

**ESTUDIO Y MODELADO MATEMÁTICO
DEL PROCESAMIENTO PRIMARIO DE LA
YERBA MATE**

**TESIS PRESENTADA PARA OPTAR AL TÍTULO DE DOCTOR
DE LA UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES EN EL AREA DE
LAS CIENCIAS QUÍMICAS**

MIGUEL E. SCHMALKO

DIRECTORA: Dra. STELLA MARIS ALZAMORA

**DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS, FACULTAD DE
CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES**

AÑO 2005

**STUDY AND MATHEMATICAL MODEL OF
YERBA MATÉ PRIMARY PROCESSING**

**THESIS PRESENTED IN ORDER TO ELECT THE TITLE OF
DOCTOR OF THE “UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES” IN
THE AREA OF CHEMICAL SCIENCES**

MIGUEL E. SCHMALKO

DIRECTOR: Dra. STELLA MARIS ALZAMORA

**DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS, FACULTAD DE CIENCIAS
EXACTAS Y NATURALES**

YEAR 2005

AGRADECIMIENTOS

- A la Directora de esta tesis por permitirme trabajar bajo su Dirección y por su ayuda en el desarrollo y redacción de la misma
- Al titular de la asignatura Operaciones Unitarias III C, Ing. Rodolfo G. Känzig por sustituirme en el dictado de clases durante mi licencia
- A la Universidad Nacional de Buenos Aires por permitirme realizar el doctorado en forma gratuita.
- A mis colaboradores en el proyecto de investigación, por sustituirme en las tareas durante mi licencia.

INDICE DE LA TESIS

	Página
RESUMEN	5
SECCIÓN I: INTRODUCCIÓN	
Capítulo 1. La yerba mate	8
1.1. Introducción	9
1.2. La planta	10
1.3. El cultivo y la cosecha	11
1.4. El procesamiento primario	14
1.5. El estacionamiento y la molienda	19
1.6. Breve reseña histórica sobre el cultivo de la yerba mate	22
1.7. Producción y consumo	24
1.8. Usos y formas de consumo	27
1.9. Tipos de producto y normativa vigente	31
Capítulo 2. Antecedentes de trabajos sobre el procesamiento de la yerba mate	36
2.1. Introducción	37
2.2. Primeros estudios	38
2.3. Estacionamiento acelerado	38
2.4. Estudio del secado y las propiedades fisicoquímicas	40
2.5. Modificaciones fisicoquímicas en el procesamiento	42
SECCIÓN II: OBJETIVOS	
Capítulo 3. Objetivos y justificación	47
SECCIÓN III: DESARROLLO	
Capítulo 4. Medición de los contenidos de humedad, cafeína, clorofilas y color en el procesamiento	52
4.1. Introducción	53
4.2. Materiales y métodos	56
4.3. Resultados y discusión	60
4.4. Conclusiones	67
Capítulo 5. Balances de masa y energía en el secadero	
5.1. Introducción	69
5.2. Materiales y métodos	69
5.3. Resultados y discusión	70
5.4. Conclusiones	89
5.5. Nomenclatura	90
Capítulo 6. Propiedades fisicoquímicas de los palos de yerba mate	
6.1. Introducción	92
6.2. Materiales y métodos	94
6.3. Resultados y discusión	99

6.4. Conclusiones	112
6.5. Nomenclatura	113
Capítulo 7. Cinética de secado de los palos de yerba mate	
7.1. Introducción	115
7.2. Materiales y métodos	115
7.3. Resultados y discusión	123
7.4. Conclusiones	128
7.5. Nomenclatura	129
Capítulo 8. Propiedades fisicoquímicas y de transporte de las hojas de yerba mate	
8.1. Introducción	131
8.2. Material	131
8.3. Isotermas de sorción	131
8.4. Densidad aparente y coeficiente de contracción	134
8.5. Coeficiente de difusión	136
8.6. Capacidad calorífica y conductividad térmica	136
8.7. Nomenclatura	138
Capítulo 9. Degradación de las clorofilas en condiciones controladas	
9.1. Introducción	140
9.2. Materiales y métodos	143
9.3. Resultados y discusión	145
9.4. Conclusiones	158
9.5. Nomenclatura	159
Capítulo 10. Modelado del zapecador	
10.1. Introducción	161
10.2. Materiales y métodos	162
10.3. Resultados y discusión	171
10.4. Conclusiones	174
10.5. Nomenclatura	175
Capítulo 11. Modelado del secadero	
11.1. Introducción	178
11.2. Materiales y métodos	179
11.3. Resultados y discusión	186
11.4. Conclusiones	192
11.5. Nomenclatura	193
 SECCIÓN IV: CONCLUSIONES GENEALES Y REFERENCIAS	
Capítulo 12. Conclusiones	196
Capítulo 13. Referencias	201

SECCIÓN V: ANEXOS

Anexo 1. Mediciones realizadas en la planta industrial de color, contenidos de clorofilas, cafeína y humedad	A-2
Anexo 2. Mediciones realizadas en la planta industrial para el balance de masa y calor	A-15
Anexo 3. Contenido de humedad de equilibrio para diferentes actividades de agua; cálculo de las constantes de GAB, Henderson y Halsey de las isothermas de sorción y equilibrio corteza-xilema	A-18
Anexo 4. Datos de cinética de secado de los palos con y sin corteza	A-24
Anexo 5. Programas para calcular las constantes del coeficiente de difusión del agua en los palos de yerba mate	A-66
Anexo 6. Mediciones realizadas de contenidos de clorofilas a y b en el laboratorio	A-82

ESTUDIO Y MODELADO MATEMÁTICO DEL PROCESAMIENTO PRIMARIO DE LA YERBA MATE

Palabras Claves: Yerba mate, procesamiento, secado, sapecado, modelado, clorofila, color, contenido de humedad, propiedades fisicoquímicas.

RESUMEN

El objetivo general de esta tesis fue estudiar las condiciones de operación y las variaciones del contenido de humedad, clorofilas, cafeína y color en el procesamiento primario de la yerba mate (sapecado o tratamiento térmico y secado) y realizar el modelado matemático de estas etapas. Fueron objetivos particulares realizar en estas etapas los balances de masa y energía, determinar las propiedades fisicoquímicas y de transporte de humedad en las hojas y los palos y estudiar la cinética de degradación de la clorofila en condiciones controladas.

El trabajo fue realizado en un establecimiento industrial en el que se midieron las condiciones de trabajo de cada equipo (flujo de gases y sólidos, temperaturas y humedad de entrada y salida del aire, consumo de combustible, tiempo de residencia, porcentaje de hojas y palos en las ramas) y las variaciones de contenido de humedad, clorofilas, cafeína y color en la yerba mate.

Para realizar el modelado matemático se determinaron ciertas propiedades fisicoquímicas y de transporte, a saber: índice de contracción, densidad, isothermas de desorción y coeficiente de difusión de la humedad. También se estudió la influencia del contenido de humedad y la temperatura sobre cada una de estas propiedades. Para poder obtener las ecuaciones que describieran las pérdidas de clorofilas durante el secado, se determinó su cinética de degradación en función de la actividad del agua y la temperatura, teniendo en cuenta los niveles de estas dos variables que se encontraban en dicha etapa.

Para el modelado matemático del sapecador y del secadero, los equipos fueron divididos en nodos. En cada uno de ellos se determinaron los balances de masa y energía para estimar las variaciones de temperatura del aire y del sólido y la pérdida de humedad en las hojas y los palos. Para la resolución de las ecuaciones diferenciales se utilizó el método de las diferencias finitas y los valores obtenidos con el modelo resultaron muy similares en valores absolutos con los valores experimentales.

STUDY AND MATHEMATICAL MODEL OF YERBA MATÉ PRIMARY PROCESSING

Key Words: Yerba maté, processing, zapecado, drying, mathematical model, chlorophylls, colour water content, physicochemical properties.

ABSTRACT

The general objective of this thesis was to study the operation conditions and variations of moisture content, chlorophylls, caffeine and colour in yerba mate during the primary processing (zapecado or heat treatment and drying) and to model these stages. The specific objectives were to make heat and mass balances in these stages, to determine physicochemical and moisture transport properties in leaves and twigs and to study chlorophyll kinetics degradation in controlled conditions.

The study was carried out in an industrial factory. Work conditions in each equipment (gas and solid flux, temperature and humidity of air, fuel consumption, residence time and percentage of leaves and twigs in branches) and solid moisture content, chlorophylls, caffeine and colour of yerba mate at each step were measured.

In order to obtain the mathematical model, some twig physical properties were determined, such as shrinkage index, apparent density, desorption isotherms and moisture diffusion coefficient. The influence of water content and temperature in these properties was also analyzed. To obtain the equations for describing chlorophylls losses during drying, degradation kinetics and its dependence on water activity and temperature was determined, considering the levels of these parameters at drying step.

For modelling xxxxxxxxxx, the equipments were divided into nodes. In each one, heat and mass balances were carried out to estimate air and solid temperature and water losses in leaves and twigs. To solve differential equations, the finite-difference method was used and a good agreement between predicted and experimental values was obtained.

SECCIÓN I

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1

LA YERBA MATE

1.1. INTRODUCCIÓN

La yerba mate (*Ilex paraguariensis* Saint Hilaire) es una planta que crece en la región central del MERCOSUR. Una vez procesada, se consumen sus hojas y ramas más jóvenes.

La producción anual en la región es de aproximadamente 500.000 Tn, de las cuales el 90 % se consume en la misma y el resto se exporta a otros países, principalmente el Medio Oriente (Ramallo et al., 1998).

Su procesamiento comprende cinco etapas: 1) Zapecado o Escaldado; 2) Secado; 3) Molienda Gruesa o Canchado; 4) Estacionamiento y 5) Molienda Fina, Tipificación y Envasado. Las tres primeras etapas se llevan a cabo en establecimientos denominados “secaderos” y la quinta etapa en establecimientos industriales denominados “molinos”. El estacionamiento se realiza indistintamente en los secaderos o en los molinos. En general, los molinos procesan yerba mate proveniente de diferentes secaderos, ya sean propios o de otras empresas. En Brasil, el procesamiento de la yerba mate no incluye la etapa de estacionamiento.

El consumo, por lo general, se lleva a cabo en la forma denominada “mate”. En esta forma de consumo se coloca una porción de 30 a 50 g de yerba mate en un recipiente y sobre el mismo se vierten porciones de aproximadamente 20 ml de agua, succionándose por medio de una bombilla. En general se emplean entre 0,5 y 1 lt por cada porción de yerba mate.

En el denominado “mate caliente”, el agua vertida tiene una temperatura entre 70 y 85 °C. En algunas zonas cálidas de la región y principalmente en los meses cálidos, se consume con agua fría (5-10 °C), denominándose a esta forma de consumo mate frío o “tereré” (Ramallo et al., 1998). La modalidad del consumo del mate varía en los diferentes países del MERCOSUR. Las preferencias argentinas son hacia la yerba mate con molienda gruesa y mucho tiempo de estacionamiento; mientras que en el Brasil se prefiere la yerba mate de molienda fina y sin estacionamiento; en Uruguay se prefiere la yerba mate con un grado de molienda mayor que el argentino y estacionada, y en Paraguay las preferencias de consumo son similares a las de Argentina.

Una segunda modalidad de consumo es en forma de infusión, en la que la yerba mate (a granel o en saquitos) se consume en forma similar al té con agua a

temperaturas cercanas a la ebullición. Es frecuente encontrar esta modalidad de consumo en el desayuno o a media tarde.

En los últimos años, aparecen otras dos formas de consumo: como bebida carbonatada o como “soluble en forma sólida” con la que se preparan bebidas calientes. Estos dos productos no están aún muy expandidos. Además existen otros usos de la yerba mate que serán mencionados en el punto correspondiente.

1.2. LA PLANTA

1.2.1. Descripción

La yerba mate o *Ilex paraguariensis* Saint Hilaire (familia de las Aquifoliáceas), de acuerdo a la Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería (Dimitri, 1988), es un árbol de hojas persistentes, abovadas u oblongas, crenado-dentadas, inermes, de 5-7 cm de largo, cortamente pecioladas. Las flores son pequeñas, tetrámeras, dioicas, blanquecinas, dispuestas en cimas auxiliares muy cortas. El fruto es carnoso, globoso, de 5-7 cm de diámetro y color parduzco. Florece en primavera y fructifica en verano y otoño. Se desarrolla en la región de Sudamérica tropical y Misiones.

1.2.2. Producción de plantines

La obtención de los plantines para el cultivo en el campo se lleva a cabo en almácigos y viveros (Prat Krikum, 1994a).

Los frutos se cosechan de plantas seleccionadas cuando se encuentran maduros. Se obtiene la semilla por rotura de los mismos y posterior separación de los hollejos por medio de una corriente de agua. El rendimiento de semillas es de 130 g por kg de fruta, con una producción por planta de 4 a 12 kg de frutos.

Los almácigos se construyen en sitios altos y ventilados, y elevados del suelo. El suelo se obtiene mezclando diferentes tipos de tierra y arena y posteriormente realizando una desinfección, generalmente con agua caliente.

La germinación tiene lugar entre los 100 y 360 días y generalmente alcanza el 23 % de las semillas, obteniéndose aproximadamente entre 30.000 y 40.000 plantas por kg de semilla. El trasplante se realiza 120 días después, cuando la planta tiene 4 a 6 hojas con una altura de 2 a 4 cm. Este procedimiento se efectúa todo el año con picos entre octubre y diciembre. La sobre vivencia del material repicado alcanza entre el 65 y 85%.

Se tienen viveros en suelo directo y en maceta. Los viveros en suelo directo son similares a los almácigos, pero se utilizan diferentes mezclas de tierra y distancias mayores (10 cm) entre plantas. En los viveros en macetas, las plantas son colocadas en macetas de polietileno de 15 cm de alto y 8 a 10 cm de diámetro. El empleo de los mismos permite un mejor aprovechamiento del riego y una rápida clasificación por tamaño. El tamaño óptimo para el transplante ocurre cuando la planta alcanza entre 15-25 cm de altura.

Con el objeto de mejorar la especie, en la Estación Experimental del INTA-Cerro Azul (Misiones) se ha llevado a cabo una selección de plantas de campo o vivero y su posterior propagación vegetativa. Esta técnica tiene numerosas ventajas respecto al cultivo con semillas (Prat Krikum, 1994b).

1.3. EL CULTIVO Y LA COSECHA

1.3.1. El cultivo

Los suelos aptos para la implantación son los suelos rojos, conocidos como “tierra colorada”. En función de las pendientes, niveles de fertilidad, acidez y contenido de aluminio, se puede establecer un rango para la aptitud que va desde los Alfisoles con buena fertilidad y pendientes menores al 5 %, hasta los Oxisoles con baja fertilidad y mayores tenores de aluminio. Los suelos denominados toscos son moderadamente aptos para el cultivo (Prat Krikum, 1994c).

El cultivo de los plantines se realiza entre los meses de abril a septiembre si es en macetas o entre junio y julio si los plantines se cultivan a raíz libre. Si se lleva a cabo

bajo sombra, se puede realizar durante todo el año. Posteriormente los plantines cultivados se protegen del sol de primavera-verano con protectores de paja y restos del aserrado y debobinado de pino o eucaliptus.

Las distancias entre líneas varían entre 2,25 y 3,5 m y entre plantas entre 1,0 y 2,0 m, con densidades que varían entre 1.900 y 4.400 plantas por hectárea. Las diferentes densidades producen diferentes rendimientos en la producción de los yerbales, los que pueden variar entre 6.000 y 12.000 kg de yerba mate/ha y año (Prat Krikum, 1994c; Prat Krikum y Berlingheri, 1995). De acuerdo a la cantidad de plantas cultivadas por hectárea, los cultivos se clasifican en cultivos de alta, media y baja densidad.

Entre los cuidados posteriores al cultivo se deben mencionar el control de malezas en los primeros años, el de plagas y podas de formación. La última se realiza con el objeto de eliminar partes de la planta para orientar su crecimiento de tal modo de obtener tallos múltiples para equilibrar la copa y favorecer la producción foliar y proporcionar altura a los troncos y estructura adecuada de ramas para favorecer la aireación e iluminación interna de la copa (Mayol, 1997).

1.3.2. La cosecha

La entrada en producción del yerbal ocurre entre el 4° y 6° año de la implantación, alcanzando su máximo rendimiento entre el 8° y 10° año. El período productivo abarca entre 25 y 30 años, llegando en algunos casos a 60 años, dependiendo del cuidado del suelo.

La cosecha en la actualidad puede extenderse durante 10 meses (desde enero hasta octubre). El período más adecuado comprende el período abril-agosto (Prat Krikum, 1994d). En general se evita cosechar cuando la planta está floreciendo, brotando o fructificando.

Existen tres tipos de poda de producción o cosecha:

- a) **Viruteo**: Consiste en retirar a mano las ramas finas denominadas comúnmente “virutas”, teniendo mucho cuidado de dejar en la planta los brotes que permitan su expansión lateral y de evitar el desprendimiento de la corteza y prevenir, de esta

forma, la entrada de patógenos. Esta práctica se realiza entre los meses de abril a junio.

- b) **Poda de banderas:** Este tipo de poda se refiere al de las ramas dominantes, ubicadas en su mayoría en la parte superior. Se cortan las ramas en estado avanzado de madurez, considerándose al diámetro de éstas como variable de control (un mínimo de 2 cm). Estas ramas son cortadas cada 18 meses y en la poda se utilizan tijeras de podar, realizándose normalmente esta práctica entre julio y agosto.
- c) **Corte parejo:** Consiste en combinar los dos métodos anteriores en una sola operación, las ramas finas son retiradas a mano (viruteo) y las ramas gruesas son cortadas con tijera o serrucho. El corte promedio es de aproximadamente del 62 %, manteniéndose en la planta el 38 % de la masa foliar. Esta práctica se lleva a cabo entre los meses de enero y febrero.
- d) **Cosecha tipo mesa:** Esta cosecha se basa en el corte de las plantas a una determinada altura, partiéndose de 0,40 m en la primera cosecha, en la cual se forma una mesa de corte, simulando la cosecha mecanizada. Se puede elevar el corte 5 a 10 cm por año sin afectar la producción. Esta elevación podría realizarse hasta 1,2 a 1,3 m y luego volver a podarse hasta una altura de 0,50 m (Prat Krikum y Berlingheri, 1995; Mayol, 1997).

En general se sugiere aplicar uno de los diferentes métodos anteriores cada año, rotándolos entre los diferentes lotes de la plantación.

El material cosechado se recoge sobre paños de arpillera natural o sintética (denominada ponchada), los que son atados en sus cuatro extremos (raído). Los mismos son pesados en el lugar y luego cargados en camiones o tractores (ya sea en bolsas o a granel). El transporte hasta las playas de recepción de los secaderos se realiza en camiones, y las ramas son normalmente procesadas en un término menor a las 12 horas de cosechadas, principalmente en el verano.

1.4. EL PROCESAMIENTO PRIMARIO

El procesamiento primario de la yerba mate comprende 3 etapas: el zapecado, el secado y el canchado o molienda gruesa. En la figura 1.1 se puede observar un esquema del procesamiento primario.

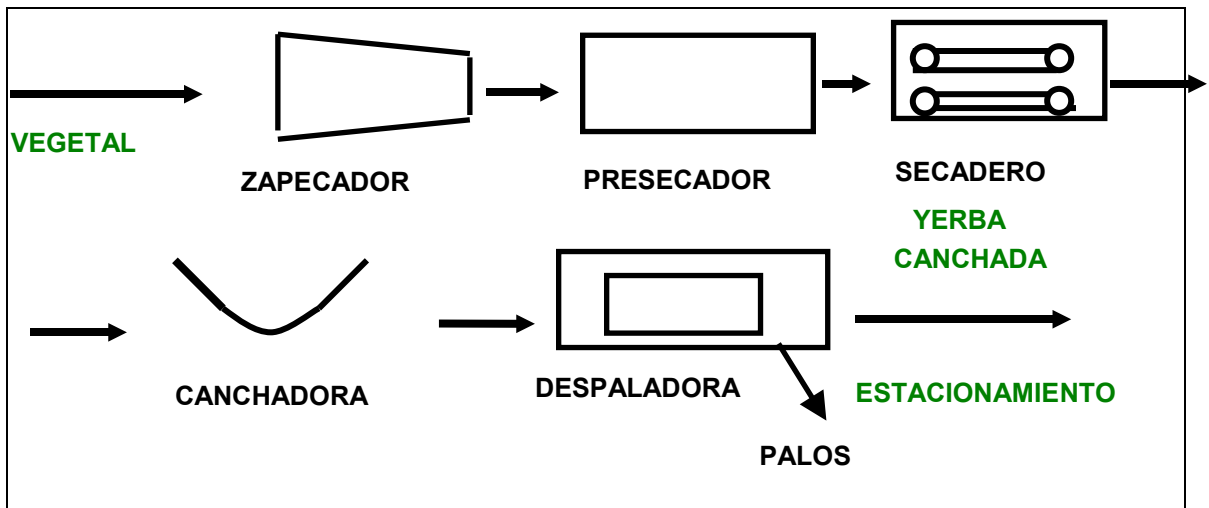


Figura 1.1. Esquema del procesamiento primario de la yerba mate (De Bernardis y Prat Krikum, 2001)

1.4.1. Recepción de la materia prima

Las ramas cosechadas de yerba mate son transportadas en camiones, los que son descargados en la playa de recepción de materia prima. En la misma permanece cierto tiempo antes de ser procesadas, pudiendo variar entre 1 y 12 horas, tiempo que se trata de minimizar para que no se produzcan fermentaciones, principalmente en los meses cálidos. En algunos casos se realiza la aireación del material por volteo, ya sea en forma manual o mecánica.

En general estas playas de recepción son cubiertas, para evitar la radiación de la luz solar directa y la lluvia. En esta playa se realiza un control visual de la materia prima, poniéndose especial atención al diámetro de las ramas (que no sean demasiado grandes), la presencia de tierra y el grado de pardeamiento que presentan las ramas,

que es indicativo del tiempo de cosecha transcurrido y del cuidado en el transporte. En algunos casos extremos, la misma es rechazada.

La materia prima es transportada hasta la cinta de alimentación del zapecador utilizándose retroexcavadoras y/o cintas transportadoras.

1.4.2. El zapecado

El zapecador es un equipo en donde las ramas de yerba mate se ponen en contacto con la llama y los gases de combustión provenientes del quemado de leña (y en algunos casos gas propano).

El objetivo de esta etapa es producir la inactivación de las enzimas para evitar el pardeamiento en la etapa de secado. En algunos establecimientos (donde no existe la etapa de presecado) esta etapa también tiene como objetivo reducir el contenido de humedad en las hojas, de tal forma que cuando las mismas se dispongan en el lecho de secado, éste tenga una porosidad alta para facilitar el flujo del gas de secado.

Pero, además, se producen una serie de modificaciones en el material que afectan su estructura física y composición química y que influyen en gran medida en las etapas del procesamiento y en la calidad del producto final.

El equipo consiste en un cilindro que gira por medio de un engranaje a bajas revoluciones (unas 10 rpm). Las ramas se introducen en el extremo del cilindro en que se produce el quemado de la leña (o gas propano), recibiendo de la misma calor por radiación de la llama y convección. Luego, el aire y las ramas se desplazan hacia el extremo opuesto en corrientes paralelas. El desplazamiento del sólido es producido por a) una serie de aletas dispuestas en forma discontinua y con una ligera inclinación para favorecer el desplazamiento y b) por el arrastre de los gases de combustión (figura 1.2).

El flujo de los gases de combustión es producido por una chimenea ubicada en el extremo de salida y es regulado por un deflector ubicado en su interior.

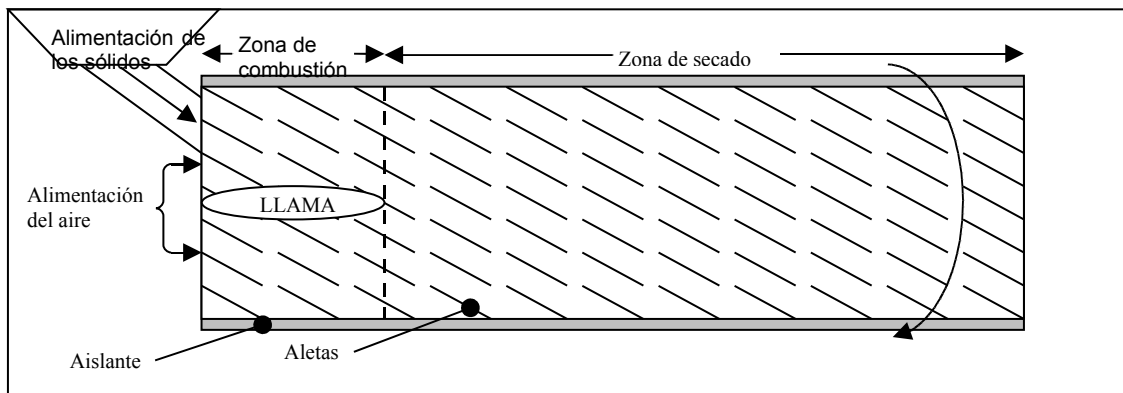


Figura 1.2. Diagrama de un zapecador

Núñez y Känzig (1995) realizaron un relevamiento de las condiciones de operación de zapecadores en 6 establecimientos, encontrando las siguientes dimensiones y condiciones de trabajo:

Longitud: 6,5 – 7,5 m

Diámetro: 1,6 – 2,5 m

Tiempo de residencia: 2-4 min.

Contenido de humedad de salida: 29-34 % (base húmeda)

Capacidad de procesamiento: 1.500-3.000 kg de hoja verde/h.

Cabe mencionar que el contenido de humedad de las ramas a la entrada es de aproximadamente un 60 % (base húmeda). La temperatura de salida es del orden de 120-250 °C. Se debe destacar la gran uniformidad de diseño y operación de los zapecadores que existen en los diferentes establecimientos industriales.

El control que se realiza en los zapecadores es bastante deficiente y se basa en la experiencia de los operarios, ya sea en la alimentación de la leña o el material, la que en la mayoría de los establecimientos es cargada con horquillas sobre una cinta transportadora que a su vez alimenta el zapecador. En algunos establecimientos, se mide la temperatura de salida de los gases y ésta y la velocidad de los gases son reguladas con la apertura o cierre de un deflector localizado en la chimenea. Un operario con experiencia controla, en forma manual, que las ramas a la salida tengan el tratamiento adecuado, es decir, que las hojas no estén quemadas (excesivo tratamiento)

ni tengan una excesiva humedad que produciría inconvenientes en la etapa de secado (en la industria se denomina a ésta “yerba cruda” y es consecuencia de un tratamiento térmico defectuoso).

1.4.3. El secado

Esta etapa tiene por objetivo reducir el contenido de humedad de la yerba mate desde el 29-34 % (base húmeda) hasta un 2-7 % (base húmeda).

Se utilizan tres tipos de secado (Prat Krikum, 1995e):

***Secado de tiempos largos** (entre 6 y 24 h): Se lleva a cabo en secaderos discontinuos con flujo a través del lecho, denominados “secaderos de catre”.

***Secado de tiempos medios** (entre 3 y 6 h): Se lleva a cabo en secaderos de flujo cruzado continuos, poniéndose el material sobre una malla, y se denominan “Secaderos de cinta”.

***Secado de tiempos cortos** (menores a 1 h): Se lleva a cabo en secaderos rotatorios o tubulares.

Además, cabe mencionar que muchos establecimientos industriales incorporan una primera etapa de secado (de tiempo corto) denominada “presecado”. También existen otros desarrollos de secaderos de yerba mate (p.ej. los neumáticos); pero debido a su escasa utilización no serán descriptos.

Los secaderos de “catre” son secaderos discontinuos, que tienen paredes de mampostería y una malla metálica sobre la cual se colocan las ramas en un lecho de 0,8 a 1,2 m de altura. El gas para el secado (generalmente gas de combustión de leña y aire) se introduce por tubos, ubicados en la parte inferior y homogéneamente distribuidos, teniéndose una altura de 2-3 m entre los conductos de alimentación de los gases y la cinta con el material. El tiempo de secado puede variar entre 6-24 hs.

Los secaderos de “cinta” son secaderos continuos construidos de mampostería que pueden alcanzar longitudes de hasta 30 m y 5 m de ancho. Pueden existir secaderos de hasta 3 cintas superpuestas, o en otros casos consecutivas. El gas de secado (generalmente gas de combustión de leña y aire) se introduce en la parte inferior por

conductos uniformemente distribuidos, pasa a través del lecho de ramas y sale por chimeneas ubicadas en el techo. El tiro puede ser natural o inducido, utilizándose en este caso ventiladores ubicados a la salida. El lecho de hojas tiene alturas que varían de 0,7 a 1 m y el tiempo de residencia total de las ramas varía entre 3 y 6 h.

Los secaderos **rotatorios o “tubulares”** son cilindros que giran, alimentándose las ramas y los gases de combustión en un extremo (corrientes paralelas) y son muy similares a los zapecadores. Se caracterizan por trabajar a altas temperaturas y cortos tiempos de residencia (en el orden de los 10 min.).

Las condiciones de trabajo en los establecimientos industriales difieren mucho entre sí, ya sea en el tipo de secadero utilizado, la temperatura del aire y/o el tiempo de residencia. Sin embargo el contenido de humedad del producto a la salida es bastante uniforme, encontrándose valores entre el 2 y el 4 % (base húmeda), de acuerdo a lo determinado por Núñez y Känzig (1995). Estos autores llevaron a cabo un relevamiento de las condiciones de trabajo en 6 establecimientos industriales, en donde se pone de manifiesto las diferentes condiciones de trabajo entre ellos. A continuación se mencionan las condiciones de trabajo observadas en los secaderos de cada uno de los establecimientos:

*Empresa N° 1: Dispone de un presecador y un secadero, ambos rotatorios. Capacidad de procesamientos: 1.700 kg de hoja verde/h. Temperaturas en el centro de los secaderos: 330 y 210 °C. Tiempos de residencia: 9 y 11 minutos. Contenido final de humedad: 4% (base húmeda).

*Empresa N° 2: Dispone de un presecador rotatorio y un secadero de 3 cintas superpuestas. Capacidad de procesamientos: 3.000 kg de hoja verde/h. Temperatura del aire de entrada: 120 °C en el secadero de cinta. Tiempo de residencia en el secadero: 1 h 30 minutos. Contenido final de humedad: 3 % (base húmeda).

*Empresa N° 3: Dispone de 3 secaderos de cinta consecutivos. Temperatura del aire de entrada a las cintas: 130, 100 y 98 °C. Tiempo de residencia en el secadero: 2 h. Contenido final de humedad: 2 % (base húmeda).

*Empresa N° 4: Dispone de un presecador rotatorio y dos secadero de cintas consecutivos. Capacidad de procesamiento: 3.000 kg de hoja verde/h. Temperatura en

el centro del presecador: 120 °C. Temperatura del aire de entrada a las cintas: 110 y 120 °C, respectivamente. Contenido final de humedad: 3,5 % (base húmeda).

*Empresa N° 5: Dispone de un presecador rotatorio y dos secaderos de cintas consecutivos. Capacidad de procesamientos: 1.500 kg de hoja verde/h. Temperatura del aire de entrada: 110 y 120 °C en el secadero de cinta. Tiempo de residencia: 8 minutos (en el presecador) y 1 h 20 minutos (en los secaderos). Contenido final de humedad: 2 % (base húmeda).

*Empresa N° 6: Dispone de un presecador y un secadero, ambos de cinta. Capacidad de procesamientos: 2.600 kg de hoja verde/h. Temperatura del aire de entrada: 90 y 110 °C, respectivamente. Tiempo de residencia: 30 minutos y 1 h, respectivamente. Contenido final de humedad: 2,5 % (base húmeda).

1.4.4. El canchado

El canchado es la molienda gruesa de las ramas de yerba mate que salen del secadero. Se realiza con un molino de martillo que posee una criba de salida. El objetivo de esta etapa es preparar al material para la etapa de estacionamiento, reduciendo su volumen y aumentando la superficie de contacto entre el material y el aire.

También en esta etapa se realiza un tamizado (en tamices rotatorios) para eliminar los palos de gran tamaño (5-20 % del material de entrada). La yerba mate canchada es posteriormente colocada en bolsas de 50 Kg y guardada en depósitos para su estacionamiento.

1.5. EL ESTACIONAMIENTO Y LA MOLIENDA

1.5.1. El estacionamiento

El estacionamiento es una operación en la que se mantiene la yerba mate durante cierto tiempo para que adquiera las características de sabor y color requeridas por los consumidores (IRAM 20515). Puede ser natural o acelerado (De Bernardi y Prat Krikum, 2001).

El “**estacionamiento natural**” se lleva a cabo en depósitos, durante varios meses, en los cuales no se realiza casi ningún tipo de control de las condiciones ambientales. En este período la yerba mate adquiere las condiciones de color y sabor deseadas por los consumidores. Los depósitos en general son de mampostería, techos de chapa y piso de madera o mampostería y las bolsas de yerba mate canchada son apiladas hasta alturas que pueden llegar a los 10 m. En general, las puertas y ventanas se mantienen cerradas para evitar el ingreso de plagas y polvo, abriéndose las mismas en forma esporádica para realizar una aireación (generalmente en los días cálidos, secos y soleados). El tiempo de estacionamiento varía de 6 a 24 meses dependiendo del establecimiento industrial.

El “**estacionamiento acelerado**” se lleva a cabo en cámaras acondicionadas durante un período de hasta 60 días. En estas cámaras se controla la temperatura (50-60 °C) y la humedad relativa (hasta el 60 %). Es necesario tener en las cámaras una buena circulación de aire para que el oxígeno, el vapor de agua y el calor lleguen al material, por lo que las bolsas deben ser ordenadas para permitir que esto se realice en forma adecuada. La circulación del aire se realiza en forma forzada con ventiladores. En algunos establecimientos se le añaden, además, otros compuestos en algunas ocasiones (p.ej. anhídrido carbónico, etileno, etc). Las construcciones son de mampostería o chapa, los pisos de mampostería o madera y el techo es de chapa y generalmente están aislados para evitar la condensación de humedad y posterior goteo del agua condensada sobre las bolsas. Para el calentamiento del aire (con intercambiadores) y la adición de vapor se utilizan calderas del tipo humotubular.

Si bien algunas empresas actualmente utilizan un sistema mixto de estacionamiento, el acelerado, que fuera desarrollado en la década del 80 por investigadores de la Universidad Nacional de Misiones, sigue siendo de gran utilidad en la regulación de la disponibilidad de yerba mate elaborada en el mercado. También actualmente estas cámaras son utilizadas por numerosas empresas con el objeto de homogeneizar el material proveniente de diferentes secaderos.

El grado de estacionamiento del producto es controlado mediante análisis sensorial por catadores expertos que tienen los establecimientos y son los que deciden cuando el producto está en condiciones de ser consumido.

1.5.2. La molienda

Se le denomina molienda a una serie de operaciones que comprende la clasificación, trituración y mezclado mediante las cuales los establecimientos adecuan el gusto de la yerba mate a los consumidores de diferentes regiones del país o países importadores (Kotik, 1994).

La materia prima procedente de diferentes lugares presenta diferentes gustos, tipos de estacionamiento, sistemas de secado, contenidos de humedad, granulometrías y tonalidades variadas. Estas variables son consideradas para obtener la mezcla adecuada de acuerdo al gusto del consumidor.

En los establecimientos pequeños se realiza la denominada “molienda integral”, debido a su bajo costo de inversión. En la misma no existen las operaciones de separación y clasificación de hojas y palos y estos dos componentes son triturados en forma conjunta, teniendo el molino una criba inferior con perforaciones del tamaño requerido por el industrial (Kotik, 1994).

En los establecimientos más grandes se efectúan en general las operaciones de limpieza, separación de hojas y palos, molienda, separación por tamaño, mezcla de las diferentes porciones y envasado.

La limpieza se realiza en una primera etapa en una zaranda cilíndrica rotatoria con chapas perforadas para eliminar elementos extraños como por ejemplo papeles, hilos,

insectos, alambres y palos de yerba mate de tamaño grande. Luego se eliminan los metales con electroimanes.

La separación de hojas y palos se realiza con zarandas rotatorias cilíndricas. Cada una de las fracciones (hojas y palos) es molida en forma separada en molinos de martillos y con diferentes tamices de salida.

Las diferentes fracciones de hojas y palos son almacenadas en diferentes silos. Estos son generalmente cilíndricos con cuerpo inferior cónico y con un dosificador de descarga en la parte inferior. Las mezclas se logran en un mezclador utilizando diferentes fracciones de polvo, hojas pequeñas, hojas de mayor tamaño y palitos.

El fraccionamiento y empaquetado se realizan en máquinas volumétricas que prensan el producto dentro de paquetes. Estas máquinas también controlan el peso del material. También existen máquinas que envasan el material sin prensar. Sobre el producto envasado se realizan en los establecimientos los controles requeridos por el Código Alimentario Argentino (Kotik, 1994).

Los paquetes de yerba mate (generalmente de ½ y 1 kg) son envasados en cajas, paquetes de polietileno o fardos con diferentes unidades para ser enviadas a los centros de comercialización (De Bernardis y Prat Krikum, 2001).

1.6. BREVE RESEÑA HISTÓRICA SOBRE EL CULTIVO DE LA YERBA MATE

El origen del nombre de la yerba mate, alimento de los indios guaraníes, proviene del término “caá” que significa en guaraní “planta o hierba”, en tanto que “mate” se supone que deriva de la palabra quichua “mati”, que era la calabaza que usaban para tomar mate. Para su consumo, los indios guaraníes utilizaban bombillas que eran hechas de cañas.

El descubrimiento de la yerba mate por parte de los españoles fue realizado por Ruiz Díaz de Guzmán, en 1592. Este había encontrado polvo de yerba mate en los sacos de algunos indios que había tomado prisioneros. La costumbre de tomar mate se expandió rápidamente entre los mestizos que habitaban el Virreinato del Río de la Plata.

A comienzos del siglo XVII, a fin de evitar las grandes distancias que separaban los lugares de consumo de los de producción, introdujeron el cultivo en algunas reducciones jesuíticas distribuidas en Corrientes, Misiones y Paraguay. Con su expulsión, en 1769, se abandonaron los yerbales por ellos cultivados y con esto se pierde también la tradición de su cultivo. La superficie cultivada en ese momento era de 504 hectáreas.

Posteriormente en el año 1901, luego de muchos fracasos, se vuelve a cultivar la yerba mate en Colonia “Nueva Germania” del Paraguay. Muy poco después, en el año 1903, se realizó la primera plantación de importancia en nuestro país en San Ignacio, Misiones.

En la década del 20 comenzaron a impulsarse en forma masiva el cultivo de yerbales en el país. Los molinos existentes en ese momento molían yerba mate canchada proveniente de Brasil y Paraguay. Al comenzar a producir estos yerbales, principalmente en manos de inmigrantes recién llegados, se tuvo inconvenientes en la comercialización debido al cambio de gusto que representaba y a que los molinos instalados en la Argentina preferían utilizar yerba mate de sus cultivos en el Paraguay.

Como consecuencia de esta crisis decide intervenir el estado Argentino, creando en el año 1935 por ley 12.236 la Comisión Reguladora de la Producción y el Comercio de la Yerba Mate (CRYM) y el Mercado Consignatario. Este organismo prohíbe la implantación de la yerba mate en la Argentina y en el año 1937, autoriza cosechar únicamente el 40% de la producción. De esta manera se crea un conflicto, ya que la importación del Paraguay y Brasil era libre (Navajas Artaza, 1995). No obstante a pesar de que en los años siguientes se mantuvo esta política con ciertas flexibilizaciones, como contrapartida estos organismos garantizaban un precio para la yerba mate, manteniéndose además la estructura minifundista existente.

Luego, a mediados de la década del 40, se reemplaza a la CRYM por otro organismo, que reemplazó la regulación de la actividad por una política de precios. Como había controlado el cultivo imponiendo un alto impuesto a las nuevas plantaciones, se generó una crisis de escasez a mediados de los años 50. En los años 1953 y 1954 se establecen decretos eliminando los impuestos para la plantación, pero poniendo límites en la densidad de la plantación.

En 1956 se vuelve a crear la CRYM debido a la sobreproducción por la entrada a la producción de los nuevos yerbales implantados. Esto impulsó nuevamente nuevos cupos y limitaciones de cosecha que se extendieron hasta los primeros años de la década del 60, llegándose en el año 1966 a prohibirse totalmente la cosecha.

A partir del año siguiente se fijan cupos crecientes hasta liberar la producción completamente en el año 1977. En el año 1973 se había autorizado la renovación parcial de los yerbales y para realizar su control se crea un Comité de Investigaciones (Coninmate) en el que participó el INTA. En 1984 se autoriza el cultivo de 20.000 hectáreas y en el año 1987 se incorporan otras 7.000 hectáreas. Debido a la escasez de yerba mate (en coincidencia con la fijación de precios máximos del plan Austral) se introducen las mejoras tecnológicas desarrolladas por el Coninmate-INTA, con el consiguiente aumento de la producción.

En el año 1991 (Decreto 2284/91) se elimina la CRYM y con ello la regulación de la actividad yerbatera. Esto lleva a un incremento de la producción que, en el período de los años 1992/99 fue del orden del 50%. Como consecuencia, salen de producción yerbales con bajos rendimientos, principalmente de pequeños y medianos productores (De Bernardi y Prat Krikum, 2001). De esta manera se llega al año 2001, donde la sobreoferta estimada es de un 30% con la consecuente reducción del precio que se le paga al productor. En el año 2002, y como consecuencia de la presión ejercida por los productores yerbateros, se crea por ley 25.564 el Instituto Nacional de la Yerba Mate (INYM), que tiene como objetivos principales la regulación del precio de la yerba mate, la promoción de su consumo y la búsqueda de nuevas alternativas en su uso. Participan en este Instituto representantes de los agricultores, industrializadores primarios y molineros, consumidores y el Gobierno Provincial y Nacional.

1.7. PRODUCCIÓN Y CONSUMO

1.7.1. Producción y consumo internacional

Las características y condiciones agroecológicas para el cultivo y desarrollo de la *Ilex paraguariensis* sólo se dan en tres países en el mundo: Argentina, Brasil y Paraguay. De estos tres países, la Argentina es el mayor productor con un 62 %, seguido de Brasil con el 34 % y Paraguay con el 4 %. El cultivo se concentra en las Provincias de Misiones (85 %) y Corrientes (15 %) en la Argentina; los Estados de Brasil que rodean a la Provincia de Misiones (Río Grande do Sul, Paraná y Santa Catarina) y los Departamentos de Itapúa y Alto Paraná del Paraguay (también limítrofes con Misiones). La producción promedio anual de los tres países es de unas 500.000 Tn/año.

Además de ser los principales productores y elaboradores de la materia prima, Argentina, Brasil y Paraguay son los mayores consumidores mundiales. Otros consumidores importantes son Uruguay, Chile y Bolivia. En Medio Oriente, Siria es el principal consumidor e importador, seguido de Líbano, Emiratos Árabes e Israel. En Estados Unidos y Europa (España, Italia y Francia) consumen principalmente los inmigrantes latinos.

Argentina es el país líder en exportaciones, seguido de Brasil, con un promedio anual en el trienio 96/98 de 41,9 miles de toneladas. Las ventas externas de la Argentina representan el 12 % de su producción, comercializándose principalmente como yerba mate canchada y en paquetes. El valor medio anual de los envíos es de 23,4 millones de dólares. Respecto a la evolución de las exportaciones, en el periodo 1994/99 éstas aumentaron un 50 %, pero no así el ingreso de divisas que se mantuvo prácticamente constante. Los principales destinos de las exportaciones argentinas son: Siria (48 %), Brasil (13 %) y Uruguay (10 %).

En cuanto a las perspectivas que presenta el producto, el mismo puede ser ofrecido a los mercados externos como infusiones saborizadas, compuestas con otras hierbas y en saquitos. Esta sería una buena alternativa, ya que actualmente se exporta a Israel, China, Rusia, Estados Unidos y Taiwán y puede cubrir el nicho de mercado de infusiones

alternativas (actualmente representa el 3 % del total de ventas) (De Bernardi y Prat Krikum, 2001).

1.7.2. Producción y consumo nacional

Las provincias de Misiones y Corrientes, por las características geográficas que poseen, colocan a la Argentina como el principal productor mundial de yerba mate. Influyen en esto las características de su suelo rojo, el clima subtropical isohídrico y la coincidencia con el área natural de dispersión de la especie. Además cabe mencionar que el área de cultivo en la Provincia de Corrientes es limítrofe con la de Misiones. La evolución del cultivo en las dos Provincias se muestra en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Evolución de la superficie cultivada de yerba mate en la Argentina (De Bernardi y Prat Krikum, 2001)

Año	Corrientes (Ha)	Misiones (Ha)	Total (Ha)
1989	20.005	149.364	169.369
1993	21.499	161.088	182.587
1999	22.994	171.684	194.678

La otra característica del cultivo en la Argentina es que la superficie cultivada se da principalmente en pequeñas parcelas, como muestra la tabla 1.2. Se puede observar que el 89 % del cultivo corresponde a superficies menores a 25 hectáreas.

Tabla 1.2. Distribución de la superficie cultivada de yerba mate en la Argentina por propietarios (De Bernardi y Prat Krikum, 2001)

Superficie	Productores	%
1 Ha á 25 Ha.	19.234	89 %
26 Ha á 99 Ha.	2.201	10 %
Más de 100 Ha.	188	1 %

La producción en los últimos años se puede observar en la figura 1.2.

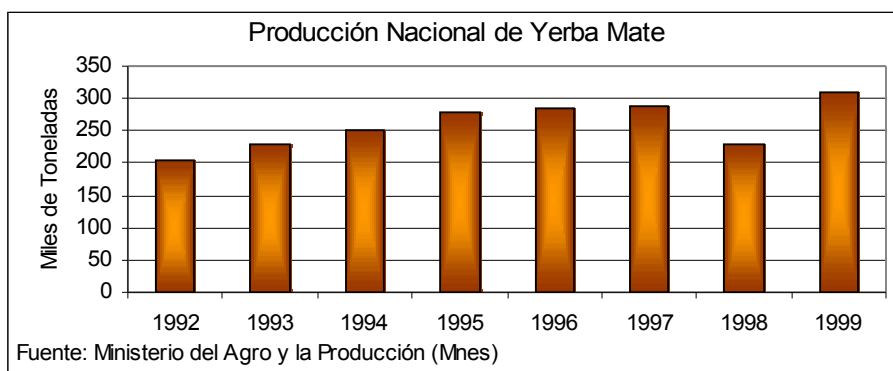


Figura 1.2. Evolución de la producción de yerba mate en la Argentina (De Bernardi y Prat Krikum, 2001).

En cuanto a la evolución de los precios, la desregulación de la actividad productiva del año 1991 tuvo un fuerte impacto en el mismo. El principal objetivo de esta desregulación era disminuir los costos de producción y comercialización a través de la supresión de las normas que regulaban la actividad del sector. Hubo cierta estabilidad de precios hasta el año 1995, gracias a que el incremento de la producción fue absorbido por el aumento simultáneo de la demanda. A partir de los años 1995/96, el crecimiento de la producción superó las necesidades del mercado, generándose una caída abrupta de los precios (de \$0,6 a \$0,4 /kg de yerba mate canchada) que persiste en la actualidad (De Bernardi y Prat Krikum, 2001).

La región yerbatera se ha caracterizado por haber sido acompañado el proceso evolutivo del cultivo con un amplio parque industrial. En total en la región existen unos 300 secaderos, de los cuales, en la actualidad, un porcentaje muy bajo está en óptimas condiciones técnicas y edilicias para operar.

Los establecimientos industriales (molinos) inscriptos en el país alcanzan a 200; pero en actividad se encuentran unos 60 y de éstos, 4 de ellos participan con el 50 % de la producción y 10, con el 80 %. Del total de molinos en actividad, sólo el 12 % se destaca por su avanzado desarrollo tecnológico y capacidad operativa.

Si bien la mayor parte de estos molinos se encuentran en la zona productora, se tiene que destacar que están radicados en Buenos Aires dos muy importantes, Molinos

Río de la Plata y Empresa Mate Larangheira. La mayor industria molinera es el Establecimiento Las Marías, ubicada en Virasoro, Corrientes (De Bernardi y Prat Krikum, 2001).

1.8. USOS Y FORMAS DE CONSUMO

La forma de consumo de la yerba mate más ampliamente difundida es como infusión. Si bien en este punto se citan otras formas de consumo, éstas en su totalidad no alcanzan al 1 % del total.

1.8.1. Infusión

Como infusión, la yerba mate se consume en forma de mate caliente (o simplemente mate), mate frío (o tereré) y en tazas en forma similar al té (mate cocido o en saquitos).

Cuando se consume en forma de **mate**, la yerba es colocada en un recipiente sobre el cual se vierten porciones de agua que son succionadas con una bombilla.

Los recipientes utilizados varían mucho según la región. El recipiente tradicional es una calabaza; pero también se utilizan vasos de vidrio, tazas de cerámica, metal, etc. De acuerdo al volumen del recipiente, la porción de consumo puede variar entre 20 y 100 g aproximadamente. Las bombillas utilizadas son de metal (acero inoxidable, alpaca, acero bañado en bronce, etc.) y pueden tener diferentes formas, desde las lisas y rectas hasta las curvadas y con muchos adornos.

La temperatura del agua utilizada en el mate depende del gusto del consumidor, la forma de consumo y del recipiente y las bombillas utilizadas. En general, la temperatura utilizada es más alta cuanto mayor es el tamaño del recipiente y cuanto mayor capacidad de disipar el calor tenga la bombilla. El rango de variación de la temperatura del agua para el mate es de 65-90°C. El agua caliente es generalmente mantenida en termos durante el consumo del mate.

Con la norma IRAM 20540-1 (1997), denominada “Yerba Mate: Materiales y Procedimientos a Utilizar en la Determinación de los Caracteres Organolépticos de la Yerba Mate, Bajo la Forma de Mate”, se normalizó la degustación de la yerba mate a ser utilizada en las transacciones comerciales. Esta norma sugiere la utilización de un recipiente de vidrio con 50 g de yerba mate con una bombilla lisa de acero inoxidable y agua a 70 °C. En la elaboración de esta norma participaron catadores expertos de la industria y de organismos públicos.

La yerba mate utilizada en el mate caliente es la denominada “elaborada” y en menor medida la denominada “yerba mate compuesta” con otras hierbas (10 % del mercado). Es muy común adicionar saborizantes durante el consumo del mate dependiendo de la región. Entre los saborizantes más utilizados se pueden citar boldo, menta, cedrón, azúcar, cáscara de naranja, café, etc. Algunas hierbas adicionadas son aquellas que normalmente se incorporan a la “yerba mate compuesta”.

El **mate frío o tereré** se consume generalmente en el verano y en algunas zonas cálidas durante todo el año. La forma de preparar es similar a la del mate; pero se utiliza agua fría (5-10 °C). En algunas regiones de la Argentina y en el Paraguay es muy común adicionar hierbas (p.ej., menta o cedrón) por considerárselas refrescantes.

También se está expandiendo el consumo del tereré con jugos y bebidas carbonatadas, principalmente entre la población juvenil. Algunas empresas lanzaron al mercado en los últimos años la yerba mate saborizada con sabor a limón o durazno para ser utilizada en el tereré.

La **yerba mate en saquitos o bolsitas** se consume en tazas en una forma similar al té. Los saquitos contienen 3 g de yerba mate y están contenidos en una bolsita de papel de filtro tissue, ensobrados con papel común, colocadas en una caja de cartón con envoltura de polietileno. La bebida se prepara con aproximadamente 250 ml de agua caliente (a temperatura cercana a la ebullición). La fracción de mercado que corresponde a este producto es de aproximadamente el 3 % (De Bernardi y Prat Krikum, 2001). Las empresas yerbateras están tratando de expandir el mercado de la yerba mate bajo ésta forma de consumo principalmente en el exterior, donde en la mayoría de los países no es aceptado el consumo como mate.

El **mate cocido** es preparado en forma similar al caso anterior; pero en este caso la yerba mate es vertida sobre el agua caliente, se mantiene en el recipiente hasta ebullición y después es filtrada. En algunos casos, la infusión es saborizada con cáscara de naranja o azúcar quemada.

1.8.2. Yerba mate soluble

De acuerdo al Código Alimentario Argentino (2000), la yerba mate soluble es el polvo resultante de la deshidratación de los extractos acuosos obtenidos exclusivamente de la yerba mate. También se le conoce con el nombre de mate instantáneo, extracto de mate en polvo, concentrado de mate, o yerba mate soluble en forma sólida.

La elaboración de la yerba mate soluble tiene cuatro etapas: extracción de los solubles, concentrado por evaporación, secado por atomización y envasado. El producto obtenido es sumamente higroscópico por lo que se debe envasar herméticamente para ser comercializado, utilizándose generalmente envase de vidrio con tapa metálica.

Si bien el actual consumo de la yerba mate soluble es bajo en el país, el sector industrial tiene mucha expectativa sobre el aumento de su consumo, principalmente en el mercado externo.

1.8.3. Bebidas y helados

Otra de los actuales usos de la yerba mate es en bebidas (Burgart, 2000). En general se elabora un concentrado partiendo de yerba mate canchada (estacionada o verde) que se utiliza como base o como ingrediente en la elaboración de bebidas. A partir de éste concentrado se elaboran bebidas refrigerantes, carbonatadas y licores.

Si bien en la Argentina el mercado es reducido, éste producto tiene mucho auge en el Brasil (El Territorio, 1996). Las bebidas refrigerantes se elaboran generalmente saborizadas con frutas (ananá, limón, pitanga, mburacuyá, frutilla, guayaba, carámbola,

etc.). En la nota se menciona un crecimiento muy elevado del consumo; pero aún no llega a significar una porción importante del mercado de las carbonatadas.

También se utiliza este concentrado para elaborar helados en base a yerba mate. Este producto se elabora en heladerías y generalmente tiene el agregado de frutas (Burgart, 2000).

1.8.4. Otros usos

Se mencionan otros usos no tradicionales de la yerba mate, entre los cuales se citan a los productos de perfumería y farmacéuticos, como materia prima para la extracción de cafeína y clorofila y en el tratamiento de residuos. De estos usos, algunos se encuentran en la etapa de comercialización, mientras que otros se encuentran en la etapa de investigación de laboratorio.

La utilización de la yerba mate en cosméticos puede ser sorprendente, ya que éste producto fue siempre utilizado como alimento. Su utilización, especialmente en cremas para la piel, se debe al elevado poder antioxidante de su extracto. En el mercado ya se comercializan en forma de gel para la piel, cara y ojos (mencionando su poder antioxidante), como crema (para la celulitis), extracto (astringente y reductor de celulitis) y perfumes (Paula y Chociai, 2000).

Azzolini y Maccari (2000) analizaron la potencial utilización medicinal de la yerba mate, realizando una revisión de los trabajos científicos que tratan de sus propiedades medicinales. Mencionan su capacidad antioxidante, sus propiedades gastrointestinales, sus efectos sobre el sistema nervioso y cardiovascular (reduce la hipertensión) y en el control de la obesidad (disminuyendo el apetito de los consumidores).

Las hojas de la yerba mate podrían ser utilizadas para la obtención de clorofila y cafeína. Esta propuesta se debe al elevado contenido de clorofilas (6 mg/100 g sólido seco) y cafeína (1,6 g/100 g sólido seco), pero hasta el presente no se tiene conocimiento que se haya realizado un estudio técnico-económico de este proceso.

También, Maccari y Rodriguez Pinto (2001) mencionan la aplicación de la yerba mate en productos de higiene y tratamiento de residuos aprovechando su contenido de

saponinas. Se están realizando estudios a escala piloto para este uso, ya que las saponinas normalmente utilizadas son obtenidas de otras fuentes (p.ej. semillas de té).

1.9. TIPOS DE PRODUCTO Y NORMATIVA VIGENTE

La yerba mate, como todo producto alimenticio, debe cumplir con la normativa específica vigente dada en el Código Alimentario Argentino. Además existe otra norma de cumplimiento obligatorio para este producto, referida a la utilización de plaguicidas, dada por la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación. Existen, también, otras normas de aplicación a todos los productos alimenticios, referidas a la Higiene y Seguridad de los establecimientos industriales, rotulado y tipo de envases, etc. En este punto se describirán las referidas específicamente a la yerba mate.

En estos últimos años, el Instituto de Racionalización de Materiales de la República Argentina (IRAM) elaboró una serie de normas de calidad para la yerba mate. Estas normas, a diferencia de las normas anteriores, son de aplicación voluntaria.

1.9.1. El Código alimentario Argentino

En los Artículos 1193 al 1198 del Código Alimentario Argentino (2000) se da la normativa específica vigente para la yerba mate. Estos artículos definen los siguientes productos:

- 1) **yerba mate canchada**: es la yerba mate zapecada, secada y groseramente triturada.
- 2) **yerba mate elaborada**: es la yerba mate canchada que ha sido sometida a los procesos de zarandeo, trituración y molienda.
 - 2.1) yerba mate elaborada o yerba mate elaborada con palos: es la yerba mate elaborada que contiene más de 65 % de hojas y menos del 35 % de palos. Debe además cumplir ciertos requisitos de tamizado.

2.2) yerba mate elaborada despalada o despalillada: es la yerba mate elaborada que contiene más de 90 % de hojas y menos del 10 % de palos. Debe además cumplir ciertos requisitos de tamizado.

- 3) **yerba mate tostada**: es la yerba mate elaborada sometida posteriormente a un proceso de tostación.
- 4) **yerba mate soluble**, mate instantáneo, extracto de mate en polvo, concentrado de mate: es el producto en polvo resultante de la deshidratación de los extractos acuosos.
- 5) **yerba mate compuesta o yerba mate aromatizada**: es la yerba mate elaborada o despalada adicionada de una o varias hierbas sávido-aromáticas de reconocida inocuidad fisiológica en la forma habitual de su uso (cedrón, menta, tomillo, etc.). Estas hierbas pueden adicionarse hasta en un 40 %.

Las características que deben reunir los productos están mencionadas en los artículos 1195 y 1198, y son las siguientes (además de los límites impuestos al % máximo de palos):

1) **yerba mate elaborada**

*Humedad (100-105 °C)	Max. 9,5 %
*Cenizas totales (500-550 °C), método de la AOAC (sobre producto seco)	Max. 9,0 %
*Cenizas insolubles en ácido clorhídrico al 10 % p/v, método de la AOAC (sobre producto seco)	Max. 1,5 %
*Cafeína, método de Cortés (sobre producto seco)	Min. 0,6 %
*Extracto Acuoso, método de la AOAC (sobre producto seco)	Min. 25 %
*Sustancias vegetales extrañas	Max. 1,0 %
*Semillas de yerba mate	Max. 1,0 %
*No deberá estar ardida, agotada o alterada	

2) yerba mate soluble

*Humedad (100-105 °C)	Max. 7,5 %
*Cenizas totales (500-550 °C)	Max. 9,0 %
*Nitrógeno total	Max. 3,0 %
*Hidratos de carbono totales (como glucosa)	18-24 %
*Bases purínicas totales, método de Bailey-Andrew	Min. 2,5 %
*Alcalinidad de las cenizas (en ml de ácido /g de cenizas)	25-30
*pH de una solución al 2% p/v en agua destilada	5,0-6,0
*Se prohíbe el agregado de hidratos de carbono y aromatizantes artificiales	

3) yerba mate compuesta o yerba mate aromatizada

*Humedad (100-105 °C)	Max. 9,5 %
*Cenizas insolubles en ácido clorhídrico al 10 % p/v (sobre producto seco)	Max. 2,0 %

1.9.2. Contenido máximo de plaguicidas

Además del Código Alimentario Argentino, existen normas respecto al contenido máximo de plaguicidas, dadas por la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca de la República Argentina en la Resolución 20/95 (1995). Dichos valores son:

<u>Producto</u>	<u>Nivel de tolerancia</u> (mg/kg sólido seco)
Oxifluorfen	0,01
Paraquat	0,1
Tiometon	0,1
Dimetoato	0,5
Glifosato	0,5
Mirex	0,01

1.9.3. Normas IRAM de calidad

En el año 1993, el Instituto de Racionalización de Materiales (IRAM) de la República Argentina firmó un convenio con las Universidades Nacionales Argentinas bajo el lema “Por una Calidad Argentina de Excelencia”. A partir de este convenio se

creó el SubComité de Yerba Mate y Té (integrado por IRAM y las Universidades Nacionales de Misiones y del Nordeste) para elaborar las normas de calidad para estos productos.

Estas normas se caracterizan por ser voluntarias. Las empresas adheridas deben pagar un canon para ser controladas (generalmente el control es realizado por el INTA) y como contrapartida incluyen en su producto el sello de IRAM de certificación de calidad.

Actualmente existen más de 25 normas aprobadas o en estudio. Estas normas tratan cuestiones relacionadas a las definiciones sobre los diferentes tipos de yerba mate, análisis físico-químicos, de muestreo, preparación de muestra y buenas prácticas de manufactura. Las normas aprobadas y aquellas presentadas para su aprobación son las siguientes:

Número	Tema	Año
20501	Yerba Mate. Muestreo	1997
20502	Yerba Mate. Preparación de una muestra molida y determinación de su contenido de materia seca	1996
20503	Yerba Mate. Determinación de la pérdida de masa a 103 °C.	1996
20505	Yerba Mate. Determinación de las cenizas totales	1996
20506	Yerba Mate. Determinación de las cenizas solubles en agua y las insolubles en agua	1996
20507	Yerba Mate. Determinación de las cenizas insolubles en ácido	1996
20508	Yerba Mate. Determinación de la alcalinidad de las cenizas solubles en agua	1996
20510	Yerba Mate. Determinación del extracto acuoso	1996
20511	Yerba Mate. Determinación de fibra cruda. Método de referencia	1999
20513	Yerba Mate. Determinación del contenido de cafeína. Método de espectrofotometría en el ultravioleta. Método de referencia	1999
20540-1	Yerba Mate. Materiales y procedimientos a utilizar en la determinación de los caracteres organolépticos de la yerba mate, bajo la forma de mate	1997
20515	Yerba Mate. Vocabulario	1999
20516	Yerba Mate canchada. Definición y características básicas	1999
20550-1	Yerba Mate. Buenas Prácticas de Manufactura. Recomendaciones Generales	1997
20550-2	Yerba Mate. Buenas Prácticas de Manufactura. Recomendaciones sobre la materia prima	1997
20550-3	Yerba Mate. Buenas Prácticas de Manufactura.	2000

	Recomendaciones para la transformación primaria	
20550-4	Yerba Mate. Buenas Prácticas de Manufactura. Recomendaciones para el estacionamiento y la molinería	En estudio
20512	Yerba Mate. Determinación del contenido de cafeína por HPLC	En estudio
20517	Yerba Mate canchada y elaborada. Determinaciones microbiológicas	En estudio
20530	Yerba Mate elaborada	En estudio
20531	Yerba Mate. Método de determinación de su genuinidad	En estudio
20532	Yerba Mate. Determinación del contenido de glucosa y sacarosa. Método de cromatografía líquida HPLC	En estudio

CAPITULO 2

ANTECEDENTES DE TRABAJOS SOBRE EL PROCESAMIENTO DE LA YERBA MATE

2.1. INTRODUCCIÓN

Si bien las primeras investigaciones sobre el procesamiento de la yerba mate se iniciaron en la década de 1930-40, se puede decir que hasta el presente existen muy pocas publicaciones sobre este tema.

Después de los estudios realizados en esa década, hubo un periodo muy largo en el que no se realizaron publicaciones. En la década de 1970-80 se iniciaron una serie de investigaciones sobre el estacionamiento acelerado y otras referidas a pérdidas en el procesamiento y determinación de propiedades físico-químicas. A partir del año 1980, aparecieron las primeras publicaciones de estos trabajos y desde ese año hasta el presente hubo cierta continuidad en la producción en los temas antes citados. Además, ocurrió un auge importante en la producción de trabajos con la aparición de los Congresos específicos sobre yerba mate a partir del año 1992. En el último de ellos, llevado a cabo en el año 2000, se presentaron 113 trabajos de investigación, de los cuales 9 estudiaban el procesamiento.

Como se había mencionado al principio, las publicaciones disponibles referentes al procesamiento son relativamente escasas. No obstante se produjo un desarrollo importante en la tecnología del procesamiento desde la década del 30 hasta el presente. Este desarrollo se llevó a cabo en las empresas metalúrgicas que fabricaban los equipos modificando empíricamente la metodología del zapeado y el secado, los que posteriormente eran optimizados en las empresas que las adquirían. Pero estos desarrollos y optimizaciones eran mantenidos como propios de las empresas y no eran publicados. Muchos secaderos existentes aplican métodos de secado que se utilizan en el secado de productos alimenticios que pueden ser considerados de avanzado desarrollo tecnológico.

Si bien en este capítulo se analizarán los antecedentes de trabajos relacionados al procesamiento, cabe mencionar que los trabajos realizados en el área de la química y agrícola tuvieron una mayor continuidad en este periodo y un avance que puede ser considerado importante. El número de trabajos en estos temas es mucho mayor al de los publicados referidos al procesamiento.

2.2. PRIMEROS ESTUDIOS

Los primeros trabajos científicos que se refieren a la yerba mate son anteriores a 1930. Se citan 2 trabajos que son del tipo descriptivo: Astrada (1925) realiza una descripción de la producción y el procesamiento de la yerba mate y Chodat y Senglet (1928) describen el proceso del zapecado e intentan describir un mecanismo y además estudian la presencia de enzimas que producen el pardeamiento. Detectaron la presencia de “tirosinasa” y “peroxidasa” y consideraron que eran las causantes del pardeamiento.

En los años 1937-38, Mutinelli (1937a y b) en trabajos que realizó en el INTA de Loreto, Misiones, estudió la influencia de la temperatura sobre el periodo de estacionamiento, y realizó un estudio de la calidad cuando se estacionaba con diferentes contenidos de humedad (detectaba el crecimiento de hongos y realizaba la degustación del producto). Jacobacci (1938) estudió la presencia de fenoles en yerba mate secada al fuego directo y al horno, encontrando los mismos solamente cuando el producto era secado al fuego.

2.3. ESTACIONAMIENTO ACELERADO

A partir de 1970 se iniciaron los estudios con el objeto de acortar el tiempo de estacionamiento, que en esos años era de 12 meses.

Khohan y Fanti (1970) estudiaron si el aumento de la temperatura podía reducir el tiempo de estacionamiento sin modificar apreciablemente su sabor. También realizaron una serie de determinaciones físico-químicas en diferentes productos. Encontraron que las determinaciones estudiadas (humedad, extracto acuoso, cenizas, cafeína, extracto cetónico, índice de yodo, componentes carbonílicos, fenoles, componentes insaturados, ácidos clorogénicos) no podrían ser utilizados para medir el grado de estacionamiento, y que las variaciones en el gusto fueron apreciables respecto al patrón con estacionamiento natural que utilizaron. En un segundo trabajo estudiaron la fijación del oxígeno por parte de la yerba mate controlando su presión parcial y el desarrollo de

CO₂. Encontraron que la yerba mate fija el oxígeno y propusieron un mecanismo para los cambios producidos durante el estacionamiento.

Un estudio sobre el procesamiento de la yerba mate fue llevado a cabo por Gómez Vara et al (1979). El mismo (que fue financiado por la Asociación de Productores de Yerba Mate) incluyó entre otros al estacionamiento acelerado. En este trabajo se utilizaron temperaturas entre 50 y 70 °C y periodos de tiempo de 20, 30 y 40 días. Encontraron que cuando se estacionaba a 65 °C durante 27-30 días el sabor resultaba aceptable y que si se estacionaba en bolsas de polietileno el producto desarrollaba sabores desagradables. Al realizar el catado en mezclas que contenían un 50 % del producto estacionado en forma acelerada, el producto se podía considerar aceptable.

Un tercer estudio sobre el estacionamiento acelerado se llevó a cabo simultáneamente al anterior a partir del año 1976 en la Universidad Nacional de Misiones. En un primer trabajo (Känzig et al., 1979) se realizó el análisis de las variables: temperatura, humedad, cantidad de O₂ y CO₂. La humedad del sólido se mantuvo constante controlando la humedad relativa del ambiente en equilibrio con el sólido, o sea la actividad acuosa. Se concluyó que se obtenían los mejores resultados cuando se trabajaba con temperaturas entre 55 y 65 °C y contenidos de humedad del sólido del 6% (b.s) (humedad relativa del ambiente 50-60 %), que la adición de O₂ era beneficiosa al principio del estacionamiento y la de CO₂ al final. La evolución del estacionamiento era seguida por medio del catado. De esta forma se obtuvo un producto bastante similar al proveniente del estacionamiento natural (de 9 meses) en 30 días.

Posteriormente, en el año 1982 (Känzig et al., 1982) y en el año 1984 (Känzig et al., 1984a), se informó sobre el resultado al realizar un cambio de escala, a nivel semiindustrial. También se realizó otro estudio sobre la influencia de un estacionamiento post-zapecado, sin modificar las etapas posteriores, sobre el gusto (Känzig, 1984b).

El desarrollo realizado sobre el estacionamiento acelerado, principalmente el de la Universidad Nacional de Misiones, tuvo una rápida aplicación en la industria a partir del año 1985 cuando hubo escasez del producto estacionado (en coincidencia de la finalización del Plan Austral, donde se fijaban precios máximos al producto). A principios de la década de 1990 prácticamente todos los establecimientos industriales

aplicaban este método de estacionamiento. A fines de la década, algunos establecimientos industriales volvieron a utilizar un sistema mixto de estacionamiento debido a la sobreoferta del producto.

2.4. ESTUDIO DEL SECADO Y LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS

Gómez Vara et al. (1979), en su trabajo titulado “Investigación Tecnológica de la Yerba Mate”, estudiaron el perfil térmico, los tipos y los tiempos de residencia en los secaderos de cuatro empresas. Realizaron determinaciones de contenido de humedad y extracto acuoso para diferentes tiempos. Los perfiles térmicos fueron tomados por encima del lecho, encontrándose desde valores muy bajos de temperaturas (40 °C) hasta muy elevados (90 °C). También en este estudio determinaron las isothermas de adsorción de las muestras de yerba mate de los diferentes establecimientos utilizando soluciones de ácido sulfúrico de diferentes concentraciones. Encontraron que las diferentes marcas tenían diferentes contenidos de humedad de equilibrio para una determinada humedad relativa. Las isothermas presentadas indicaron un contenido de humedad de equilibrio que variaba entre el 14-15 % (b.s) para las diferentes marcas a 20 °C para una humedad relativa del 60% (límite de crecimiento de hongos).

En el año 1980, Núñez (1980) presentó una publicación en la que se estudió la cinética de secado de la yerba mate por circulación transversal de aire. En el mismo, se trabajó con el secado de ramas enteras de yerba mate colocadas en un lecho a varias temperaturas. Se determinaron las curvas de pérdida de humedad y se ajustaron los datos de contenido de humedad en función del tiempo a un modelo logarítmico, calculándose la constante cinética para varias temperaturas.

Más adelante, Nuñez y Känzig (1995) realizaron un relevamiento del funcionamiento de 6 secaderos considerando sus dimensiones y variables de funcionamiento. Los autores concluyeron que las dimensiones y variables de trabajo de los zapeadores eran muy similares entre sí; mientras que las correspondientes a los

secaderos estudiados diferían mucho entre sí, encontrándose tiempos de residencias de 20 minutos hasta 2 horas y temperaturas de secado entre 90 y 300 °C.

Schiffel (1997) describió el procesamiento de la yerba mate en el Brasil. En lo referente al secado, analizó los tipos de secaderos utilizados (que son del tipo rotatorio) y mencionó algunas recomendaciones en la forma de operar, relacionándola con la calidad del producto.

También en ese año, Hoeflich et al. (1997) realizaron un relevamiento sobre el consumo de leña en el procesamiento de la yerba mate. Determinaron que con los sistemas antiguos de procesamiento, se consumían aproximadamente 3 toneladas de leña/tonelada de ramas verdes, mientras que en el sistema actual, el consumo es de 1 tonelada de leña/tonelada de ramas verdes.

En la Universidad Nacional de Misiones, entre los años 1982-1987, se llevaron a cabo una serie de estudios relacionados a la humedad de equilibrio de la yerba mate a varias temperaturas, con diferentes tipos de yerba mate. Los métodos empleados fueron el instrumental y el estático utilizando soluciones salinas saturadas. Se determinaron las isothermas de adsorción de hojas y palos entre 20 y 50 °C, las que se utilizaron para determinar el contenido máximo de humedad para envasar al producto (Känzig et al., 1985 y 1987a). El valor que correspondía a una actividad de agua de 0,6 era del 10-11 %. También se determinaron los contenidos de humedad de la monocapa, relacionado a la máxima estabilidad del producto, dando valores de 4,6-5,1 % (b.s) para las diferentes temperaturas. En otro trabajo (Känzig et al., 1987b) se determinaron las isothermas de desorción de la yerba mate zapecada, para ser utilizada en el modelado del secado, a las temperaturas de 20-90 °C. Los valores experimentales se ajustaron a diferentes modelos de isothermas de sorción de agua en alimentos.

Además, en la misma institución se determinaron otras propiedades utilizadas en esta tesis para calcular el tiempo de secado (Schmalko et al., 1996). Se determinaron los coeficientes de difusión de agua en las hojas y los palos (para difusión radial y axial) a temperaturas que variaron entre 60 y 100 °C. Se presentó también, un modelo para el coeficiente de difusión en función del contenido de humedad y la temperatura y una ecuación para calcular el tiempo de secado de una capa fina del material. Luego se realizaron determinaciones de la conductividad térmica y el calor específico de los

palos (Schmalko et al., 1997) y los coeficientes externos de transferencia de calor (Ramallo et al., 1996) y de masa (Schmalko et al., 1998).

2.5. MODIFICACIONES FÍSICOQUÍMICAS EN EL PROCESAMIENTO

El estudio de las modificaciones físico-químicas en el procesamiento se inició con el objeto de determinar los cambios en la etapa del estacionamiento en la década 1970-80. Estos trabajos tuvieron como objetivos principales encontrar un método de cuantificar el grado de estacionamiento y de tratar de interpretar los mecanismos de estos cambios. No obstante, cabe mencionar una serie de trabajos que trataban sobre la variación del contenido de vitamina C en las hojas y en el procesamiento llevados a cabo entre los años 1936-40 (Mendive y Sanguinetti, 1937; Escudero y Yantorno, 1937).

En el trabajo de Kohan y Fanti (1970) se estudiaron una serie de compuestos y sus modificaciones durante el estacionamiento, entre los que pueden mencionarse el contenido de humedad, el extracto acuoso, cenizas, cafeína, extracto cetónico, índice de yodo, componentes carbonílicos, fenoles, componentes insaturados y ácidos clorogénicos. Encontraron que la yerba mate con estacionamiento acelerado sufría ciertas modificaciones similares a la estacionada naturalmente, pero no tenía los mismos aromas y sabores características de la última.

Otro estudio muy amplio sobre el procesamiento de la yerba mate fue llevado a cabo por Gómez Vara et al. (1979). Estudiaron el contenido de una serie de compuestos en la hoja y sus modificaciones en el procesamiento. En primer término determinaron el extracto acuoso y cetónico en cuatro marcas, encontrando que los mismos no se modificaban durante el estacionamiento. En segundo término, estudiaron las variaciones de la cafeína, los hidratos de carbono y los ácidos clorogénicos en todas las etapas del procesamiento. Encontraron que la cafeína variaba entre 1,30 % (en la hoja verde) y 0,82 % (en la hoja estacionada), sufriendo modificaciones en cada una de las etapas. Los hidratos de carbono variaban desde un 19,65 % (en las hojas verdes) al 12,16 % (en las hojas estacionadas). En los ácidos clorogénicos se encontraron

reducciones de su concentración del orden del 37-38 % con respecto a su contenido inicial, aunque éstos eran muy diferentes entre sí (las determinaciones se realizaron en tres establecimientos). La degradación de las clorofilas fue estudiada durante el estacionamiento natural. Encontraron que los cambios de coloración de las hojas eran debidas a la degradación de las clorofilas, las que en el término de 9 meses variaron su concentración de 1,43 a 0,26 mg/g de hoja seca.

A partir del año 1975 se iniciaron una serie de trabajos relacionados a este tema en la Universidad Nacional de Misiones. Colombo et al (1979) estudiaron los cambios de pigmentos durante el procesamiento a través de un seguimiento de 4 longitudes de onda en un espectrofotómetro, encontrando modificaciones en la absorción de estos pigmentos. Este grupo publicó un trabajo sobre las modificaciones de la cafeína y pigmentos en el procesamiento, informando que se encontraron reducciones importantes del contenido de cafeína en el procesamiento (Colombo y Nuñez, 1980).

Känzig et al. (1980 y 1987c y d) publicaron dos trabajos de determinaciones de cromatografía en capa fina del extracto etéreo y acuoso y aminoácidos libres en hojas verdes y estacionadas. Encontraron diferencias en algunas manchas del extracto etéreo y modificaciones en la intensidad de las manchas en el extracto acuoso. Al analizar los aminoácidos libres encontraron que algunas manchas desaparecían durante el estacionamiento.

También se estudió la degradación de las clorofilas durante el estacionamiento acelerado (Schmalko et al., 1989). Se encontró que el contenido de clorofilas se redujo de 1 a 0,3 mg/g sólido seco durante el estacionamiento acelerado, siguiendo una cinética de degradación de primer orden. En otro trabajo, Schmalko et al. (1988) estudiaron la influencia de diferentes variables, entre ellos el grado de estacionamiento, sobre el contenido de humedad de equilibrio en hojas y palos. Encontraron que el contenido de humedad de equilibrio (manteniendo constante la actividad del agua) aumentó durante el estacionamiento, concluyendo que en el mismo era probable que se generaran compuestos de moléculas simples.

Bertoni et al. (1991, 1992a y b y 1993), en una serie de trabajos llevados a cabo conjuntamente entre el INTA-Cerro Azul, la Universidad Nacional de Misiones y la Universidad Nacional de Buenos Aires, estudiaron la composición química general de

diferentes clones de yerba mate (o *Ilex paraguariensis*) y de otras *Ilex* (*dumosa*, *breviacuspis*) y las modificaciones en sus procesamientos. Se determinaron los lípidos y sus composiciones acídicas, nitrógeno total, cenizas y nitrógeno soluble, cafeína y fibra cruda. En primer lugar estudiaron la composición de la hoja y de su harina (extraídos los lípidos) en tres clones diferentes de yerba mate, encontrado variaciones de composición muy importante entre ellos y en las diferentes épocas de cosecha. Como ejemplo se puede citar que la cafeína en los diferentes clones variaba entre 0,38 y 1,07 g/100 g de hojas secas. En el procesamiento, encontraron que los lípidos variaban en gran medida durante el zapeado (por su saponificación) y éstos se consideraban como las precursoras en la formación de los aromas volátiles. También encontraron variaciones importantes en el contenido de cafeína y variaciones menores en el contenido de nitrógeno total.

Otra serie de trabajos referidos a cambios durante el procesamiento se inició en la Universidad Nacional de Misiones a partir de 1990. Uno de los grupos de componentes estudiado fue los hidratos de carbono. Känzig et al. (1995) estudiaron las variaciones de glucosa y sacarosa en el procesamiento de la yerba mate. Encontraron que estos dos azúcares variaban en su concentración en las hojas verdes en diferentes épocas del año, durante el zapeado y si la hoja tenía un estacionamiento previo al zapeado. Luego Paredes et al. (2000a) investigaron las variaciones de concentración de la glucosa, la fructosa y la sacarosa durante el zapeado en condiciones controladas y en dos épocas del año. Concluyeron que la concentración de glucosa y fructosa disminuía y la de la sacarosa aumentaba durante el zapeado. Además encontraron que las concentraciones de los azúcares dependían de la época de cosecha y de si las hojas eran jóvenes o maduras. También estudiaron las variaciones de los azúcares durante el secado (Paredes et al., 2000.b) cuando el mismo se realizaba por circulación transversal en condiciones controladas. Encontraron que las variaciones de tiempo y temperatura no producían variaciones tan importantes como las que se producían en el zapeado. Cuando estudiaron los almidones (Paredes et al., 1999) encontraron que su concentración (inicial= 25,33 g/100 gramos de sólido seco) disminuía en un 56 % en el zapeado y un 22% en el secado. Esta disminución coincidía con el aumento de la concentración de sacarosa.

En otro trabajo, llevado a cabo por Ramallo et al. (1998), se estudió la variación de la vitamina C en el procesamiento de hojas y palos. El contenido de vitamina C en los palos era mucho menor que en las hojas y durante el procesamiento, el contenido de vitamina C en las hojas disminuía un 90 %.

La inactivación térmica de las peroxidasas fue estudiada por Argüello et al. (2000) y Xander et al. (2000), quienes determinaron el tiempo necesario para su inactivación a dos temperaturas diferentes. También ajustaron la velocidad de inactivación a una ecuación cinética de primer orden, obteniendo tiempos de reducción decimal de 200 s (70 °C) y 34 s (75 °C).

La degradación de dos plaguicidas, utilizados en la yerba mate (cipermetrina y dimetoato) en el cultivo y el procesamiento, fue estudiada por Escalada et al. (1999) y Schmalko et al. (1999). En ambos trabajos se concluyó que los plaguicidas sufrían un gran deterioro durante el zapecado y el secado. La cipermetrina se degradaba un 63,4 % en el zapecado y un 18,2 % en el secado, mientras que el dimetoato se degradaba un 33 % en el zapecado y un 52 % en el secado. Además, en el estacionamiento (acelerado) sufrían degradaciones que reducían la concentración por debajo del límite de detección de los equipos. Por lo tanto, las concentraciones de salida de estos plaguicidas se encontraban muy por debajo de los valores máximos permitidos.

SECCIÓN II

OBJETIVOS

CAPITULO 3

OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN

Como se mencionó en los Capítulos 1 y 2, la información disponible sobre la descripción del procesamiento de la yerba mate, sus propiedades y las variables de proceso es escasa. Para poder entender los cambios que sufre este producto es necesario conocer la evolución de su temperatura y su contenido de humedad. Estas dos variables son las más importantes en las modificaciones de los distintos componentes. La medición continua de las mismas es muy difícil debido a las condiciones extremas de operación del zapeador y a la forma del material. Uno de los métodos para estimar esta evolución es realizar el modelado del procesamiento.

Para ello es necesario conocer una serie de propiedades fisicoquímicas y de transferencia. Entre éstas se pueden citar: la densidad, la contracción, la humedad de equilibrio, la conductividad térmica, el coeficiente de difusión del agua en el producto, los coeficientes externos de transferencia de calor y materia, etc. Además al secar la yerba mate en ramas se tiene una complicación adicional, ya que se hace necesario conocer todas las propiedades antes mencionadas para los palos y las hojas. Algunas de estas propiedades ya se conocen y otras se deben determinar experimentalmente. También se debe conocer la dependencia de estas propiedades con el contenido de humedad y la temperatura, ya que estas dos variables sufren modificaciones importantes en el procesamiento.

Una vez realizado el modelado de las etapas del procesamiento, es necesario validar el modelo. Ello puede realizarse midiendo algunos valores de concentración de entrada y de salida de algunos componentes. Los valores experimentales se deben comparar con los obtenidos con el modelo y esta diferencia (o error) debe ser mínima. En la selección de los compuestos que se midan para validar el modelo se debe tener en cuenta que éstos deben poseer variaciones apreciables, que se disponga de un método analítico preciso para determinarlos y si es posible que estén relacionados a la calidad del producto, ya que de esta forma se puede optimizar su concentración. En el caso de la yerba mate resulta adecuado seleccionar a la humedad, la clorofila y la cafeína. Esto surge de estudios previos (Colombo et al., 1979; Colombo y Núñez, 1980; Schmalko et al., 1989).

OBJETIVOS GENERALES

Son objetivos de este trabajo realizar el modelado de las dos etapas más importantes del procesamiento primario de la yerba mate: el zapecado y el secado. Con ello se pretende conocer la evolución del contenido de humedad, la temperatura y el contenido de clorofila y/o cafeína de las ramas de la yerba mate. El modelado se realizará en los dos equipos más ampliamente utilizados en el procesamiento industrial: el zapecador tubular y el secadero de lecho con flujo cruzado.

Para cumplir estos objetivos generales es necesario concluir una serie de objetivos particulares que se mencionan a continuación.

OBJETIVOS PARTICULARES

- 1) Realizar el balance de masa y energía en las etapas de zapecado y secado de un establecimiento industrial para conocer las temperaturas y humedades de las corrientes de entrada y salida.
- 2) Medir las concentraciones de clorofila y cafeína a la entrada y la salida de estas dos etapas para evaluar si dichos componentes pueden ser seleccionados para validar el modelo, además del contenido de humedad.
- 3) Determinar las isotermas de desorción de los palos considerándolos como un material compuesto por xilema y corteza, como también la relación de las humedades de equilibrio entre los dos materiales. Estas relaciones de equilibrio se deben determinar en el rango de trabajo de los equipos .
- 4) Determinar el coeficiente de difusión del agua en los palos, considerándolo como un material compuesto por corteza y xilema, en el rango de temperaturas de trabajo de los equipos.
- 5) Estudiar la cinética de degradación de las clorofilas en función de la temperatura y de la actividad del agua en el rango de temperatura correspondiente al secado.

Estas propiedades y procesos son las que aún deben analizarse para realizar el modelado. Otras propiedades que no se mencionan en este punto ya fueron

determinadas anteriormente por el autor de este trabajo conjuntamente con otros investigadores. Estas propiedades son: la conductividad térmica, la capacidad calorífica, las isothermas de desorción de las hojas, el coeficiente de difusión del agua en las hojas y palos a bajas temperaturas, las propiedades de las hojas en el rango de trabajo del zapecador y la cinética de degradación de las clorofilas a temperaturas elevadas.

El desarrollo de la tesis se expone en capítulos independientes para cumplir cada uno de los objetivos particulares. Cada capítulo tiene su introducción, objetivos y conclusiones. En el capítulo 4, en el que se inicia el desarrollo de la tesis, se detallan los datos de las mediciones realizadas en el secadero industrial en estudio, a saber: los contenidos de humedad, clorofilas, cafeína y color. En el capítulo 5 se realiza el balance de masa y energía del secadero, a partir del cual se determinan las condiciones de entrada y salida al equipo. En el capítulo 6 se estudian las propiedades fisicoquímicas de los palos (densidad, contracción, isothermas de sorción y equilibrio corteza-xilema) que son utilizados en el capítulo 7 para determinar los coeficientes de difusión de la corteza y el xilema de los palos; mientras que en el capítulo 8 se evalúan los datos de equilibrio y la cinética de secado de las hojas. En el capítulo 9 se estudia la cinética de degradación de las clorofilas y el color en las hojas en condiciones controladas y en los capítulos 10 y 11 se realiza el modelado del zapecador y el secadero donde se utilizan los datos obtenidos en los capítulos anteriores.

SECCIÓN III

DESARROLLO

CAPÍTULO 4

MEDICIÓN DE LAS VARIACIONES DE COLOR Y LOS CONTENIDOS DE HUMEDAD, CAFEÍNA Y CLOROFILAS EN EL PROCESAMIENTO

4.1. INTRODUCCIÓN

El secado es una forma tradicional de conservar los productos alimenticios. En esta operación, en la mayoría de los casos, el material es sometido durante cierto tiempo a temperaturas relativamente elevadas, evaporándose el agua presente. Pero, simultáneamente, el mismo sufre una serie de alteraciones que pueden clasificarse en bioquímicas, químicas, físicas y mecánicas (Pan et al., 1999). Estas alteraciones dependen en gran medida del grado de tratamiento térmico a que es sometido el material.

Por otra parte algunos productos antes de ser secados deben someterse a un escaldado con el fin de evitar su pardeamiento enzimático en la etapa de secado. En esta etapa, debido al alto valor de la actividad del agua que tiene el material, se pueden generar reacciones de deterioro importantes.

Entre los cambios químicos se pueden citar la degradación de compuestos relacionados a la calidad y al valor nutritivo del alimento. Para el producto en estudio, *Ilex paraguariensis* Saint Hilaire, son importantes las pérdidas de vitaminas y clorofilas. En estudios realizados por Ramallo et al. (1998) se encontró que en las etapas de zapeado (escaldado) y secado del producto, se degradaba el 80 % de la vitamina C. La pérdida de las clorofilas ha sido también estudiada en otros productos (espinacas, habas, pimientos, brócoli, kiwi, etc). Se mencionarán algunos de dichos estudios.

La degradación de la clorofila y el color durante el escaldado fue estudiada en espinacas (Canjura et al., 1991) entre temperaturas de 100 y 145 °C y tiempos en el rango 2 – 25 min, encontrándose pérdidas superiores al 90 % del valor inicial.

Steet y Tong (1996) estudiaron la pérdida de las clorofilas y el color en puré de habas verdes durante el tratamiento térmico entre 70 y 90 °C y tiempos de hasta 300 minutos, encontrándose en todos los casos pérdidas superiores al 90 %.

Maharaj y Sankat (1996) estudiaron los efectos del secado con convección natural a cuatro temperaturas y tres pretratamientos y secado en convección forzada sobre la degradación de las clorofilas en hojas de taro (*Colocasia esculenta*). Encontraron valores entre 33,3 y 41,9 % de pérdidas cuando las hojas eran secadas con convección natural entre 40 y 70 °C (sin pretratamientos) y pérdidas de 9,6 a 31,7 % cuando las hojas tenían pretratamientos (escaldados con agua o vapor e inmersión en una solución de MgCO₃) y secado con convección forzada a 60 °C. Los autores atribuyeron esta diferencia al tiempo de secado menor que se tenía en el segundo caso.

De la Cruz – García et al. (1997) estudiaron los efectos que producían cuatro tratamientos culinarios (con vapor, agua en ebullición, cocción a presión y con microondas)

sobre las clorofilas *a* y *b* en habas. Encontraron que el tratamiento con vapor era el que causaba mayor degradación.

El efecto del escaldado a baja temperatura fue estudiado en pimientos Jalapeño congelados por Quintero-Ramos et al. (1998), quienes optimizaron la pérdida de color utilizando el método de la superficie de respuesta para diferentes tiempos y temperaturas, encontrando que ambas variables influían significativamente en el parámetro “a*” y no tenían efecto en los parámetros “L” y “b*”.

López-Ayerra et al. (1998) estudiaron la influencia de los tratamientos de congelado y esterilización sobre la clorofila de hojas de espinaca. Encontraron que perdía el 16 % de la clorofila en el proceso de congelado y el 99% después del enlatado y tratamiento térmico.

La pérdida en el calentamiento y el tratamiento conjunto temperatura-presión fue estudiada en jugo de brócoli (Van Loey et al., 1998; Weemaes et al., 1999) a temperaturas de 80 – 120 °C y presiones entre 0,1 y 800 MPa., encontrándose que a altas temperaturas el aumento de la presión producía un aumento de la cinética de degradación.

Teng y Chen (1999) estudiaron la degradación de las clorofilas durante la cocción de hojas de espinaca utilizando diferentes métodos. Concluyeron que la cocción con microondas y el escaldado con agua degradaban más a las clorofilas que el tratamiento con vapor o cocción al horno. Los niveles de degradación de la clorofila *a* variaron entre un 60 y 99 % y de la clorofila *b* entre un 57 y 85 %. Cabe mencionar que los tiempos de tratamiento fueron diferentes en cada caso.

Las pérdidas de clorofila durante el escaldado y el secado de okra fueron estudiadas por Shivhare et al. (2000), encontrando que el método de escaldado influía más que la temperatura de secado en las mismas.

Negi y Roy (2000) estudiaron los cambios de concentración de β -caroteno, vitamina C y las clorofilas en el escaldado y secado de hojas de remolacha, amaranto y alholva. Encontraron que el escaldado en una solución de bicarbonato de sodio, óxido de magnesio y metasulfito de potasio producía la menor pérdida de las clorofilas (un 20 % aproximadamente), mientras que el escaldado en agua producía las pérdidas más elevadas (un 42 % aproximadamente). En la etapa de secado, las aplicaciones de los diferentes métodos no produjeron pérdidas muy diferentes (entre el 31 y el 53 %), obteniéndose los mejores resultados con el secado a bajas temperaturas. Posteriormente estos autores (Negi y Roy, 2001) estudiaron los efectos del secado, empaque y almacenamiento sobre los mismos componentes. Encontraron que se producía una reducción drástica en el secado solar a

temperatura ambiente y las mejores condiciones de almacenamiento se lograban cuando se utilizaba doble empaque y refrigeración.

Martins y Silva (2002) estudiaron los cambios de color y la degradación de las clorofilas en habas verdes durante el almacenamiento a -7 , -15 y -30 °C. Los cambios siguieron una cinética de primer orden, y la constante de velocidad específica aumentó al aumentar la temperatura. A la temperatura de -30 °C, el deterioro alcanzó el 85 % a los 150 días. No se encontró correlación entre el cambio de color verde y el contenido de clorofilas.

Mongprommeet et al. (2002) estudiaron el secado de cebollas con radiación infrarroja y bajo vacío. Encontraron que existía un valor mínimo de pérdida de clorofila cuando se aumentaba la intensidad de radiación (y se disminuía el tiempo de tratamiento).

De acuerdo a estos estudios los porcentajes de degradación de las clorofilas en el procesamiento de los alimentos varían con el producto, el tipo de tratamiento, la temperatura y tiempo de tratamiento y los pretratamientos a que son sometidos los vegetales, alcanzando en algunos casos valores del 99 %.

Entre los cambios físicos que se producen en el escaldado y el secado se pueden citar la pérdida de componentes por evaporación, alteraciones del color, cambios en las dimensiones, etc. Para el producto en estudio son importantes los cambios de color y la pérdida de cafeína. El color verde de los vegetales está relacionado al contenido de clorofilas, y esta relación fue encontrada en numerosos productos, por ejemplo en kiwi (Matsumoto et al., 1983); brócoli (Barth et al., 1993) y habas (Steet and Tong, 1996).

La cafeína es un parámetro importante de calidad, ya que en el producto en estudio es una de las razones de su consumo, en forma similar al té y café, en los cuales este producto se utiliza como uno de los parámetros de control en el procesamiento (Purdon y McCamey, 1987; Gulati y Ravindranath, 1996; Liang et al., 2003). Se conocen muy pocos trabajos que hayan estudiado la pérdida de cafeína en el procesamiento. Bertoni et al. (1993) encontraron que en el procesamiento de una muestra de yerba mate se perdía el 30 % en el zapecado y el 13 % en el secado. Avanza et al. (1987) encontraron que en el zapecado se perdía el 11 % de la cafeína, y en las dos etapas de secado el 21 %. Los mecanismos de pérdida de la cafeína son la difusión y la sublimación y por este motivo al aumentar la temperatura, aumenta la misma. Sin embargo es de esperar un efecto contrario de la actividad del agua, ya que al ser la cafeína un compuesto soluble en agua, su presión parcial se reducirá al aumentar el contenido de humedad, y por lo tanto se espera una disminución de las pérdidas al aumentar el mismo.

Debido a que el material se procesa en ramas enteras, la variación de humedad en las diferentes partes representa otro problema. Las hojas del material tienen espesores medios de $0,3 \cdot 10^{-3}$ m; mientras que las partes más gruesas de las ramas pueden tener hasta $8 \cdot 10^{-3}$ m. Considerando que, cuando no existe resistencia externa a la transferencia de masa, la velocidad de ésta es proporcional a la inversa de la longitud característica al cuadrado (Suarez et al., 1981), la pérdida de humedad puede ser muy diferente en los dos materiales. Esta situación puede darse cuando la velocidad del aire es relativamente alta o en las últimas etapas del secado. Por este motivo, como se determinó experimentalmente (Schmalko et al., 1996), las hojas requieren tiempos relativamente cortos de secado; pero son sometidas a un tratamiento térmico excesivo porque las ramas requieren un tiempo mayor de secado. Esto hace que las pérdidas de componentes presentes en las hojas (clorofilas, cafeína, etc) sean grandes.

El objetivo de este capítulo es estudiar las variaciones de color y de los contenidos de clorofilas, cafeína y humedad en las diferentes partes de las ramas de yerba mate durante el procesamiento primario, el zapecado y las dos etapas de secado.

4.2. MATERIALES Y MÉTODOS

4.2.1. Procesamiento industrial

La materia prima a procesar son ramas de yerba mate que tienen longitudes que varían entre 0,10 y 0,60 m y pesos entre 10 y 30 g (Crotti et al, 2002). Las mismas son cortadas por operarios que utilizan machetes o tijeras de podar y se colocan en paños abiertos extendidos, luego son atadas y pesadas y transportadas al establecimiento en camiones y/o tractores con acoplados.

En el establecimiento industrial, los camiones son pesados y las ramas se dejan caer sobre una planchada de cemento. Por medio de una cinta transportadora, cargada por operarios, o pequeñas retroexcavadoras son transportadas a la cinta de alimentación del zapecador.

El trabajo de medición fue realizado en el establecimiento industrial de la empresa OAS S.A., localizado en Apóstoles, Misiones.

En dicho establecimiento, las ramas que están en la planchada son transportadas con una retroexcavadora hasta una cinta transportadora ancha y luego a otra de menor tamaño y

entre ambas hay un controlador del flujo de ramas. Esta segunda cinta es la que alimenta el zapecador.

El zapecador es un cilindro rotatorio de 9,6 m de longitud que gira a 10 rpm. En el extremo donde se introducen los sólidos se produce la combustión del propano y también se introduce aire. Las ramas pasan a través de la llama (de aproximadamente 1 m de longitud) unas tres veces al ser transportadas hacia el otro extremo por el movimiento del cilindro, el flujo de gases y las aletas que posee el equipo. En todo este trayecto se produce el contacto con los gases de combustión en corriente paralela. El tiempo de residencia medio es de 174 s (Crotti et al., 2002). En el extremo de salida, las ramas caen a una cinta transportadora y los gases salen al exterior por una chimenea en donde se encuentra un deflector para regular su flujo. Las ramas son transportadas por la cinta hasta la alimentación del primer secadero.

El secado se realiza en dos etapas y en ambos casos se utilizan secaderos de cinta con flujo cruzado de los gases. En la primera etapa, los gases de combustión del propano entran al secadero impulsados por dos ventiladores y después de atravesar el lecho de ramas, de aproximadamente 1 m de altura, los mismos salen al exterior por chimeneas ubicadas en el techo. Las ramas salen por el extremo opuesto a la entrada tras recorrer una distancia aproximada de 20 m en 1 h y 30 minutos. Por medio de una cinta, son transportadas a la segunda etapa de secado. La misma, a diferencia de la primera, tiene una sola entrada de gases de combustión. En el anexo 2 figura un diagrama de flujo de la planta industrial.

A la salida del segundo secadero, las ramas se introducen a un molino de martillos, el que a la salida tiene una criba para separar los palos más gruesos. Las hojas molidas y los palos finos son cargados en bolsas de 35-50 kg y trasladados a los depósitos.

4.2.2. Materiales

Las muestras fueron extraídas en los siguientes puntos: 1) antes de ingresar al zapecador; 2) a la salida del zapecador; 3) a la salida del primer secadero y 4) a la salida del segundo secadero.

El material del punto 1 se preparó de la siguiente forma: Las hojas fueron separadas de las ramas y clasificadas de acuerdo al color (grado de verde) en forma visual. Se clasificaron en tres grupos que se denominaron 1, 2 y 3, coincidentes con la edad de las hojas, en orden de edad creciente. Los mismos se pueden observar en el anexo 1. De cada uno de estos grupos se determinaron los parámetros de color, el contenido de clorofilas y el porcentaje en peso y su desviación standard. Luego se calculó el promedio ponderado de cada una de las mediciones.

Las muestras de palos se obtuvieron midiendo el diámetro con un calibre, y retirándose las correspondientes a los diámetros de $2,5 \cdot 10^{-3}$; $5 \cdot 10^{-3}$ y $7,5 \cdot 10^{-3}$ m y 0,05 m de longitud. Las muestras fueron guardadas en frascos cerrados herméticamente hasta su procesamiento.

A partir del punto 2 (salida del zapecador) ya no fue posible realizar la clasificación de las hojas por colores debido al grado de deterioro (pardeamiento y rotura), por lo que se trabajó con las tres clases juntas. Las hojas se separaron de las ramas y fueron molidas en un molino de martillo con tamiz de salida de 1 mm de perforación. Las muestras de palos se obtuvieron en forma similar a la del punto 1.

Las determinaciones se realizaron en 10 días de semanas diferentes.

4.2.3. Color

En las hojas enteras (punto 1) el color se midió sobre el material sin preparación previa. A partir de la etapa 2, el color se midió en la muestra molida, a la que se le adhirió un film de polietileno. El color se midió con un medidor Color Touch ISO Technidyne Corporation, USA, en una escala de color CIELAB (L, a y b), con ángulo de observador de 10° .

El parámetro “L” mide el grado de blancura, el parámetro “a” mide el grado de verde-rojo y el parámetro “b” el grado de azul-amarillo. Estos valores fueron convertidos a la escala HunterLab.

También se calcularon otras funciones de color para cada muestra: el matiz se calculó como el arco tangente de (b/a) ; la intensidad del color como $(a^2+b^2)^{1/2}$ y la diferencia total de color (ΔE) como $((L-L_0)^2+(a-a_0)^2+(b-b_0)^2)^{1/2}$, donde L_0 , a_0 y b_0 fueron los valores obtenidos antes del zapecado.

Sobre cada muestra se realizaron 3 mediciones, rotando el material. El valor de los parámetros informados corresponde al valor medio dado por el equipo. A su vez, se realizaron mediciones en tres muestras diferentes en cada etapa.

4.2.4. Clorofilas

Para la extracción de las clorofilas en las hojas sin procesar se utilizó el método de la AOAC 924.04 (1990). Las hojas (8 g) eran molidas en un mortero que contenía 0,1 g de carbonato de sodio (marca Merck pa, Alemania) y arena seca, previamente lavada con solución de ácido clorhídrico. Se le añadían porciones de una solución acetona:agua (85:15)

(marca Omnisolv, USA, para HPLC) y luego se filtraba utilizando vidrio sinterizado. Este procedimiento se repetía hasta que la solución no tuviera color verde y la solución recogida se llevaba a 500 ml, la que se inyectaba en el cromatógrafo.

En las muestras obtenidas a la salida de las tres etapas se procedió de la siguiente manera: a 1 g de la muestra se le añadieron 10 ml de una solución de acetona:agua 80:20 (Omnisolv, USA, para HPLC) en volumen y se introdujo en un baño con ultrasonido durante 5 minutos a 25°C. Luego se filtró la solución con un filtro para jeringa y se inyectó al cromatógrafo (Morawicki et al., 1999).

Para preparar la solución patrón se utilizaron clorofilas *a* y *b* puras de marca Sigma, USA, aisladas de espinaca. Se disolvieron 1 mg de las clorofilas *a* y *b* en 1 ml de acetona (marca Omnisolv, USA, para HPLC) por separado, se tomaron alícuotas de 200 µl de solución de clorofila *a* y 100 µl de solución de clorofila *b*, se mezclaron y se guardaron en un frasco de color caramelo. Las soluciones patrón se conservaron en un freezer a -18 °C.

Las características del cromatógrafo y las condiciones de trabajo fueron las siguientes: Marca KNK-500 HPLC, España; columna C18 marca Hibart RT; fase móvil: acetato de etilo:metanol:agua, (55:35:10), marca Merck, Alemania; caudal: 2 ml/min y detector UV-Visible 435 nm. Las determinaciones se realizaron por triplicado en cada una de las muestras obtenidas en 10 días de semanas diferentes.

4.2.5. Contenido de humedad

Se utilizó el método dado por la norma IRAM 20503 (1995). Las muestras eran colocadas en una estufa de convección natural, que se mantenía a $103 \pm 2^\circ \text{C}$, durante 6 hs. Las determinaciones se realizaron por triplicado en cada una de las muestras obtenidas en 10 días de semanas diferentes.

4.2.6. Contenido de cafeína en las hojas

Se determinó cafeína utilizando un método de cromatografía líquida de alta presión (IRAM 20512). Para la preparación de la muestra se utilizaron los siguientes procedimientos: las hojas sin procesar se molieron en un molinillo de café durante 30 segundos, mientras que las muestras extraídas de las etapas 2,3 y 4 fueron molidas en un molino de martillo con malla de salida de 1 mm. Se utilizó aproximadamente 0,5 g de muestra seca y se colocó en un

erleryer de 500 ml. Se añadieron 300 ml de agua y 4,5 g de óxido de magnesio (Merck pa, Alemania). Luego se colocó en un baño a 90°C durante 1 hora, con agitación continua. Se dejó enfriar el erleryer y se filtró utilizando un filtro de vidrio sinterizado.

Se utilizó un patrón de cafeína pura anhidra, marca Mallinckrot, USA. Se pesaron 0,3815 g de cafeína, se colocó en un matraz aforado de 1 litro y se añadió una solución de agua:etanol, marca Omnisolv, USA, para HPLC) (80:20)(hasta enrasarlo.

Las características del cromatógrafo y condiciones de trabajo fueron las siguientes: Marca KNK-500 HPLC, España; columna C18 marca Hibart RT; fase móvil: acetonitrilo:agua (marca Omnisolv, USA, para HPLC) (70:30); caudal 1 ml/min y detector UV-Visible 272 nm. Las determinaciones se realizaron por triplicado en cada una de las muestras obtenidas en 10 días de semanas diferentes.

4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.3.1. Color

La tabla 4.1 muestra los valores de los parámetros y funciones de color (L, a, b, matiz e intensidad), los contenidos de clorofilas *a* y *b* y las fracciones en peso clasificadas de acuerdo a la edad de las hojas verdes. También se pueden observar los valores medios considerando las fracciones en peso. En el Anexo 1 figuran los valores individuales obtenidos. Como se puede observar, los contenidos de clorofilas y los valores de los parámetros de color dependieron en gran medida de la edad de las hojas. Las más jóvenes (grupo 1) presentaron valores de casi todos los parámetros diferentes a los de los otros grupos.

Los parámetros de color “a” y “b” tuvieron valores similares a los encontrados en otros vegetales tales como brócoli, espinaca y tomates verdes (Gnanasekharan et al., 1992), mientras que el valor de “L” fue ligeramente superior.

En las Figuras 4.1 y 4.2 se pueden observar los cambios de color en las diferentes etapas del procesamiento. De cada uno de los parámetros (L, -a y b) se dan los valores medios y los límites de confianza (al 95 % de nivel de confianza) de los valores obtenidos en 10 días diferentes. En todos los casos se encontraron superposiciones entre los límites de confianza, por lo que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los valores medios. No obstante, se pueden observar ciertas tendencias en los valores medios.

Tabla 4.1. Parámetros y funciones de color (L, a, b, matiz e intensidad de color), contenido de clorofilas *a* y *b* (en % base húmeda) y fracción en peso de las hojas clasificadas de acuerdo a su color y edad (1: jóvenes; 2: intermedias y 3: viejas). Valores medios \pm desviación standard de 10 determinaciones llevadas a cabo durante 10 semanas diferentes.

Grupo	L	-a	b	Matiz	Intensidad del color	Contenido de clorofilas		Fracción en peso
						<i>a</i>	<i>b</i>	
1	64,5 \pm 0,9	10,5 \pm 1,2	25,6 \pm 1,2	112,4	27,7	0,127 \pm 0,026	0,021 \pm 0,004	0,122
2	61,9 \pm 1,4	10,4 \pm 0,8	16,9 \pm 0,8	121,6	19,8	0,209 \pm 0,018	0,032 \pm 0,005	0,612
3	60,0 \pm 1,2	7,2 \pm 1,0	11,3 \pm 1,9	122,3	13,4	0,243 \pm 0,017	0,041 \pm 0,007	0,266
Valor medio	61,7	9,5	16,5	120,1	19,0	0,208	0,031	

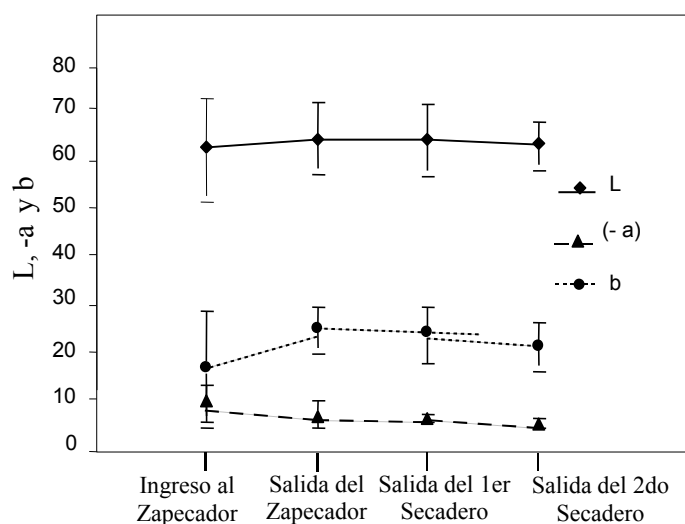


Figura 4.1. Parámetros de color L, -a y b en las hojas de yerba mate en las diferentes etapas del procesamiento

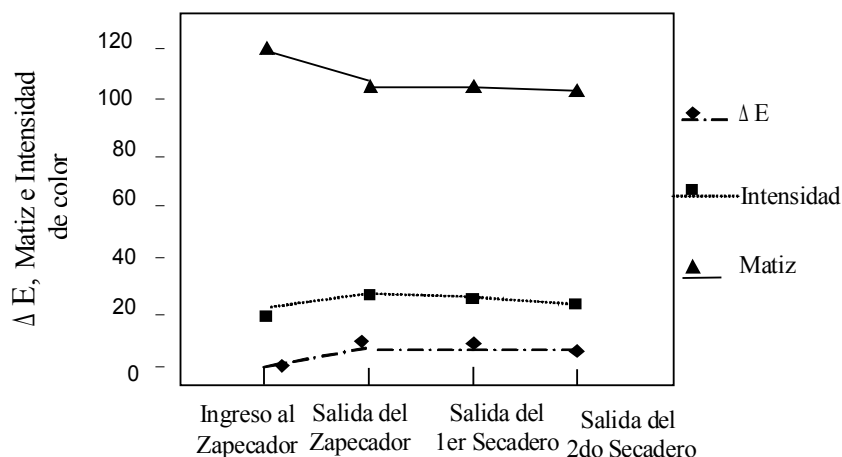


Figura 4.2. Variaciones de la diferencia total (ΔE), matiz e intensidad de color en las hojas de yerba mate en las diferentes etapas del procesamiento

El valor de “L” o grado de luminosidad aumentó ligeramente en la etapa de zapecado y se mantuvo prácticamente constante en las etapas siguientes. Por otra parte, se encontraron grandes diferencias en los valores de “a” (grado de verde) y de “b” (grado de amarillo), principalmente después del escaldado. “a” varió de $-9,13$ a $-5,46$ y “b” varió entre 17 y 21. La disminución de “a” y el incremento de “b” hicieron que el matiz variara mucho, principalmente durante el zapecado. El incremento del valor absoluto de “b” y la disminución del valor absoluto de “a” hicieron que la intensidad de color prácticamente no se modificara. La diferencia de color de las hojas tuvo una gran variación durante el zapecado y una pequeña variación durante las etapas de secado.

4.3.2. Clorofilas

El valor medio ponderado con el peso de cada fracción del contenido de clorofila total (*a* y *b*), expresado en base seca, fue de 6,02 mg/g de sólido seco en las hojas verdes; pero decreció a 1,18 mg/g de sólido seco después del zapecado y a 0,91 y 0,51 mg/g de sólido seco después de la primera y segunda etapa de secado, respectivamente. En el anexo 1 figuran los valores de contenidos de clorofila para cada una de las clases de hoja verde y las mediciones individuales en cada una de las etapas. Los porcentajes de degradación de las clorofilas *a*, *b* y total en las diferentes etapas del procesamiento se pueden observar en la Figura 4.3. El contenido de clorofilas decreció en gran medida en la etapa de zapecado, con pérdidas que

variaron entre el 70 % y el 80 %. Aunque el tiempo de residencia de las hojas en el zapecador es muy pequeño (2-3 minutos), los altos valores de actividad de agua y de temperatura en esta etapa son los responsables de la alta degradación que tienen las clorofilas. Estos valores de pérdida son similares a los encontrados en la literatura para el procesamiento térmico de vegetales (Canjura et al., 1991).

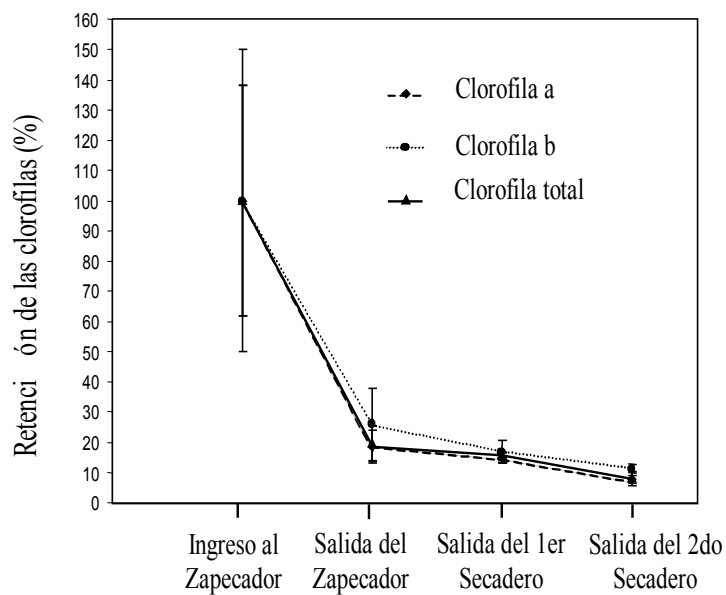


Figura 4.3. Retención (%) de las clorofilas a, b y total en las hojas de yerba mate en las diferentes etapas del procesamiento

Por otra parte, las menores degradaciones que sufren las clorofilas en las etapas de secado se podrían atribuir a los menores valores de temperatura que tienen las hojas en las mismas.

La clorofila *a* tuvo una mayor degradación que la clorofila *b* (92 y 88 %, respectivamente). Este comportamiento ya fue mencionado por otros autores trabajando con diversos materiales, por ejemplo habas, espinaca y brócoli. Schwartz y von Elbe (1983), trabajando con espinaca a las temperaturas de 116, 121 y 126 °C, encontraron que la velocidad de degradación de la clorofila *a* era el doble que la de la clorofila *b*; mientras Canjura et al. (1991), trabajando con puré del mismo vegetal a las temperaturas de 100, 115,

130 y 145 °C, encontraron que esta relación era de 2 a 6 veces. Steet y Tong (1996), trabajando con habas verdes a 70, 80 y 90 °C encontraron una relación de 2 entre estas velocidades. Van Loey et al. (1998), trabajando con el mismo producto a las temperaturas de 50, 60, 70 y 80°C y diferentes presiones, y Weemaes et al. (1999) trabajando entre 80 y 120°C con jugo de brócoli encontraron una relación de constantes de velocidad (a/b) entre 2 y 5.

Cuando se correlacionaron las concentraciones de clorofilas y los parámetros de color en las diferentes clases de hojas, se encontró una correlación positiva ($P<0,05$) entre los parámetros de color “-a”, “b” y L y los cambios de concentración para las clorofilas a , b y total, como se puede observar en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Correlación entre los contenidos de clorofilas a , b y total y los parámetros de color L, -a y b en las hojas sin procesar. En cada cuadro se presentan el coeficiente de correlación, el número de mediciones y el nivel de significación de la correlación.

	Clorofila a	Clorofila b	Clorofilas (a+b)	L	-a	b
Clorofila a	1,0000 (30) 0,0000	0,7769 (30) 0,0000	0,9946 (30) 0,0000	-0,9047 (30) 0,0000	0,7317 (30) 0,0000	-0,8931 (30) 0,0000
Clorofila b	0,7769 (30) 0,0000	1,0000 (30) 0,0000	0,8360 (30) 0,0000	-0,8361 (30) 0,0000	0,7098 (30) 0,0000	-0,8238 (30) 0,0000
Clorofilas (a+b)	0,9949 (30) 0,0000	0,8360 (30) 0,0000	1,0000 (30) 0,0000	-0,9208 (30) 0,0000	0,7529 (30) 0,0000	-0,9101 (30) 0,0000
L	-0,9047 (30) 0,0000	-0,8361 (30) 0,0000	-0,9208 (30) 0,0000	1,0000 (30) 0,0000	-0,8241 (30) 0,0000	0,9549 (30) 0,0000
-a	0,7317 (30) 0,0000	0,7098 (30) 0,0000	0,7529 (30) 0,0000	-0,8241 (30) 0,0000	1,0000 (30) 0,0000	-0,8937 (30) 0,0000
b	-0,8931 (30) 0,0000	-0,8238 (30) 0,0000	-0,9101 (30) 0,0000	0,9549 (30) 0,0000	-0,8937 (30) 0,0000	1,0000 (30) 0,0000

Pero cuando se correlacionaron las concentraciones de clorofilas y los parámetros de color en las etapas del procesamiento, se encontraron correlaciones positivas ($P<0,05$) entre el parámetro de color “-a” y los cambios de concentración para las clorofilas a y total; y entre el parámetro L y clorofila a, como se puede observar en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Correlación entre los contenidos de clorofilas *a*, *b* y total y los parámetros de color L, -a y b en las diferentes etapas del procesamiento. En cada cuadro se presentan el coeficiente de correlación, el número de mediciones y el nivel de significación de la correlación.

	Clorofila a	Clorofila b	Clorofilas (a+b)	L	-a	b
Clorofila a	1,0000 (18) 0,0000	0,8776 (18) 0,0000	0,9955 (18) 0,0000	-0,4832 (18) 0,0422	0,5390 (18) 0,0210	-0,3803 (18) 0,1196
Clorofila b	0,8776 (18) 0,0000	1,0000 (18) 0,0000	0,9130 (18) 0,0000	--0,3245 (18) 0,1889	0,2821 (18) 0,2568	0,2869 (18) 0,2483
Clorofilas (a+b)	0,9955 (18) 0,0000	0,9130 (18) 0,0000	1,0000 (18) 0,0000	-0,4622 (18) 0,0545	0,4985 (18) 0,0352	0,3699 (18) 0,1308
L	-0,4832 (18) 0,0422	-0,3245 (18) 0,1889	-0,4622 (18) 0,0545	1,0000 (18) 0,0000	-0,3697 (18) 0,1310	-0,6930 (18) 0,0014
-a	0,5390 (18) 0,0210	0,2821 (18) 0,2568	0,4985 (18) 0,0352	-0,3697 (18) 0,1310	1,0000 (18) 0,0000	0,6542 (18) 0,0032
b	-0,3803 (18) 0,1196	0,2869 (18) 0,2483	0,3699 (18) 0,1308	-0,6930 (18) 0,0014	0,6542 (18) 0,0032	1,0000 (18) 0,0000

4.3.3. Contenido de humedad

La figura 4.4 muestra las variaciones de contenido de humedad en las hojas y en los palos con distintos diámetros ($2,5 \cdot 10^{-3}$; $5 \cdot 10^{-3}$ y $7,5 \cdot 10^{-3}$ m) en las diferentes etapas del procesamiento. El contenido de humedad de las diferentes partes de las ramas varió entre el 59 y 65 % (base húmeda) antes de ingresar al zapecador (60 % para las hojas y 65 %, 63 % y 59 % para los palos de diámetros diferentes). El coeficiente de variación (relación entre la desviación standard y el valor medio) de las diferentes muestras varió entre 2,4 % y 2,6 %. Sin embargo el contenido de humedad varió en forma diferente en las hojas y palos en las diferentes etapas. También a la salida de los secaderos, la dispersión de los valores de contenido de humedad entre las muestras obtenidas en diferentes semanas fue muy importante, dando valores de coeficientes de variación que variaron entre 3 % y 42 %. Durante el zapecado, la pérdida de agua en las hojas fue mayor que la de los palos, debido principalmente a sus diferentes espesores (entre $0,27 \cdot 10^{-3}$ y $0,4 \cdot 10^{-3}$ m para las hojas y $2,5 \cdot 10^{-3}$ y $7,5 \cdot 10^{-3}$ m para los palos). Las pérdidas de humedad en el secado fueron importantes en los palos. Se encontró una gran variación en los contenidos de humedad en las muestras con

diferentes diámetros a la salida de los secaderos. Por ejemplo, a la salida de la segunda etapa de secado, el contenido de humedad varió desde un 11 % (b.h) en los palos de menor diámetro a 28 % (b.h) en los de mayor diámetro.

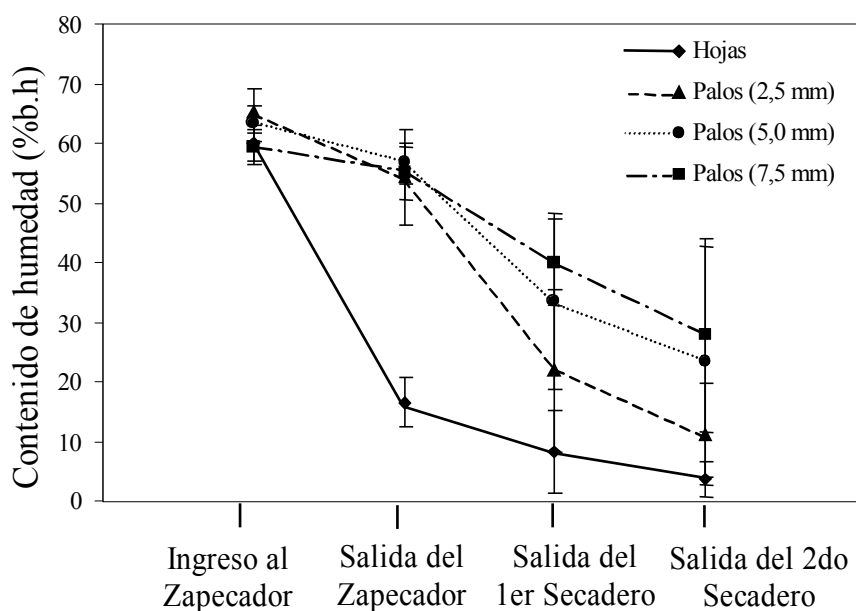


Figura 4.4. Contenido de humedad (% base húmeda) de las hojas y palos de yerba mate en las diferentes etapas del procesamiento

4.3.4. Cafeína

La pérdida total promedio de cafeína en las hojas fue de 30 % (8 % en el zapecado, 8 % en la primera etapa de secado y 13 % en la segunda etapa de secado) (Figura 4.5). La pérdida más alta tuvo lugar en la segunda etapa de secado. Esto se debe probablemente a que al tener un valor más alto de contenido de humedad en el zapecado y en la primera etapa de secado, se reduce su presión parcial por solubilidad en el agua, evitando las pérdidas por sublimación. Estos valores son bastante similares a los obtenidos por Bertoni et al. (1993) (30 y 13 % en las etapas de zapecado y secado) y difiere a los encontrados por Avanza et al. (1987)(11 y 21 %, respectivamente).

No obstante, las pérdidas de cafeína pueden considerarse bajas cuando se comparan con otros compuestos. De esta forma puede concluirse que no es conveniente seleccionar a la cafeína como parámetro a seguir en el modelado de las diferentes etapas del procesamiento,

ya que las variaciones encontradas son relativamente bajas y están en el orden de magnitud de las variaciones naturales que tienen las hojas de yerba mate y al error experimental de su determinación, aún cuando las diferencias sean estadísticamente significativas al 95 % de nivel de confianza.

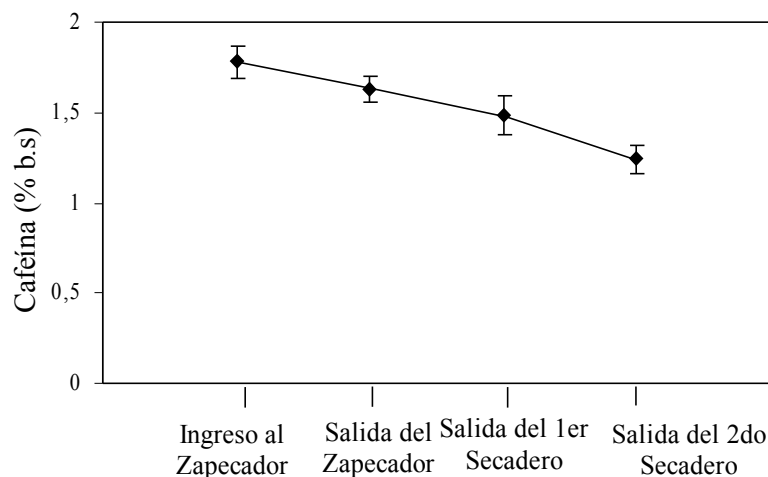


Figura 4.5. Cambio en el contenido de cafeína (% base seca) de las hojas de yerba mate en las diferentes etapas del procesamiento

4.4. CONCLUSIONES

Cuando se midieron las variaciones de color, clorofilas, cafeína y contenido de humedad en las diferentes etapas del procesamiento de la yerba mate (zapecado y dos etapas de secado), las mayores variaciones de color y contenido de clorofilas se encontraron en la etapa de zapecado. Por el contrario, las mayores variaciones de contenido de cafeína se encontraron en la segunda etapa de secado, cuando el material tenía menor contenido de humedad. No obstante las pérdidas de cafeína fueron mucho menores que las de clorofilas.

En las hojas, la pérdida de humedad fue mayor durante el zapecado, mientras que las pérdidas principales en los palos tuvieron lugar en las etapas de secado, con un tiempo de duración mayor. Se encontraron valores de contenido de humedad muy diferentes en los palos con diferentes diámetros.

CAPITULO 5

**BALANCES DE MASA Y
ENERGÍA EN EL
SECADERO**

5.1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo a lo manifestado en el capítulo 1 (puntos 1.4.2 y 1.4.3) las condiciones de trabajo en los establecimientos difieren mucho entre sí, en cuanto a las condiciones de procesamiento y el tiempo de residencia de la materia prima en los diferentes equipos. En la mayoría de ellos se realiza muy poco control de las condiciones de trabajo y sobre el producto final. Pero al comparar el contenido de humedad del producto a la salida, se encuentra bastante uniformidad entre los diferentes establecimientos, con valores que oscilan entre el 2 y el 4% , en base húmeda. Núñez y Känzig (1995) llevaron a cabo un relevamiento de las condiciones de trabajo en 6 establecimientos, encontrando los valores siguientes:

- Capacidad de procesamiento: 1.500 a 3.000 kg de ramas verdes/h
- Zapecador: tiempo de residencia de 2-4 minutos; temperaturas de los gases de salida entre 120 y 250°C y contenidos de humedad variables entre 29 y 34%, base húmeda
- Secaderos: cuatro empresas disponían de un presecador rotatorio y secaderos tipo cinta; temperatura del gas variable entre 100 y 330°C y tiempos de residencia entre 20 minutos y 6 horas.

Teniendo en cuenta esta variabilidad, se consideró conveniente realizar el estudio y modelado del procesamiento primario para un establecimiento en particular y modificar el mismo de acuerdo a las condiciones de trabajo de cada establecimiento. En este capítulo, se estudiaron los balances de masa y energía para un establecimiento en particular, en el que se realizaron las mediciones de las variables de trabajo.

5.2. MATERIALES Y MÉTODOS

5.2.1. Materia prima y procesamiento

La materia prima a procesar y las condiciones de procesamiento fueron descriptas en el punto 4.2.1.

5.2.2. Medición de la temperatura y la velocidad del aire

La temperatura del aire se midió utilizando termómetros de mercurio (con una precisión de +/- 0,1°C) y la velocidad de los gases utilizando un medidor tipo ventilador con cuentavueeltas, marca Wilh Lampracht KG, modelo 1400/351028, de origen alemán (con una precisión de +/-1 m/min) . Las mediciones se realizaban por triplicado en diferentes tiempos (cada 1 hora aproximadamente) y se utilizaba el valor medio. Se midieron en 10 días diferentes de acuerdo a lo mencionado en el punto 4.2.2.

5.2.3. Determinación del porcentaje de hojas y palos en las ramas verdes

Para determinar estos porcentajes se recolectaban muestras de ramas de diferentes partidas (aproximadamente 5 kg) y se llevaban al laboratorio, donde se separaban las hojas de los palos en forma manual y luego se pesaban por separado. Se obtenía una muestra en cada día de trabajo en los días de trabajo mencionados en el punto 4.2. 2.

5.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.3.1. Zapecador

Diagrama del zapecador

En la figura 5.1 se puede observar un diagrama de flujo de las corrientes de entrada y salida del zapecador.

Entrada de ramas

La cantidad de ramas procesadas fue estimada de datos otorgados por la empresa, considerando 7 días de trabajo, y es el siguiente:

$$R_1=3859,9 \text{ kg s/h.}$$

Los porcentajes de hojas y palos (valor medio \pm la desviación estándar), obtenidos de acuerdo a la metodología descrita, son:

Hojas = 65,33% \pm 4,33%

Palos = 34,67% \pm 4,33%.

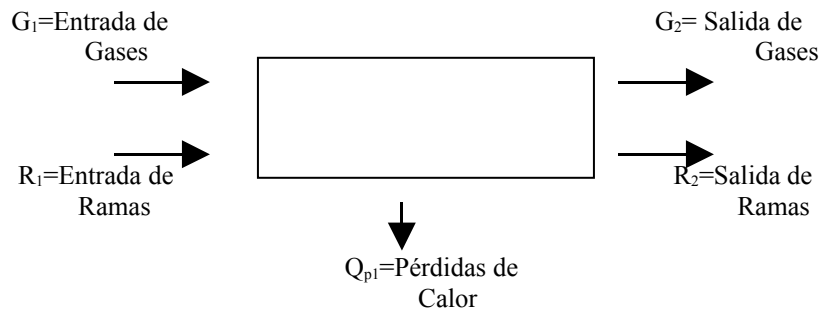


Figura 5.1. Diagrama de flujo de las corrientes de entrada y salida del zapecador.

Considerando el flujo total de ramas (R_1) y los porcentajes de hojas y palos, se calcularon los flujos de hojas (H_1) y palos (P_1) a ser procesados:

$$H_1 = R_1 * 0,6533 = 3859,9 \text{ kg s/h} * 0,6533 = 2521,7 \text{ kg s/h}$$

$$P_1 = R_1 * 0,3467 = 3859,9 \text{ kg s/h} * 0,3467 = 1338,2 \text{ kg s/h}.$$

Los valores promedio de los contenidos de humedad (expresados en kg agua/kg de sólido, o kg a/kg s) para las hojas (x_{h1}) y los palos (x_{p1}) a la entrada del zapecador obtenidos de los datos expuestos en el anexo 1 son:

$$x_{h1} = 0,5970 \text{ kg a/kg s}$$

$$x_{p1} = 0,6242 \text{ kg a/kg s}.$$

Considerando el flujo total de hojas (H_1) y palos (P_1) y sus contenidos de humedad, se calcularon los flujos de sólido seco de ambos materiales:

$$H_{S1} = H_1 * (1 - x_{h1}) = 2521,7 \text{ kg s/h} * (1 - 0,5970 \text{ kg a/kg s}) = 1016,2 \text{ kg ss/h}$$

$$P_{S1} = P_1 * (1 - x_{p1}) = 1338,2 \text{ kg s/h} * (1 - 0,6242 \text{ kg a/kg s}) = 502,9 \text{ kg ss/h}.$$

Realizando un balance de masa total (Treybal, 1980), se calculó la cantidad de agua que ingresa con las ramas de yerba mate (A_1):

$$R_1 = A_1 + Hs_1 + Ps_1$$

Por lo tanto:

$$A_1 = R_1 - Hs_1 - Ps_1 = 3859,9 \text{ kg s/h} - 1016,2 \text{ kg ss/h} - 502,9 \text{ kg ss/h} = 2340,8 \text{ kg a/h}$$

Cantidad de propano utilizado

La cantidad de propano utilizado en el zapecador fue suministrada por la empresa, y el valor dado corresponde al promedio de los 7 días de trabajo:

$$= 173,4 \text{ kg/h}$$

Flujo de aire de salida

La determinación del flujo de salida de los gases del zapecador (G_{s_2}) se realizó en el anexo 2, de acuerdo a la metodología descrita en materiales y métodos. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

$$G_{s_2} = 14328 \text{ kg gs/h}$$

$$Y_2 = 0,14 \text{ kg a/kg gs}$$

Salida de ramas

Los flujos de salida de sólido seco de las hojas (Hs_2) y los palos (Ps_2) son iguales a los de entrada, o sea:

$$Hs_2 = Hs_1 = 1016,2 \text{ kg ss/h}$$

$$Ps_2 = Ps_1 = 502,9 \text{ kg ss/h}$$

Los contenidos promedio de humedad de salida, que figuran en el anexo 1, son los siguientes:

$$\text{Hojas: } x_{h_2} = 0,1692 \text{ kg a/kg s}$$

$$\text{Palos: } x_{p_2} = 0,5588 \text{ kg a/kg s}$$

Con estos dos valores se calcularon el flujo de agua de salida (A_2), con las hojas (A_{h_2}) y los palos (A_{p_2}):

$$A_{H_2} = 1016,2 \text{ kg ss/h} * 0,1692 \text{ kg a/kg s} / (1 - 0,1692 \text{ kg a/kg s}) = 207,0 \text{ kg a/h}$$

$$A_{P_2} = 502,9 \text{ kg ss/h} * 0,5588 \text{ kg a/kg s} / (1 - 0,5588 \text{ kg a/kg s}) = 636,9 \text{ kg a/h}$$

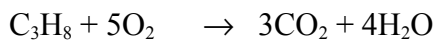
$$A_2 = A_{H_2} + A_{P_2} = 207,0 \text{ kg a/h} + 636,9 \text{ kg a/h} = 843,9 \text{ kg a/h}$$

El flujo total de salida del zapecador se obtuvo con un balance total de sólidos y humedad:

$$R_2 = H_{S_2} + P_{S_2} + A_2 = 1016,2 \text{ kg ss/h} + 502,9 \text{ kg ss/h} + 843,9 \text{ kg a/h} = 2363,0 \text{ kg s/h}$$

Gases y vapores generados en la combustión

Para estimar la cantidad de gases y vapores generados en la combustión, se consideró combustión completa del propano considerando el exceso de aire en la entrada. La misma se lleva a cabo de acuerdo a la siguiente reacción:



Los pesos moleculares de cada uno de los compuestos son:

Propano = 44 kg/kmol

Oxígeno = 32 kg/kmol

Anhidrido carbónico = 44 kg/kmol

Agua = 18 kg/kmol

Las cantidades generadas y consumidas se calcularon considerando la estequiometría de la reacción:

$$\text{Anhidrido carbónico} = \frac{3 * 44}{44} * 173 \text{ kg / h} = 520,2 \text{ kg / h}$$

$$\text{Agua} = \frac{4 * 18}{44} * 173 \text{ kg / h} = 283,7 \text{ kg / h}$$

$$\text{Oxígeno} = \frac{5 * 32}{44} * 173 \text{ kg / h} = 630,5 \text{ kg / h}$$

Flujo de aire seco y agua de entrada

Como es muy difícil medir el flujo de aire de entrada, el mismo se estimó a partir de un balance de masa en el zapecador:

Flujo de gas seco de salida = Flujo de aire seco de entrada + Flujo de propano
– Agua generada

$$G_{S1} = G_{S2} - \text{Flujo de propano} + \text{Agua generada}$$

$$G_{S1} = 14328 \text{ kg gs/h} - 173,4 \text{ kg g/h} + 283,7 \text{ kg a/h} = 14438,3 \text{ kg gs/h}$$

El contenido de humedad del aire de entrada se calculó a partir de un balance de agua en el zapecador:

$$G_{S1} * Y_1 + A_1 + \text{Agua generada} = G_{S2} * Y_2 + A_2$$

$$Y_1 = (G_{S2} * Y_2 + A_2 - A_1 - \text{Agua generada}) / G_{S1}$$

$$Y_1 = (14328 * 0,14 \text{ kg a/h} + 843,9 \text{ kg a/h} - 2340,8 \text{ kg a/h} - 283,7 \text{ kg a/h}) / 14438,3 \text{ kg gs/h}$$
$$= 0,0156 \text{ kg a/kg gs}$$

Calor generado por combustión del propano

Como se mencionó, se considera combustión completa del propano y en este caso el calor generado por la combustión (q) fue:

$$\text{Calor de combustión del propano} = 11016 \text{ kcal/kg}$$

$$q = 173,4 \text{ kg/h} * 11016 \text{ kcal/kg} = 1910174,4 \text{ kcal/h.}$$

Temperatura de los gases posterior a la combustión

Para calcular la temperatura de los gases de combustión se consideró que todo el calor se utilizó para calentar los gases; entonces la temperatura resultante fue:

$$t_{Gg} = t_{G1} + q / (G_{S1} C_s)$$

$$\begin{aligned}
C_{S1} &= 0,24 \text{ kcal/kg gs}^\circ\text{C} + 0,46 \text{ kcal/kg gs}^\circ\text{C} * Y \\
&= 0,24 \text{ kcal/kg gs}^\circ\text{C} + 0,46 * 0,0156 \text{ kcal/kg gs}^\circ\text{C} \\
&= 0,247 \text{ kcal/kg gs}^\circ\text{C}
\end{aligned}$$

$$t_{Gg} = 0^\circ\text{C} + 1910174,4 \text{ kcal/h} / (0,247 \text{ kcal/kg gs}^\circ\text{C} * 14328 \text{ kg gs/h}) = 559^\circ\text{C}.$$

Entalpía de entrada del aire

La entalpía del aire de entrada se debe calcular considerando una temperatura de referencia. Para simplificar los cálculos se seleccionó la temperatura de referencia igual a la temperatura del aire de entrada (20°C).

$$H_{G1} = C_{S1} * (t_{G1} - tr) + Y_1 * \lambda_0 = Y_1 * \lambda_0$$

$$H_{G1} = 0,0156 \text{ kg a/kg gs} * 586 \text{ kcal/kg a} = 9,14 \text{ kcal/kg gs}$$

$$\begin{aligned}
\text{Flujo total de energía de entrada} &= G_{S1} * H_{G1} = 4438,3 \text{ kg gs/h} * 9,14 \text{ kcal/kg gs} \\
&= 131966,1 \text{ kcal/h}
\end{aligned}$$

Entalpía de salida del aire

Como en el caso anterior, la entalpía se calculó utilizando una temperatura de referencia igual a 20°C.

$$H_{G2} = C_{S2} (t_{G2} - tr) + Y_2 * \lambda_0$$

$$\begin{aligned}
C_{S2} &= 0,24 \text{ kcal/kg gs}^\circ\text{C} + 0,46 \text{ kcal/kg gs}^\circ\text{C} * Y \\
&= 0,24 \text{ kcal/kg gs}^\circ\text{C} + 0,46 * 0,24 \text{ kcal/kg gs}^\circ\text{C} \\
&= 0,307 \text{ kcal/kg gs}^\circ\text{C}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
H_{G2} &= 0,307 \text{ kcal/kg gs}^\circ\text{C} * (120^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) + 0,14 \text{ kg a/kg gs} * 586 \text{ kcal/kg a} \\
&= 112,74 \text{ kcal/kg gs}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Flujo total de energía de salida} &= G_{S2} * H_{G2} = 14328 \text{ kg gs/h} * 112,74 \text{ kcal/kg gs} \\
&= 1615338,7 \text{ kcal/h}
\end{aligned}$$

Entalpía de entrada del sólido

Como se consideró como temperatura de entrada del aire que es igual a la temperatura de entrada del sólido, su entalpía es igual a 0.

Entalpía de salida del sólido

Para calcular la entalpía del sólido a la salida, se estimó su temperatura de salida en 100°C, ya que la temperatura del gas de salida es de 120°C.

$$h_{s2} = C_{sol} \cdot (t_{s2} - t_r) = H_2 \cdot h_{hojas} + P_2 \cdot h_{palos}$$

Los calores específicos de las hojas y los palos se calcularon utilizando una ecuación empírica (Schmalko et al., 1997) y con ella se calcularon las entalpías de las hojas y los palos:

$$\begin{aligned} C_{hojas} &= 0,428 \text{ kcal/kg s}^\circ\text{C} + 0,56 \text{ kcal/kg a}^\circ\text{C} \cdot x_{h2} \\ &= 0,428 \text{ kcal/kg s}^\circ\text{C} + 0,56 \text{ kcal/kg a}^\circ\text{C} \cdot 0,1692 \text{ kg a/kg s} \\ &= 0,52 \text{ kcal/kg s}^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{palos} &= 0,428 \text{ kcal/kg s}^\circ\text{C} + 0,56 \text{ kcal/kg a}^\circ\text{C} \cdot x_{p2} \\ &= 0,428 \text{ kcal/kg s}^\circ\text{C} + 0,56 \text{ kcal/kg a}^\circ\text{C} \cdot 0,5588 \text{ kg a/kg s} \\ &= 0,74 \text{ kcal/kg s}^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$h_{hojas} = 0,52 \text{ kcal/kg s}^\circ\text{C} \cdot (100^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 41,6 \text{ kcal/kg s}$$

$$h_{palos} = 0,74 \text{ kcal/kg s}^\circ\text{C} \cdot (100^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 59,2 \text{ kcal/kg s}$$

Los flujos totales de hojas (H_2) y palos (P_2) a la salida, se calcularon con los flujos de sólido seco y los contenidos de humedad:

$$H_2 = H_s / (1 - x_{h2}) = 1016,2 \text{ kg ss/h} / (1 - 0,1692 \text{ kg a/ kg s}) = 1223,2 \text{ kg s/h}$$

$$P_2 = P_s / (1 - x_{p2}) = 502,9 \text{ kg ss/h} / (1 - 0,5588 \text{ kg a/ kg s}) = 1139,8 \text{ kg s/h}$$

El flujo de ramas es la suma del flujo de hojas y palos:

$$R_2 = H_2 + P_2 = 1223,2 \text{ kg s/h} + 1139,8 \text{ kg s/h} = 2363,0 \text{ kg s/h}$$

El flujo de energía de las ramas a la salida, se calculó utilizando los valores de entalpías de las hojas, los palos y sus flujos:

$$\begin{aligned} R_2 \cdot h_{s2} &= H_2 \cdot h_{hojas} + P_2 \cdot h_{palos} \\ &= 1223,2 \text{ kg s/h} \cdot 41,6 \text{ kcal/kg s} + 1139,8 \text{ kg s/h} \cdot 59,2 \text{ kcal/kg s} \\ &= 118361,3 \text{ kcal/h} \end{aligned}$$

Determinación de las Pérdidas de Calor

Las pérdidas de calor se estimaron con un balance de energía total (Treybal, 1980).

$$\begin{aligned} Q_{P1} &= \text{Flujos de energía con las corrientes de entrada} + \text{Calor generado por la} \\ &\quad \text{combustión} - \text{Flujos de energía con las corrientes de salida} \\ &= G_{S1} * H_{G1} + R_1 * h_{s1} + \text{Calor generado por la combustión} - (R_2 * h_{s2} + G_{S2} * H_{G2}) \\ &= 131966,1 \text{ kcal/h} + 0 + 1910174,4 \text{ kcal/h} - 1615338,7 \text{ kcal/h} - 118361,3 \text{ kcal/h} \\ &= 308440,5 \text{ kcal/h} \end{aligned}$$

5.3.2. Primer secadero

Diagrama de flujo

En la figura 5.2 se puede observar un diagrama de flujo de las corrientes de entrada y salida del primer secadero.

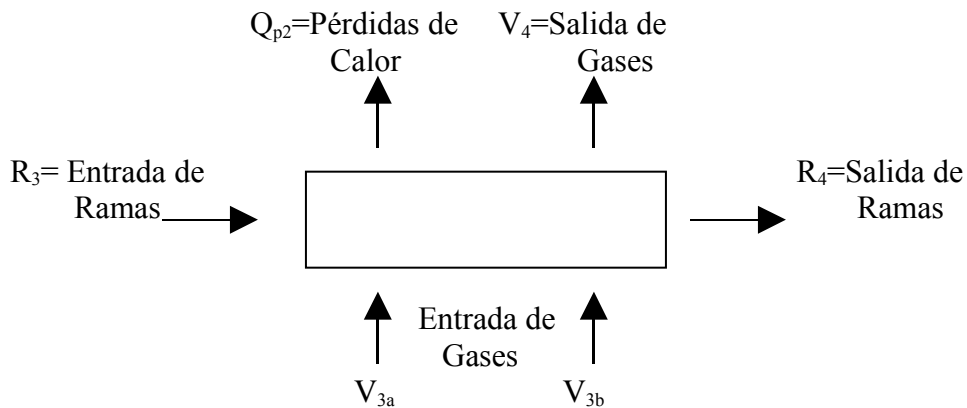


Figura 5.2. Diagrama de flujo de las corrientes de entrada y salida del primer secadero.

Entrada de ramas

Las cantidades de hojas (H_{S3}) y palos (P_{S3}) que entran al primer secadero son iguales a las que salen del zapecador. Los flujos de sólido seco son:

$$H_{S3} = H_{S2} = 1016,2 \text{ kg ss/h}$$

$$P_{S3} = P_{S2} = 502,9 \text{ kg ss/h}$$

Los contenidos de humedad de las hojas (x_{h3}) y los palos (x_{p3}) son:

$$x_{h3} = x_{h2} = 0,1692 \text{ kg a/kg s}$$

$$x_{p3} = x_{p2} = 0,5588 \text{ kg a/kg s}$$

El agua contenida en las hojas (A_{h3}) y palos (A_{p3}), es:

$$\begin{aligned} A_{h3} &= H_{S3} * x_{h3} / (1 - x_{h3}) = 1016,2 \text{ kg ss/h} * 0,1692 \text{ kg a/kg s} / (1 - 0,1692 \text{ kg a/kg s}) \\ &= 207,0 \text{ kg a/h} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{p3} &= P_{S3} * x_{p3} / (1 - x_{p3}) = 502,9 \text{ kg ss/h} * 0,5588 \text{ kg a/kg s} / (1 - 0,5588 \text{ kg a/kg s}) \\ &= 636,9 \text{ kg a/h} \end{aligned}$$

La cantidad total de agua (A_3), es la suma de ambas cantidades:

$$A_3 = A_{h3} + A_{p3} = 207,0 \text{ kg a/h} + 636,9 \text{ kg a/h} = 843,9 \text{ kg a/h}$$

El flujo de ramas (R_3) que entra al secadero es igual al flujo que sale del zapeador, por lo tanto:

$$R_3 = R_2 = 2363,0 \text{ kg s/h}$$

y el contenido medio de humedad es : $x_3 = x_2 = 0,357 \text{ kg a/kg s}$

El calor específico se calculó a partir de una ecuación empírica (Schmalko et al., 1997) y a partir de ellas se calculó la entalpía:

$$C_{sol3} = 0,428 \text{ kcal/kg s}^\circ\text{C} + 0,56 \text{ kcal/kg a}^\circ\text{C} * 0,357 \text{ kg a/kg s} = 0,628 \text{ kcal/kg s}^\circ\text{C}$$

$$h_{sólido} = 0,628 \text{ kcal/kg s}^\circ\text{C} * (50^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 18,8 \text{ kcal/kg s}$$

(La temperatura de entrada al primer secadero se estimó en 50°C , medida en el lecho del sólido).

Entrada de gases

Los valores de caudal (V_{3a} y V_{3b}) y temperatura (t_{G3a} y t_{G3b}) fueron medidos en las dos entradas del secadero y son (anexo 2):

$$V_{3a} = 16157 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$t_{G3a} = 110^\circ\text{C}$$

$$Y_{3a} = 0,0156 \text{ kg a/kg gs (Ver 5.3.1, p.6)}$$

$$V_{3b} = 15842 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$t_{G3b} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$Y_{3b} = 0,0156 \text{ kg a/kg gs (Ver 5.3.1, p.6)}$$

Los volúmenes húmedos (v_{H3a} y v_{H3b}) y los flujos de ambas corrientes (G_{S3a} y G_{S3b}), son:

$$v_{H3a} = \left(\frac{1}{29} + \frac{0,0156}{18} \right) \frac{\text{kmol}}{\text{kg}} 0,082 \frac{\text{m}^3 \text{ atm}}{\text{kmol}^\circ \text{K}} \frac{(110 + 273,2)^\circ \text{K}}{1 \text{ atm}} = 1,11 \text{ m}^3 / \text{kg gs}$$

$$G_{S3a} = \frac{V_{3a}}{v_{H3a}} = \frac{16157 \text{ m}^3 / \text{h}}{1,11 \text{ m}^3 / \text{kg}_{\text{gas}}} = 14555,9 \text{ kg gs} / \text{h}$$

$$v_{H3b} = \left(\frac{1}{29} + \frac{0,0156}{18} \right) \frac{\text{kmol}}{\text{kg}} 0,082 \frac{\text{m}^3 \text{ atm}}{\text{kmol}^\circ \text{K}} \frac{(100 + 273,2)^\circ \text{K}}{1 \text{ atm}} = 1,08 \text{ m}^3 / \text{kg gs}$$

$$G_{S3b} = \frac{V_{3b}}{v_{H3b}} = \frac{15842 \text{ m}^3 / \text{h}}{1,08 \text{ m}^3 / \text{kg g}} = 14668,5 \text{ kg gs} / \text{h}$$

La entalpía de entrada de los gases, es:

$$Cs_3 = 0,24 \text{ kcal/kg gs}^\circ\text{C} + 0,46 \text{ kcal/kg a}^\circ\text{C} * 0,0156 \text{ kg a/kg gs} = 0,247 \text{ kcal/kg gs}^\circ\text{C}$$

$$H_{G3a} = 0,247 \text{ kcal/kg gs}^\circ\text{C} * (110 \text{ }^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) + 0,0156 * 586 \text{ kcal/kg gs} = 31,37 \text{ kcal/kg gs}$$

$$H_{G3b} = 0,247 \text{ kcal/kg gs}^\circ\text{C} * (100 \text{ }^\circ\text{C} - 20 \text{ }^\circ\text{C}) + 0,0156 * 586 \text{ kcal/kg gs} = 28,90 \text{ kcal/kg gs}$$

Salida de gases

La temperatura de salida de los gases tiene un valor medio de 47°C (anexo 2) y el flujo de gas seco es la suma de los flujos de entrada:

$$G_{S4} = G_{S3a} + G_{S3b} = 14555,9 \text{ kg gs} / \text{h} + 14668,5 \text{ kg gs} / \text{h} = 29224,4 \text{ kg gs} / \text{h}$$

Salida de ramas

Como el flujo de material seco permanece constante, se tiene que

$$H_{S4} = H_{S3} = 1016,2 \text{ kg ss/h}$$

$$P_{S4} = P_{S3} = 502,9 \text{ kg ss/h}$$

Los contenidos de humedad se determinaron experimentalmente (Cap 4):

$$\text{Hojas: } x_{h4} = 0,0557 \text{ kg a/kg s}$$

$$\text{Palos: } x_{p4} = 0,2492 \text{ kg a/kg s}$$

El flujo total de agua que sale con las hojas (A_{h4}) y los palos (A_{p4}), se calculó con los valores de flujo seco y los contenidos de humedad:

$$\begin{aligned} A_{h4} &= H_{S3} * x_{h4} / (1 - x_{h4}) = 1016,2 \text{ kg ss/h} * 0,0557 \text{ kg a/kg s} / (1 - 0,0557 \text{ kg a/kg s}) \\ &= 59,9 \text{ kg a/h} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{p4} &= P_{S3} * x_{p4} / (1 - x_{p4}) = 502,9 \text{ kg ss/h} * 0,2492 \text{ kg a/kg s} / (1 - 0,2492 \text{ kg a/kg s}) \\ &= 166,9 \text{ kg a/h} \end{aligned}$$

La cantidad total de agua (A_4), es la suma de ambas cantidades:

$$A_4 = A_{h4} + A_{p4} = 59,9 \text{ kg a/h} + 166,9 \text{ kg a/h} = 226,8 \text{ kg a/h}$$

El flujo total de ramas húmedas (R_4), es:

$$R_4 = H_{S4} + P_{S4} + A_4 = 1016,2 \text{ kg ss/h} + 502,9 \text{ kg ss/h} + 226,8 \text{ kg a/h} = 1745,9 \text{ kg s/h},$$

y su contenido medio de humedad es: $x_4 = 0,1299 \text{ kg a/kg s}$

La entalpía del sólido se calculó utilizando el calor específico del material y una temperatura estimada de 80°C :

$$C_{sol4} = 0,428 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C} + 0,56 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C} * 0,1299 \text{ kg a/kg s} = 0,501 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$$

$$h_{s4} = 0,501 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C} * (80^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 30,1 \text{ kcal/kg s}$$

Balance de agua

Se realizó un balance de agua para determinar la humedad absoluta del aire a la salida (Y_4'):

$$Gs_{a3}Y_3' + Gs_{b3}Y_3' + SsX_3' = Gs_4Y_4' + SsX_4'$$

$$Y_4' = \frac{SsX_3' - SsX_4' + Gs_{a3}Y_3' + Gs_{b3}Y_3'}{Gs_4}$$

$$Y_4' = \frac{843,9 \text{ kg a/h} - 226,8 \text{ kg a/h} + 14555,9 * 0,0156 \text{ kg a/h} + 14668,5 * 0,0156 \text{ kg a/h}}{29224,4 \text{ kg gs/h}} = 0,0367 \text{ kg a/kg gs}$$

Balance de Energía

El balance de energía se realizó para determinar las pérdidas de calor en este secadero.

Para realizar este balance, en primer término se calculó el calor específico y la entalpía de la corriente gaseosa de salida (H_{G4}):

$$Cs_4 = 0,24 \text{ kcal/kg gs}^\circ\text{C} + 0,46 * 0,0367 \text{ kcal/kg gs}^\circ\text{C} = 0,257 \text{ kcal/kg gs}^\circ\text{C}$$

$$H_{G4} = 0,257 \text{ kcal/kg gs}^\circ\text{C} * (47-20)^\circ\text{C} + 0,0367 * 586 \text{ kcal/kg gs} = 28,4 \text{ kcal/kg gs}$$

Flujo de energía de las corrientes de entrada = Flujo de energía de las corrientes de salida + Pérdidas de calor

$$Gs_{a3}H_{G3a} + Gs_{b3}H_{G3b} + R_3h_{S3} = Gs_4H_{G4} + R_4h_{S4} + Qp_2$$

$$Qp_2 = (Gs_{a3}H_{G3a} + Gs_{b3}H_{G3b} + R_3h_{S3}) - (Gs_4H_{G4} + R_4h_{S4})$$

$$Qp_2 = (14555,9 * 31,7 \text{ kcal/h} + 14668,5 * 28,9 \text{ kcal/h} + 2363,0 * 18,8 \text{ kcal/h}) - (29224,4 * 28,4 \text{ kcal/h} + 1745,9 * 30,1 \text{ kcal/h})$$

$$Qp_2 = 47241,5 \text{ kcal/h}$$

5.3.3. Segundo secadero

Diagrama de Flujo

En la figura 5.3 se puede observar un diagrama de flujo de las corrientes de entrada y salida al segundo secadero.

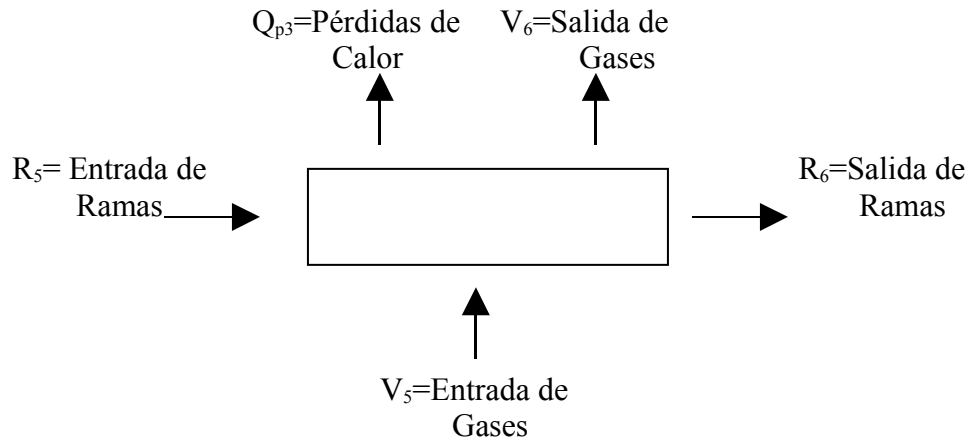


Figura 5.3. Diagrama de flujo de las corrientes de entrada y salida al segundo secadero.

Entrada de ramas

Los flujos de material seco y de contenido de humedad de entrada a este secadero (H_{S5} y P_{S5}) coinciden con los de la salida del primer secadero:

$$H_{S5} = H_{S4} = 1016,2 \text{ kg s/h}$$

$$P_{S5} = P_{S4} = 502,9 \text{ kg s/h}$$

$$x_{h5} = x_{h4} = 0,0557 \text{ kg a/kg s}$$

$$x_{p5} = x_{p4} = 0,2492 \text{ kg a/kg s}$$

El agua contenida en las hojas (A_{h5}) y palos (A_{p5}), es:

$$A_{h5} = H_{S5} * x_{h5} / (1 - x_{h5}) = 1016,2 \text{ kg/h} * 0,0557 \text{ kg a/kg s} / (1 - 0,0557 \text{ kg a/kg s}) = 59,9 \text{ kg a/h}$$

$$A_{p5} = P_{S5} * x_{p5} / (1 - x_{p5}) = 502,9 \text{ kg/h} * 0,2492 \text{ kg a/kg s} / (1 - 0,2492 \text{ kg a/kg s}) = 166,9 \text{ kg a/h}$$

La cantidad total de agua (A_5), es la suma de ambas cantidades:

$$A_5 = A_{h5} + A_{p5} = 59,9 \text{ kg a/h} + 166,9 \text{ kg a/h} = 226,8 \text{ kg a/h}$$

El flujo total de entrada de ramas (R_5), es la suma de los flujos de hojas y palos secos y el agua total que ingresa:

$$R_5 = H_{s5} + P_{s5} + A_5 = 1016,2 \text{ kg s/h} + 502,9 \text{ kg s/h} + 226,8 \text{ kg a/h} = 1745,9 \text{ kg/h}$$

Su contenido medio de humedad es:

$$x_5 = A_5/R_5 = 226,8 \text{ kg a/h} / 1745,9 \text{ kg s/h} = 0,1299 \text{ kg a/kg s}$$

El calor específico y entalpía del sólido (h_{s5}), son:

$$C_{s5} = 0,428 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C} + 0,56 * 0,1299 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C} = 0,501 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$$

$$h_{s5} = 0,501 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C} * (60 \text{ } ^\circ\text{C} - 20 \text{ } ^\circ\text{C}) = 20,0 \text{ kcal/kg s}$$

Se estima una temperatura media de entrada del sólido de 60°C .

Entrada de gases

El flujo de gas (V_5), su temperatura (t_{G5}) y humedad absoluta (Y_5), se calcularon en el anexo 2, y son:

$$V_5 = 11158,6 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$t_{G5} = 100^\circ\text{C}$$

$$Y_5 = 0,0156 \text{ kg a/kg gs}$$

El volumen húmedo (v_{H5}) se calculó para estimar el flujo de gas seco (G_{s5}):

$$v_{H5} = \left(\frac{1}{29} + \frac{0,0156}{18} \right) \frac{\text{kmol}}{\text{kg}} * 0,082 \frac{\text{m}^3 \text{ atm}}{\text{kmol}^\circ\text{K}} \frac{(100 + 273,2)^\circ\text{K}}{1 \text{ atm}} = 1,08 \text{ m}^3 / \text{kg gs}$$

$$G_{s5} = \frac{V_5}{v_{H5}} = \frac{11158,67 \text{ m}^3 / \text{h}}{1,08 \text{ m}^3 / \text{kg gs}} = 10332,0 \text{ kg gs} / \text{h}$$

La entalpía de entrada (H_{G5}), es:

$$C_{s5} = 0,24 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C} + 0,46 * 0,0156 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C} = 0,247 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$$

$$H_{G5} = 0,247 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C} * (100 \text{ } ^\circ\text{C} - 20 \text{ } ^\circ\text{C}) + 0,0156 * 586 \text{ kcal/kg gs} = 28,9 \text{ kcal/kg gs}$$

Salida de gases

La temperatura de salida de los gases se midió experimentalmente y su valor promedio fue de 60°C. El valor del flujo de gas seco de salida es igual al flujo de gas seco de entrada:

$$Gs_6 = Gs_5 = 10332,0 \text{ kg gs / h}$$

Salida de ramas

El flujo seco de hojas (Hs_6) y palos (Ps_6) es igual al de entrada al secadero, por lo tanto:

$$Hs_6 = Hs_5 = 1016,2 \text{ kg s/h}$$

$$Ps_6 = Ps_5 = 502,9 \text{ kg s/h}$$

Los contenidos de humedad de las hojas (x_{h6}) y los palos (x_{p6}) se midieron experimentalmente (Cap. 4), y son:

$$x_{h6} = 0,0344 \text{ kg a/kg s}$$

$$x_{p6} = 0,1719 \text{ kg a/kg s}$$

El agua contenida en las hojas (Ah_6) y palos (Ap_6), es:

$$Ah_6 = Hs_6 * x_{h6} / (1 - x_{h6}) = 1016,2 \text{ kg s/h} * 0,0344 \text{ kg a/kg s} / (1 - 0,0344 \text{ kg a/kg s}) = 36,2 \text{ kg/h}$$

$$Ap_6 = Ps_6 * x_{p6} / (1 - x_{p6}) = 502,9 \text{ kg s/h} * 0,1719 \text{ kg a/kg s} / (1 - 0,1719 \text{ kg a/kg s}) = 104,4 \text{ kg/h}$$

La cantidad total de agua (A_6), es la suma de ambas cantidades:

$$A_6 = Ah_6 + Ap_6 = 36,2 \text{ kg a/h} + 104,4 \text{ kg a/h} = 140,6 \text{ kg a/h}$$

La cantidad de ramas totales a la salida (R_6) es la suma de los flujos secos y del agua:

$$R_6 = Hs_6 + Ps_6 + A_6 = 1016,2 \text{ kg ss/h} + 502,9 \text{ kg ss/h} + 140,6 \text{ kg a/h} = 1659,7 \text{ kg/h}$$

Su contenido medio de humedad es:

$$x_6 = A_6 / R_6 = 140,6 \text{ kg a/h} / 1659,7 \text{ kg s/h} = 0,085 \text{ kg a/kg s}$$

El calor específico (C_{s6}) y entalpía del sólido (h_{s6}) se calcularon considerando una temperatura media de salida del sólido igual a 60°C :

$$C_{s6} = 0,428 \text{ kcal/kg } s^\circ\text{C} + 0,56 * 0,085 \text{ kcal/kg } s^\circ\text{C} = 0,476 \text{ kcal/kg } ss^\circ\text{C}$$

$$h_{s6} = 0,476 \text{ kcal/kg } ss^\circ\text{C} * (60^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 19,0 \text{ kcal/kg } ss$$

Balance de agua

Se realizó un balance de agua para estimar la humedad absoluta del gas a la salida (Y'_6):

$$G_{s5}Y'_5 + S_sX'_5 = G_{s6}Y'_6 + S_sX'_6$$

$$Y'_6 = \frac{S_sX'_5 - S_sX'_6 + G_{s5}Y'_5}{G_{s6}}$$

$$Y'_6 = \frac{226,8 \text{ kg a/h} - 140,6 \text{ kg a/h} + 10332,0 * 0,0156 \text{ kg a/h}}{10332,0 \text{ kg gs/h}} = 0,0239 \text{ kg a/kg gs}$$

Balance de Energía

El balance de energía se realizó para determinar las pérdidas de calor en este secadero.

Para realizar este balance, en primer término se calculó el calor específico (C_{s6}) y la entalpía (H_{G6}) de la corriente gaseosa de salida:

$$C_{s6} = 0,24 \text{ kcal/kg } gs^\circ\text{C} + 0,46 * 0,0239 \text{ kcal/kg } gs^\circ\text{C} = 0,251 \text{ kcal/kg } gs^\circ\text{C}$$

$$H_{G6} = 0,251 \text{ kcal/kg } gs^\circ\text{C} * (60^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) + 0,0239 * 586 \text{ kcal/kg } gs = 24,0 \text{ kcal/kg } gs$$

Flujo de energía de las corrientes de entrada = Flujo de energía de las corrientes de salida + Pérdidas de calor

$$G_{s5}H_{G5} + R_5h_{s5} = G_{s6}H_{G6} + R_6h_{s6} + Q_{p3}$$

$$Q_{p3} = (G_{s5}H_{G5} + R_5h_{s5}) - (G_{s6}H_{G6} + R_6h_{s6})$$

$$Qp_3 = (10332,0 * 28,9 \text{ kcal / h} + 1745,9 * 20,0 \text{ kcal / h})$$

$$- (10332,0 * 24,0 \text{ kcal / h} + 1659,7 * 19,0 \text{ kcal / h})$$

$$Qp_3 = 54010,5 \text{ kcal / h}$$

5.3.4. Canchadora o molienda gruesa

Diagrama de flujo

En la figura 5.4 se puede observar un diagrama de flujo de las corrientes de entrada y salida a la canchadora.

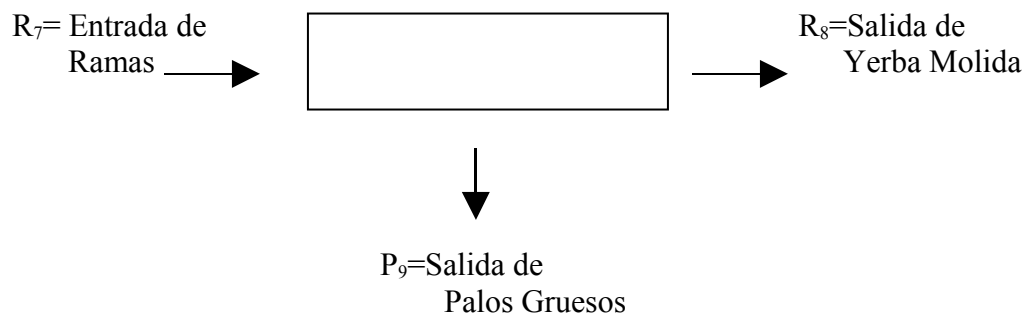


Figura 5.4. Diagrama de flujo de las corrientes de entrada y salida a la canchadora.

Entrada de ramas

Los flujos de material seco (Hs_7 y Ps_7) y de contenido de humedad de entrada a este secadero coinciden con los de la salida del segundo secadero:

$$Hs_7 = Hs_6 = 1016,2 \text{ kg ss/h}$$

$$Ps_7 = Ps_6 = 502,9 \text{ kg ss/h}$$

$$x_{h7} = x_{h6} = 0,0344 \text{ kg a/kg s}$$

$$x_{p7} = x_{p6} = 0,1719 \text{ kg a/kg s}$$

Salida de palos gruesos

El flujo de salida de palos se obtuvo a partir de los datos que la empresa dispone y las horas de trabajo; mientras que el contenido de humedad corresponde al de los palos mas gruesos (Cap. 4):

$$P_{s9} = 50,3 \text{ kg s/h}$$

$$x_{p9} = 0,2173 \text{ kg a/kg s}$$

Salida de yerba molida

En las hojas no se modifica el flujo ni el contenido de humedad, y es por lo tanto:

$$H_{s8} = H_{s7} = 1016,2 \text{ kg ss/h}$$

$$x_{h8} = x_{h7} = 0,0344 \text{ kg a/kg ss}$$

El flujo de palos a la salida y su contenido de humedad se calcula realizando balances de masa.

Balance de palos secos:

Flujo de salida de palos finos = Flujo de entrada de palos – flujo de salida de palos gruesos

$$P_{s8} = P_{s7} - P_{s9} = 502,9 \text{ kg ss/h} - 50,3 \text{ kg ss/h} = 452,6 \text{ kg ss/h}$$

$$X_{p7} = 0,1719 \text{ kg a/kg s} / (1 - 0,1719 \text{ kg a/kg s}) = 0,2076 \text{ kg a/kg ss}$$

$$X_{p9} = 0,2173 \text{ kg a/kg s} / (1 - 0,2173 \text{ kg a/kg s}) = 0,2777 \text{ kg a/kg ss}$$

Balance de agua en los palos:

$$P_{s8} * X_{p8} = P_{s7} * X_{p7} - P_{s9} * X_{p9}$$

$$X_{p8} = \frac{P_{s7} * X_{p7} - P_{s9} * X_{p9}}{P_{s8}} = \frac{502,9 * 0,2076 \text{ kg a/h} - 50,3 * 0,2777 \text{ kg a/h}}{452,6 \text{ kg ss/h}} = 0,1998 \text{ kg a/kg ss}$$

El flujo total y su contenido de humedad, se calcularon realizando los balances de masa:

$$X_{h8} = 0,0344 \text{ kg a/kg s} / (1 - 0,0344 \text{ kg a/kg s}) = 0,0356 \text{ kg a/kg ss}$$

Flujo total de salida de la canchadora (R_8):

Flujo total de salida = Flujo de salida de hojas + Flujo de salida de palos

$$R_8 = H_{s8}(1 + X_{h8}) + P_{s8}(1 + X_{p8})$$

$$= 1016,2 \text{ kg ss/h} * (1 + 0,0356 \text{ kg a/kg ss}) + 452,6 \text{ kg ss/h} * (1 + 0,1998 \text{ kg a/kg ss}) = 1595,4 \text{ kg/h}$$

Balance de agua:

$$(Hs_8 + Ps_8) * X_8 = Hs_8 * X_{h8} + Ps_8 * X_{p8}$$

$$X_8 = \frac{Hs_8 * X_{h8} + Ps_8 * X_{p8}}{Hs_8 + Ps_8}$$
$$= \frac{1016,2 \text{ kg ss} / \text{h} * 0,0356 \text{ kg a} / \text{kg ss} + 452,6 \text{ kg ss} / \text{h} * 0,1998 \text{ kg a} / \text{kg ss}}{1016,2 \text{ kg ss} / \text{h} + 452,6 \text{ kg ss} / \text{h}} = 0,0862 \text{ kg a} / \text{kg ss}$$

$$x_8 = 0,0862 \text{ kg a} / \text{kg ss} / (1 + 0,0862 \text{ kg a} / \text{kg ss}) = 0,0794 \text{ kg a} / \text{kg s}$$

5.3.5. Discusión

Se realizaron los balances de masa y energía en las diferentes etapas del procesamiento primario de la yerba mate.

Mediante el balance de masa se determinaron los diferentes flujos de las corrientes de entrada y salida en cada uno de los equipos. De estos cálculos se puede destacar la gran pérdida de humedad que tiene lugar en el zapecador (principalmente en las hojas) y el menor valor en las etapas 1 y 2 de secado (principalmente en los palos).

Con respecto a las humedades de salida de las corrientes gaseosas, se puede decir que en el zapecador el valor de humedad absoluta es alto ($0,14 \text{ Kg}_{\text{agua}}/\text{Kg}_{\text{gas}}$), pero también es alta su temperatura, resultando en un valor bajo de humedad relativa. De acuerdo a estos resultados, de esta corriente se podría recuperar parte del calor. Las otras dos corrientes están constituidas por aire a bajas humedades y también a bajas temperaturas, por lo que resultaría conveniente reutilizarlas. No obstante se podría mejorar la eficiencia de la segunda etapa de secado, especialmente en las primeras secciones del secadero, reduciendo el flujo de gas para obtener una mayor humedad absoluta en el aire de salida, ya que la relativa es bastante baja (20%, aproximadamente).

Mediante el balance de energía se determinaron las pérdidas de calor en cada uno de los equipos. De las pérdidas totales, el 75% correspondió al zapecador y el 25% restante se perdía en los dos secaderos en porcentajes similares.

Para estimar la eficiencia energética del proceso, se calculó la energía total generada en el zapecado y en los dos secaderos. Para calcular la energía utilizada, se consideró el agua evaporada en las tres etapas y se multiplicó por el calor latente de evaporación (no se consideró el calor de adsorción). De acuerdo a esto, el 45,1% del calor generado se utilizó para evaporar el agua, el 14,3% correspondió a las pérdidas de calor en los equipos y el 40,6% restante fue calor no utilizado y es el que se perdía con las corrientes gaseosas, sólidas y para calentar el sólido.

En la bibliografía se citan eficiencias térmicas de secaderos. Así para los rotatorios, las eficiencias varían entre el 55 y 75% (Perry and Green, 1997; pp.12-56); mientras que el zapecador tiene una eficiencia térmica del 46,0%. En los secaderos, las eficiencias fueron del 51,0% en el primero y del 21,2% en el segundo. Como era de esperar, la eficiencia es menor en el segundo secadero, debido a la dificultad de extraer agua a bajos contenidos de humedad, por su elevado calor de adsorción. En la bibliografía se citan eficiencias térmicas de alrededor del 55% (Mujundar, A.S., 1995; pp. 535). Respecto al calor no utilizado que se perdía con las corrientes (40,6%), en el mismo libro se cita un valor similar.

5.4. CONCLUSIONES

Al realizar los balances de masa y energía en un secadero de yerba mate se encontró que los gases de salida del zapecador tenían una relativamente elevada temperatura y baja humedad relativa, con lo que podría recuperarse parte de este calor. Las corrientes de salida de los dos secaderos tuvieron una relativamente baja temperatura y alta humedad relativa.

Del balance de energía se concluye que las pérdidas de calor son relativamente altas y que la eficiencia energética del zapecador y del segundo secadero están por debajo de los valores encontrados en la bibliografía.

5.5. NOMENCLATURA

A	Flujo de agua	kg/h
---	---------------	------

Cs	Calor específico del gas húmedo	kcal/kg gs°C
Csol	Calor específico del sólido	kcal/kg ss°C
Gs	Flujo de aire seco	kg gs/h
H	Flujo de hojas (total, incluyendo el agua)	kg s/h
H _G	Entalpía del gas	kcal/k gs
Hs	Flujo de hojas secas	kg ss/h
hs	Entalpía del sólido	kcal /kg ss
P	Flujo de palos (total, incluyendo el agua)	kg s/h
Ps	Flujo de palos secos	kg ss/h
Q	Calor generado en la combustión	kcal/h
Q _p	Pérdidas de calor	kcal/h
R	Flujo de ramas (total, incluyendo el agua)	kg s/h
Rs	Flujo de ramas secas	kg ss/h
T _G	Temperatura del gas	°C
X	Contenido de humedad, base seca	kg a/kg ss
x	Contenido de humedad, base húmeda	kg a/ kg s
Y	Humedad absoluta del aire	kg a/ kg gs
λ ₀	Calor de evaporación del agua a 20 °C	kcal/kg a

Subscriptos

1	Entrada al sapecador
2	Salida del sapecador
3	Entrada al primer secadero
3a	Primera entrada de gases al primer secadero
3b	Segunda entrada de gases al primer secadero
4	Salida del primer secadero
5	Entrada al segundo secadero
6	Salida del segundo secadero
7	Entrada a la canchadora
8	Salida de la yerba molida
9	Salida de los palos gruesos de la canchadora
a	agua
g	Gas
gs	Gas seco
h	Hojas
p	Palos
s	Sólido
ss	Sólido seco

CAPÍTULO 6

PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LOS PALOS DE YERBA MATE

6.1. INTRODUCCIÓN

Cuando se desea realizar el modelado del secado de un material es necesario conocer una serie de propiedades fisicoquímicas y de transporte, a saber, la densidad, el coeficiente de contracción, el calor específico, la conductividad térmica, el coeficiente de difusión, etc. En general estas propiedades dependen del contenido de humedad y de la temperatura.

Además, en la interfase gas-sólido se establece una relación de equilibrio (isoterma de sorción) entre el contenido de humedad del sólido y la humedad relativa del aire.

Por otra parte, algunos materiales no pueden ser considerados isotrópicos porque algunas propiedades pueden variar en lugares diferentes. Este comportamiento tiene lugar en los granos de maíz, arroz con cáscara y algunas raíces, donde el pericarpio tiene propiedades muy diferentes a las otras partes del material (Tolaba et al., 1990; Mourad et al., 1996; Sokhansanj et al., 1999; Abud-Archila et al., 2000). Al modelar el secado de estos materiales, otras dificultades pueden aparecer, a saber:

- 1) Cada material tiene diferentes propiedades físicas y de transporte,
- 2) Cada material se contrae en forma diferente durante el secado y
- 3) En la interfase de los dos materiales, se establece un equilibrio entre sus contenidos de humedad, que generalmente no es de igualdad.

El material en estudio, palos de yerba mate, puede ser considerado un material compuesto de xilema en la parte central y corteza en la periferia. Los objetivos de este capítulo son estudiar las propiedades físicas de ambos materiales (coeficiente de contracción, densidad aparente e isothermas de desorción); determinar su relación de humedad de equilibrio y encontrar modelos matemáticos que describan sus variaciones con la variación del contenido de humedad. En el Capítulo 7 se estudiarán las propiedades de transporte.

Contracción y densidad aparente

Durante el secado, los materiales biológicos sufren generalmente una contracción que depende de su estructura interna y por lo tanto varía su densidad.

Lozano et al. (1983) definieron el coeficiente de contracción como la relación entre el volumen actual y el inicial. Presentaron diferentes modelos que describían la dependencia de este coeficiente con el contenido de humedad. Encontraron que el coeficiente de contracción dependía principalmente de la estructura del material y del contenido de humedad. También encontraron una dependencia lineal entre la densidad aparente y el contenido de humedad en

peras, zanahorias, papas, batatas y ajos. Arnosti et al. (2000), trabajando con semillas de *Bracharia prizantha*, encontraron que el coeficiente de encogimiento depende del contenido de humedad adimensional (definiendo a ésta como el contenido de humedad actual/contenido inicial de humedad), pero que la densidad aparente no dependía del contenido de humedad.

Ramallo et al. (2000) reportaron que en hojas de yerba mate el coeficiente de encogimiento y la densidad aparente eran función del contenido de humedad (relacionados por una ecuación lineal), pero no de la temperatura de secado. Sokhansanj et al.(1999), al estudiar estas dos propiedades en raíces de ginseng, encontraron que los datos experimentales ajustaban mejor a un modelo que consideraba al material compuesto de dos regiones diferentes que al modelo isotrópico. Este modelo se denominó modelo de encogimiento del doble tanque.

Por las conclusiones obtenidas en estos dos últimos trabajos, al estudiar estas dos propiedades en el palo de la yerba mate, se debería considerar que ambas dependen del contenido de humedad y que podrían ser diferentes en la corteza y el xilema.

Isotermas de sorción y equilibrio corteza-xilema

Las isotermas de sorción permiten determinar el contenido de humedad de equilibrio en la interfase gas-sólido durante el secado. Uno de los métodos utilizados para su obtención es el método estático. En este método, el sólido se pone en contacto con una atmósfera de actividad de agua conocida, generada generalmente con una solución salina saturada, en un frasco herméticamente cerrado a cierta temperatura hasta alcanzar el equilibrio. Los datos experimentales son ajustados a diferentes modelos de isotermas de sorción en productos alimenticios. Chirife e Iglesias (1978) realizaron una revisión de los modelos que aparecían en la literatura, clasificándolos en lineales y no lineales. En los últimos años, el modelo de GAB (Guggenheim, Anderson y deBoer), no lineal, ha sido el más utilizado.

Si no existe resistencia a la transferencia de masa en la interfase xilema-corteza, el contenido de humedad debería estar en equilibrio en ambas fases durante el secado. Este equilibrio puede ser expresado como una igualdad de sus actividades de agua. Los modelos que describen el mismo pueden por lo tanto ser obtenidos a partir de los modelos de isotermas de sorción; pero si se quieren obtener ecuaciones simples, que facilitan su utilización en el modelado, es necesario utilizar los modelos lineales para la descripción de los mismos.

6.2. MATERIALES Y MÉTODOS

6.2.1. Material

Considerando que el material en estudio se seca industrialmente en ramas, para estudiar la contracción del material durante el secado se seleccionaron muestras con tres diámetros representativos de las mismas: $2,5 \cdot 10^{-3}$, $5,0 \cdot 10^{-3}$ y $7,5 \cdot 10^{-3}$ m, en forma similar a los utilizados en el Capítulo 4. En estos ensayos y en las experiencias de secado (Capítulo 7), los palos de cada uno de los diámetros fueron seleccionados y cortados con una longitud de 0,05 m. Para estudiar las propiedades del xilema, los palos fueron pelados a mano con un cuchillo.

Cuando se llevaron a cabo los ensayos para la determinación de las isothermas de sorción, la corteza fue separada del xilema, y luego cada parte fue molida por separado en un molino de cuchillas de laboratorio. Ambos materiales fueron rociados con una solución de sorbato de potasio (Química Oeste S.A., Argentina) al 1% (p/p) y luego fueron expuestos a luz UVC durante 30 minutos para evitar el crecimiento de microorganismos durante los ensayos.

6.2.2. Contenido de humedad

Se utilizó el método dado por la norma IRAM 20503 (1995), trabajándose a 103 ± 2 °C, durante 6 hs. Las determinaciones se realizaron por triplicado. Se utilizaron aproximadamente 5 g de material y pesafiltros de aluminio.

6.2.3. Coeficiente de contracción y densidad aparente

El coeficiente de contracción (S_b) y la densidad aparente (ρ) de los palos con y sin corteza y su dependencia con el contenido de humedad, se determinaron pesando y midiendo el volumen del material con diferentes contenidos de humedad. Al principio, las muestras eran saturadas por inmersión en agua durante 5 días. Luego, se determinaron el peso, la longitud y el diámetro en 3 puntos con un Microscopio Nikon, tipo 104. Este fue calibrado previamente con un micrómetro óptico con una escala absoluta de calibración. El volumen se calculó con la longitud y los diámetros medidos.

Las muestras con diferentes contenidos de humedad fueron obtenidas secando el material en una estufa a 60 °C sobre silica gel, en 10 etapas. Después de cada etapa, las mismas eran mantenidas durante 4 días en frascos herméticamente cerrados para asegurar la uniformidad del contenido de humedad del material. Luego, las muestras eran pesadas y medidas en los mismos tres puntos de cada palo (Schmalko et al., 1997). Las experiencias fueron llevadas a cabo utilizando 20 palos, con y sin corteza, y diámetros iniciales de $2,5 \cdot 10^{-3}$, $5,0 \cdot 10^{-3}$ y $7,5 \cdot 10^{-3}$ m. Los valores de contenidos inicial de humedad fueron de aproximadamente $59 \pm 1\%$, p/p, en base húmeda. El coeficiente de contracción se calculó como la relación del volumen medido dividido el volumen inicial; mientras que la densidad aparente se calculó con la relación del peso dividido el volumen.

Los datos experimentales de ambas variables se ajustaron a modelos lineales.

6.2.4. Isotermas de sorción y equilibrio corteza-xilema

Para determinar los contenidos de humedad de equilibrio, los materiales (corteza y xilema) fueron colocados en frascos cerrados que contenían soluciones salinas saturadas que generaban atmósferas con diferentes actividades de agua. Luego, se colocaron en una estufa a una temperatura controlada. Se utilizaron siete soluciones salinas diferentes (LiCl, MgCl₂, CoCl₂, NaBr, NaNO₃, NaCl y KCl), cuyas actividades de agua para las diferentes temperaturas fueron obtenidas de las tablas de Greenspan (1977) (tabla 6.1). Las muestras fueron mantenidas en la estufa hasta alcanzar el equilibrio (aproximadamente 15 días). Las experiencias fueron llevadas a cabo entre 30 y 90 °C, cada 10 °C (± 1 °C).

Tabla 6.1. Actividades de agua (a_w) de las soluciones salinas saturadas a diferentes temperaturas (Greenspan, 1977).

Sal	Temperatura (°C)						
	30	40	50	60	70	80	90
LiCl	0,113	0,112	0,111	0,110	0,108	0,105	0,102
MgCl ₂	0,324	0,316	0,305	0,293	0,278	0,260	0,241
CoCl	0,618	0,555	0,500	0,467	0,470	-	-
NaBr	0,560	0,532	0,509	0,497	0,497	0,514	-
NaNO ₃	0,731	0,710	0,690	0,674	0,660	0,652	0,650
NaCl	0,751	0,747	0,744	0,745	0,751	0,763	-
KCl	0,836	0,823	0,812	0,802	0,795	0,789	0,785

6.2.5. Modelos de isotermas de sorción

De los modelos de isotermas de sorción de agua en alimentos citados por Chirife e Iglesias (1978), se seleccionaron el modelo de Halsey y el de GAB (Guggenheim-Anderson-deBoer). El modelo de Halsey es del tipo lineal y fue seleccionado debido a que en experiencias anteriores realizadas con el material procesado fue el que tuvo mejor ajuste (Känzig et al., 1987). Los modelos lineales tienen la ventaja que sus pendientes son fácilmente calculadas cuando son necesarias al modelar el secado. El modelo de Halsey tiene la siguiente forma:

$$a_w = \exp\left(-\frac{a}{X^r}\right) \quad (6.1)$$

Esta ecuación se puede linealizar resultando:

$$\ln(-\ln a_w) = \ln a - r \ln X \quad (6.2)$$

En estas ecuaciones “a” y “r” son las constantes del modelo, estando “r” relacionada al tipo de interacción entre el vapor y el sólido (Chirife e Iglesias, 1978). Se encontró que ambas constantes dependían de la temperatura. Esta dependencia puede ser expresada a través de una ecuación exponencial (Santana y Mascheroni, 2003) o de tipo Arrhenius (Rao and Rivsi, 1985; García et al., 2000). En este caso se ajustarán a las siguientes ecuaciones:

$$a = a_0 \exp[HA_0/(RT)] \quad (6.3)$$

$$r = r_0 \exp[HR_0/(RT)] \quad (6.4)$$

Para ajustar los datos experimentales al modelo de Halsey se utilizó una técnica de regresión lineal y luego se calculó el Error Medio Porcentual (MPE) con la siguiente ecuación:

$$MPE = \frac{\sum \frac{|X_{\text{experimental}} - X_{\text{calculado}}|}{X_{\text{experimental}}}}{N} * 100 \quad (6.5)$$

En la misma N es el número de datos experimentales.

El modelo de GAB fue seleccionado por tener las siguientes ventajas: 1) tiene bases teóricas; 2) describe el comportamiento de la sorción en un rango amplio de actividad de agua (0-0,9); 3) sus parámetros tienen significado físico y 4) se pueden describir los efectos de la temperatura. El modelo GAB tiene la siguiente forma:

$$X = \frac{XmCka_w}{(1 - ka_w)(1 - ka_w + Cka_w)} \quad (6.6)$$

La constante Xm es el contenido de humedad de la monocapa, C es una constante de energía relacionada a la diferencia de potencial químico del agua entre la adsorción de la monocapa y la multicapa y k es una constante de energía relacionada a la diferencia de potencial químico entre el agua pura y la adsorbida en la multicapa. Las mismas dependen de la temperatura y dicha dependencia puede ser expresada por una ecuación del tipo Arrhenius (Rao and Rizvi, 1995; García et al., 2000). Para cada una de ellas, se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$Xm = Xmo \exp(\Delta H' / RT) \quad (6.7)$$

$$C = Co \exp[(H_1 - H_m) / (RT)] \quad (6.8)$$

$$k = ko \exp[(H_L - H_m) / (RT)] \quad (6.9)$$

El ajuste fue obtenido utilizando el criterio de los mínimos cuadrados con una técnica de regresión no lineal, utilizando el programa Statgraphics (1993).

El calor neto de sorción o exceso de calor de sorción (Q_s) es el calor adicional (además del calor de evaporación) que es necesario añadir para evaporar 1 mol de agua. El mismo tiene valores elevados a bajos contenidos de humedad donde ocurre una fuerte interacción entre las moléculas de agua y los sitios activos del sólido. A medida que aumenta el contenido de humedad y por lo tanto el número de capas de agua, su valor disminuye. Para un valor dado de contenido de humedad este calor puede ser calculado partiendo de la ecuación de Clausius-Clapeyron:

$$\left[\frac{\partial (\ln(a_w))}{\partial \left(\frac{1}{T}\right)} \right]_X = - \frac{Q_s}{R} \quad (6.10)$$

que integrada, tiene la forma (Labuza et al, 1985):

$$\ln(a_w) = (-Q_s / R) * 1/T + \text{constante} \quad (6.11)$$

Los valores de a_w para las diferentes temperaturas para un determinado contenido de humedad pueden ser obtenidos de las isotermas de sorción. Con estos valores y graficando $\ln(a_w)$ en función de $1/T$ se pueden obtener los valores de Q_s para cada contenido de humedad.

6.2.6. Modelos de equilibrio corteza-xilema

Los modelos que describen el equilibrio de contenidos de humedad entre la corteza y el xilema fueron obtenidos a partir de los modelos de isotermas de sorción. Para simplificar los cálculos cuando se realiza el modelado del secado, únicamente los modelos lineales fueron seleccionados. Los modelos de tres parámetros generalmente hacen inestable los cálculos iterativos en el mismo. Para obtener la relación, cada uno de los modelos fue aplicado a cada material y luego se igualaron sus actividades de agua. De esta forma se obtuvo una ecuación que relaciona los contenidos de humedad de la corteza y el xilema. De la revisión realizada por Chirife e Iglesias (1978), dos tipos de modelos fueron obtenidos:

- 1) El modelo logarítmico (obtenidos a partir de los modelos de Halsey, Henderson, Caurie, Day y Nelson y Oswin):

$$\ln X_X = A_1 + B_1 \ln X_B \quad (6.12)$$

- 2) El modelo lineal (obtenido a partir de los modelos de Bradley, Chen, Chung y Pfof, Kuhn, Mizrahi y Smith):

$$X_X = A_2 + B_2 X_B \quad (6.13)$$

6.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.3.1. Coeficiente de contracción y densidad aparente

Cuando se midieron los espesores de la corteza y el xilema, se encontraron diferentes proporciones para los diferentes diámetros de los palos. Los valores medios entre la relación del volumen del xilema/volumen de la corteza, para los diferentes diámetros, fueron 0,53/0,47 (para $d = 2,5 \cdot 10^{-3}$ m); 0,6/0,4 (para $d = 5,0 \cdot 10^{-3}$ m) y 0,65/0,35 (para $d = 7,5 \cdot 10^{-3}$ m).

Los datos de coeficiente de contracción y densidad aparente calculados para palos con (x_M) y sin (x_X) corteza para cada diámetro fueron ajustados a modelos lineales para explicar su dependencia con el contenido de humedad. No se encontraron diferencias significativas entre las constantes del modelo cuando se compararon los resultados obtenidos con los tres diámetros, y de acuerdo a esto todos los datos se ajustaron a un solo modelo. Se obtuvo el mejor resultado cuando se consideraron los datos de coeficiente de contracción en función del contenido de humedad en base seca y los datos de densidad aparente en función del contenido de humedad en base húmeda. Se obtuvieron las siguientes ecuaciones:

$$Sb_X = \frac{0,706 + 0,038X_X}{0,706 + 0,038X_{X0}} \quad (6.14)$$

$$Sb_M = \frac{0,613 + 0,192X_M}{0,613 + 0,192X_{M0}} \quad (6.15)$$

$$\rho_M = 701 + 730x_M \quad (6.17)$$

El ajuste resultó muy bueno con $P < 0,01$ y un valor de MPE = 10 %. El coeficiente de contracción de la corteza se calculó utilizando las ecuaciones 6.14 y 6.15. Las Figuras 6.1 y 6.2 muestran los valores del coeficiente de contracción experimentales y calculados con las ecuaciones 6.14 y 6.15; y las figuras 6.3 y 6.4 muestran los valores de la densidad aparente experimentales y calculados con las ecuaciones 6.16 y 6.17.

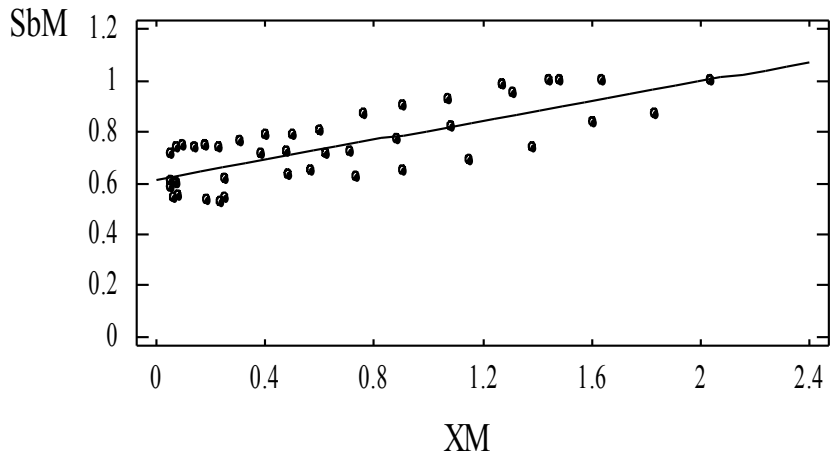


Figura 6.1. Coeficiente de contracción (Sb_M) en función del contenido de humedad (base seca) de los palos con corteza. Valores experimentales y calculados con la ecuación 6.15.

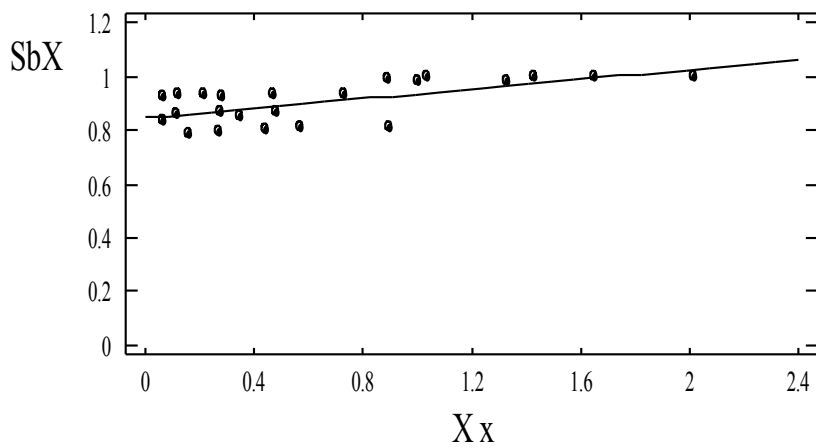


Figura 6.2 Coeficiente de contracción (Sb_X) en función del contenido de humedad (base seca) de los palos sin corteza. Valores experimentales y calculados con la ecuación 6.14

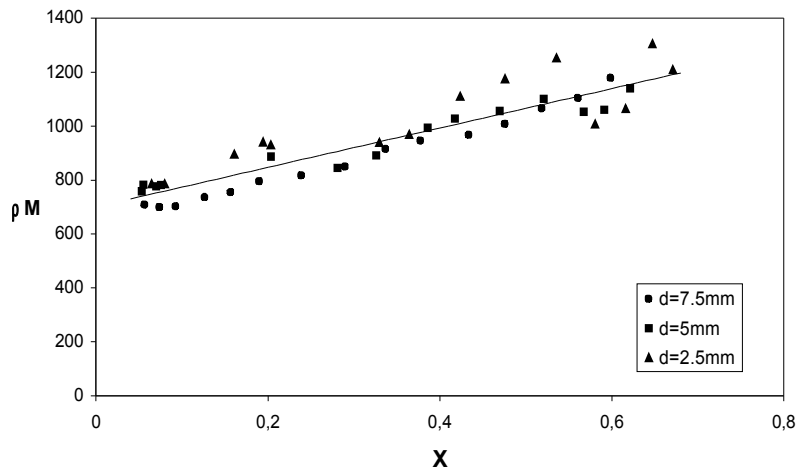


Figura 6.3. Densidad aparente (ρ_M) en función del contenido de humedad (x_M) de los palos con corteza. Valores experimentales y calculados con las ecuaciones 6.16.

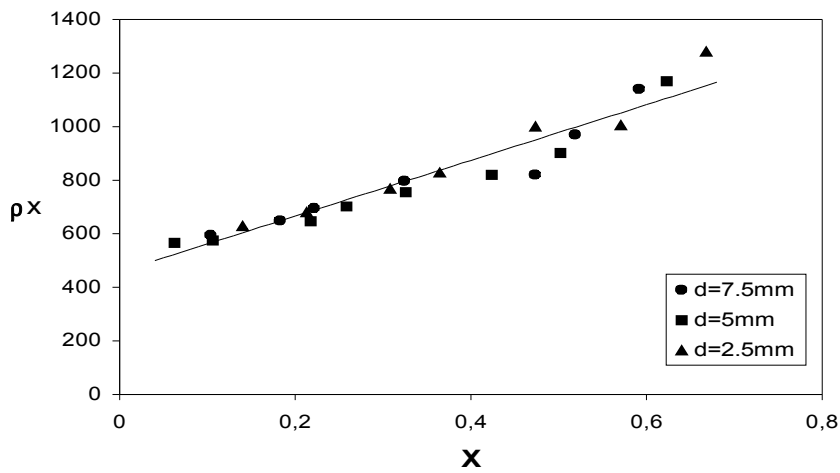


Figura 6.4. Densidad aparente (ρ_x) en función del contenido de humedad (x_x) de los palos sin corteza. Valores experimentales y calculados con las ecuaciones 6.17.

6.3.2. Isotermas de desorción

Los valores medios (de 3 mediciones) de contenidos de humedad de equilibrio de la corteza y el xilema entre 20 °C y 90 °C, cada 10 °C, se reportan en la Tabla 6.2. Los valores individuales figuran en el anexo 3. En todos los casos, el coeficiente de variación fue menor al 10 %.

Tabla 6.2. Actividades de agua (a_w) y contenidos de humedad de equilibrio para la corteza (X_B) y el xilema (X_X), en kg a/kg ss, a 30 °C, 40 °C, 50 °C, 60 °C, 70 °C, 80 °C y 90 °C.

30 °C			40 °C			50 °C		
a_w	X_B	X_X	a_w	X_B	X_X	a_w	X_B	X_X
0,113	0,0486	0,0455	0,112	0,0313	0,0276	0,111	0,0288	0,0296
0,324	0,0729	0,0730	0,316	0,0696	0,0803	0,305	0,0665	0,0745
0,560	0,1006	0,1174	0,532	0,0943	0,1033	0,500	0,0721	0,0883
0,614	0,1071	0,1185	0,555	0,0992	0,1067	0,509	0,0807	0,0977
0,731	0,1560	0,1735	0,710	0,1330	0,1607	0,690	0,1141	0,1375
0,751	0,1890	0,2415	0,747	0,1696	0,2386	0,744	0,1699	0,2322
0,836	0,2483	0,3618	0,823	0,2309	0,3766	0,812	0,2195	0,3269
60 °C			70 °C			80 °C		
a_w	X_B	X_X	a_w	X_B	X_X	a_w	X_B	X_X
0,110	0,0251	0,0247	0,108	0,0220	0,0193	0,105	0,0174	0,0182
0,293	0,0601	0,0683	0,278	0,0591	0,0656	0,260	0,0471	0,0525
0,467	0,0700	0,0867	0,470	0,0606	0,0616	0,514	0,0532	0,0568
0,497	0,0840	0,0969	0,497	0,0702	0,0785	0,652	0,0674	0,0740
0,674	0,1103	0,1377	0,660	0,1045	0,1196	0,763	0,1160	0,1142
0,745	0,1622	0,2130	0,751	0,1701	0,1799	0,789	0,1223	0,1210
0,802	0,1819	0,2781	0,795	0,1751	0,2294			
90 °C								
a_w	X_B	X_X						
0,102	0,0198	0,0236						
0,241	0,0350	0,0402						
0,650	0,0603	0,0619						
0,785	0,1114	0,1067						

Ambos modelos de isotermas de sorción tuvieron un buen ajuste ($P < 0,01$), pero con un valor de MPE relativamente alto. Esto se debe, probablemente, a la poca uniformidad del material y a los bajos valores de contenidos de humedad obtenidos, ya que este término aparece dividiendo la diferencia de valores absolutos en el MPE. El modelo de GAB tuvo un buen ajuste hasta la temperatura de 60 °C. Por arriba de esta temperatura, los valores de MPE fueron elevados, teniéndose un mejor ajuste con el modelo de Halsey. La Tabla 6.3 muestra los valores de X_m , C y k para cada temperatura. Al aumentar la temperatura, X_m y C

disminuyeron y k se incrementó. Se encontraron valores diferentes para la corteza y el xilema. Las Figuras 6.5 y 6.6 muestran los valores experimentales y los calculados con la ecuación 6.4 para la corteza y el xilema entre 30°C y 60°C.

Tabla 6.3. Constantes del modelo GAB para la corteza y el xilema a 30 °C, 40 °C, 50 °C y 60 °C.

	Corteza				Xilema			
	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
Xm	0,0509	0,0486	0,0463	0,0403	0,0548	0,0523	0,0510	0,0458
C	20,15	16,84	11,81	10,68	14,56	12,52	10,91	9,29
k	0,95	0,96	0,97	0,99	0,99	1,00	1,02	1,05
MPE	11,11	6,23	9,69	8,65	9,68	14,11	11,72	9,79

La Tabla 6.4 muestra las constantes de las ecuaciones 6.7, 6.8 y 6.9 para el modelo de GAB. Como se puede observar, estos valores son diferentes para la corteza y el xilema.

Tabla 6.4. Constantes de la ecuación de GAB (ecuaciones 6.7, 6.8 y 6.9) para la corteza y el xilema entre 30 y 60 °C (P<0,05).

	Xmo (kg a/ kg ss)	$\Delta H'$ (kJ/mol)	Co	H ₁ -H _m (kJ/mol)	ko	H _L -H _m (kJ/mol)
Corteza	4,37 10 ⁻³	6,24	1,08 10 ⁻²	19,00	1,57	-1,28
Xilema	8,60 10 ⁻³	4,70	10,49 10 ⁻²	12,46	1,83	-1,55

Con estas constantes se puede obtener una ecuación general que describa el comportamiento de la humedad de equilibrio con la actividad del agua y la temperatura, entre 30 °C y 60 °C.

Para la corteza, la ecuación resultante es:

$$X_B = \frac{7,41 \cdot 10^{-5} * e^{\frac{2882}{(T+273.2)}} * a_w}{(1 - 1,57 * e^{\frac{-154}{(T+273.2)}} * a_w)(1 - 1,57 * e^{\frac{-154}{(T+273.2)}} * a_w + 0,0170 * e^{\frac{2310}{(T+273.2)}} * a_w)} \quad (6.18)$$

con un valor de MPE= 7,92%.

Para el xilema, la ecuación resultante es:

$$X_X = \frac{1,65 \cdot 10^{-3} * e^{\frac{1878}{(T+273.2)}} * a_w}{(1 - 1,83 * e^{\frac{-186}{(T+273.2)}} * a_w)(1 - 1,83 * e^{\frac{-186}{(T+273.2)}} * a_w + 0,192 * e^{\frac{1312}{(T+273.2)}} * a_w)} \quad (6.19)$$

con un valor de MPE= 11,14%.

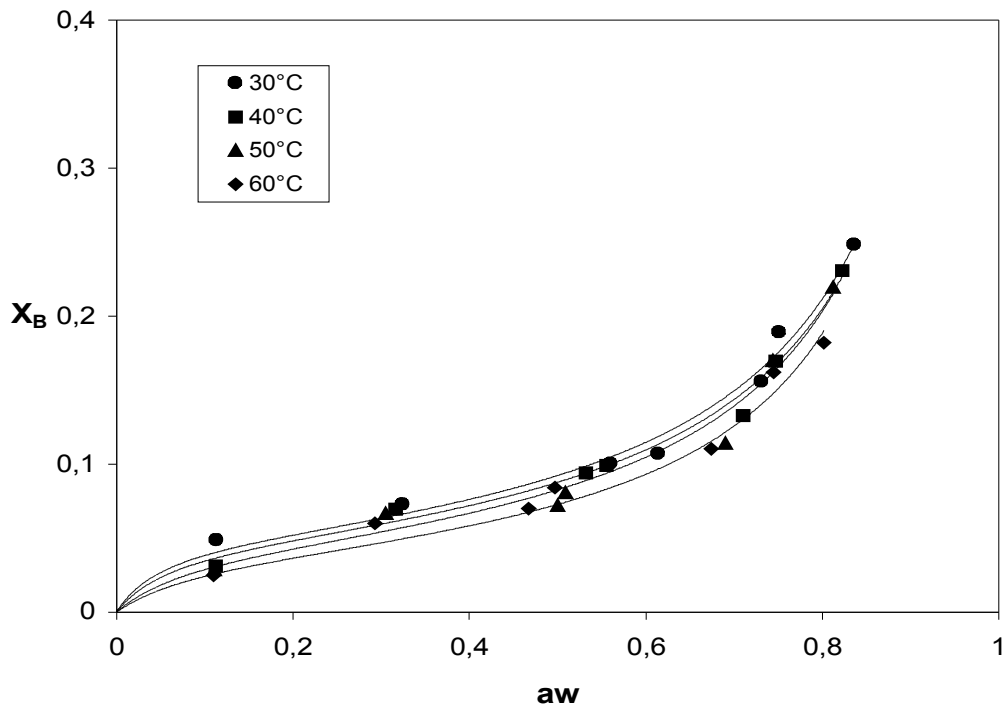


Figura 6.5. Isothermas de desorción para la corteza a 30 °C, 40 °C, 50 °C y 60 °C. Valores experimentales y calculados con la ecuación de GAB

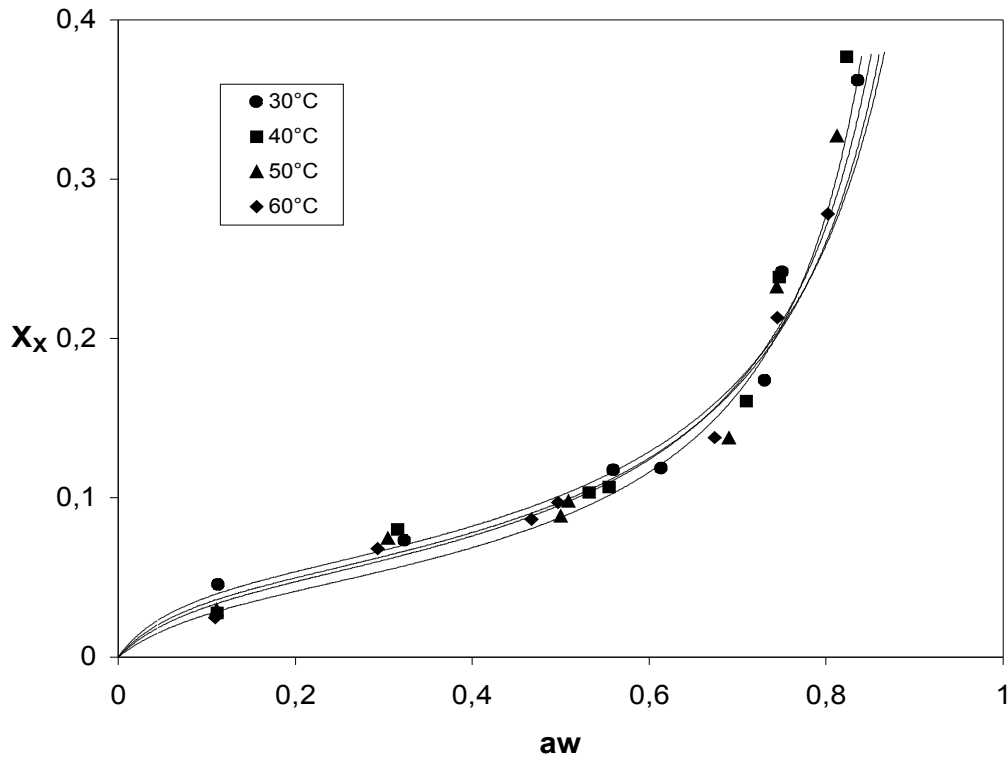


Figura 6.6. Isotermas de desorción para el xilema a 30 °C, 40 °C, 50 °C y 60°C. Valores experimentales y calculados con la ecuación de GAB

En las figuras 6.7 y 6.8 se pueden observar las variaciones del contenido de humedad obtenidas con las ecuaciones 6.18 y 6.19, para la corteza y el xilema, respectivamente. En estas figuras y en las figuras 6.5 y 6.6 se puede observar la pequeña dependencia que tienen las isotermas con la temperatura, ya que en las figuras 6.7 y 6.8 las líneas de corte de temperatura son casi paralelas al eje de las abscisas y por la pequeña separación entre las líneas en las figuras 6.5 y 6.6.

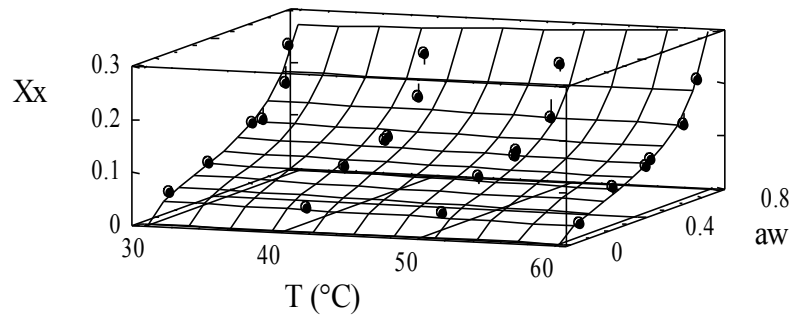


Figura 6.7. Isothermas de desorción para el xilema a 30 °C, 40 °C, 50 °C y 60°C. Valores experimentales y calculados con la ecuación 6.16

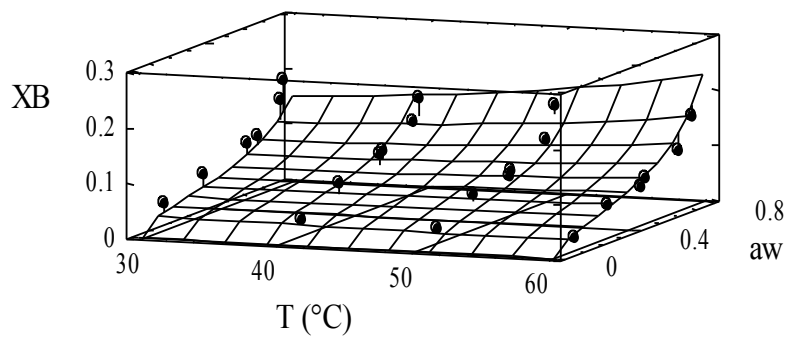


Figura 6.8. Isothermas de desorción para corteza a 30 °C, 40 °C, 50 °C y 60 °C. Valores experimentales y calculados con la ecuación 6.17

La Figura 6.9 muestra los valores de Q_s para la corteza y el xilema para diferentes contenidos de humedad.

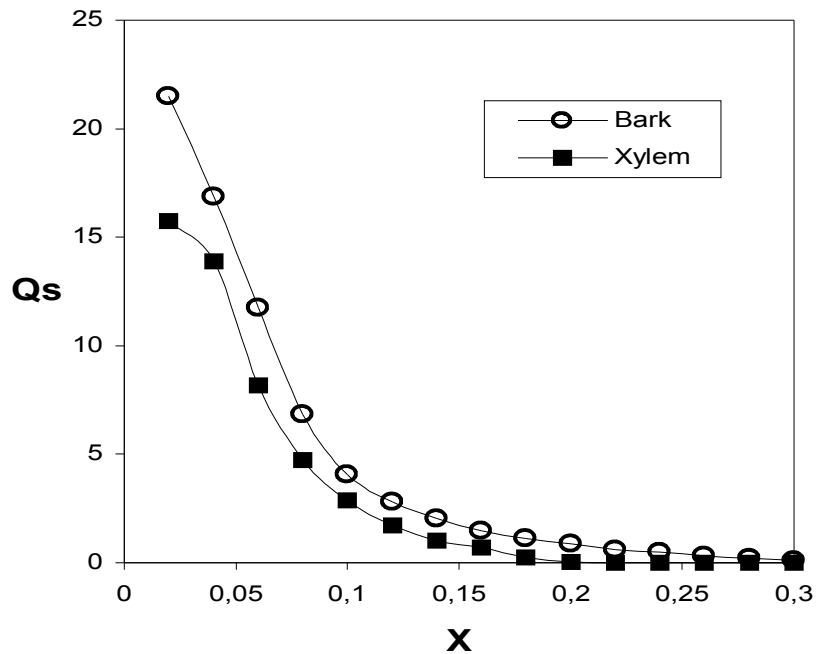


Figura 6.9. Calor neto de sorción (Q_s) para la corteza (Bark) y el xilema (Xylem) a diferentes contenidos de humedad X (X_B y X_X , respectivamente)

En los últimos años, con la utilización de las computadoras para ajustar los datos experimentales a los modelos, la mayoría de los trabajos publicados en este tema ajustan los datos experimentales al modelo de GAB. Debido a esto se han reportado valores de las constantes para numerosos productos y rangos de temperatura (Tabla 6.5).

El rango de valores encontrados es muy amplio y depende del material estudiado y del rango de temperatura. Los valores de las constantes encontrados en este trabajo coinciden con los valores dados en esta tabla. Al realizar un análisis de la variación de las constantes con la temperatura, se pudo observar que al aumentar la misma ocurrían las siguientes variaciones: X_m disminuía en todos los casos; k aumentaba en la mayoría de los productos, disminuía en otros casos y no presentaba tendencia definida en otros; C aumentaba en la mayoría de los productos y en otros casos no presentaba tendencia definida. En la corteza y el xilema se encontró que X_m y C disminuían y k aumentaba con el incremento de la temperatura. Estas comparaciones se realizan considerando el valor medio, sin tener en cuenta sus límites de

confianza, ya que en los ajustes por regresión no lineal estos límites son muy grandes que en general no se encuentran diferencias significativas estadísticamente entre ellas.

Los valores del calor neto de sorción (obtenidos a partir de los trabajos citados en la tabla 6.5) variaban entre 7 y 20 kJ/mol para 5 % de contenido de humedad y valores cercanos a 0 para contenidos de humedad cercanos al 20 %. Los rangos de valores obtenidos en esta tesis coinciden con los encontrados en estos trabajos.

Tabla 6.5. Constantes de la ecuación de GAB (ec. 4) para diferentes productos y rangos de temperatura.

Producto	Xm (%base seca)	k	C	Rango de temperatura (°C)	Referencia
Frutos secos	1,3-4,1	0,63-1,06	12-125	5-45	Martínez-Navarrete y Chiralt, 1996
Galletitas y preparados de maíz	3,00-4,58	0,94-1,06	3,55-17,75	25-45	Palou et al., 1997
Cereales en granos (maíz, arroz y trigo)	4,42-10,27	0,61-0,98	9,01-27,96	10-80	Tolaba et al., 1997
Almidón de papa	8,74-10,22	0,72-0,79	11,40-28,41	27-67,2	Viollaz y Rovedo, 1999
Okara de soja	2,69-5,89	0,92-1,00	5,6-62,8	20-50	García et al., 2000
Maní	6,22-10,29	0,64-0,70	12,09-23,56	4,4-60	Gely y Ginner, 2000
Macarrones japoneses	6,83-7,88	0,83-0,85	18,25-33,63	20-40	Inazu et al., 2001
Celulosa microcristalina	3,7-5,3	0,72-0,81	5,80-8,61	25-90	Arlabosse et al., 2003

La Tabla 6.6 muestra las constantes del modelo de Halsey a 70 °C, 80 °C y 90 °C para la corteza y el xilema. En la bibliografía se encuentran valores de la constante “a” (cuando la humedad se expresa como una relación de pesos) entre 0,015 y 0,030 en diferentes productos: maíz (Tolaba y Suárez, 1990), okhara de soja (García et al., 2000) y semillas de girasol (Santana y Mascheroni, 2003). El parámetro “r” para estos productos varía entre 1,03 y 1,68. Estos autores trabajaron a temperaturas inferiores a 60 °C y encontraron que el valor de ambas constantes disminuía al aumentar la temperatura. Los valores encontrados en este trabajo para la corteza y el xilema se encuentran en el rango de los valores encontrados por

estos autores. En estos dos materiales, la constante r tiene un comportamiento diferente al encontrado en otros materiales, ya que aumenta con el incremento de la temperatura.

Las figuras 6.10 y 6.11 muestran los valores experimentales de las isoterms de desorción y el ajuste obtenido con la ecuación de Halsey.

Tabla 6.6. Constantes del modelo de Halsey para la corteza y el xilema a 70 °C, 80 °C y 90 °C.

	Corteza			Xilema		
	70°C	80°C	90°C	70°C	80°C	90°C
a	0,033	0,015	0,010	0,050	0,014	0,005
r	1,16	1,31	1,43	1,02	1,37	1,66
MPE	11,88	13,55	11,23	12,92	13,55	11,10

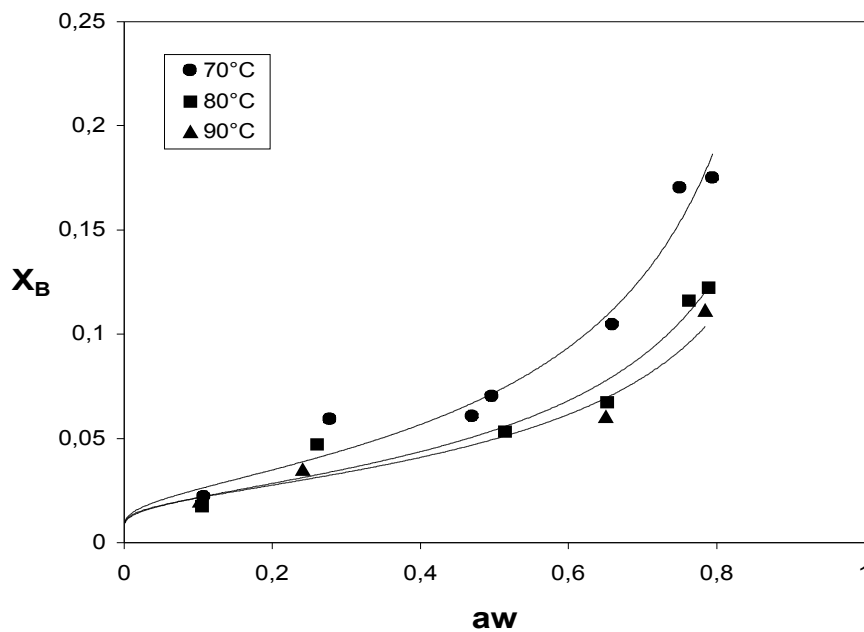


Figura 6.10. Isoterms de desorción para la corteza a 70 °C, 80 °C y 90 °C. Valores experimentales y predichos con el modelo de Halsey.

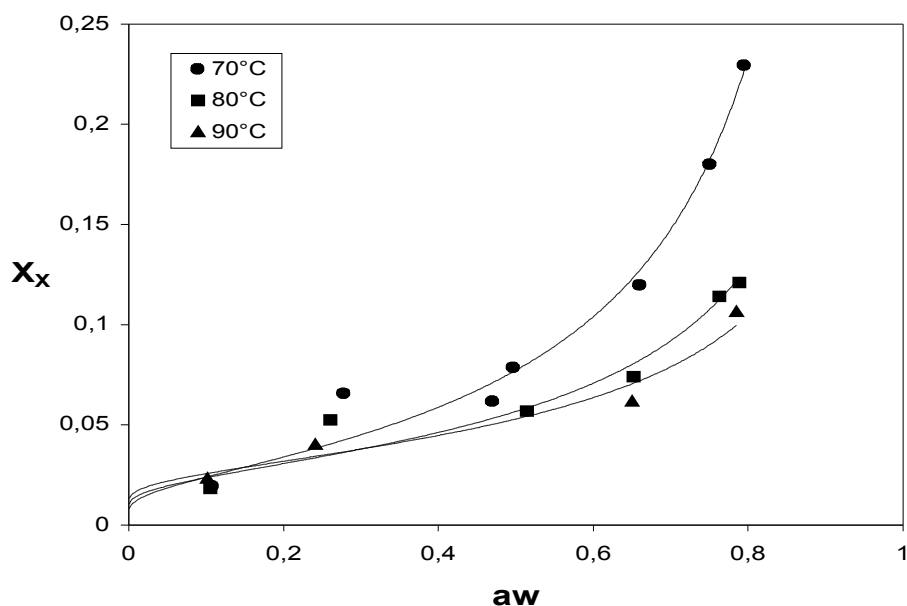


Figura 6.11. Isothermas de desorción para el xilema a 70 °C, 80 °C y 90 °C. Valores experimentales y predichos con el modelo de Halsey.

Los valores de las constantes resultantes del ajuste de las ecuaciones 6.3 y 6.4 se muestran en la tabla 6.7.

Tabla 6.7. Constantes de la ecuación de Halsey (ecuaciones 6.3 y 6.4) para la corteza y el xilema a 70 °C, 80 °C y 90 °C (P< 0,08)

	ao	HA0 (K ⁻¹)	ro	HR0 (K ⁻¹)
Corteza	5,61.10 ⁻¹²	7700	50,2	-1291
Xilema	8,38.10 ⁻²⁰	14031	6551,1	-3002

Con estas constantes se puede obtener una ecuación general que cubra el rango de temperaturas de 70 °C a 90 °C.

Para la corteza, resultó:

$$X_B = \left[\frac{-5,61 \cdot 10^{-12} e^{\frac{7700}{T+273,2}}}{\ln(aw)} \right]^{\frac{1}{50,20 e^{\frac{-1291}{T+273,2}}}} \quad (6.20)$$

con un valor de MPE= 12,47%, y para el xilema:

$$X_X = \left[\frac{-8,38 \cdot 10^{-20} e^{\frac{14031}{T+273,2}}}{\ln(aw)} \right]^{\frac{1}{\frac{-3002}{6555,1e^{T+273,2}}}} \quad (6.21)$$

con un valor de MPE= 12,78%.

En las figuras 6.12 y 6.13 se puede observar las variaciones del contenido de humedad obtenidas con las ecuaciones 6.20 y 6.21 para la corteza y el xilema respectivamente. En estas figuras y en las figuras 6.9 y 6.10 se puede observar que, a altas temperaturas, la dependencia que tienen las isothermas con la temperatura es mayor, principalmente a altas actividades de agua.

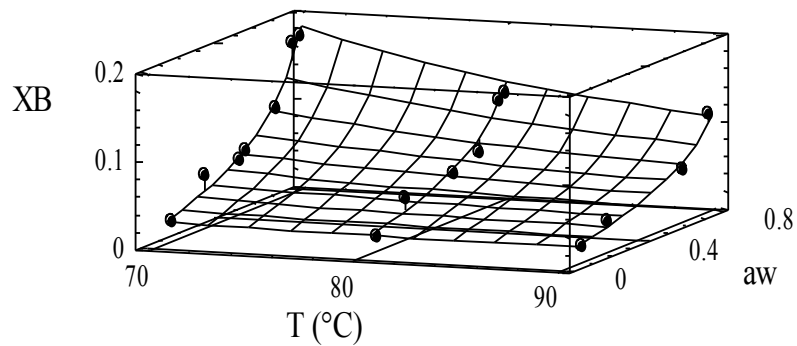


Figura 6.12. Isothermas de desorción de la corteza de los palos de yerba mate a 70 °C, 80 °C y 90 °C . Valores experimentales y obtenidos con la ecuación 6.20

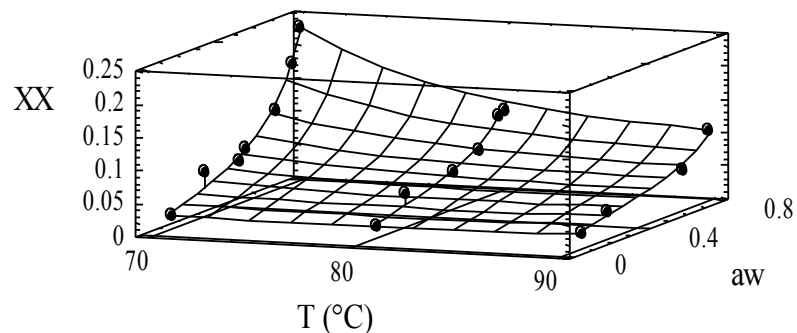


Figura 6.13. Isothermas de desorción del xilema de los palos de yerba mate entre 70 °C, 80 °C y 90 °C. Valores experimentales y obtenidos con la ecuación 6.21

6.3.3. Equilibrio corteza-xilema

Cuando los valores experimentales de contenido de humedad en la corteza y el xilema fueron ajustados a los modelos de equilibrio (ecuaciones 6.12 y 6.13), se obtuvo un buen ajuste con ambas ecuaciones, con $P < 10^{-4}$. Los valores de MPE fueron menores para el modelo logarítmico (7,43 %) que para el modelo lineal (9,96 %). Cuando se compararon los valores de pendiente y la ordenada al origen obtenidas a diferentes temperaturas, calculando y comparando sus límites de confianza, no se encontraron diferencias entre las mismas. Entonces, con todos los datos se obtuvo una sola curva, con un valor de MPE= 8,16 % (ecuación 6.22).

$$X_X = 1,61 X_B^{1,14} \quad (6.22)$$

La figura 6.14 muestra los datos experimentales y el ajuste obtenido con la ecuación 6.22. De acuerdo a esta figura y a los valores experimentales de la tabla 6.3, se encontraron diferencias apreciables entre los contenidos de humedad de equilibrio de la corteza y el xilema. Este comportamiento también fue encontrado por Tolaba et al. (1990), cuando estudiaron el equilibrio en maíz con y sin pericarpio.

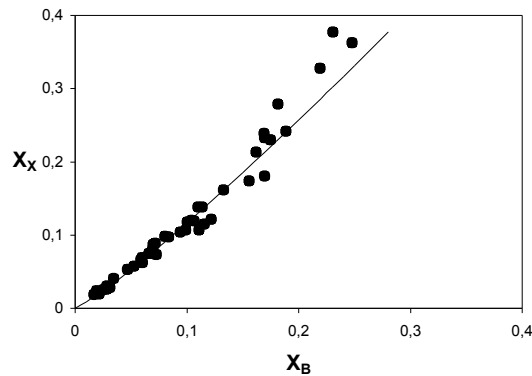


Figura 6.14. Contenido de humedad de equilibrio para el xilema (X_X) y la corteza (X_B). Valores experimentales y calculados con la ecuación 6.22 (modelo logarítmico).

6.4. CONCLUSIONES

Cuando se estudiaron las propiedades físicas de los palos de yerba mate, considerándolo como un material compuesto de corteza y xilema, se encontró que el coeficiente de contracción y la densidad aparente de ambos materiales dependió del contenido de humedad. Esta dependencia se pudo explicar con una ecuación lineal.

Las isotermas de desorción para ambos materiales resultaron diferentes y se encontró que dependían de la temperatura, siendo esta dependencia mayor a altas temperaturas. Cuando se relacionaron los contenidos de humedad de la corteza y el xilema, se encontró que la misma se podía explicar con una ecuación potencial. Esta relación no dependía de la temperatura.

Al ajustar los datos experimentales a los diferentes modelos, se encontraron valores relativamente elevados de error promedio porcentual. Esto se debe, probablemente, a la baja uniformidad del material y a los bajos valores de contenido de humedad obtenidos, ya que este término aparece dividiendo la diferencia de valores absolutos en el error promedio porcentual.

6.5. NOMENCLATURA

A_i, B_i	Constantes de las ecuaciones de regresión
a	Constante del modelo de Halsey
a_0	Constante del modelo de Halsey
a_w	Actividad del agua
C	Constante del modelo GAB
C_0	Factor pre-exponencial del modelo GAB
d	Diámetro del palo (m)
HA_0	Constante del modelo de Halsey
H_1	Calor de sorción de la primera capa (kJ/mol)
H_L	Calor de condensación del agua pura (kJ/mol)
H_m	Calor de sorción de la multicapa (kJ/mol)
HR_0	Constante del modelo de Halsey
k	Constante del modelo GAB
k_0	Factor pre-exponencial del modelo GAB
N	Número de datos experimentales
Q_s	Exceso de calor de sorción (kJ/mol)
r	Constante del modelo de Halsey
r_0	Constante del modelo de Halsey
S_b	Coefficiente de contracción
T	Temperatura (°K)
x	Contenido de humedad, base húmeda (kg agua/kg de sólido húmedo)
X	Contenido de humedad, base seca (kg agua/kg sólido seco)
X_m	Constante del modelo GAB (kg agua/kg sólido seco)
X_{m_0}	Factor pre-exponencial del modelo GAB (kg agua/kg sólido seco)
$\Delta H'$	Factor energético tipo Arrhenius (kJ/mol)
ρ	Densidad aparente (kg/m ³)

Subscripts

a	Agua
B	Corteza
M	Valor medio de la propiedad, considerando la corteza y el xilema
M_0	Valor medio inicial de la propiedad, considerando la corteza y el xilema
ss	Sólido seco
x	Xilema
x_0	Xilema, valor inicial de la propiedad

CAPÍTULO 7

CINÉTICA DE SECADO DE LOS PALOS DE YERBA MATE

7.1. INTRODUCCIÓN

En las ecuaciones diferenciales que describen el secado de un sólido están incluidas ciertas propiedades que dependen del contenido de humedad y la temperatura y por lo tanto sólo se pueden obtener soluciones analíticas si se realizan ciertas suposiciones (Hoffman, 1992). Si el sólido es un material compuesto, las propiedades son diferentes en cada región y se tienen diferentes condiciones en la interfase. Para aplicar estas ecuaciones deben utilizarse soluciones numéricas. Uno de los métodos usados es el de las diferencias finitas. En este método se suponen que las propiedades permanecen constantes en un volumen determinado y en una etapa de tiempo (Chau y Gaffney, 1990; Sakai y Hayakawa, 1992; Schmalko et al, 1998; Ramallo et al., 2001).

En el capítulo 6 se estudiaron algunas propiedades físicas de los palos de yerba mate. El palo fue considerado como un material compuesto de xilema y corteza. Para cada material, se determinaron la densidad aparente, el coeficiente de contracción y su dependencia con el contenido de humedad, como así también las isotermas de desorción y el contenido de humedad de equilibrio entre los dos materiales. Se ajustaron diferentes modelos a los datos experimentales.

En este capítulo se desarrolló un modelo que describe el secado de los palos de yerba mate considerado como material compuesto utilizando el método de las diferencias finitas y empleando el coeficiente efectivo de difusión de humedad como parámetro de ajuste del modelo.

7.2. MATERIALES Y MÉTODOS

7.2.1. Material

Se utilizaron palos de yerba mate con tres diámetros representativos ($2,5 \cdot 10^{-3}$, $5,0 \cdot 10^{-3}$ y $7,5 \cdot 10^{-3}$ m) como materiales de ensayo.

Los palos de diferentes diámetros fueron cortados de una longitud de 0,05 m. Para estudiar el secado del xilema, los palos fueron pelados con un cuchillo. Los materiales fueron sellados en los extremos con una pintura epoxy para evitar las pérdidas de humedad y poder ser considerados como un cilindro infinito. Esto es especialmente importante en la transferencia de masa, ya que se encontró que el coeficiente de difusión de humedad en la

dirección axial puede llegar a ser 250 veces mayor que en la dirección radial (Schmalko et al., 1996). Cuando se considera la transferencia de calor, el efecto de los extremos no es importante, ya que la conductividad térmica del material no varía en forma tan amplia en las dos direcciones por tener un elevado contenido de humedad (sobre todo en la etapa de calentamiento) y el área de los extremos representa como máximo el 6% del área total (Schmalko et al., 1997).

7.2.2. Contenido de humedad

Se utilizó el método establecido por la norma IRAM 20503 (1995), trabajándose a $103 \pm 2^\circ\text{C}$, durante 6 hs. Las determinaciones se realizaron por triplicado.

7.2.3. Determinación experimental de la cinética de secado

Las determinaciones experimentales de las curvas de secado fueron realizadas en un secadero de planta piloto de circulación transversal usando una capa fina del material. La velocidad del aire fue fijada en 2,5 m/s. Se trabajó a las siguientes temperaturas: 70°C , 80°C , 90°C , 100°C , 110°C , 120°C y 130°C , con una precisión de $\pm 1^\circ\text{C}$. El calentamiento del aire se realizaba con una serie de resistencias eléctricas localizadas en el interior del secadero. La temperatura se controlaba haciendo variar la intensidad de corriente que pasaba a través de las mismas con un reóstato.

El material fue colocado en canastas, las que eran pesadas cada 10 minutos cuando se trabajaba a 70°C , 80°C , 90°C y 100°C y cada 5 minutos cuando se trabajaba a 110°C , 120°C y 130°C . El contenido de humedad para cada tiempo se calculó utilizando el peso de la muestra para cada tiempo y el peso del material seco. Este último fue determinado con el valor del peso final y su contenido de humedad. Se utilizaron pesos iniciales de muestras que variaron entre 30 y 50 g. Las experiencias de secado a todas las temperaturas fueron realizadas por duplicado para cada diámetro y palos con y sin corteza (en total 84 experiencias).

7.2.4. Modelo matemático

Para poder aplicar las ecuaciones diferenciales de transporte de calor y materia en el secado de los palos, se realizaron las siguientes suposiciones:

- la no existencia de perfil térmico dentro del sólido
- la difusión era el mecanismo de transferencia de materia dentro del sólido
- la evaporación del agua tenía lugar en la superficie del sólido
- el material tenía la forma de un cilindro infinito
- las propiedades termofísicas y de transporte dependían del contenido de humedad y/o la temperatura
- la densidad aparente, el coeficiente de contracción y el coeficiente de difusión eran diferentes para cada material
- la actividad de agua era igual para ambos materiales en la interfase corteza-xilema

En las interfases sólido-aire y sólido-sólido, el modelo plantea la utilización de un coeficiente global de transferencia de materia. La figura 1 muestra la división en nodos y la simbología utilizada.

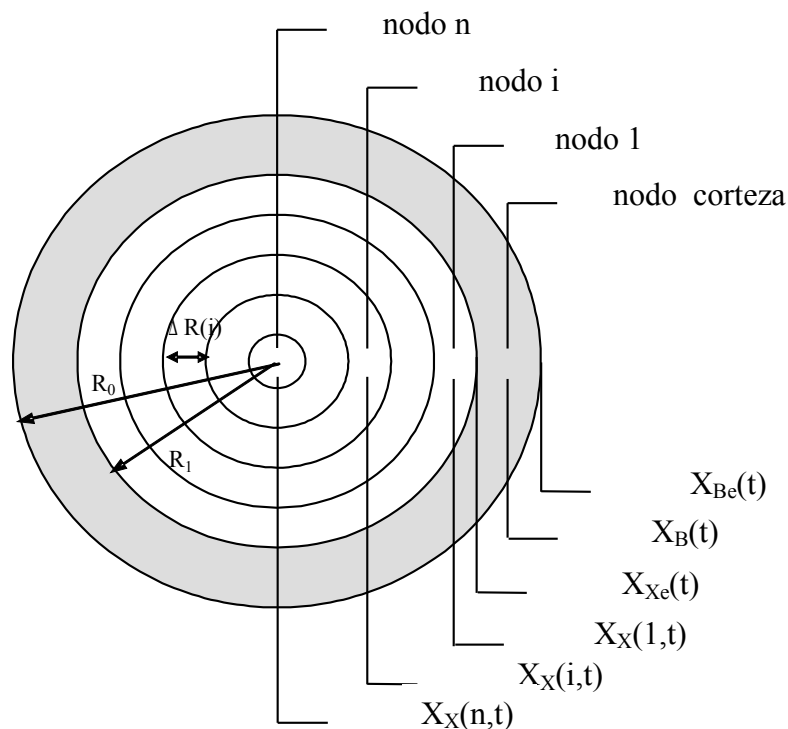


Figura 7.1. División del palo con corteza en nodos

Las ecuaciones para determinar el contenido de humedad en función del tiempo se obtuvieron realizando un balance de humedad en cada nodo, para un tiempo Δt . Como ejemplo se realiza a continuación este balance para el nodo corteza:

Flujo de humedad que entra al nodo – Flujo de humedad que sale del nodo =
= Acumulación de humedad en el nodo

$$\frac{D_{XB}^* \rho_X}{(1 + X_X(1,t))} * \frac{\Delta X_{1-B}}{\Delta R_{1-B}} * A_1 - \frac{D_{BA}^* \rho_B}{(1 + X_B(t))} * \frac{\Delta X_{B-A}}{\Delta R_{B-A}} * A_0 = M_{BS} * \frac{\Delta X_{t+1-t}}{\Delta t} \quad (7.1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{D_{XB}^* \rho_X}{(1 + X_X(1,t))} * 2 \frac{(X_X(1,t) - X_{Xe}(t))}{(\Delta R(1) + \Delta R(B))} * 2\pi R_1 L - \frac{D_{BA}^* \rho_B}{(1 + X_B(t))} * 2 \frac{(X_B(t) - X_{Be}(t))}{\Delta RB} * 2\pi R_0 L = \\ & = \pi (R_0^2 - R_1^2) L \frac{\rho}{(1 + X_B(t))} * \frac{(X_{B(t+1)} - X_{B(t)})}{\Delta t} \end{aligned} \quad (7.2)$$

$$\begin{aligned} X_B(t+1) = X_B(t) + \frac{4(1 + X_B(t))\Delta t}{\rho_B (R_0^2 - R_1^2)} & \left[\frac{D_{XB}^* \rho_X R_1}{(\Delta R(1) + \Delta R(B))(1 + X_X(1,t))} (X_X(1,t) - X_{Xe}(t)) - \right. \\ & \left. - \frac{D_{BA}^* \rho_B R_0}{\Delta RB(1 + X_B(t))} (X_B(t) - X_{Be}(t)) \right] \end{aligned} \quad (7.3)$$

donde: $X_{Be}(t)$ es el contenido de humedad de equilibrio de la corteza con el aire
y $X_{Xe}(t)$ es el contenido de humedad de equilibrio con $X_B(t)$

Para los demás nodos las ecuaciones obtenidas fueron:

*Nodo 1 (palo con corteza)

$$\begin{aligned} X_X(1,t+1) = X_X(1,t) + \frac{2\Delta t}{(2R_1\Delta R(1) - \Delta R(1)^2)} & \left[\frac{D_X}{\Delta R(1)} (R_1 - \Delta R(1))(X_X(2,t) - X_X(1,t)) - \right. \\ & \left. - \frac{D_{XA}^* R_1}{\Delta R(1)} (X_X(1,t) - X_{XA}(t)) \right] \end{aligned} \quad (7.5)$$

*Nodo 1 (palo sin corteza)

$$X_X(1,t+1) = X_X(1,t) + \frac{2\Delta t}{(2R_1\Delta R(1) - \Delta R(1)^2)} \left[\frac{D_X}{\Delta R(1)} (R_1 - \Delta R(1))(X_X(2,t) - X_X(1,t)) - \frac{2D_{XB}^* R_1}{(\Delta R(1) + \Delta R(B))} (X_X(1,t) - X_{Xe}(t)) \right] \quad (7.4)$$

donde: $X_{xA}(t)$ es el contenido de humedad del xilema en equilibrio con el aire

*Nodo i:

$$X_X(i,t+1) = X_X(i,t) + \frac{\Delta t D_X}{2R(i)\Delta R(i)} \left[\frac{R(i) - \Delta R(i)/2}{\Delta R(i)} (X_X(i+1,t) - X_X(i,t)) - \frac{R(i) + \Delta R(i)/2}{\Delta R(i)} (X_X(i,t) - X_X(i-1,t)) \right] \quad (7.6)$$

*Nodo n:

$$X_X(n,t+1) = X_X(n,t) + \frac{2\Delta t D_X}{\Delta R(n)^2} (X_X(i+1,t) - X_X(i,t)) \quad (7.7)$$

Para calcular los coeficientes globales de transferencia de masa, se tuvo en cuenta la resistencia a la transferencia de masa en el sólido (de tipo difusiva) y la resistencia convectiva del aire. Se supuso que no existía resistencia a la transferencia en la interfase (teoría de la doble resistencia) y por lo tanto, que existía una relación de equilibrio entre la corteza y el xilema dada por la ecuación 6.22 y entre el sólido y el aire dada por la isoterma de desorción. Con estas suposiciones, se obtuvieron las siguientes ecuaciones:

$$D_{XB}^* = \frac{(\Delta R(1) + \Delta R(B))(1 + X_X(1,t))}{\rho_X} * \frac{1}{\frac{\Delta R(1)(1 + X_X(1,t))}{D_X \rho_X} + \frac{M_{XB} \Delta R(B)(1 + X_B(t))}{D_B \rho_B}} \quad (7.8)$$

$$D_{BA}^* = \frac{\Delta R(B)(1 + X_B(t))}{2\rho_B} * \frac{1}{\frac{\Delta R(B)(1 + X_B(t))}{2D_B \rho_B} + \frac{M_{BA}}{k_G Y_e}} \quad (7.9)$$

$$D_{XA}^* = \frac{\Delta R(1)(1 + X_X(1,t))}{2\rho_X} * \frac{1}{\frac{\Delta R(1)(1 + X_X(1,t))}{2D_X\rho_X} + \frac{M_{XA}}{k_G Y_e}} \quad (7.10)$$

La temperatura del palo se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$T(t+1) = T(t) + \frac{1}{c_P \rho_M} \left[\frac{h \Delta t}{R_0} (T_A - T(t)) - \frac{\lambda \rho_M}{1 + X_M(t)} (X_M(t) - X_M(t+1)) \right] \quad (7.11)$$

7.2.5. Ajuste del modelo matemático a los datos experimentales

El modelo matemático fue ajustado a los datos experimentales (ecuaciones 7.1 a 7.11) utilizando el coeficiente efectivo de difusión de la humedad como parámetro de ajuste. En primer lugar, los datos de cinética de secado del xilema fueron ajustados utilizando la siguiente ecuación para el coeficiente efectivo de difusión de la humedad:

$$D_X = D_{X0} f_1 x(R_1) f_2 x(X_X) f_3 x(T) \quad (7.12)$$

En esta ecuación D_{X0} es una constante y $f_1 x(R_1)$, $f_2 x(X_X)$ y $f_3 x(T)$ son funciones matemáticas (para el xilema) que dependen del radio, del contenido de humedad del xilema y de la temperatura respectivamente.

Luego, los datos obtenidos de los palos con corteza fueron ajustados utilizando la ecuación del coeficiente efectivo de difusión de la humedad para el xilema y la siguiente ecuación para el coeficiente efectivo de difusión de la humedad en la corteza:

$$D_B = D_{B0} f_1 b(R_0) f_2 b(X_X) f_3 b(T) \quad (7.13)$$

En esta ecuación D_{B0} es una constante y $f_1 b(R_0)$, $f_2 b(X_X)$ y $f_3 b(T)$ son funciones matemáticas (para la corteza) que dependen del radio, del contenido de humedad de la corteza y de la temperatura respectivamente.

La dependencia del coeficiente efectivo de difusión de la humedad con el radio del palo y el contenido de humedad fue ajustada con una ecuación lineal, mientras que para explicar la dependencia con la temperatura, se utilizó una ecuación exponencial, tipo Arrhenius (Zogzas et al., 1996).

El ajuste se realizó minimizando el error promedio porcentual (MPE):

$$MPE = \frac{\sum \frac{|X_{experimental} - X_{calculado}|}{X_{experimental}}}{N} * 100 \quad (7.14)$$

donde N es el número de valores experimentales.

7.2.6. Parámetros utilizados en el modelo

Las propiedades y los coeficientes utilizados en las ecuaciones anteriores, fueron calculados de acuerdo a las ecuaciones dadas en la tabla 7.1. La ecuación que relaciona el calor específico de la yerba mate con el contenido de humedad fue obtenida en trabajos anteriores del grupo (Schmalko et al., 1997). Esta propiedad se determinó en forma simultánea con la conductividad térmica considerando la variación de la temperatura del material en estado inestable y la diferencia de temperatura en estado estable cuando el material se calentaba con flujo de calor constante. Para calcular el calor específico se midieron los valores de temperatura y tiempo en dos puntos diferentes del palo. Mediante la resolución numérica de la ecuación de transferencia de calor en estado inestable se minimizó el error promedio porcentual de la temperatura con lo que se obtuvo el valor del calor específico. Las mediciones se realizaron en palos de diferentes contenidos de humedad. Los datos de calor específico se ajustaron en función del contenido de humedad a diferentes modelos, resultando la ecuación que se da en la tabla 7.1 la de menor error promedio porcentual.

La ecuación que relaciona el calor latente con la temperatura fue obtenida a partir de los datos experimentales obtenidos en la bibliografía y utilizando la técnica de regresión lineal (Schmalko et al., 1998).

Para determinar los valores de los coeficientes de transferencia de calor y materia (h y k_G) se utilizaron los valores de las propiedades del aire obtenidas de las tablas de Kreith y Kern (1993) las que fueron evaluadas a la temperatura del aire.

Las ecuaciones para la densidad aparente y el coeficiente de contracción utilizadas en el cálculo fueron las obtenidas en el capítulo 6. Los valores M_{BA} y M_{XA} fueron obtenidos de las isothermas de sorción, mientras que el valor de M_{XB} fue obtenido de la ecuación de equilibrio corteza-xilema. En los dos primeros casos las pendientes se determinaron a la temperatura del material sólido y al contenido de humedad de la interfase corteza(o xilema)-aire calculada en la etapa de tiempo anterior. Para estimar M_{XB} se utilizaron los contenidos de humedad en la interfase xilema-corteza calculadas, también en este caso, en la etapa de tiempo anterior.

Tabla 7.1. Propiedades y coeficientes utilizados en el modelo

<i>Propiedad y/o coeficiente</i>	<i>Referencia</i>
$c_p = 1,79 \cdot 10^3 + 2,36 \cdot 10^3 X$	Schmalko et al., 1997
$\lambda = 7020 - 803 \ln(T + 273,16)$	Schmalko et al, 1997
$h = 0,51 \frac{k_a}{d} \left(\frac{vd}{v} \right)^{0,5} Pr^{0,37}$	Kreith y Bohn, p. 455, 1993
$k_G = 0,74 \frac{D_a \rho_a}{d} \left(\frac{vd}{v} \right)^{0,5} \left(\frac{v}{D_a} \right)^{1/3}$	Perry y Green, p. 5-65, 1997

7.2.7. Modelo matemático para un material isotrópico

Otro modelo más simple, que considera al material isotrópico, fue aplicado para comparar el comportamiento de ambos modelos. En el mismo, el contenido de humedad fue calculado utilizando la ecuación integrada de la 2^{da} ley de Fick (Ec. 7.15). En la misma D_M es el coeficiente efectivo de difusión de humedad que se calcula utilizando la ecuación 7.16. Para calcular la temperatura en cada etapa de tiempo se utilizó la ecuación 7.11.

$$X_M(t+1) = X_{BE} + (X_M(t) - X_{BE}) e^{-2.4048^2 \frac{D_M \Delta t}{R_0^2}} \quad (7.15)$$

$$D_M = D_{M0} f_1(X_M) f_2(T) \quad (7.16)$$

En esta ecuación D_{M0} es una constante y $f_1(X_M)$ y $f_2(T)$ son funciones matemáticas que dependen del contenido de humedad del material y de la temperatura respectivamente.

7.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.3.1. Cálculos previos

En las ecuaciones 12 y 13, el modelo introduce una dependencia del coeficiente efectivo de difusión de la humedad con el radio del palo. Para determinar esta dependencia, en una primera etapa se calculó el coeficiente de difusión utilizando la ecuación integrada de la segunda ley de Fick para un cilindro infinito, por regresión lineal, para los diferentes radios. Luego se realizó nuevamente una regresión lineal del logaritmo del coeficiente de difusión en función del radio con las que se calcularon las constantes dadas en las siguientes ecuaciones para palos con y sin corteza:

$$f_1x(R_1) = \text{constante} * e^{412R_1} \quad (7.17)$$

$$f_1b(R_0) = \text{constante} * e^{936R_0} \quad (7.18)$$

Las constantes de las ecuaciones 7.17 y 7.18 fueron incluidas en las constantes “ D_{x0} ” y “ D_{B0} ” de las ecuaciones 7.12 y 7.13.

Por otra parte, se realizaron ensayos previos para determinar la estabilidad del sistema, es decir cuál era el tamaño mínimo del nodo con que se podía trabajar. La misma se manifestaba con aumento y disminución brusca de la temperatura en un nodo en un intervalo de tiempo. Por este motivo, los palos que tienen $2,5 \cdot 10^{-3}$ m de diámetro fueron divididos en dos nodos; los palos que tienen un diámetro de $5,0 \cdot 10^{-3}$ m fueron divididos en 3 nodos y los palos con $7,5 \cdot 10^{-3}$ m de diámetro, en cinco nodos. Además, las diferencias de temperaturas encontradas entre nodos eran muy pequeñas, y por esta razón se supuso un perfil plano de temperatura dentro del palo.

7.3.2. Aplicación del modelo

Los valores experimentales de las ochenta y cuatro experiencias de secado se exponen en el anexo 4.

Para estudiar la dependencia del coeficiente efectivo de difusión de la humedad con el contenido de humedad y la temperatura, se utilizaron las ecuaciones 7.1 a 7.11 suponiendo valores de las constantes en las ecuaciones 7.17 y 7.18 y minimizando el MPE. Los menores valores de MPE se obtuvieron dividiendo las experiencias en dos grupos: el primer grupo consideró el rango de temperatura de 70°C a 100°C y el otro grupo entre 110°C y 130°C.

En primer lugar se calculó la ecuación del coeficiente efectivo de difusión de la humedad para el secado del xilema entre 70°C y 100°C. En una segunda etapa se calculó esta constante para el rango de temperatura entre 110°C y 130°C, utilizando la ecuación calculada en primer término para las primeras etapas del calentamiento. Luego se calcularon las constantes para la corteza, siguiendo el mismo procedimiento y utilizando las ecuaciones obtenidas para el xilema. Se utilizaron cuatro programas desarrollados en “basic”, que se exponen en el anexo 5.

Las ecuaciones resultantes para el coeficiente efectivo de difusión de la humedad son las ecuaciones 7.19, 7.20, 7.21 y 7.22. También se dan los valores de MPE correspondiente al contenido de humedad y al tiempo de secado.

*Xilema, entre 70°C y 100°C

MPE= 12,72% (contenido de humedad)

MPE= 6,58% (tiempo de secado)

$$D_X = 1,24 \cdot 10^{-7} (1 + 0,75X_X) e^{\frac{-2270}{(T+273,16)}} e^{412R_1} \quad (7.19)$$

*Xilema, entre 100°C y 130°C

MPE= 12,63% (contenido de humedad)

MPE= 3,85% (tiempo de secado)

$$D_X = 1,18 \cdot 10^{-5} (1 + 1,55X_X) e^{\frac{-3928}{(T+273,16)}} e^{412R_1} \quad (7.20)$$

*Corteza, entre 70°C y 100°C

MPE= 13,07% (contenido de humedad)

MPE= 5,84% (tiempo de secado)

$$D_B = 9,95 \cdot 10^{-5} (1 + 0,28X_B) e^{\frac{-5968}{(T+273,16)}} e^{936R_0} \quad (7.21)$$

*Corteza, entre 100°C y 130°C

MPE= 19,06% (contenido de humedad)

MPE= 4,60% (tiempo de secado)

$$D_B = 5,17 \cdot 10^{-4} (1 + 0,44 X_B) e^{\frac{-6312}{(T+273,16)}} e^{936 R_0} \quad (7.22)$$

Los valores del coeficiente efectivo de difusión de la humedad en el xilema variaron entre $1,7 \cdot 10^{-10}$ y $8,3 \cdot 10^{-9}$ m²/s y para la corteza entre $8,7 \cdot 10^{-12}$ y $4,7 \cdot 10^{-9}$ m²/s. Las diferencias entre los valores de los coeficientes efectivos de difusión de la humedad entre ambos materiales fueron muy grandes a bajas temperaturas y pequeñas a altas temperaturas. Abud-Archila et al. (2000) también encontraron diferencias en el coeficiente efectivo de difusión de la humedad entre los diferentes componentes del arroz con cáscara. Como se puede deducir de las constantes relacionadas al efecto de la temperatura en las ecuaciones 7.19-7.22 (5968°K^{-1} y 6312°K^{-1} vs. 2270°K^{-1} y 3928°K^{-1}), la dependencia del coeficiente efectivo de difusión de la humedad para la corteza fue mayor que para el xilema con esta variable. Por otra parte, la dependencia del coeficiente efectivo de difusión de la humedad con el contenido de humedad fue mayor en el xilema que en la corteza. Los valores del coeficiente efectivo de difusión de la humedad y las energías de activación están en el orden que las encontradas para otros productos alimenticios (Zogzas et al., 1996). La dependencia del coeficiente efectivo de difusión de la humedad se muestra en las figuras 7.2 y 7.3 para el xilema y la corteza entre 70°C y 100°C y 0 y 2 kg agua/kg de sólido seco.

La figura 7.4 compara los valores de contenidos de humedad teóricos y experimentales para palos con y sin corteza para un caso particular ($T_A = 100^\circ\text{C}$ y $d = 5,0 \cdot 10^{-3}$ m). La figura 7.5 muestra la evolución de la temperatura predicha durante el secado en las mismas condiciones. Como fue de esperarse, la velocidad de secado en los palos sin corteza fue mayor que en los palos con corteza.

También se calculó el número de Biot para la transferencia de masa utilizando la relación de los términos del denominador de las ecuaciones 7.9 y 7.10, encontrándose valores entre 1 y 20.

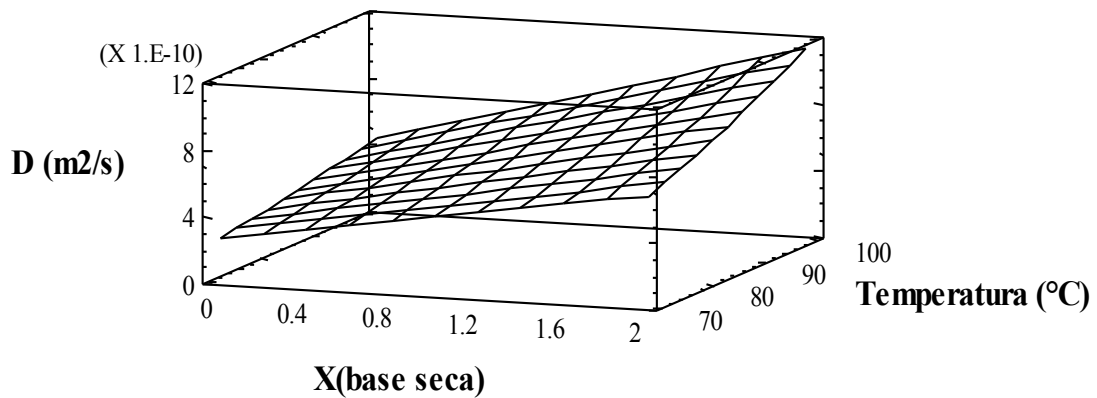


Figura 7.2. Coeficiente efectivo de difusión de humedad del xilema en función de la temperatura y el contenido de humedad (ec. 7.19) en palos de $5.0 \cdot 10^{-3}$ m de diámetro.

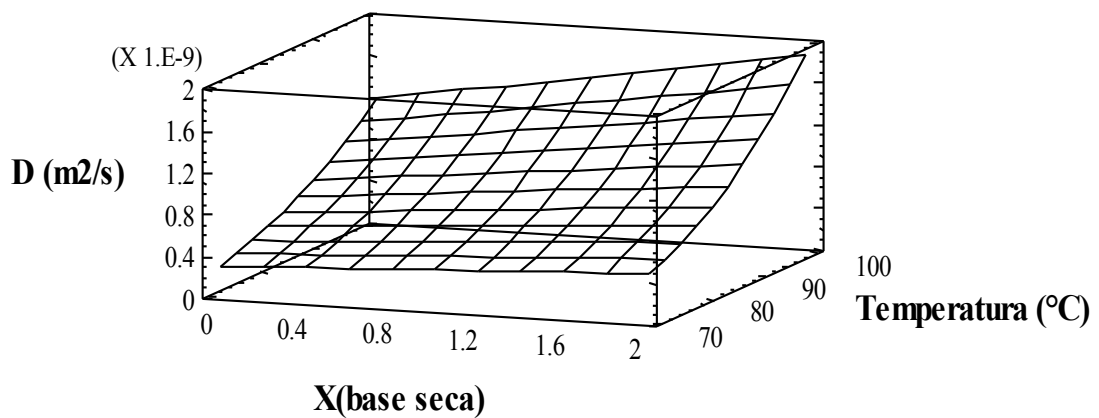


Figura 7.3. Coeficiente efectivo de difusión de humedad de la corteza en función de la temperatura y el contenido de humedad (ec. 7.19) en palos de $5.0 \cdot 10^{-3}$ m de diámetro.

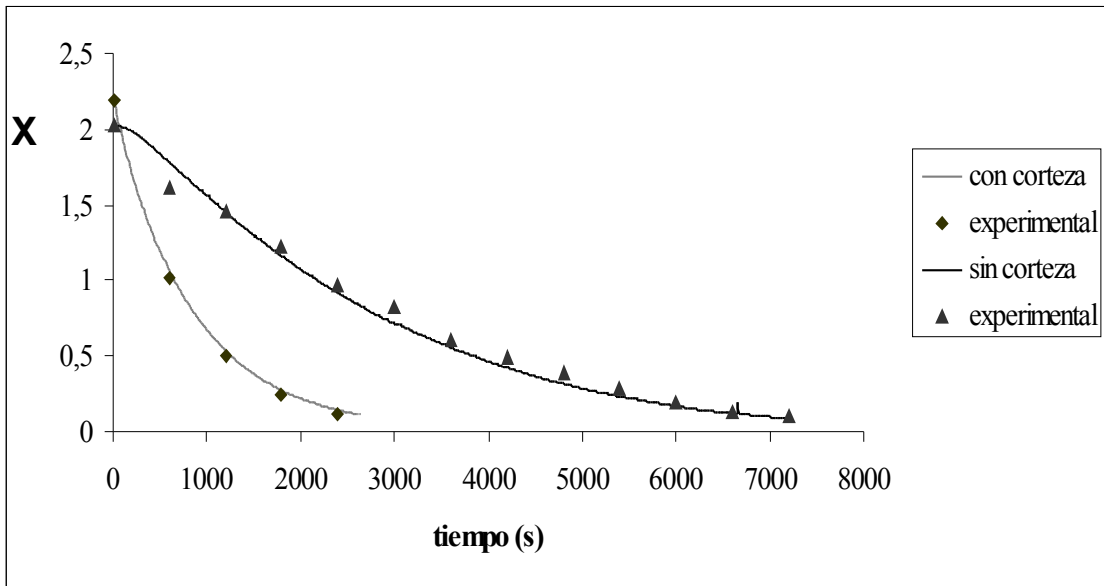


Figura 7.4. Valores experimentales y predichos con el modelo de contenido de humedad durante el secado a 100°C para palos con y sin corteza (diámetro: $5,0 \cdot 10^{-3}$ m)

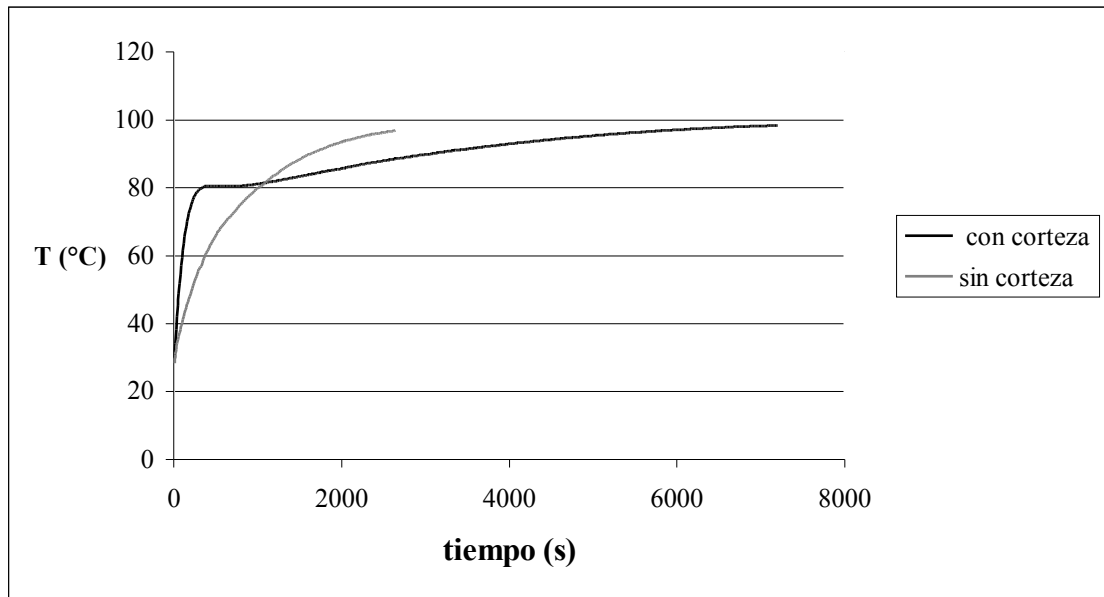


Figura 7.5. Predicción de la evolución de la temperatura durante el secado a 100°C para palos con y sin corteza ($d= 5,0 \cdot 10^{-3}$ m)

7.3.3. Modelo considerando un material isotrópico

Para poder comparar los modelos para el material compuesto y el isotrópico, se utilizaron los mismos rangos de temperatura para realizar el ajuste (70°C-100°C y 100°C-130°C). Las ecuaciones obtenidas y los valores de MPE para el contenido de humedad y el tiempo de secado, fueron:

*Entre 70°C y 100°C

MPE= 46,53% (contenido de humedad)

MPE=31,15% (tiempo de secado)

$$D_M = 1,01 \cdot 10^{-5} (1 + 0,51 X_M) e^{\frac{-3619}{(T+273,16)}} \quad (7.23)$$

*Entre 100°C y 130°C

MPE= 51,17% (contenido de humedad)

MPE=18,95% (tiempo de secado)

$$D_M = 8,15 \cdot 10^{-4} (1 + 1,25 X_M) e^{\frac{-5185}{(T+273,16)}} \quad (7.24)$$

Los valores de MPE fueron mayores que los obtenidos con el modelo del material compuesto. Los valores predichos de contenido de humedad fueron menores que los experimentales en palos con diámetros pequeños y mayores que los valores experimentales en palos con diámetros grandes. Ello se debe probablemente a las diferentes proporciones de la relación de volúmenes de la corteza y el xilema y a las diferentes estructuras del material.

7.4. CONCLUSIONES

El modelo desarrollado para un material compuesto fue satisfactoriamente aplicado al secado de palos de yerba mate, utilizándose el coeficiente efectivo de difusión de la humedad como parámetro para ajustar el modelo.

Se encontró que el coeficiente efectivo de difusión de la humedad dependió de la temperatura, el contenido de humedad y el diámetro del palo. Se obtuvieron menores valores

de error promedio porcentual (entre 12 y 19%) cuando las experiencias se dividieron en dos grupos, tomándose la temperatura de 100°C como límite. Los valores del coeficiente efectivo de difusión de la humedad para el xilema fueron mayores que para la corteza (entre 2 y 20 veces). Los errores promedios porcentuales fueron mucho menores que los obtenidos al aplicar un modelo más simple, que consideraba al material como isotrópico.

7.5. NOMENCLATURA

c_p	Capacidad calorífica específica del sólido (J/kg°C)
d	Diámetro del palo (m)
D	Coefficiente efectivo de difusión de humedad para un material simple (m ² /s)
D^*	Coefficiente efectivo de difusión de humedad global. Incluye dos fases (m ² /s)
k	Conductividad térmica (J/ms°C)
k_G	Coefficiente convectivo de transferencia de masa (kg/m ² s)
h	Coefficiente convectivo de transferencia de calor (J/m ² s°C)
M	Pendiente de la línea de equilibrio
N	Número de datos experimentales
Pr	Número de Prandtl para el aire
R	Radio del nodo (m)
R_1	Radio del xilema (m)
R_0	Radio de la corteza (m)
T	Temperatura (°C)
V	Velocidad del aire (m/s)
X	Contenido de humedad (kg agua/kg sólido seco)
Y	Humedad absoluta del aire (kg agua/kg aire seco)
ΔR	Espesor del nodo (m)
Δt	Etapa de tiempo (s)
λ	Calor latente de evaporación del agua (J/kg)
ν	Viscosidad cinemática del aire (m ² /s)
ρ	Densidad aparente (kg/m ³)

Subscriptos

A	Aire
B	Corteza
BA	Interfase corteza-aire
E	Equilibrio
I	Número de nodo (entre 1 y n)
M	Valor medio de una propiedad considerando la corteza y el xilema
t	Tiempo
X	Xilema
XA	Interfase xilema-aire
XB	Interfase xilema-corteza

CAPÍTULO 8

PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y DE TRANSPORTE DE LAS HOJAS DE YERBA MATE

8.1. INTRODUCCIÓN

En los capítulos anteriores se expusieron los resultados obtenidos en la medición de las propiedades fisicoquímicas y de transporte en los palos de yerba mate (densidad, coeficiente de contracción, calor específico, conductividad térmica, coeficiente de difusión del agua, contenido de humedad de equilibrio, etc).

En este capítulo se realizó una revisión de los trabajos reportados sobre la determinación de estas propiedades para utilizarlas en el modelado de las etapas de zapecado y secado de las hojas de yerba mate. Esta revisión se realizó principalmente sobre trabajos que fueron desarrollados en este Centro de Investigación (Känzig et al., 1987.a; Schmalko et al., 1989; Ramallo et al., 2001; Schmalko et al., 1996).

8.2. MATERIALES

En todos los casos el estudio se efectuó en hojas verdes de yerba mate (sin procesar). Su espesor varió entre $2,79 \cdot 10^{-4}$ y $4,54 \cdot 10^{-4}$ m. El mismo se determinó utilizando un micrómetro automático que opera con un peso muerto y que posee una placa plana circular con una cara móvil con un área de $200 \pm 5 \text{ mm}^2$. La precisión de la medida era de $\pm 2,54 \cdot 10^{-6}$ m ($\pm 1 \cdot 10^{-4}$ pulgadas). Las mediciones se realizaron en 4 puntos diferentes de la hoja y para las experiencias de cinética de secado se seleccionaban aquellas cuyo espesor no difería en $\pm 2,54 \cdot 10^{-5}$ m (Ramallo et al., 2001).

8.3. ISOTERMAS DE DESORCIÓN

Los datos de humedad de equilibrio para diferentes actividades de agua para las hojas de yerba mate zapecada entre 20 °C y 90 °C se muestran en la tabla 1 (Känzig et al., 1987.a; Schmalko et al., 1989).

Se utilizaron dos métodos experimentales diferentes. En el primer trabajo (Känzig et al., 1987.a) se utilizó un método instrumental (entre 20 °C y 50 °C), en el que la actividad del agua se midió utilizando un equipo Rotronic DT, con celda de medición WA-SHT3, con doble termostatación y sensor de conductividad eléctrica. La muestra original (hojas verdes sin procesar) era secada durante diferentes tiempos en una estufa de vacío a 50 °C y luego se

mantenía en frascos herméticamente cerrados durante 1 semana para uniformar su humedad. Luego se medía su actividad de agua y se determinaba su contenido de humedad utilizando el método de secado en estufa a 103 +/-2 °C hasta llegar a peso constante. En el segundo trabajo (Schmalko et al., 1989), se utilizó el método estático, en el que las muestras se colocaban en frascos que contenían soluciones salinas saturadas hasta alcanzar el equilibrio. Estos frascos eran colocados en una estufa a una temperatura determinada. Se trabajó entre 60 °C y 90 °C y se utilizaron 7 soluciones salinas diferentes. Una vez que se alcanzaba el equilibrio, se determinaba el contenido de humedad de las muestras.

Tabla 8.1. Contenido de humedad de equilibrio(X), en kg agua/kg de sólido seco y actividad de agua de hojas de yerba mate sin procesar a temperaturas entre 20 °C y 50 °C (Känzig et al., 1987.a) y entre 60 °C y 90 °C (Schmalko et al., 1989).

20 °C		30 °C		40 °C		50 °C	
a_w	X	a_w	X	a_w	X	a_w	X
0,164	0,0358	0,118	0,0495	0,111	0,0400	0,141	0,0418
0,207	0,0470	0,162	0,0611	0,127	0,0464	0,212	0,0506
0,343	0,0594	0,277	0,0707	0,164	0,0555	0,256	0,0536
0,416	0,0691	0,348	0,0753	0,229	0,0633	0,378	0,0642
0,542	0,0853	0,477	0,0900	0,337	0,0760	0,475	0,0808
0,650	0,1036	0,602	0,1158	0,441	0,0862	0,584	0,0945
0,699	0,1138	0,664	0,1260	0,556	0,0977	0,699	0,1507
0,753	0,1494	0,730	0,1562	0,661	0,1201	0,803	0,1916
0,847	0,1892	0,798	0,1818	0,704	0,1408	0,792	0,2057
0,872	0,2080	0,833	0,2121	0,770	0,1769	0,813	0,2442
0,885	0,2332	0,875	0,2464	0,811	0,2016	0,855	0,2811
0,901	0,2849	0,901	0,2915	0,838	0,2290	0,857	0,3175

60 °C		70 °C		80 °C		90 °C	
a_w	X	a_w	X	a_w	X	a_w	X
0,110	0,0158	0,108	0,0144	0,105	0,0151	0,102	0,0119
0,293	0,0296	0,278	0,0316	0,260	0,0297	0,241	0,0295
0,467	0,0670	0,470	0,0493	0,514	0,0505	0,650	0,0510
0,497	0,0512	0,497	0,0488	0,520	0,0494	0,785	0,1038
0,674	0,1003	0,660	0,0718	0,652	0,0685		
0,789	0,1407	0,791	0,1157	0,793	0,0943		
0,802	0,1680	0,795	0,1536	0,789	0,1049		

En cuanto al ajuste de los diferentes modelos, en el primer trabajo (entre 20 °C y 50 °C) se encontró un muy buen ajuste con el modelo de Halsey (ec. 8.1), dando un valor de error promedio porcentual (MPE) de 5,22 %:

$$a_w = \exp\left(-\frac{a}{X^r}\right) \quad (8.1)$$

Los valores de las constantes “a” y “r” se pueden observar en la tabla 8.2.

Con el segundo grupo de datos (60 °C-90 °C) se encontró el mejor ajuste con el modelo de Chen:

$$X = \frac{1}{B} \ln\left(\frac{\ln a_w - K}{a'}\right) \quad (8.2)$$

El error promedio porcentual fue del 8,65 %. Los valores de las constantes “a’”, “B” y “K” se dan en la tabla 8.3.

No obstante, cuando se utilizaron los datos a todas las temperaturas (20-90 °C) y se ajustaron a un solo modelo, se obtuvo el mejor ajuste con el modelo de GAB:

$$X = \frac{XmCka_w}{(1 - ka_w)(1 - ka_w + cka_w)} \quad (8.3)$$

Con esta ecuación se obtuvo un error promedio porcentual del 7,51 %. Los valores de las constantes “Xm”, “C” y “k” se encuentran en la tabla 8.4.-

El error promedio porcentual (MPE) se calculó con la siguiente ecuación:

$$MPE = \frac{\sum \frac{|X_{experimental} - X_{calculado}|}{X_{experimental}}}{N} * 100 \quad (8.4)$$

Donde N es el número de datos experimentales.

Tabla 8.2. Constantes a y r de la ecuación de Halsey (1) y error promedio porcentual (MPE) para hojas de yerba mate entre 20 °C y 50 °C (Känzig et al., 1987.a).

	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C
a	0,0141	0,0114	0,0162	0,0302
r	1,515	1,764	1,587	1,290
MPE	6,92	2,86	5,21	5,90

Tabla 8.3. Constantes a’, B y K de la ecuación de Chen (2) y error promedio porcentual (MPE) para hojas de yerba mate entre 60 °C y 90 °C (Schmalko et al., 1989).

	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
a'	-3,06	-2,95	-3,04	-2,80
B	-32,96	-32,76	-32,78	-32,38
K	-0,251	-0,164	-0,017	-0,086
MPE	10,40	6,61	8,11	10,09

Tabla 8.4. Constantes X_m , C y k de la ecuación de GAB (3) y error promedio porcentual (MPE) para hojas de yerba mate entre 20 °C y 90 °C.

	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
X_m	0,0484	0,0511	0,0494	0,0418	0,0388	0,0250	0,0316	0,0169
C	11,19	14,96	45,13	46,36	4,34	12,80	7,88	39,79
k	0,915	0,911	0,935	1,005	0,963	1,031	0,884	1,066
MPE	6,97	3,18	5,20	4,62	10,00	10,05	3,13	16,92

Como se puede observar en las tres últimas tablas, los valores de las constantes no presentaron algún tipo de tendencia con la temperatura y al realizar el ajuste por regresión lineal de las constantes, en muy pocos casos resultaron estos ajustes significativos. Por lo tanto no se pudo obtener una ecuación general que describiera la dependencia del contenido de humedad de equilibrio con la temperatura. Al realizar el modelado de las etapas de zapeado y secado, se calcularán los valores de contenido de humedad de equilibrio a las temperaturas más cercanas y luego se interpolarán estos valores para obtener el mismo a la temperatura requerida.

8.4. DENSIDAD APARENTE Y COEFICIENTE DE CONTRACCIÓN

Estas dos propiedades y su dependencia con el contenido de humedad fueron estudiadas para las hojas de la yerba mate por Ramallo et al (2001). Estos autores utilizaron la siguiente metodología:

Las hojas de yerba mate fueron seleccionadas de acuerdo a su espesor. La hojas eran seleccionadas considerando un variación de $\pm 2,54 \cdot 10^{-6}$ m ($\pm 1 \cdot 10^{-4}$ pulgadas) en los diferentes puntos de la hoja. Si no cumplían este requisito, las mismas eran descartadas. Una vez clasificadas, se midió el área marcando el contorno de las hojas sobre un papel, cortándolo,

pesándolo y comparándolo con el peso de un área conocida del mismo papel. Cada una de las fracciones eran parcialmente secadas y mantenidas durante 3 días en un recipiente herméticamente cerrado con el objeto de uniformar su humedad. Se determinaba luego el peso, espesor y contenido de humedad. Estas experiencias fueron llevadas a cabo para cada espesor y a cuatro temperaturas diferentes (100 °C, 110 °C, 120 °C y 130 °C). La densidad aparente fue determinada como el cociente entre el peso y el volumen de las hojas (el volumen se calculó multiplicando el espesor por el área). El coeficiente de encogimiento se calculó como la relación entre el espesor a un contenido de humedad dividido el espesor inicial. Si bien se define este coeficiente como la relación entre los respectivos volúmenes (Lozano et al, 1983), al permanecer el área constante, se puede considerar que es igual a la relación de los espesores (L/L_0).

Los datos obtenidos fueron analizados utilizando regresión lineal. Se realizaron dos tipos de regresiones, la primera de ellas considerando el espesor dividido el espesor inicial en función del contenido de humedad dividido el contenido inicial de humedad (L/L_0 vs. X/X_0) y en segundo lugar el espesor en función del contenido de humedad (L vs. X).

La influencia de la temperatura fue analizada comparando los límites de confianza de la pendiente y la ordenada al origen de las líneas de regresión. No se encontraron diferencias significativas entre estos dos parámetros al comparar los valores estimados a las diferentes temperaturas ($p < 0,05$). Por lo tanto las 94 determinaciones se ajustaron a un solo modelo. El mejor ajuste se obtuvo con la siguiente ecuación (MPE= 10,05 %):

$$L = 2,60 \cdot 10^{-4} + 6,34 \cdot 10^{-5} X \quad (8.5)$$

El mismo procedimiento se siguió para ajustar los datos de densidad aparente. En este caso se encontró también que la densidad aparente era independiente de la temperatura de secado. Por lo tanto, todos los valores experimentales se ajustaron a una ecuación lineal. Se obtuvo la siguiente ecuación ($P < 10^{-5}$ y MPE=10,75 %):

$$\rho = 560 + 187 X \quad (8.6)$$

8.5. COEFICIENTE DE DIFUSIÓN

El estudio del coeficiente de difusión del agua en las hojas de yerba mate fue llevado a cabo a temperaturas menores a 100 °C (60 °C-100 °C) por Schmalko et al. (1996), y a temperaturas mayores a 100 °C (100 °C-130 °C) por Ramallo et al (2001).

En ambos trabajos, los valores de coeficientes de difusión se calcularon a partir de los datos de variación de contenido de humedad en función del tiempo durante el secado de las hojas.

Para estudiar la dependencia del coeficiente con la temperatura y el contenido de humedad, se utilizó en el primer trabajo (Schmalko et al., 1996) una técnica de regresión no lineal y el criterio de los cuadrados mínimos, planteándose un modelo tipo Arrhenius para explicar la dependencia con la temperatura y un modelo exponencial para explicar la variación con el contenido de humedad. La ecuación resultante fue la siguiente:

$$D = 2,96 \cdot 10^{-6} e^{0,0797X} e^{\frac{-4558,6}{T+273,16}} \quad (8.7)$$

Los valores del coeficiente de difusión variaron entre $2,1 \cdot 10^{-12}$ y $1,9 \cdot 10^{-11}$ m²/s.

Cuando se trabajó a temperaturas mayores a 100°C (Ramallo et al., 2001), para determinar el coeficiente de difusión a partir de los datos experimentales, se utilizó el método de las diferencias finitas, discretizándose el tiempo de secado. Para explicar la dependencia con la temperatura se utilizó una ecuación del tipo Arrhenius y una dependencia lineal con el contenido de humedad. La ecuación obtenida, fue la siguiente:

$$D = 6,64 \cdot 10^{-7} (1 + 0,01X(\%)) e^{\frac{-3373}{T+273,16}} \quad (8.8)$$

Los valores de coeficiente de difusión variaron entre $2,3 \cdot 10^{-11}$ y $2,5 \cdot 10^{-10}$ m²/s.

8.6. CAPACIDAD CALORÍFICA Y CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Estas dos propiedades dependen en gran medida del contenido de humedad del material (Niesteruk, 1996). También, en general, dependen de la temperatura, pero en el rango normal de secado de los productos vegetales, esta variación es despreciable.

Ramallo y Schmalko (2000) realizaron una recopilación de las ecuaciones utilizadas para determinar estas propiedades con el objeto de utilizarlas en los cálculos del coeficiente de difusión del agua. Al estudiar la capacidad calorífica, encontraron ecuaciones para numerosos vegetales (ecuaciones específicas para un producto) y ecuaciones generales. En todos los casos se planteaban modelos lineales entre los parámetros y la humedad. Los mismos presentaban mucha similitud en cuanto a los valores para el producto seco (ordenada al origen) y la pendiente (las variaciones eran menores al 10 %). Se optó por utilizar una ecuación con los valores medios de la ordenada al origen y pendiente considerando las ecuaciones de productos similares (repollo, lechuga, espinacas, palos de yerba mate y vegetales en general):

$$c = 1539 + 27,2x \quad (8.9)$$

Al estudiar la conductividad térmica, como en el caso anterior, se encontraron ecuaciones para determinar esta propiedad en productos vegetales, ya sean específicas o generales. La mayoría de las encontradas son modelos lineales, aunque también se encontraron modelos que incluían términos logarítmicos y funciones inversas. Estos modelos se descartaron debido a la inestabilidad que presentan cuando se acercan al valor 0 de contenido de humedad. Al ser los modelos lineales muy similares entre sí, se optó por utilizar, como en el caso anterior, los valores promedios de la ordenada al origen y de la pendiente de los productos similares (perejil, apio, palos de yerba mate y vegetales en general):

$$k_t = 0,142 + 0,051x \quad (8.10)$$

8.7. NOMENCLATURA

a	Constante del modelo de Halsey
a'	Constante de la ecuación de Chen
a _w	Actividad del agua
B	Constante de la ecuación de Chen
C	Constante del modelo GAB
c	Capacidad calorífica (J/kg°K)
D	Coeficiente de difusión del agua en las hojas (m ² /s)
K	Constante de la ecuación de Chen
k	Constante del modelo GAB
k _t	Conductividad térmica (W/m°K)
L	Espesor de la hoja (m)
L _o	Espesor inicial de la hoja (m)
N	Número de datos experimentales
r	Constante del modelo de Halsey
T	Temperatura (°C)
x	Contenido de humedad, % base húmeda (kg agua/100 kg sólido húmedo)
X	Contenido de humedad, base seca (kg agua/kg sólido seco)
X _o	Contenido inicial de humedad, base seca (kg agua/kg sólido seco)
X _m	Constante del modelo GAB –humedad de la monocapa(kg agua/kg sólido seco)
X(%)	Contenido de humedad, % base seca (kg agua/100 kg sólido seco)
ρ	Densidad aparente (kg/m ³)

CAPÍTULO 9

DEGRADACIÓN DE LAS CLOROFILAS EN CONDICIONES CONTROLADAS

9.1. INTRODUCCIÓN¹

Uno de los parámetros más importantes en la calidad de un alimento es su color, relacionado con la presencia de pigmentos. Uno de los compuestos responsables del color verde en los alimentos de origen vegetal es la clorofila.

Para conservar los alimentos se realizan normalmente una serie de tratamientos (escaldado, secado, etc.) que producen una disminución importante de la concentración de clorofilas y la correspondiente pérdida de color. La degradación de las clorofilas en alimentos procesados puede seguir dos caminos diferentes (Heaton et al., 1996): a) la pérdida del magnesio para formar feofitina, seguido por la separación de la cadena fitol para formar un feofóbido y b) la separación de la cadena de fitol para formar la clorofilida y luego feofóbido por la pérdida del magnesio. Esta pérdida se puede deber a la acción del calor o una sustitución acídica. La separación de la cadena fitol puede deberse a la hidrólisis química o a la acción enzimática (figura 9.1).

Existen numerosos estudios de su degradación y el cambio de color en el procesamiento de los alimentos. Los mismos ya fueron mencionados en el Capítulo 4. En el procesamiento de la yerba mate se producen pérdidas muy importantes de las clorofilas (91%). En la etapa de zapecado se degrada aproximadamente el 80% de la clorofila que tienen las hojas y en la etapa de secado el 11% de este valor original, aunque si se considera el contenido con que ingresan a la etapa de secado, la degradación alcanza al 55%.

Entre los factores estudiados que influyen en la degradación de la clorofila y el color se pueden mencionar la temperatura, la actividad del agua (a_w), el pH, etc. El efecto de la temperatura fue ampliamente estudiado por muchos investigadores y en numerosos productos.

Canjura et al. (1991) estudiaron la degradación de las clorofilas en puré de espinacas cuando eran tratadas a temperaturas que variaron entre 100°C y 145°C. Encontraron valores de la constante de velocidad específica de primer orden entre 0,036 min⁻¹ y 0,322 min⁻¹ para la clorofila *a* y 0,0067 min⁻¹ y 0,163 min⁻¹ para la clorofila *b*. Las energías de activación tuvieron valores de 15 kcal/mol y 22 kcal/mol.

¹ El desarrollo de este Capítulo se basa en un trabajo realizado en forma conjunta con la Lab. Patricia Scipioni y el Ing. Darío Ferreira, ambos integrantes del proyecto “Utilización de Gas Licuado Propano en el Procesamiento de la Yerba Mate: Modelado y Optimización de la Etapa de Zapecado”, bajo mi Dirección.

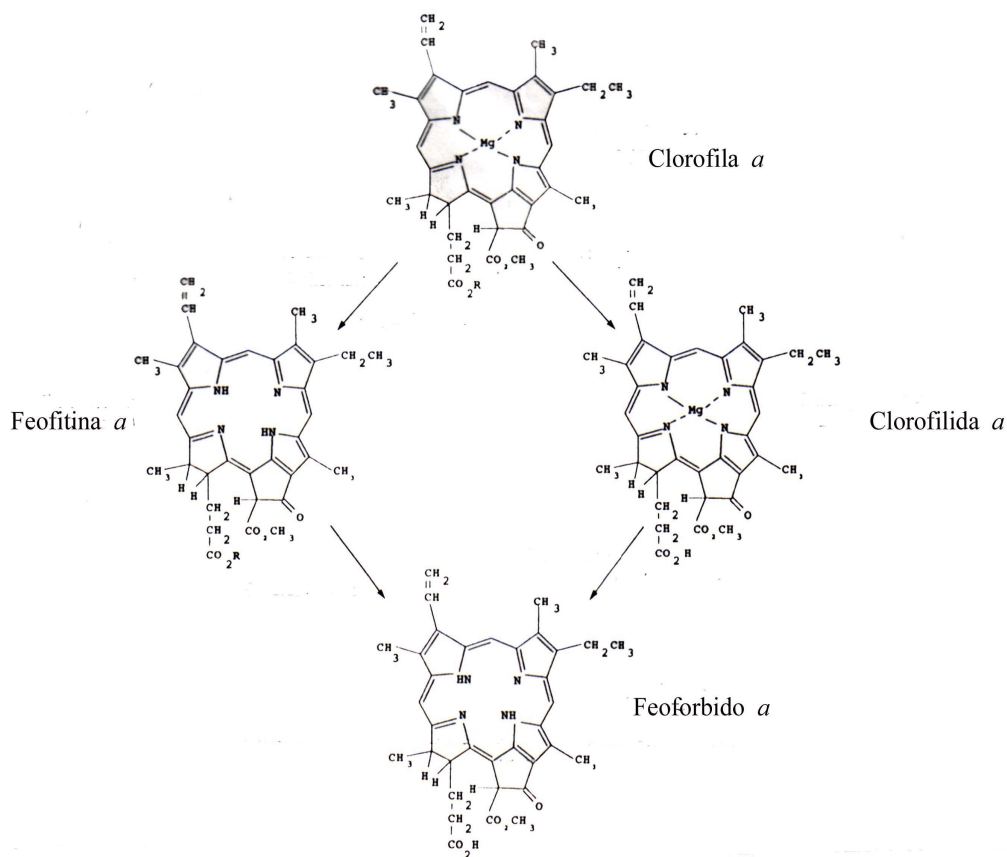


Figura 9.1. Pasos de la degradación de la clorofila *a*

Steet y Tong (1996) estudiaron la degradación de las clorofilas y el color en espinacas a tres temperaturas (70 °C, 80 °C y 90 °C). Las experiencias se llevaron a cabo en el producto con alto contenido de humedad (80 %, base húmeda). Los valores de la constante de velocidad específica variaron entre 0,0074 min⁻¹ y 0,0160 min⁻¹ para la clorofila *a*, entre 0,0039 min⁻¹ y 0,0160 min⁻¹ para la clorofila *b* y entre 0,0042 min⁻¹ y 0,0187 min⁻¹ para el parámetro de color *a**. Las energías de activación tuvieron valores de 19,5 kcal/mol; 17,1 kcal/mol y 18,2 kcal/mol, respectivamente.

Weemaes et al. (1999), trabajando con jugo de brócoli a temperaturas entre 80 °C y 120 °C, encontraron valores de la constante de 0,0101 min⁻¹ y 0,1224 min⁻¹ para la clorofila *a* y 0,0085 min⁻¹ y 0,0943 min⁻¹ para la clorofila *b*. Las energías de activación calculadas fueron de 71,04 kJ/mol y 67,11 kJ/mol, respectivamente.

Shivhare et al. (2000) estudiaron la influencia de la temperatura en el secado de la okra. Se utilizaron dos pretratamientos y tres temperaturas de secado (40 °C, 55 °C y 70 °C). Se encontró que la temperatura óptima de secado (menor degradación) era de 55 °C.

Ahmed et al. (2000) estudiaron la cinética de degradación del color en puré de chile verde, encontrando valores de $0,041 \text{ min}^{-1}$ (a $60 \text{ }^\circ\text{C}$) para el parámetro de color a^* y energías de activación entre $11,4 \text{ kJ/mol}$ y $16,0 \text{ kJ/mol}$ para los diferentes parámetros de color.

Lau et al. (2000) determinaron los cambios de color en espárragos verdes planteando diferentes modelos para describir su degradación, en los cuales se consideraban diferentes órdenes de reacción. Al trabajar con la variable “matiz” encontraron que la ecuación de primer orden era la que mejor describía los cambios y obtuvieron valores de la constante de $0,0029 \text{ min}^{-1}$ y $0,0130 \text{ min}^{-1}$ (entre $70 \text{ }^\circ\text{C}$ y $100 \text{ }^\circ\text{C}$) y una energía de activación de $12,9 \text{ kcal/mol}$.

La influencia de la actividad del agua (a_w) fue estudiada por Lajollo et al. (1971) en espinacas, determinando la cinética de degradación a dos temperaturas y cinco valores de a_w . Encontraron que la velocidad de degradación aumentaba mucho a partir de una a_w de $0,52$ y por debajo de ésta la influencia era muy baja. Como ejemplo se puede citar que a $37 \text{ }^\circ\text{C}$ con una a_w de $0,11$ la clorofila a tenía una degradación del 20% en 120 días (constante de (velocidad específica = $0,0000093 \text{ min}^{-1}$); mientras que con una a_w de $0,75$ esta degradación se producía en $1,5$ días (constante de velocidad específica = $0,000745 \text{ min}^{-1}$). Morawicki et al. (1999) estudiaron la influencia de la a_w en la degradación de clorofilas en yerba mate, encontrando que en los niveles de a_w estudiados ($< 0,33$) esta variable no influía en la velocidad de degradación. Las constantes de velocidad específica variaron entre $0,0000135 \text{ min}^{-1}$ y $0,0000155 \text{ min}^{-1}$ (a $25 \text{ }^\circ\text{C}$).

En el procesamiento de la yerba mate se producen variaciones importantes de su contenido de humedad y por lo tanto de la a_w . También el rango de temperatura a que es sometido el material es bastante amplio y difiere entre establecimientos industriales. Para poder realizar el modelado de la pérdida de clorofila durante el procesamiento, es necesario obtener una ecuación que describa la velocidad de degradación en función de la a_w y la temperatura.

En el presente capítulo se estudió la cinética de degradación de las clorofilas y el color de las hojas de yerba mate en función de la actividad de agua y la temperatura con el objeto de obtener una ecuación que describa este comportamiento, trabajando con los niveles de estos parámetros correspondientes a la etapa de secado.

9.2. MATERIALES Y MÉTODOS

9.2.1. Material

Se utilizaron hojas de yerba mate que fueron recogidas a la salida del zapecador del establecimiento industrial OAS S.A. localizado en Apóstoles, Misiones. En esta etapa las hojas de yerba mate tienen un contenido de humedad del $16 \pm 5 \%$ (base húmeda) (Ver capítulo 4).

Las hojas fueron separadas de las ramas (provenientes del establecimiento industrial) y secadas parcialmente a una temperatura de $60 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta el contenido de humedad correspondiente al diseño experimental. Este valor fue obtenido con los valores de a_w y temperatura del diseño experimental y las isotermas de desorción de la yerba mate. (Känzig et al., 1987). Posteriormente fueron molidas en un molino de martillo con cuchillas con un tamiz de salida con aberturas de 40 mesh. Para asegurar la uniformidad del contenido de humedad y alcanzar el nivel de a_w deseado, las muestras eran mantenidas en un recipiente cerrado que contenía la solución salina correspondiente y en una heladera ($5 \text{ }^\circ\text{C}$ - $8 \text{ }^\circ\text{C}$) durante 10 días.

9.2.2. Método experimental

Las muestras, aproximadamente 5 gramos, eran colocadas en pequeños recipientes que contenían una atmósfera con un valor de a_w y temperatura determinadas. Los diferentes niveles de a_w eran generados utilizando diferentes soluciones salinas saturadas, las que se colocaban en la parte inferior del recipiente. Los mismos eran mantenidos en una estufa a una temperatura determinada. En cada uno de ellos se colocaban 12 frascos, los que eran retirados a tiempos seleccionados para analizar los contenidos de clorofilas, humedad y el color. La primera muestra (correspondiente al tiempo cero) era retirada 30 minutos después de que el recipiente era colocado en la estufa, con el objeto de iniciar las mediciones cuando la temperatura del recipiente era la seleccionada. Este tiempo se calculó en forma teórica considerando la mayor temperatura de diseño, es decir $80 \text{ }^\circ\text{C}$. Las demás muestras eran retiradas en diferentes tiempos de acuerdo a los niveles de temperatura y a los niveles de a_w de trabajo y variaron entre 0,5 h y 408 h. Las determinaciones eran realizadas por triplicado.

Los niveles de a_w utilizados correspondieron a las siguientes soluciones salinas: ClK ($a_{w1} = 0,789$ - $0,812$); NO_3Na ($a_{w2} = 0,652$ - $0,690$); BrNa ($a_{w3} = 0,497$ - $0,514$); Cl_2Mg ($a_{w4} = 0,260$ -

0,305) y CILi ($a_{w5} = 0,105-0,111$). Los niveles de temperaturas utilizados fueron 50 °C, 60 °C, 70 °C y 80 °C. El control de temperatura se realizaba con una precisión de ± 1 °C.

9.2.3. Determinación de las clorofilas

La determinación de las clorofilas se realizó utilizando un método de cromatografía líquida HPLC, previa extracción en un baño de ultrasonido (Morawichi et al., 1999; Ryan-Stoneham y Tong, 2000).

A 1 g de la muestra (colocado en un frasco color caramelo) se le añadía 10 ml de una solución acetona-agua al 85 % en volumen y se colocaba en un baño de ultrasonido (Crest Ultrasonic Corporation 690 D, USA) durante 5 minutos a 25 °C. Luego se extraía parte de la solución utilizando una jeringa y un filtro de tamaño de poro de 0,22 μm , la que era inyectada al cromatógrafo. El cromatógrafo utilizado era un Shimadzu LC6A, con un integrador CR3A, detector Linear UVIS 200 (Japón) y columna C18 Altima, 5 Micron 250 *4,6 mm (USA). Las condiciones de ensayo fueron: fase móvil, acetato de etilo: metanol: agua (55:35:10 en volumen) (Merck, Argentina), flujo: 2 ml/min y detector UV-Vis a 435 nm, 0,01 AUFS (Japón).

Para trazar la curva de calibración se utilizaron patrones de clorofilas *a* y *b* de algas *nidulans* (Sigma, USA). Como solvente se utilizó una solución acetona: agua (85:15 en volumen) (Merck, Argentina) y las concentraciones variaron entre 0,0074 mg/ml y 0,666 mg/ml (clorofila *a*) y 0,0037 mg/ml y 0,333 mg/ml (clorofila *b*).

9.2.4. Determinación del color

Las medidas del color se realizaron en un medidor de color Color Touch ISO (Technodyne Corp. Indiana, USA). Los parámetros de la respuesta estaban en la escala CIELAB: L^* = luminosidad, a^* = eje verde-rojo y b^* = eje azul-amarillo. Las muestras eran colocadas en cajas de petri de 5 cm de diámetro y 1 cm de altura y con una tapa de acrílico que estaba en contacto con el equipo de medición. Las mismas fueron llevadas a cabo para un ángulo de observador de 10°. Las mediciones se realizaron por triplicado girando el recipiente después de cada lectura y se consideraba el valor medio de las tres mediciones.

9.2.5. Contenido de humedad

El contenido de humedad fue determinado midiendo la pérdida de masa en una estufa a 103 ± 2 °C, durante 6 horas (IRAM 20503, 1995). Se utilizaron aproximadamente 5 g de material y pesafiltros de aluminio.

9.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las concentraciones de clorofilas *a* y *b* de las muestras a tiempo cero tuvieron valores máximos de 1,850 mg/g ss y 0,853 mg/g ss respectivamente y las relaciones iniciales entre ellas variaron entre 1,75 mg/g ss y 2,52 mg/g ss (cabe recordar que las muestras sufrieron un tratamiento térmico y acondicionado previo, por lo que la relación entre las clorofilas *a* y *b* era diferente al valor encontrado en las hojas verdes, el cual es aproximadamente 3) (Fennema, 1996).

Los valores medios (de tres determinaciones) de concentración de las clorofilas *a* y *b* obtenidos en las experiencias en función del tiempo se pueden encontrar en el Anexo 6 de esta tesis. Estos valores se ajustaron a la ecuación integrada de la cinética de primer orden:

$$\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = -kt \quad (9.1)$$

donde *C* es la concentración al tiempo *t*, *C*₀ es la concentración inicial y *k*, la constante de velocidad específica.

El ajuste resultó significativo en todos los casos y los valores de la constante de la ecuación cinética de primer orden (ec. 9.1) y el valor del coeficiente de correlación obtenidos se pueden observar en las tablas 9.1 y 9.2. Las constantes de velocidad específica variaron entre 0,0046 h⁻¹ y 0,5433 h⁻¹ para la clorofila *a* y 0,0042 h⁻¹ y 0,2968 h⁻¹ para la clorofila *b*. Los coeficientes de correlación variaron entre 0,980 y 0,998. En todos los casos la constante de velocidad de degradación de la clorofila *a* fue mayor que la de la clorofila *b*, resultando valores de esta relación (*k*_A/*k*_B) entre 1,10 y 2,54.

Las líneas de ajuste, obtenidas con la ecuación 9.1, y los datos experimentales se pueden observar en las figuras 9.2 a 9.6 para una determinada actividad de agua y diferentes

niveles de temperatura para las clorofilas *a* y *b*. Con el objeto de poder comparar visualmente la influencia de la a_w en la velocidad de degradación de las clorofilas, en la figura 9.7 se muestran las líneas de ajuste a 60°C para diferentes actividades de agua.

Tabla 9.1. Constantes de la ecuación cinética de primer orden “k” para la clorofila *a* (en h⁻¹), error standard y coeficiente de correlación

a_w	k			
	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C
0,789-0,812	0,0620 ± 0,0025 (0,980)	0,1474 ± 0,0029 (0,996)	0,2143 ± 0,0030 (0,998)	0,5433 ± 0,0136 (0,993)
0,652-0,690	0,0249 ± 0,0006 (0,995)	0,0578 ± 0,0009 (0,997)	0,1405 ± 0,0019 (0,998)	0,4584 ± 0,0133 (0,993)
0,497-0,514	0,0094 ± 0,0002 (0,993)	0,0371 ± 0,0005 (0,988)	0,1332 ± 0,0035 (0,995)	0,2255 ± 0,0049 (0,995)
0,260-0,305	0,0053 ± 0,0001 (0,994)	0,0158 ± 0,0004 (0,994)	0,0664 ± 0,0015 (0,996)	0,1028 ± 0,0021 (0,995)
0,105-0,111	0,0046 ± 0,0001 (0,992)	0,0138 ± 0,0002 (0,998)	0,0611 ± 0,0021 (0,990)	0,0655 ± 0,0016 (0,993)

Tabla 9.2. Constantes de la ecuación cinética de primer orden “k” para la clorofila *b* (en h⁻¹), error standard y coeficiente de correlación

a_w	k			
	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C
0,789-0,812	0,0265 ± 0,0005 (0,997)	0,0794 ± 0,0011 (0,998)	0,1125 ± 0,0023 (0,996)	0,2968 ± 0,0068 (0,994)
0,652-0,690	0,0088 ± 0,0002 (0,994)	0,0239 ± 0,0004 (0,997)	0,0610 ± 0,0013 (0,995)	0,2258 ± 0,0075 (0,980)
0,497-0,514	0,0043 ± 0,0001 (0,997)	0,0140 ± 0,0005 (0,986)	0,0596 ± 0,0014 (0,993)	0,0999 ± 0,0033 (0,990)
0,260-0,305	0,0043 ± 0,0001 (0,993)	0,0107 ± 0,0002 (0,995)	0,0334 ± 0,0006 (0,997)	0,0579 ± 0,0010 (0,997)
0,105-0,111	0,0042 ± 0,0001 (0,994)	0,0111 ± 0,0002 (0,998)	0,0380 ± 0,0006 (0,998)	0,0497 ± 0,0008 (0,997)

En la bibliografía se pueden encontrar valores de la constante de velocidad de degradación de las clorofilas en distintos alimentos. Estas constantes se determinaron procesando el producto a valores de actividad de agua mayores a los estudiados en este trabajo. Van Loey et al (1998) y Weemaes et al (1999) trabajaron en brócoli y encontraron valores de la constante entre $0,0251 \text{ min}^{-1}$ y $1,01 \text{ min}^{-1}$ para la clorofila *a* y $0,0159 \text{ min}^{-1}$ y $0,55 \text{ min}^{-1}$ para la clorofila *b* a $80 \text{ }^\circ\text{C}$. Steet y Tong (1996), trabajando con arvejas, reportaron valores de $0,0074 \text{ min}^{-1}$ ($70 \text{ }^\circ\text{C}$) y $0,0175 \text{ min}^{-1}$ ($80 \text{ }^\circ\text{C}$) para la clorofila *a* y de $0,0039 \text{ min}^{-1}$ ($70 \text{ }^\circ\text{C}$) y $0,0086 \text{ min}^{-1}$ ($80 \text{ }^\circ\text{C}$) para la clorofila *b*; mientras que Ryan-Stoneham y Tong (2000) en puré de habas con pH controlado encontraron valores de la constante de $0,046 \text{ min}^{-1}$ a $80 \text{ }^\circ\text{C}$ y pH=5,5 para la clorofila *a* y $0,022 \text{ min}^{-1}$ a $80 \text{ }^\circ\text{C}$ y pH = 5,5 para la clorofila *b*. En todos los casos los valores encontrados fueron superiores a los obtenidos en este trabajo. Esto se debería a los valores superiores de a_w con que trabajaron dichos autores.

En las tablas 9.1 y 9.2 y en las figuras 9.1 a 9.7 se puede observar que la constante de velocidad específica de la ecuación 9.1 aumentó al aumentar la temperatura para cada una de las actividades de agua estudiadas y para cada una de las clorofilas. También se puede observar que, en general, al aumentar la actividad de agua aumentó el valor de la constante de velocidad específica. Sin embargo, no existieron diferencias significativas entre las constantes de las muestras colocadas a los valores de actividades de agua correspondientes a las soluciones saturadas de LiCl ($a_w = 0,105$) y MgCl₂ ($a_w = 0,305$).

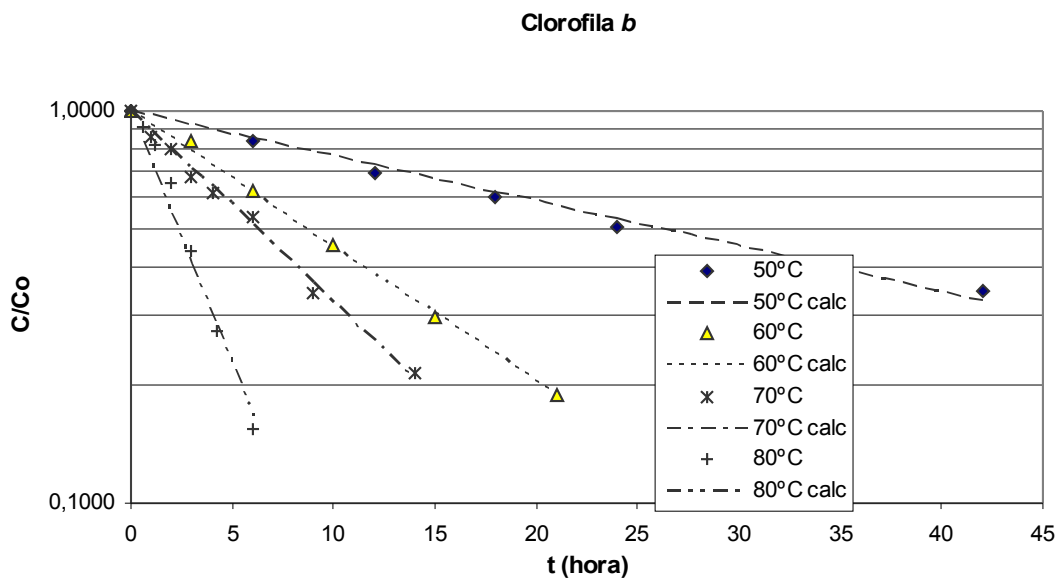
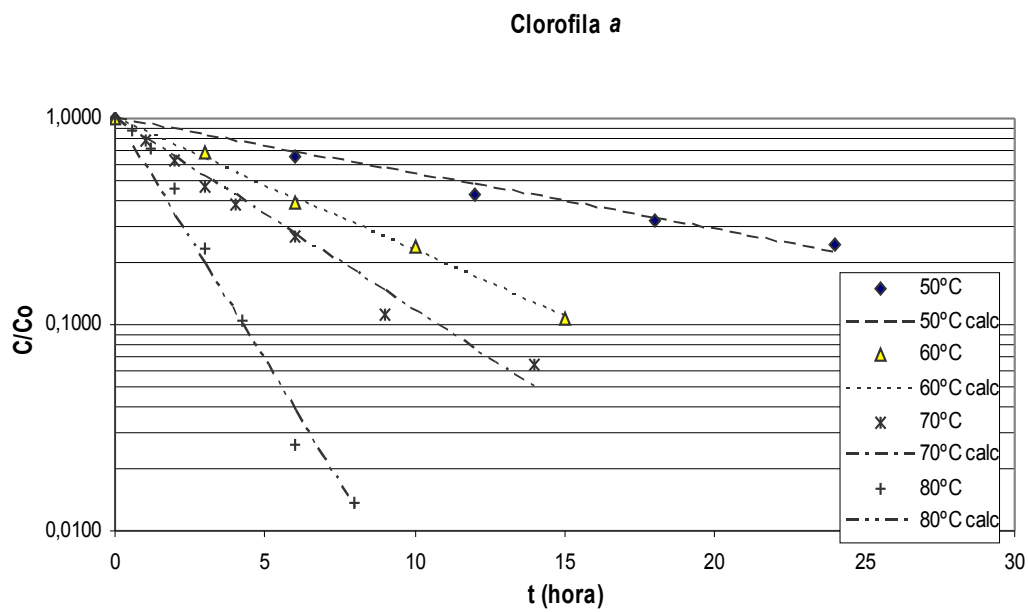


Figura 9.2. Variación de la concentración (C/C_0) de las clorofilas a y b en función del tiempo para $a_w=0,789-0,812$ y temperaturas de 50 °C, 60 °C, 70 °C y 80 °C. Valores experimentales y calculados con la ecuación 9.1.

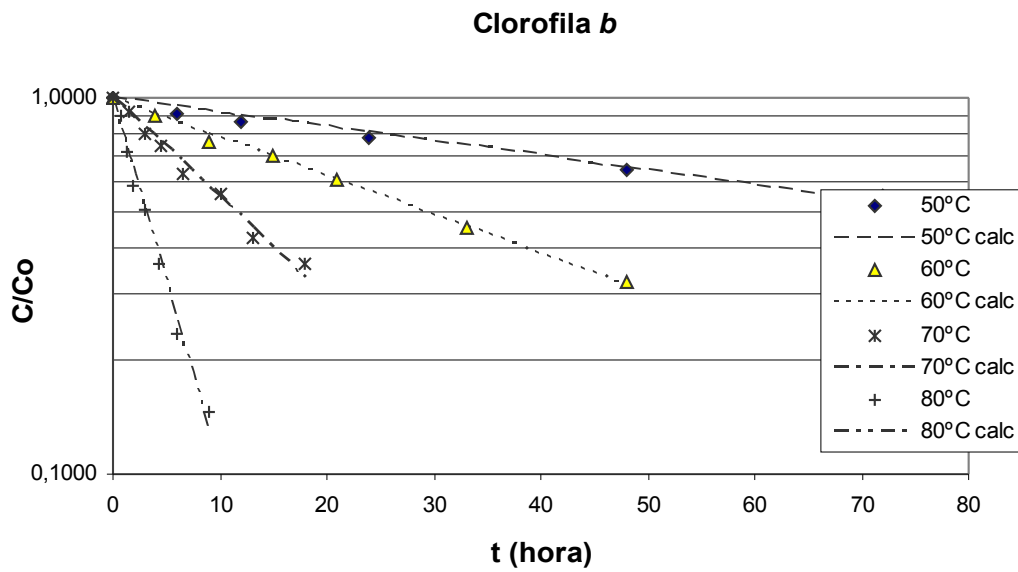
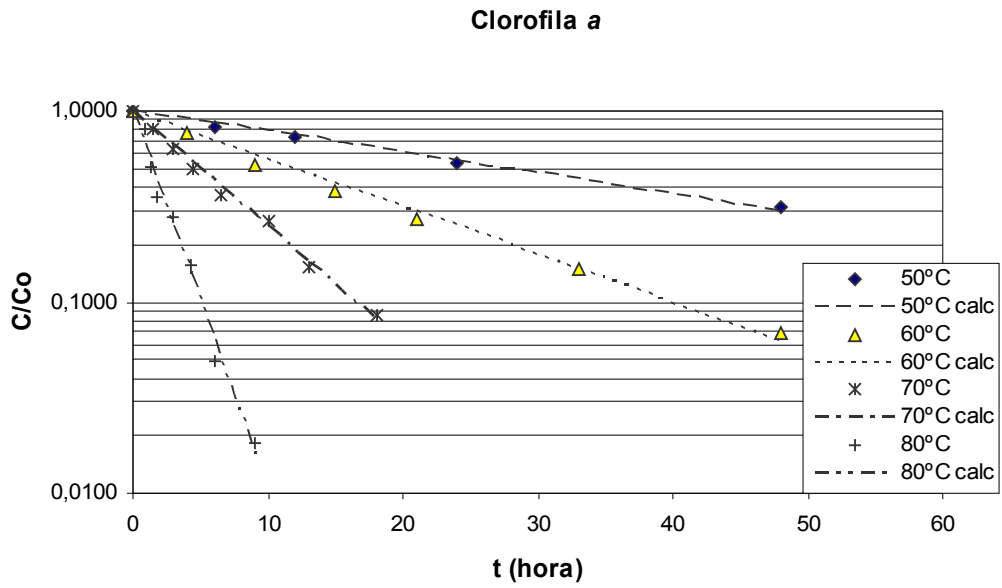


Figura 9.3. Variación de la concentración (C/C_0) de las clorofilas *a* y *b* en función del tiempo para $a_w=0,652-0,690$ y temperaturas de 50 °C, 60 °C, 70 °C y 80 °C. Valores experimentales y calculados con la ecuación 9.1.

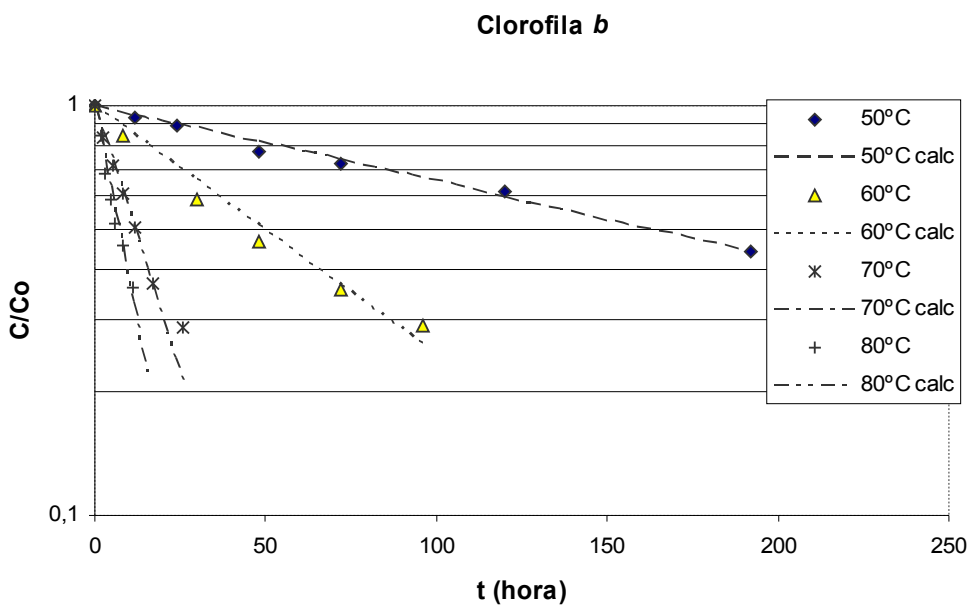
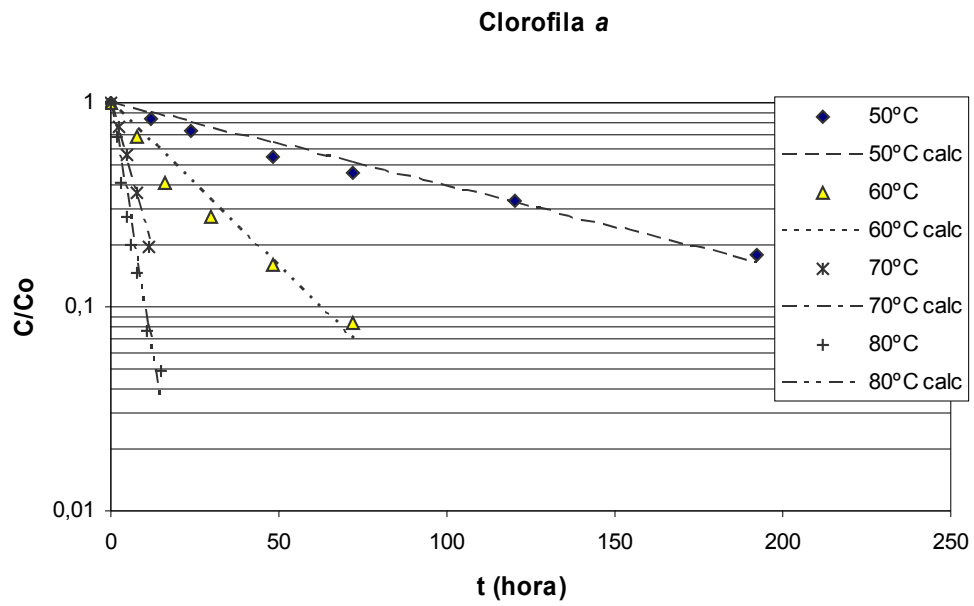


Figura 9.4. Variación de la concentración (C/C_0) de las clorofilas a y b en función del tiempo para $a_w=0,497-0,514$ y temperaturas de $50\text{ }^\circ\text{C}$, $60\text{ }^\circ\text{C}$, $70\text{ }^\circ\text{C}$ y $80\text{ }^\circ\text{C}$. Valores experimentales y calculados con la ecuación 9.1.

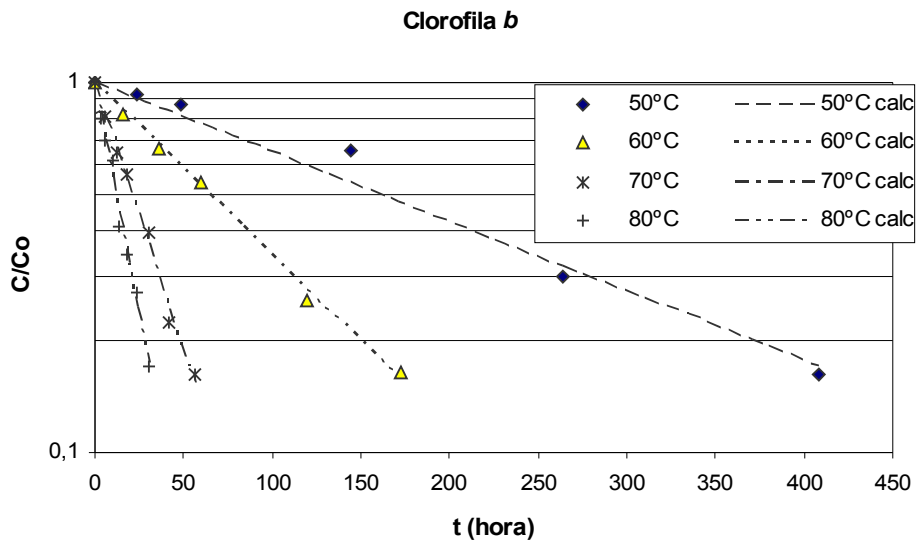
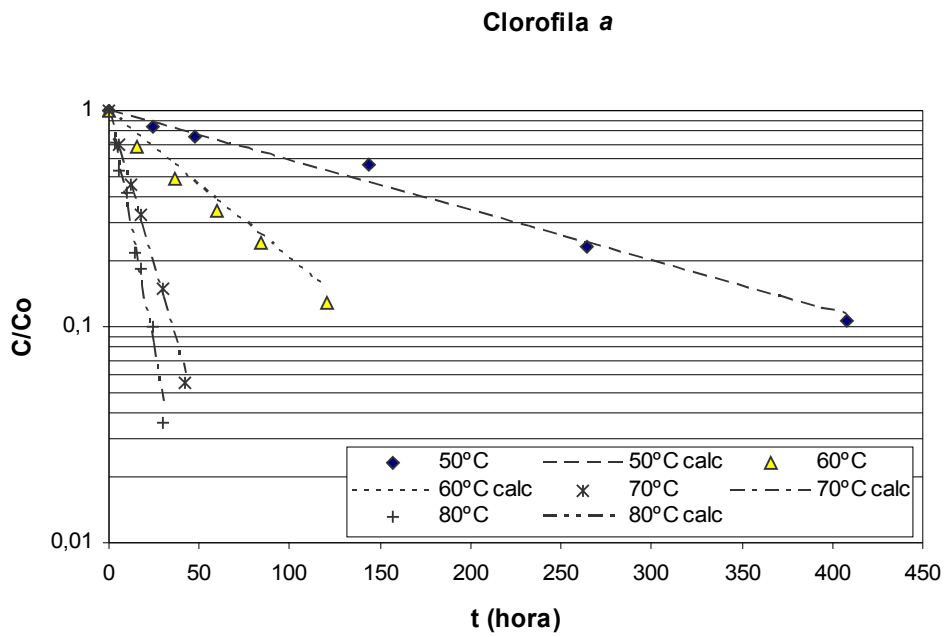


Figura 9.5. Variación de la concentración (C/C_0) de las clorofilas *a* y *b* en función del tiempo para $a_w=0,260-0,305$ y temperaturas de 50 °C, 60 °C, 70 °C y 80 °C. Valores experimentales y calculados con la ecuación 9.1.

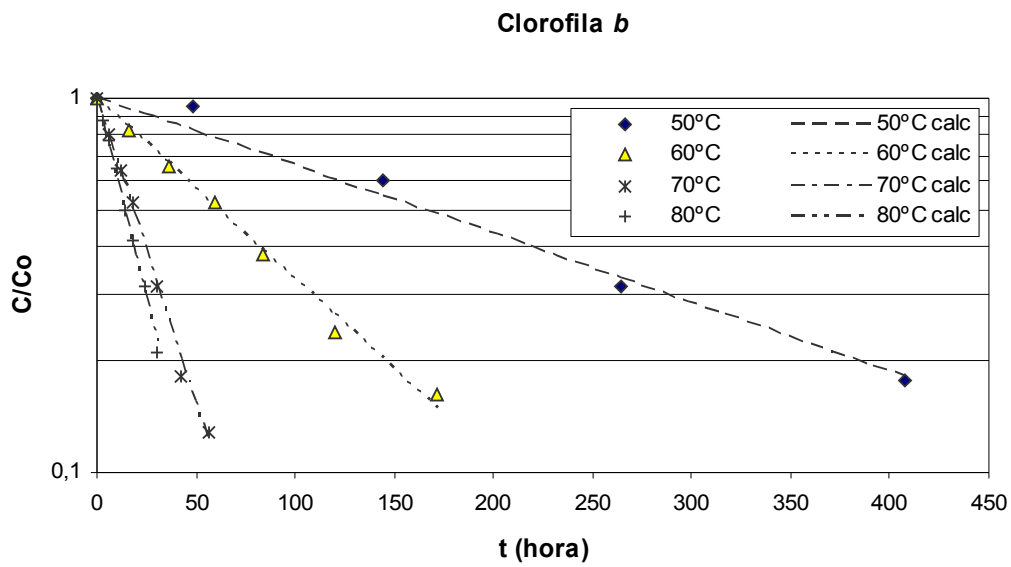
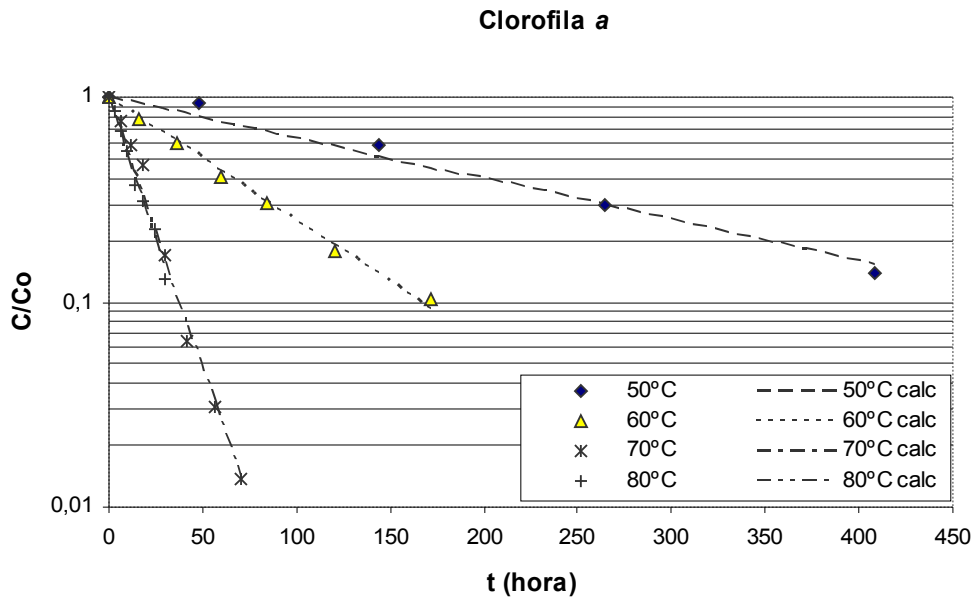


Figura 9.6. Variación de la concentración (C/C_0) de las clorofilas *a* y *b* en función del tiempo para $a_w=0,105-0,111$ y temperaturas de 50 °C, 60 °C, 70 °C y 80 °C. Valores experimentales y calculados con la ecuación 9.1.

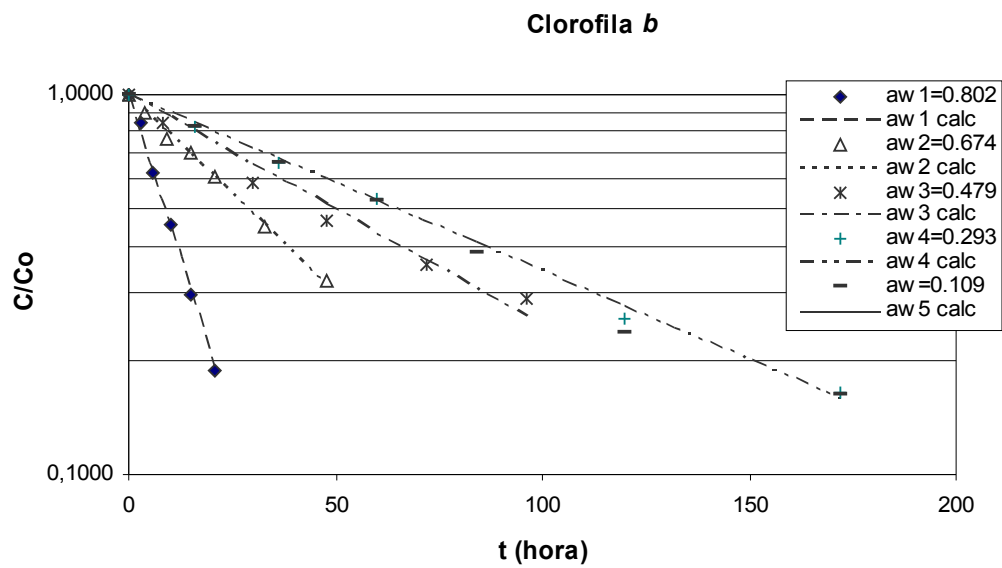
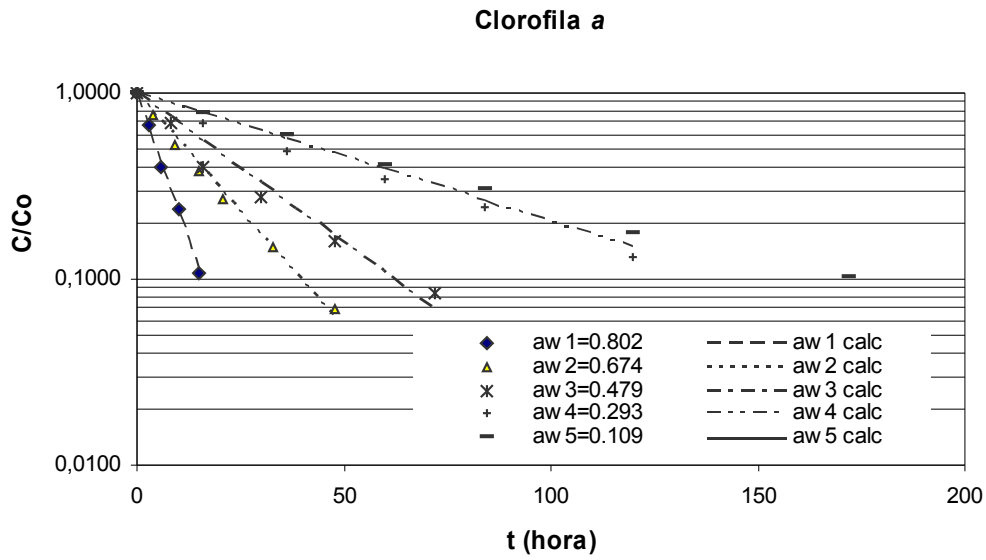


Figura 9.7. Variación de la concentración (C/C_0) de las clorofilas a y b a $60\text{ }^\circ\text{C}$ y 5 niveles de actividad de agua (0,802; 0,674; 0,479; 0,293 y 0,109). Valores experimentales y calculados con la ecuación 9.1.

Se ensayaron diferentes modelos para describir la dependencia de la constante de velocidad específica con la temperatura y la actividad de agua. En primer término se ensayó un modelo lineal del tipo:

$$\ln k = \ln k_o * a_w - \frac{Ea}{R} * \frac{1}{T} \quad (9.2)$$

donde T es la temperatura absoluta, k_o es una constante y Ea es la energía de activación.

Al realizar el ajuste se encontraron errores promedios porcentuales elevados (>30%) y además la constante Ea variaba con la actividad del agua. Por este motivo se ensayaron modelos en que la constante k_o y Ea dependían de la actividad del agua. Se obtuvo el mejor ajuste con el modelo representado en la ecuación 9.3:

$$\ln k = a + b * a_w + \frac{c(1 + d * a_w)}{T} \quad (9.3)$$

siendo a , b , c y d constantes.

Uddin et al (2001), estudiando la degradación del ácido ascórbico, encontraron una dependencia similar de la energía de activación con la actividad del agua. Los valores de las constantes y el error promedio porcentual del ajuste para las clorofilas a y b se puede observar en la tabla 9.3.

Tabla 9.3. Valores de las constantes de la ecuación 9.3 para las clorofilas a y b y el error promedio porcentual (MPE), calculado con la ecuación 6.5.

	a	b	c	d	MPE
Clorofila a	28,23	-6,98	-12369,6	-0,273	7,90
Clorofila b	22,64	2,98	-10572,5	0,022	7,42
Coordenada de color a^*	19,79	2,07	-8568,1	-0,057	6,09

En las figuras 9.8 y 9.9 se pueden observar los valores experimentales de las constantes y los calculados con la ecuación 9.3 para las clorofilas a y b . La dependencia de la energía de activación con la a_w (dada por la constante d) es importante para la clorofila a , variando este parámetro desde 80,4 kJ/mol a 99,7 kJ/mol; para la clorofila b esta dependencia es menos importante ya que el valor de la energía de activación varió desde 88,1 kJ/mol a 89,5 kJ/mol. Estos valores son más altos que los encontrados en la bibliografía para otros vegetales (Ryan-Stoneham y Tong, 2000; Van Loey et al ,1998; Steet y Tong, 1996)

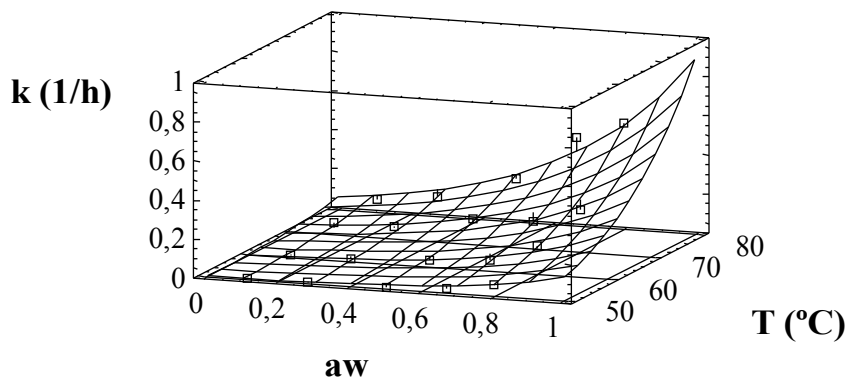


Figura 9.8. Valores experimentales y predichos mediante la ecuación 9.3 de la constante de velocidad específica de degradación para la clorofila *a*.

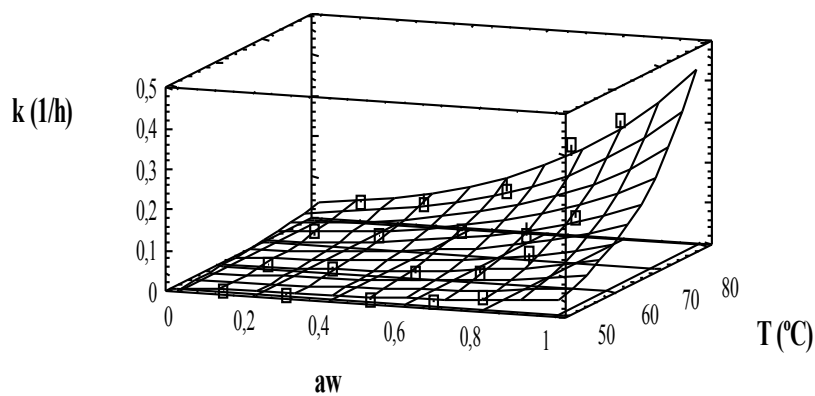


Figura 9.9. Valores experimentales y predichos mediante la ecuación 9.3 de la constante de velocidad específica de degradación para la clorofila *b*.

Como ocurre en todos los productos alimenticios la degradación de la clorofila produce una modificación de su color. En la mayoría de los casos, esta pérdida se da en la coordenada a^* de la escala de color que representa el grado de verde (Barth et al, 1992; Steet y Tong, 1996; Schmalko y Alzamora, 2000; Weemaes et al, 1999). En las experiencias realizadas se encontraron degradaciones importantes de este parámetro.

En el Anexo 6 de esta tesis se dan los valores de las coordenadas de color L, a^* y b^* en función del tiempo para cada una de las experiencias. Se encontraron muy pocas variaciones en las coordenadas L y b^* y variaciones muy importantes en la coordenada a^* . Los valores iniciales de L variaron entre 39 y 46; y la variación durante el procesamiento fue menor a ± 2 . Los valores iniciales de b^* variaron entre 27 y 31; y la variación durante el procesamiento fue menor de ± 3 . Se encontraron variaciones muy importantes en los valores iniciales del parámetro a^* debido al pretratamiento a que eran sometidas las muestras antes de ser medidas (calentamiento a diferentes temperaturas durante 30 minutos). En la figura 9.10 se puede observar, como ejemplo, la variación del parámetro a^* para un valor determinado de a_w a diferentes temperaturas. Se tuvieron variaciones similares para las otras a_w .

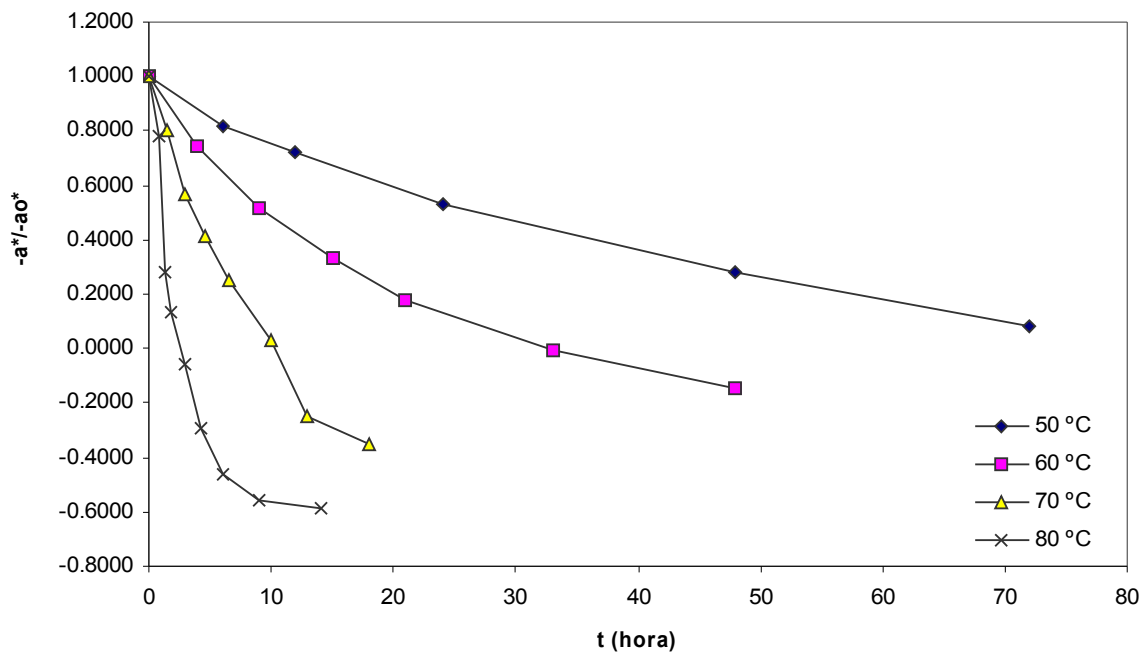


Figura 9.10. Variación de la coordenada a^* (valores normalizados) en función del tiempo a $a_w = 0,652-0,690$ y temperaturas de 50°C, 60°C, 70°C y 80°C.

En muchos casos, es útil asimilar las propiedades físicas a unidades de concentración y ajustar las mismas a un modelo de degradación de primer orden. Cuando se consideró ajustar los valores de la coordenada de color a^* (ecuación 9.1) se encontró con el inconveniente de que sus valores pasaban de un valor negativo a uno positivo y por lo tanto no se podía calcular la relación $\ln(a^*/a_0^*)$. De acuerdo a esto se consideró un modelo representado por la ecuación 9.4, en la que la relación fué siempre positiva. Para esto se definió un parámetro a_∞^* , que es el valor de a^* a tiempo infinito.

$$\ln \left(\frac{a^* - a_{\infty}^*}{a_0^* - a_{\infty}^*} \right) = -kt \quad (9.4)$$

Para calcular el valor de a_{∞}^* se utilizó la ecuación de Pilosof et al. (1985). Si bien esta ecuación se desarrolló para la absorción de agua en proteínas, la misma se utiliza con buenos resultados cuando se desean obtener valores de concentración o parámetros físicos a tiempo infinito (Sabatella et al., 2003). La ecuación utilizada fue la siguiente:

$$a^* - a_0^* = \frac{(a_{\infty}^* - a_0^*)t}{B + t} \quad (9.5)$$

Los parámetros $(a_{\infty}^* - a_0^*)$ y B se calcularon ajustando los datos de $a^* - a_0^*$ en función del tiempo por regresión no lineal. Los valores de a_{∞}^* para cada una de las experiencias se muestran en el anexo 6.

En la tabla 9.4 se muestran los valores de la constante de velocidad específica para la ecuación cinética de primer orden (ecuación 9.4) para la coordenada de color a^* .

Tabla 9.4. Constantes de la ecuación cinética de primer orden “k” para la coordenada de color a^* (en h^{-1}), error standard y coeficiente de correlación

a_w	k			
	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C
0,789-0,812	0,01722 ±0,0019 (0,989)	0,0361 ±0,0039 (0,990)	0,0533 ±0,0026 (0,988)	0,0747 ±0,0018 (0,985)
0,652-0,690	0,0070 ±0,0004 (0,994)	0,0159 ±0,0015 (0,991)	0,0278 ±0,0020 (0,994)	0,0894 ±0,0081 (0,948)
0,497-0,514	0,0029 ±0,0002 (0,994)	0,0107 ±0,0012 (0,986)	0,0184 ±0,0017 (0,991)	0,0517 ±0,0043 (0,992)
0,260-0,305	0,0022 ±0,0002 (0,990)	0,0044 ±0,0004 (0,991)	0,0080 ±0,0005 (0,995)	0,0015 ±0,0011 (0,993)
0,105-0,111	0,0009 ±0,0001 (0,988)	0,0029 ±0,0002 (0,995)	0,0086 ±0,0008 (0,990)	0,0061 ±0,0004 (0,995)

Los valores de las constantes variaron entre $0,0009 \text{ h}^{-1}$ y $0,0894 \text{ h}^{-1}$ y fueron menores a los valores obtenidos para las clorofilas. Los valores de los coeficientes de correlación variaron entre 0,985 y 0,995. Con el objeto de describir la dependencia de esta constante en función de la a_w y la temperatura, los valores obtenidos se ajustaron por regresión no lineal a la ecuación 9.3. Los valores de las constantes de la ecuación y el error promedio porcentual se muestran en la tabla 9.3. En la figura 9.11 se pueden observar los valores experimentales y los calculados con la ecuación 9.3.

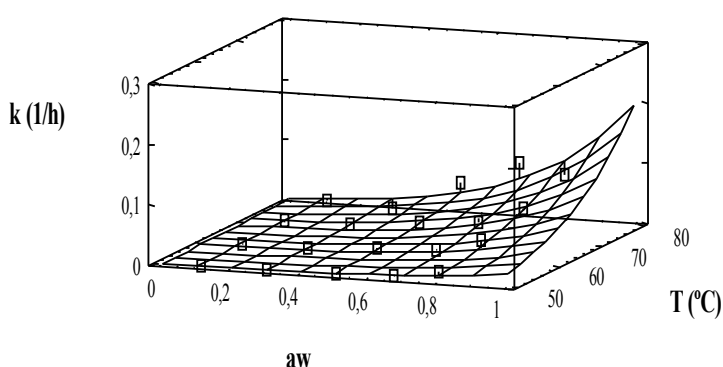


Figura 9.11. Valores experimentales y predichos mediante la ecuación 3 de la constante de velocidad específica para la coordenada de color a^* .

9.4. CONCLUSIONES

Al estudiar las degradaciones de las clorofilas a y b de las hojas de yerba mate se encontró que la temperatura y la actividad del agua influyen significativamente en ella. Los datos experimentales tuvieron un buen ajuste a una ecuación cinética de primer orden. La relación de valores de las constantes de velocidad de degradación de las clorofilas a/b varió entre 1,10 y 2,54. Los mismos se ajustaron a un modelo en función de la actividad del agua y la temperatura, encontrándose que los valores de la energía de activación de la clorofila a dependían de la actividad del agua. Al estudiar la variación del color (coordenadas L , a^* , b^*), se encontró que el valor de a^* tenía variaciones muy importantes en las experiencias, no así los valores de L y b^* . La variación del parámetro de color a^* se ajustó a una ecuación cinética de primer orden resultando el ajuste significativo y las constantes obtenidas tuvieron valores

menores que las obtenidas para las clorofilas *a* y *b*. Las constantes de velocidad específica de variación del parámetro de color a^* se ajustaron a un modelo similar al de las clorofilas, encontrándose un comportamiento similar a éstas.

9.5. NOMENCLATURA

a	Constante de la Ecuación 9.3
a^*	Eje verde-rojo, parámetro de color. Valor al tiempo t
a_0^*	Valor de a^* al tiempo cero
a_∞^*	Valor de a^* al tiempo infinito
a_w	Actividad del agua
B	Constante de la Ecuación 9.3
b^*	Eje azul-amarillo, parámetro de color
C	Concentración de la clorofila en mg/gss
c	Constante de la Ecuación 9.3
C_0	Concentración inicial de la clorofila en mg/gss
d	Constante de la Ecuación 9.3
E_a	Energía de activación, kJ/mol
k	Constante de velocidad, h^{-1}
k_0	Constante de velocidad específica, h^{-1}
L^*	Luminosidad, parámetro de color
MPE	Error promedio porcentual
R	Constante de los gases ideales, kJ/mol K
t	Tiempo, h
T	Temperatura, K

Subíndices

A	Clorofila <i>a</i>
B	Clorofila <i>b</i>

CAPÍTULO 10

MODELADO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR Y MATERIA EN EL ZAPECADOR

10.1. INTRODUCCIÓN¹

De acuerdo a lo mencionado en el capítulo 1, la etapa de zapecado tiene por objetivo inactivar las enzimas presentes en las hojas de la yerba mate. Esta operación se lleva a cabo en un equipo similar a un secadero rotatorio, en el que el material se pone en contacto con la llama (ubicada en la primer parte del zapecador) en forma discontinua y con los gases de combustión generados que están a una temperatura muy elevada. El tiempo de residencia de las ramas es relativamente corto (aproximadamente 3 minutos).

Simultáneamente con la inactivación enzimática se producen variaciones muy importantes de la concentración de los otros componentes. Estas variaciones pueden ser mayores que las producidas en la etapa de secado, en la que el tiempo de residencia es mucho mayor. En el capítulo 4 se mencionó que las variaciones del contenido de humedad y las concentraciones de las clorofilas y de la cafeína que tenía lugar en esta etapa. Schmalko *et al.* (2002) al estudiar la degradación de un plaguicida (dimetoato) en las hojas de yerba mate, encontraron que en el procesamiento se degradaba el 97% del mismo, reduciéndose el 25% en el zapecado y el 50% en el secado. Ramallo *et al.* (1998) midieron las modificaciones de la vitamina C en el procesamiento, encontrando que en las etapas de zapecado y secado se degradaba el 79% de su contenido inicial. Paredes *et al.* (2000) estudiaron las modificaciones que sufren los azúcares (glucosa, fructosa y sacarosa) en estas dos etapas y encontraron que en el zapecado se producía una disminución del contenido de azúcares simples y un aumento de la sacarosa, mientras que en el secado esta variación no era muy importante. Por lo tanto, de acuerdo a lo expresado anteriormente, se puede concluir que las variaciones de concentración que tienen los componentes de la yerba mate en esta etapa son importantes. Si se desea minimizar dichas pérdidas, es necesario conocer las variaciones de la temperatura y el contenido de humedad de la misma en el procesamiento.

Al no encontrarse un método experimental aplicable para determinar la temperatura y el contenido de humedad de las ramas (especialmente de las hojas), se deben estimar los mismos a partir de la transferencia de calor y materia que tiene lugar dentro del equipo. En este capítulo se determinará la evolución de la temperatura y el contenido de humedad de las hojas y los palos de yerba mate en la etapa de zapecado, utilizando balances de calor y materia.

¹ El desarrollo de este Capítulo se basa en un trabajo realizado en forma conjunta con el Ing. Juan Manuel Peralta bajo mi dirección en el proyecto “Utilización de Gas Licuado Propano en el Procesamiento de la Yerba Mate: Modelado y Optimización de la Etapa de Zapecado”

10.2. MATERIALES Y MÉTODOS

10.2.1. Material

Se utilizaron ramas de yerba mate (*Ilex paraguariensis Saint Hilaire*), las que fueron cosechadas en forma manual y luego transportadas al establecimiento industrial. Las mismas se depositaban en una playa de recepción y luego de cierto tiempo eran introducidas en el zapecador para su tratamiento. El material a procesar era muy heterogéneo y entre sus características físicas se pueden mencionar las siguientes (Crotti *et al.*, 2002; Coelho *et al.* 2002):

- Tipos: ramificadas y sin ramificar
- Peso medio: 10,97 g (Valores extremos: 2,5g y 30g)
- Diámetro medio ponderado de los palos: 0,0034 m
- Espesor medio ponderado de las hojas: 0,00036 m

10.2.2. El equipo

El zapecador consistía en un cilindro que giraba por medio de engranajes a bajas revoluciones. Las ramas se introducían en el extremo donde se quemaba propano, recibiendo calor de la llama por radiación y convección. El quemador de la llama tenía un diámetro de 0,38 m y en forma concéntrica al mismo ingresaba el aire al sistema. La llama alcanzaba una longitud aproximada de 1 m. La longitud total del sapecador era de 9,6 m y su diámetro interno de 2,57 m.

En su interior el equipo tenía una serie de aletas de 0,025 m altura y 0,060 m de largo, dispuestas en un ángulo de 60° con respecto al eje del secadero. Existían en total 7 grupos de aletas, distribuidas longitudinalmente a una distancia de 1 m entre grupos. Cada grupo tenía 18 aletas distribuidas uniformemente en todo el diámetro (figura 10.1). Este diseño de aletas y el sentido de rotación del equipo ayudaban a desplazar a las ramas hacia el otro extremo, resultando en una configuración de corrientes paralelas. El flujo de gases era controlado por medio de un deflector ubicado en la chimenea de salida.

Los valores medios de las condiciones de trabajo fueron obtenidos en mediciones realizadas durante 7 días, realizándose 3 mediciones por día. El flujo de sólidos fue obtenido de los datos de producción de la empresa y el flujo de propano del consumo de esos días y la

cantidad de horas de trabajo. La temperatura de los gases a la salida se mantuvo constante variando el flujo de propano. Los valores obtenidos fueron los siguientes (Capítulo 5 y Anexo 2):

Condiciones de entrada:

- Flujo de ramas: 0,422 kg ss/s
- Flujo de hojas: 0,282 kg ss/s
- Flujo de palos: 0,140 kg ss/
- Flujo de aire a la entrada: $4,01 \pm 0,17$ kg sa/s
- Humedad absoluta del aire: $0,0156 \pm 0,002$ kg agua/kg sa
- Temperatura media: 25°C (aire y sólidos)
- Flujo másico de propano: 0,0482 kg/s

Condiciones de salida:

- Humedad absoluta del aire: 0,140 kg agua /kg gas seco (Ver Capítulo 5)
 - Temperatura: 120°C (Fijada como consigna en el equipo)
-
- Velocidad de rotación del secadero: 10 rpm
 - Tiempo medio de residencia de las ramas: 174 ± 56 s
 - Tipo de aislante y espesor: Lana de vidrio de 0,0254 m

El contenido de humedad de las hojas y los palos, medidos durante 7 días y utilizados para ajustar el modelo propuesto se pueden observar en la Tabla 10.1.

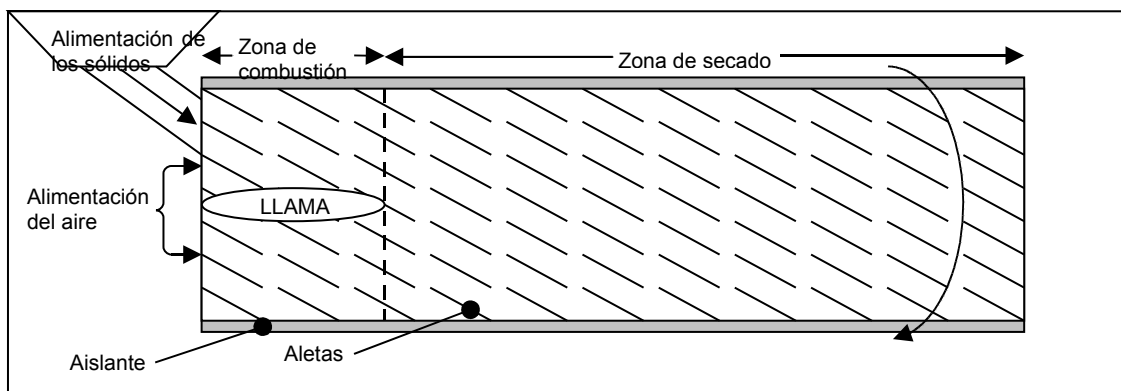


Figura 10.1: Diagrama del zapecador con sus respectivas zonas.

Tabla 10.1. Contenido medio de humedad (en kg de agua/kg ss) de entrada y salida (base seca) de las hojas y palos medidos durante 7 días diferentes.

Día	Hojas		Palos	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida
1	1,4814	0,2112	1,6539	1,3100
2	1,4710	0,1476	1,7747	1,2821
3	1,5806	0,1979	1,7167	1,1777
4	1,5126	0,2066	1,6518	1,1210
5	1,4396	0,1975	1,6867	1,0978
6	1,5058	0,1617	1,6702	1,1119
7	1,4504	0,2118	1,7693	1,3507
Valor medio	1,4916	0,1906	1,7033	1,2073

10.2.3. Modelo matemático

Suposiciones

Para aplicar el modelo, se realizaron las siguientes suposiciones:

- 1) El secado de los sólidos sólo tiene lugar cuando los mismos están en la fase gaseosa. En el tiempo durante el cual las ramas son levantadas por las aletas se considera que solamente hay una redistribución de la humedad (Kemp and Oakley, 2002).
- 2) Ausencia de perfil térmico dentro de los sólidos (hojas y palos).
- 3) Los palos son considerados como un material compuesto (xilema y corteza) y se calcula un coeficiente de difusión efectivo.
- 4) En el cálculo de las pérdidas de calor sólo se considera transferencia desde el gas a las paredes (no desde el sólido a las paredes).
- 5) Al finalizar la zona de tratamiento térmico, los productos de combustión y el aire húmedo se mezclan para dar un gas homogéneo en la zona de secado.
- 6) En la llama, el propano reacciona en forma completa con el oxígeno.
- 7) En toda la llama existe una composición constante de los productos e igual a la producida en la combustión completa.
- 8) Los gases son considerados ideales.
- 9) Las propiedades termofísicas y de transporte son calculadas como resultado de los aportes individuales (O_2 , N_2 , H_2O y CO_2).

- 10) Se considera el efecto de entrada de los gases al equipo en el cálculo del coeficiente convectivo de transferencia de calor en las paredes del mismo.
- 11) Se considera el efecto de contracción que produce la pérdida de humedad en los sólidos sobre sus áreas de transferencia.
- 12) Se desprecia la resistencia a la transferencia de calor conductiva que ofrecen las paredes del secadero con respecto al aislante externo.
- 13) La composición de los gases en el aire no fue considerada constante, efectuándose balances de transferencia de masa, en los cuales se tuvieron en cuenta: los productos de reacción, el aire de entrada y el agua que se evapora de los sólidos durante el secado.

Ecuaciones básicas

Transferencia de calor

Las ecuaciones 10.1 a 10.6 describen la variación de la temperatura en forma diferencial en función del tiempo para los sólidos y el aire (mezcla entre el aire húmedo de entrada, productos de combustión y agua que se evapora de los sólidos).

En las hojas se realiza en primer lugar un balance de energía:

Energía ganada por radiación + energía ganada por convección – energía perdida por evaporación = energía utilizada en el calentamiento

La que expresada en forma diferencial, es:

$$A_h f_{l-h} \sigma (\epsilon_h T_g^4 - \alpha_h T_h^4) + A_h h_h (T_g - T_h) - \gamma \lambda E_h = M_{sh} (1 + X_h) C_p \frac{dT_h}{dt} \quad (10.1)$$

A partir de ésta, se puede obtener la variación de la temperatura en función del tiempo:

$$\frac{dT_h}{dt} = \frac{1}{M_{sh} (1 + X_h) C_p} \left[A_h f_{l-h} \sigma (\epsilon_h T_g^4 - \alpha_h T_h^4) + A_h h_h (T_g - T_h) - \gamma \lambda E_h \right] \quad (10.2)$$

En los palos, se realiza un balance similar y se obtiene:

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{1}{M_{sp} (1 + X_p) C_p} \left[A_p f_{l-p} \sigma (\epsilon_p T_g^4 - \alpha_p T_p^4) + A_p h_p (T_g - T_p) - \lambda E_p \right] \quad (10.3)$$

El balance de energía para el aire es el siguiente:

Energía ganada por radiación + energía ganada por convección + energía del vapor de agua proveniente de las hojas y palos – energía transferida al sólido – pérdidas de energía = energía utilizada en el calentamiento

$$\delta A_l \sigma (T_g^4 - T_a^4) + \delta A_l h_a (T_g - T_a) + E_h \lambda_h + E_p \lambda_p - Q_s - Q_w = M_{sa} (1 + X_a) C p_a * \frac{dT_a}{dt} \quad (10.4)$$

A partir de ésta, se puede obtener la variación de la temperatura en función del tiempo:

$$\frac{dT_a}{dt} = \frac{1}{M_{sa} (1 + X_a) C p_a} \left[\delta A_l \sigma (T_g^4 - T_a^4) + \delta A_l h_a (T_g - T_a) + E_h \lambda_h + E_p \lambda_p - Q_s - Q_w \right] \quad (10.5)$$

La temperatura de los gases (T_g) toma el valor de T_l cuando los sólidos atraviesan la llama y T_g para la mezcla del aire húmedo y los productos de combustión.

Calor que recibe la fase sólida:

$$Q_s = \frac{S_h \Delta x A_h}{v_s M_{sh}} \left[h_h (T_g - T_h) + \sigma (\epsilon_g T_g^4 - \alpha_h T_h^4) \right] + \frac{S_p \Delta x A_p}{v_s M_{sp}} \left[h_p (T_g - T_p) + \sigma (\epsilon_g T_g^4 - \alpha_p T_p^4) \right] \quad (10.6)$$

Pérdidas de calor:

$$Q_w = \Delta x P \left[h_{pi} (T_g - T_{pi}) + \sigma (\epsilon_{gi} T_{gi}^4 - \alpha_{pi} T_{pi}^4) \right] = 2\pi k_{aislante} \Delta x \frac{(T_{psi} - T_{po})}{\ln\left(\frac{d_{pi}}{d_{po}}\right)}$$

$$= \Delta x P \left[h_{po} (T_\infty - T_{po}) + \sigma (\epsilon_{go} T_\infty^4 - \alpha_{po} T_{po}^4) \right] \quad (10.7)$$

Para la resolución de estas ecuaciones se utilizó el método de las diferencias finitas hacia delante. El zapecador fue dividido en dos zonas: la de llama o tratamiento térmico y la de secado. En la zona de tratamiento térmico se producía la combustión del propano y los sólidos se ponían en contacto con la llama en forma discontinua, mientras que en la segunda zona se producía el secado convencional. Se plantearon 48 nodos (cantidad de veces que los sólidos atraviesan la fase gaseosa), de los cuales 5 estaban en la zona de llama y los restantes en la zona de secado. A su vez, cada nodo en la zona de combustión fue dividido en tres sub-zonas, analizadas con diferentes tiempos de contacto: 1) arriba de la llama, 2) contacto con la

llama y 3) debajo de la llama, como se muestra en la figura 10.2. El tiempo de caída considerado en cada nodo fue de 0,72 s, y fue calculado utilizando la siguiente ecuación (Kemp y Oakley, 2002):

$$t_c = \sqrt{\frac{2d_i \text{sen}\theta}{g}} \quad (10.8)$$

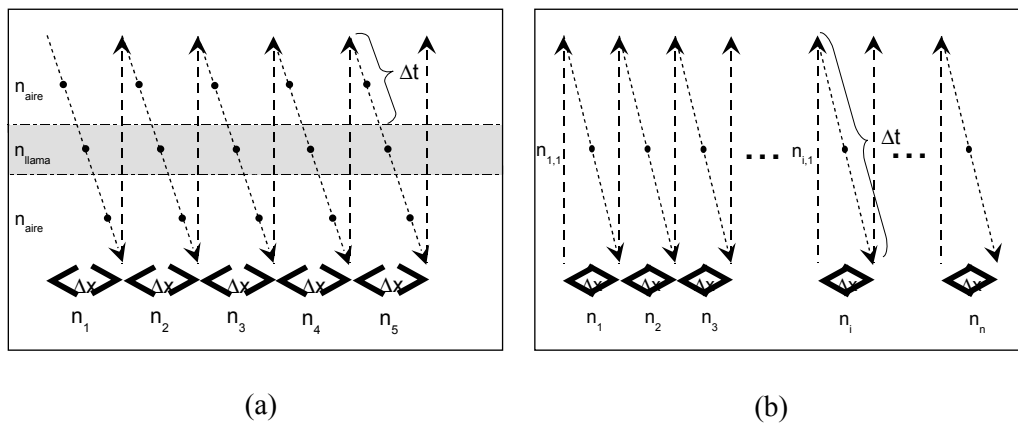


Figura 10. 2. Planteo de los nodos para el modelo: a) zona de combustión y detalle de sub-zonas; b) zona de secado.

Transferencia de masa

Las pérdidas de humedad se calcularon utilizando las ecuaciones integradas de la 2° ley de Fick, dadas a continuación (Suarez *et al.*, 1981) :

- En los palos se plantea la solución considerando un cilindro infinito con transferencia de masa en forma radial (Schmalko *et al.*, 1996):

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\mu_n^2} e^{\left[\frac{-\mu_n^2 D_p t}{R_0^2} \right]} \quad (10.9)$$

donde μ_n son las raíces de la función de Bessel de orden cero.

- En las hojas se plantea esta solución considerando una placa plana infinita (Schmalko *et al.*, 1996):

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} e^{\left[\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_h t}{L^2} \right]} \quad (10.10)$$

Propiedades

Las ecuaciones para estimar las propiedades del gas y los coeficientes de transferencia de calor y materia se presentan en la tabla 10.2. En el cálculo del coeficiente convectivo de calor, para determinar las propiedades, se consideró la composición media del gas. En la primera zona, los nodos primero y tercero fueron considerados compuestos de aire puro, mientras que el segundo se consideró compuesto de gases de combustión de propano. Cuando se estimó el coeficiente de transferencia de calor en las hojas, el flujo se consideró perpendicular a la misma la mitad del tiempo y paralelo la otra mitad.

Las ecuaciones utilizadas para estimar las propiedades del sólido y los coeficientes de transferencia de calor y materia se presentan en la tabla 10.3. Las ecuaciones presentadas para determinar el coeficiente de difusión del agua en las hojas fueron estimadas a partir de datos experimentales obtenidos entre 100 °C y 130 °C (Ramallo et al., 2001), mientras que en los palos se trabajó con valores experimentales obtenidos entre 70 °C y 100 °C, que figuran en el capítulo 9.

La llama

Para realizar la estimación de la temperatura de llama se efectuaron balances térmicos en la totalidad de su longitud, dando como resultado temperaturas que variaron entre los 2000 K y 2100 K (por debajo de su temperatura de llama adiabática). En la primera zona no se consideró que exista un mezclado homogéneo entre los gases de combustión y el aire entrante, debido a que la velocidad axial relativa de la llama con respecto al aire es muy superior. De acuerdo a esta diferencia, la llama no se mezclaría considerablemente con el aire, permitiendo suponer a la misma con una geometría cilíndrica y separando a la zona de combustión en sub-zonas.

Tabla 10.2. Ecuaciones utilizadas para estimar las propiedades y coeficientes de la fase gaseosa utilizadas en la aplicación del modelo y su fuente

Parámetros	Referencias	
$k_m = \frac{\sum_{i=1}^n y_i k_i}{\sum_{j=1}^n y_j A_{ij}}$ $S_i = 1.5T_{bi}$ $S_{ij} = S_{ji} = (S_i S_j)^{0,5}$ $A_{ij} = 0,25 \left\{ 1 + \left[\frac{\mu_i}{\mu_j} \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{0,75} \left(\frac{T + S_i}{T + S_j} \right) \right]^{0,5} \right\}^2 \left(\frac{T + S_{ij}}{T + S_i} \right)$	Perry y Green , 1997 (p.2.368)	
$\mu_m = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i}{\left[1 + \sum_{j=1}^n \left(Z_{ij} \frac{y_j}{y_i} \right) \right]}$ $Q_{ij} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{0,5} \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{0,25} \right]^2}{\sqrt{8} \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right)^{0,5}}$	Perry y Green , 1997 (p. 2.363)	
$Cp_a = \sum y Cp_i$	Perry y Green , 1997 (p. 2.347)	
$h_{po} = 0,11 \left(\frac{k_o}{d_o} \right) \left(0,5 Re_{\omega}^2 + Gr_D Pr \right)^{0,35}$	Kreith y Bohn, 1997 (p. 341)	
$h_{pi} = 0,023 \left(\frac{k_i}{d_H} \right) Re_{dh}^{0,8} Pr^{0,4} \left(\frac{A_{fa}}{A_{fc}} \right)^{0,1} \left(\frac{A_n}{A_A} \right)^{0,5} (\sec(\beta))^3$	Kreith y Bohn, 1997 (p. 418)	
$h_h = 0,648 \left(\frac{k_g}{L_h} \right) Re_L^{0,5} Pr^{1/3}$ <p>(Flujo paralelo)</p>	$h_h = 0,205 \left(\frac{k_g}{L_h} \right) Re_L^{0,588} Pr^{1/3}$ <p>(Flujo perpendicular)</p>	Perry y Green , 1997 (p. 5.15- 5.16)
$h_p = 0,51 \left(\frac{k_g}{d_p} \right) Re_d^{0,5} Pr^{0,37}$	Kreith y Bohn, 1997 (p. 455)	
<p>La emisividad hemiesférica total (ϵ) y la absortividad hemisférica total (α) utilizados para calcular la transferencia radiante entre los gases y las superficies fueron calculados a partir del método propuesto en Perry and Green, 1997 (pp. 5.33 – 5.34)</p>		

Tabla 10.3. Ecuaciones para estimar las propiedades y coeficientes del sólido utilizados en la aplicación del modelo y su fuente

$C_{p_h} = 1.539 \cdot 10^3 + 2,72 \cdot 10^3 \frac{X_h}{(1 + X_h)}$	Schmalko <i>et al.</i> , 1997	
$C_{p_p} = 1,79 \cdot 10^3 + 2,36 \cdot 10^3 \frac{X_p}{(1 + X_p)}$	Schmalko <i>et al.</i> , 1997	
$k_h = 0,142 + 0,0051 \frac{X_h}{(1 + X_h)}$	Schmalko <i>et al.</i> , 1997	
$\lambda = 7020 - 803 \ln(T)$	Schmalko <i>et al.</i> , 1998	
$\rho_h = 560 + 187X_h$ $\rho_p = 701 + 730X_p$	Ramallo <i>et al.</i> , 2001	Ecuación 6.17
$L_h = 2,6 \cdot 10^{-4} + 6,34 \cdot 10^{-5} X_h$	Ramallo <i>et al.</i> , 2001	
$s_p = \frac{0,613 + 0,192X_p}{0,613 + 0,192X_{p0}}$	Ecuación 6.11	
$D_h = 6,64 \cdot 10^{-6} (1 + X_h) e^{\left[\frac{-3733}{T_h} \right]}$	Ramallo <i>et al.</i> , 2001	
$D_{pX} = 1,24 \cdot 10^{-7} (1 + 0,75X_p) e^{\frac{-2270}{T_p}} e^{412R_i}$ $D_{pB} = 9,95 \cdot 10^{-5} (1 + 0,28X_p) e^{\frac{-5968}{T_p}} e^{936R_0}$ $D_{ef} = \frac{1}{\frac{(d_B - d_x)}{d_B} \frac{1}{D_B} + \frac{1}{mD_x}}$	Ecuaciones 7.19 y 7.21	
m= pendiente de la línea de equilibrio corteza-xilema=1,61		

Planteo del modelo

El modelo matemático de transferencia de energía y materia se planteó en dos posibles situaciones: 1) considerando que la transferencia de materia en los palos sólo se lleva a cabo en forma radial, no existiendo transferencia de humedad de los palos hacia las hojas y 2) teniendo en cuenta dicha transferencia. De acuerdo con Schmalko *et al.* (1996), como las ramas de yerba mate contienen capilares, éstos permiten que el agua se desplace en dirección axial, mas fácilmente que en dirección radial, reflejando este comportamiento en sus

respectivos coeficientes de difusión. Similares observaciones fueron obtenidas Basílico y Moyne, (1986), en muestras de madera.

10.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

10.3.1. Cálculos preliminares

El modelo desarrollado fue aplicado para las condiciones de trabajo expuestas anteriormente. En una primera etapa se supuso que no existía transferencia de humedad de los palos a las hojas ($\gamma=1$ en la ec. 1). Los resultados obtenidos fueron comparados con las condiciones de salida de los materiales y el aire (contenido de humedad de las hojas y los palos, temperatura y humedad del aire).

Con estas suposiciones se obtuvieron resultados que no estaban de acuerdo con las mediciones realizadas: el contenido de humedad de las hojas fue menor al valor experimental; los palos prácticamente no perdían humedad y su temperatura resultaba muy alta; la humedad del aire era menor y su temperatura estaba por encima de la experimental.

Estos resultados dieron lugar a que se pudiera plantear la situación en la cual se considera la transferencia de humedad por capilaridad de los palos hacia las hojas.

10.3.2. Aplicación del nuevo modelo

En el nuevo modelo se consideró que existía transferencia de humedad (en estado líquido) de los palos hacia las hojas, y que esta humedad se evaporaba en estas últimas. Se supuso que toda la humedad que perdían los palos se evaporaba de esta forma, por lo que el factor “ γ ” de la ecuación 1 se consideró igual a 1,11. Este valor fue calculado considerando la diferencia entre los valores experimentales (calculados con el modelo 1) de contenido de humedad en las hojas y los palos. Esto significa que se evapora un 11% adicional de agua en las hojas proveniente de los palos. Luego de cada etapa de tiempo, el contenido de humedad en las hojas y los palos era corregido teniendo en cuenta esta transferencia. Cabe mencionar que el área de transferencia de calor y materia de las hojas es mucho mayor que la de los palos, por lo que se tendría una rápida reducción de su contenido de humedad, generándose un gradiente entre los palos y las hojas, que produciría la transferencia antes mencionada. Con

esta consideración, el ajuste del modelo a los datos experimentales resultó bueno. Los valores experimentales y calculados de contenido de humedad en las hojas y los palos a la salida y el error entre ellos se dan en la tabla 10.4.

Tabla 10.4. Contenido de humedad (en kg de agua/ kg ss) de las hojas y los palos a la salida del zapecador (valores experimentales y calculados con el modelo) y el error entre ellos.

Día	Hojas			Palos		
	Experimentales	Calculados	Error %	Experimentales	Calculados	Error %
1	0,2112	0,1665	21,1	1,3100	1,2376	5,5
2	0,1476	0,1589	7,7	1,2821	1,3573	5,9
3	0,1979	0,2262	14,3	1,1777	1,2870	9,3
4	0,2066	0,1849	10,5	1,1210	1,2315	9,9
5	0,1975	0,1424	27,9	1,0978	1,2745	16,2
6	0,1617	0,1806	11,7	1,1119	1,2504	12,5
7	0,2118	0,1486	30,0	1,3507	1,3621	0,8
Valor medio	0,1906	0,1674	12,2	1,2073	1,2775	5,8

10.3.3. Temperatura

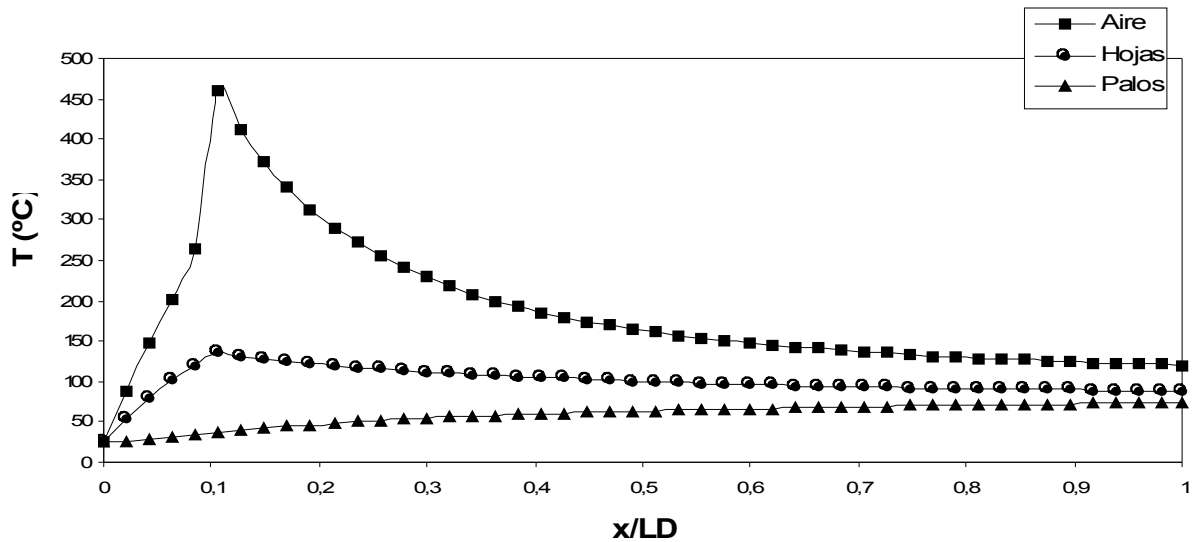
En la figura 10.3 se presentan las variaciones de temperatura calculadas con el modelo para el aire, las hojas y los palos para la experiencia 1, correspondiente al día 1. Como se puede observar, el modelo predice un rápido incremento de la temperatura del gas hasta la distancia $x/L_D=0,1$ (hasta 460 °C), correspondiente al lugar donde termina la llama. A partir de este punto se produce una disminución de la misma (que es típica de los secaderos rotatorios), hasta alcanzar los 120 °C a la salida.

Los palos tienen un calentamiento continuo (desde 25 °C hasta 75 °C), característico de los sólidos en un secadero rotatorio, cuando no tienen un período de velocidad constante de secado (Vega *et al.*, 2000; Ghoshdastidar *et al.*, 2002).

Sin embargo las hojas tienen un comportamiento diferente. En la primer zona del equipo (hasta $x/L_D=0,1$), y debido a que poseen un área de transferencia por unidad de peso muy elevada, éstas reciben calor por convección y radiación de la llama, elevándose su temperatura hasta los 135 °C (en aproximadamente 17 s). A partir de este punto, la temperatura de la hoja tiene una lenta disminución, ya que el calor recibido es menor que el calor necesario para evaporar el agua. La velocidad de evaporación es alta debido a la elevada

temperatura que tiene la hoja al entrar a la zona de secado. Su temperatura de salida es de aproximadamente 88 °C.

Figura 10.3. Evolución de las temperaturas en el equipo en función de la distancia



adimensional

10.3.4. Humedad

En la figura 10.4 se puede observar las variaciones de contenido de humedad de las hojas y los palos en función de la distancia adimensional para la experiencia 1. En la primera zona el aire tiene un brusco aumento de temperatura produciendo un pronunciado descenso del contenido de humedad. Esta variación produce un comportamiento especial que no se encuentra en los secaderos típicos, ya que en ellos el calentamiento se produce fuera del secadero. En estos últimos el perfil de humedad generalmente es plano debido al calentamiento más lento del sólido. En la siguiente zona (de secado), se produce la disminución logarítmica que plantea el modelo de Fick. Esta disminución es menos pronunciada que la presentada en otros trabajos (Kemp and Oakley, 1997; Ghoshdastidar *et al.*, 2002). Esto se debería probablemente, a la disminución de temperatura que experimenta la hoja y al aporte de humedad de los palos.

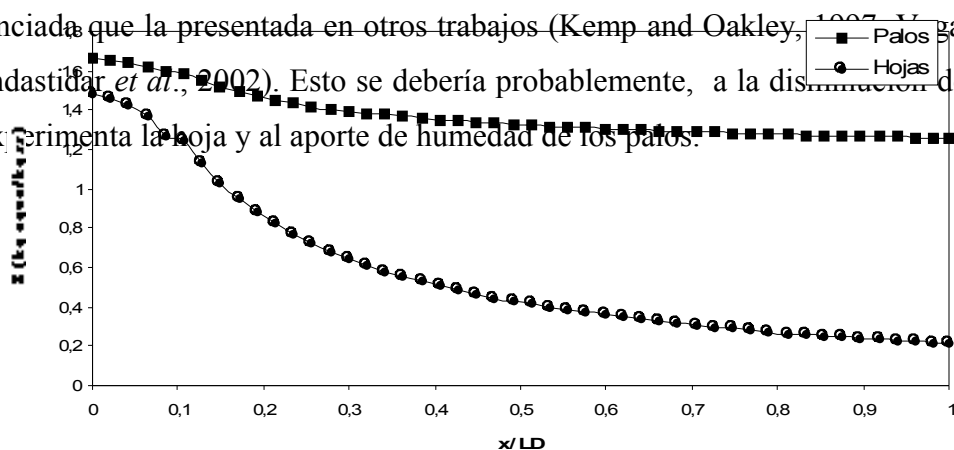


Figura 10.4. Evolución del contenido de humedad de las hojas y los palos en función de la distancia adimensional

10.4. CONCLUSIONES

Al realizar el modelado de la transferencia de calor y materia en el zapeador, con el objetivo de conocer las variaciones de temperatura y humedad en las hojas y los palos de yerba mate, se encontró que los valores experimentales coincidían con los teóricos cuando se consideraba que casi la totalidad del agua presente en el palo se evaporaba por las hojas.

En la primera zona, donde el material se ponía en contacto con la llama, ocurría un rápido aumento de la temperatura en las hojas (hasta 135°C) y un lento aumento de la misma en los palos, que se debería a su menor área de transferencia de materia y energía.

En la segunda zona, debido a la elevada temperatura que adquieren las hojas y a la alta velocidad de evaporación, se producía una disminución de su temperatura, comportamiento que se puede considerar atípico en secaderos rotatorios. Los palos presentaron un comportamiento normal en esta zona.

La humedad de las hojas tuvo un descenso importante en la primera zona debido a la rápida elevación de su temperatura. Esta variación produce un comportamiento especial que no se encuentra en los secaderos típicos, ya que en ellos el calentamiento se produce fuera del secadero. En la segunda zona de secado se produce el perfil logarítmico esperable. Los palos presentaron un comportamiento normal en ambas zonas.

10.5. NOMENCLATURA

A	Area de transferencia promedio (m^2)
A_h	Area de transferencia promedio de una hoja (m^2)
A_p	Area de transferencia promedio de un palo de longitud unitaria (m^2)
A_{ij}	Coefficiente para calcular la conductividad térmica
A_{fa}, A_{fc}, A_n, A_A	Áreas de transferencia de la ecuación del coeficiente de transferencia de calor en los palos (área real de flujo libre, área de flujo dentro de las aletas, Area nominal de transferencia de calor sin las aletas y Area real de transferencia de calor respectivamente)
a_w	Actividad de agua
B_{ij}	Coefficientes utilizados para estimar la conductividad térmica
C_p	Capacidad calorífica (J/kg K)
D	Diámetro del palo (m)
D	Coefficiente de difusión de materia (m^2/s)
d_d	Diámetro interno del zapecador
d_H	Diámetro hidráulico (m)
F	Factor de visión
E	Velocidad de evaporación de agua (kg/s)
G	aceleración de la gravedad ($9.81 m/s^2$)
Gr	Número de Grasshoff
H	Coefficiente convectivo de transferencia de calor ($J/m^2 K$)
K	Conductividad térmica (J/m K)
L	Espesor de la hoja (m)
L_D	Longitud del equipo (m)
M	Peso molecular
M_s	Masa seca de materia (kg)
n_i	Número de nodo
P	Perímetro interno del secadero (teniendo en cuenta las aletas) (m)
Pr	Número de Prandlt
Q	Flujo de calor (J/s)
R	Radio del palo (m)
Re	Número de Reynold
S_{ij}	Coefficiente para calcular la conductividad térmica
s	Coefficiente de contracción
t	Tiempo, s
t_c	Tiempo de caída de las ramas, s
T	Temperatura (K)
v_s	Velocidad media de los sólidos en el secadero (m/s)
X	Contenido de humedad (kg agua/kg sólido seco)
X	Distancia al extremo de entrada del sólido (m)
Y	Fracción molar de los gases
Z_{ij}	Coefficiente utilizado para estimar la viscosidad

α	Adsorividad hemisférica total
β	Angulo con respecto al eje de las aletas espirales.
Δx	Longitud del nodo (m)
Δ	Coefficiente de zona (toma el valor de 1 en la zona de combustión y 0 en la zona de secado.
Γ	Coefficiente que tiene en cuenta la evaporación del agua de los palos por las hojas
ε	Emisividad hemisférica total
λ	Calor latente de evaporación (J/kg)
ρ	Densidad (kg/m ³)
σ	Constante de Stefan-Boltzman (J/m ² K ⁴)
θ	ángulo con respecto a la horizontal donde los sólidos caen de las aletas. Se toma 2π en promedio
μ	Viscosidad de los gases (kg/m s)

Subíndices

a	Aire
b	Corteza
ef	Efectivo
g	Gases
h	Hojas
l	Llama
m	Medio
p	Palos
pi	Pared interna
po	Pared externa
s	Sólido
sa	Aire seco
sh	Hojas seca
sp	Palos seco
ss	Sólido seco
x	Xilema
w	Pared
∞	Ambiente exterior (298 K)
0	Inicial

CAPÍTULO 11

MODELADO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR Y MATERIA EN EL SECADERO

11.1. INTRODUCCIÓN¹

De acuerdo a lo mencionado en el capítulo 1, la etapa de secado tiene por objetivo reducir el contenido de humedad a valores donde el producto se vuelve estable y puede ser estacionado. En la yerba mate este valor es de aproximadamente un 5% o actividad de agua de 0,3 (correspondiente a los valores de contenido de humedad de la monocapa). También en esta etapa se producen modificaciones de algunos componentes (clorofila, cafeína, azúcares), como ya fue mencionado en el capítulo 10.

Entre las principales diferencias de las condiciones de trabajo entre esta etapa y la del zapecado se pueden mencionar: la menor velocidad y temperatura del aire y el mayor tiempo de residencia del sólido en esta etapa.

Los secaderos más utilizados son los de tipo cinta, con flujo cruzado. Estos secaderos tienen una cinta perforada que llevan las ramas desde un extremo al otro, mientras que el aire caliente se introduce por medio de tubos localizados en la parte inferior de la cinta. El aire es luego forzado a pasar a través del lecho de ramas. El contenido de humedad y la temperatura del producto y del aire varían a lo largo y alto del lecho. La velocidad de secado depende de la velocidad y temperatura del aire, el flujo de material, la altura y porosidad del lecho y el tipo de material (Khandari and Patankar, 1999; Sturgeon, L.F., 1996, Giner et al., 1996).

En estos secaderos, el material sólido permanece en una posición fija respecto a la cinta y a las otras partículas, por lo que el tiempo de residencia de las diferentes ramas se pueden considerar similares. Por este motivo, si el secadero no tiene inversión del sentido de los flujos, las ramas pueden tener diferentes tratamientos térmicos de acuerdo a su posición. Es decir que las ramas localizadas en la parte inferior a la cinta están en contacto con aire a mayor temperatura y menor humedad; mientras que las ramas localizadas en la parte superior, están en contacto con el aire más frío y húmedo. Esto hace que exista una diferencia muy importante entre el contenido de humedad, la temperatura y la composición de los otros componentes (clorofilas, azúcares, etc) en las hojas y ramas a la salida del secadero de acuerdo al nivel que ocuparon en el mismo. Esta diferencia puede ser importante cuando el lecho es de altura elevada, como en este caso (aproximadamente 1 m).

El modelo matemático de un secadero permite conocer la evolución de la temperatura y el contenido de humedad del sólido en las diferentes posiciones del lecho. Este método es

¹ El desarrollo de este Capítulo se basa en un trabajo realizado en forma conjunta con el Ing. Juan Manuel Peralta bajo mi dirección en el proyecto “Utilización de Gas Licuado Propano en el Procesamiento de la Yerba Mate: Modelado y Optimización de la Etapa de Zapecado”

muy útil cuando el sólido se encuentra en movimiento (como en este caso) o cuando es muy pequeño y no es posible introducir en su interior el elemento de medición.

Para realizar el modelado en un lecho, es necesario utilizar las ecuaciones de balance y transferencia de calor y materia para el aire y el sólido. Si el lecho es suficientemente alto de tal forma que las condiciones del aire varían en forma apreciable, los balances se realizan en un nodo o elemento de dimensiones reducidas. Las soluciones de las ecuaciones diferenciales obtenidas son generalmente numéricas. Como en el caso del zapecador, en el modelado del secadero se utilizará el método de solución de las diferencias finitas.

En este capítulo se determinó, mediante el modelado de la transferencia de calor y materia, la evolución del contenido de humedad y temperatura de las hojas y los palos de la yerba mate cuando se seca en ramas a diferentes alturas de lecho de secado.

Aunque el establecimiento industrial donde se realizaron las mediciones de las variables a ser modeladas contaba con dos secaderos, en este capítulo se trabajó con uno de ellos, ya que el segundo operaba en condiciones similares al primero.

11.2. MATERIALES Y MÉTODOS

11.2.1. Material

Se utilizaron ramas de yerba mate (*Ilex paraguariensis Saint Hilaire*) provenientes de la etapa de zapecado. A la salida de esta etapa, las mismas eran transportadas por medio de una cinta a la alimentación al secadero, reduciéndose en este tramo apreciablemente su temperatura. El contenido de humedad de las hojas variaba entre 0,14 kg de agua/kg ss y 0,22 kg de agua/kg ss y el de los palos entre 1,10 kg de agua/kg ss y 1,35 kg de agua/kg de ss. Las características físicas de las ramas ya fueron mencionadas en el punto 10.2.

11.2.2. El equipo

El secadero tenía paredes de mampostería con una dimensión de 35 m de largo por cuatro metros de ancho y 7 m de altura. La alimentación se realizaba en un extremo del mismo por medio de una cinta transportadora cuyo extremo se desplazaba de tal forma que la misma fuera uniforme en todo el ancho de la cinta, formando un lecho de ramas de 1 m de altura.

La cinta tenía dos tramos de 15 m de longitud y 4 m de ancho, con perforaciones que permitían el paso del aire. El aire caliente se obtenía quemando gas propano en el exterior introduciéndose por debajo de la cinta por medio de tubos con 5 bocas en cada una de las dos secciones. El mismo salía al exterior por medio de 7 chimeneas ubicadas en el techo del secadero. Los sólidos salían por el extremo opuesto al de entrada y eran volcados sobre una cinta transportadora que los llevaba a la segunda etapa de secado.

Las condiciones de trabajo, que corresponden a los valores medios de mediciones en 7 días diferentes y que serán utilizadas en el modelado, son las siguientes (Capítulo 4):

<u>Condiciones de entrada:</u>	
• Flujo de ramas:	0,422 kg ss/s
• Flujo de hojas:	0,282 kg ss/s
• Flujo de palos:	0,140 kg ss/s
• Flujo de aire a la entrada:	Primera sección: $4,04 \pm 0,42$ kg sa/s Segunda sección: $4,07 \pm 0,24$ kg sa/s
• Humedad absoluta del aire:	$0,0156 \pm 0,002$ kg agua/kg sa
• Temperatura de los sólidos:	50 °C
• Temperatura del aire:	Primera sección: 110 °C Segunda sección: 100 °C
<u>Condiciones de salida:</u>	
• Humedad absoluta del aire:	0,0367 kg /kg gas seco
• Temperatura:	50 °C
• Velocidad de la cinta:	0,0055 m/s
• Tiempo medio de residencia de las ramas:	5400 s
• Altura del lecho de ramas:	1 m
• Velocidad del aire en la entrada del lecho:	0,08 m/s

En la tabla 12.1 se muestran los valores de contenido de humedad de las hojas y los palos a la entrada y salida del secadero medidos en 7 días diferentes.

Tabla 11.1. Valores de contenido de humedad (en kg agua/kg ss) de las hojas y los palos a la entrada y salida del secadero medidos en 7 días diferentes

Día	Hojas		Palos	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida
1	0,2112	0,0594	1,3100	0,3633
2	0,1476	0,0390	1,2821	0,3477
3	0,1979	0,0948	1,1777	0,4102
4	0,2066	0,0791	1,1210	0,4447
5	0,1975	0,0710	1,0978	0,3649
6	0,1617	0,0500	1,1119	0,4965
7	0,2118	0,0740	1,3507	0,3439
Valor medio	0,1906	0,0668	1,2073	0,3958

11.2.3. Modelo matemático

Suposiciones

Para aplicar el modelo, se realizaron las siguientes suposiciones:

- 1) No existía perfil térmico dentro de los sólidos (hojas y palos).
- 2) Los palos eran considerados como un material compuesto (xilema y corteza) y se calculó un coeficiente de difusión efectivo considerando estos dos materiales.
- 3) Los gases eran considerados ideales.
- 4) Las propiedades termofísicas y de transporte eran calculadas como la suma de los aportes individuales (gases y H₂O).
- 5) Se consideraba el efecto de contracción que produce la pérdida de humedad en los sólidos sobre sus áreas de transferencia.

Ecuaciones Básicas

Transferencia de calor

Las ecuaciones 11.1 a 11.6 describen la variación de la temperatura en forma diferencial en función del tiempo para los sólidos y el aire (mezcla entre el aire húmedo de entrada, productos de combustión y agua que se evapora de los sólidos).

En las hojas se realiza en primer lugar un balance de energía:

Energía ganada por convección – energía perdida por evaporación = energía utilizada en el calentamiento

La que expresada en forma diferencial, es:

$$A_h h_h (T_g - T_h) - \gamma \lambda E_h = M_{sh} (1 + X_h) C_{p_h} * \frac{dT_h}{dt} \quad (11.1)$$

A partir de ésta, se puede obtener la variación de la temperatura en función del tiempo

$$\frac{dT_h}{dt} = \frac{1}{M_{sh} (1 + X_h) C_{p_h}} [A_h h_h (T_g - T_h) - \gamma \lambda E_h] \quad (11.2)$$

En los palos, se realiza un balance similar y se obtiene:

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{1}{M_{sp}(1 + X_p)Cp_p} [A_p h_p (T_g - T_p) - \lambda E_p] \quad (11.3)$$

El balance de energía para el aire es el siguiente:

Energía transferida al sólido + energía utilizada en el calentamiento del vapor =
energía perdida por el aire

$$A_h h_h (T_g - T_h) + A_p h_p (T_g - T_p) + E_h Cp_h (T_h - T_g) + E_p Cp_p (T_p - T_g) = M_g (1 + Y_g) Cp_g * \frac{dT_g}{dt} \quad (11.4)$$

A partir de ésta, se puede obtener la variación de la temperatura en función del tiempo:

$$\frac{dT_g}{dt} = \frac{-1}{M_g (1 + Y_g) Cp_g} [A_h h_h (T_g - T_h) + A_p h_p (T_g - T_p) + E_h Cp_h (T_h - T_g) + E_p Cp_p (T_p - T_g)] \quad (11.5)$$

Transferencia de masa

Las pérdidas de humedad se calcularon utilizando las ecuaciones integradas de la 2° ley de Fick, planteándose dos modelos diferentes como se verá mas adelante.

- En los palos se planteó la solución considerando un cilindro infinito con transferencia de masa en forma radial):

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\mu_n^2} e^{\left[\frac{-\mu_n^2 D_p t}{R_0^2} \right]} \quad (11.6)$$

donde μ_n son las raíces de la función de Bessel de orden cero.

- En las hojas se planteó esta solución considerando una placa plana infinita:

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} e^{\left[\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_H t}{L^2} \right]} \quad (11.7)$$

La humedad del aire, se calcula de la siguiente forma:

$$Y_{i+1} = Y_i + \frac{E_h + E_p}{M_s} \quad (11.8)$$

Método de resolución

Para la resolución de estas ecuaciones, se utilizó el método de las diferencias finitas hacia delante y una hoja de cálculo. El secadero fue dividido en 1080 nodos: 120 divisiones longitudinales y 9 divisiones de alto.

Propiedades

Las propiedades utilizadas en el modelo para el cálculo se plantean en las tablas 11.2 para la fase gaseosa y en la tabla 11.3 para el sólido. Las ecuaciones presentadas para determinar el coeficiente de difusión del agua en las hojas fueron estimadas a partir de datos experimentales obtenidos entre 70 °C y 110°C (Schmalko et al., 1996; Ramallo et al., 2001), mientras que en los palos se trabajó con valores experimentales obtenidos entre 70 °C y 100°C (Ver capítulo 9).

Tabla 11.2. Propiedades y coeficientes de la fase gaseosa utilizados en la aplicación del modelo y su fuente

Parámetros	Referencias	
$k_m = \frac{\sum_{i=1}^n y_i k_i}{\sum_{j=1}^n y_j A_{ij}}$ $S_i = 1.5T_{bi}$ $S_{ij} = S_{ji} = (S_i S_j)^{0,5}$ $A_{ij} = 0,25 \left\{ 1 + \left[\frac{\mu_i}{\mu_j} \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{0,75} \left(\frac{T + S_i}{T + S_j} \right) \right]^{0,5} \right\}^2 \left(\frac{T + S_{ij}}{T + S_i} \right)$	Perry y Green , 1997 (p. 2.368)	
$\mu_m = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_i}{\left[1 + \sum_{j=1}^n \left(Z_{ij} \frac{y_j}{y_i} \right) \right]}$ $Z_{ij} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{0,5} \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{0,25} \right]^2}{\sqrt{8} \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right)^{0,5}}$	Perry y Green , 1997 (p. 2.363)	
$Cp_g = \sum y Cp_1$	Perry y Green , 1997 (p. 2.347)	
$h_h = 0,648 \left(\frac{k_g}{L_h} \right) Re_L^{0,5} Pr^{1/3}$ <p style="text-align: center;">(Flujo paralelo)</p>	$h_h = 0,205 \left(\frac{k_g}{L_h} \right) Re_L^{0,588} Pr^{1/3}$ <p style="text-align: center;">(Flujo perpendicular)</p>	Perry y Green , 1997 (p. 5.15- 5.16)
$h_p = 0,51 \left(\frac{k_g}{d_p} \right) Re_d^{0,5} Pr^{0,37}$	Kreith y Bohn, 1997 (p. 455)	
$k_G = 0,74 \frac{D_g \rho_g}{d} \left(\frac{vd}{v} \right)^{0,5} \left(\frac{v}{D_g} \right)^{1/3}$ <p style="text-align: center;">(Palos)</p>	Perry y Green, 1997 (p. 5.65)	
$k_G = 0,0365 \frac{D_g \rho_g}{L} \left(\frac{vL}{v} \right)^{0,8}$ <p style="text-align: center;">(Hojas)</p>	Perry y Green, 1997 (p. 5.60)	

Tabla 11.3. Propiedades y coeficientes del sólido utilizados en la aplicación del modelo y su fuente

$C_{p_h} = 1.539 \cdot 10^3 + 2,72 \cdot 10^3 \frac{X_h}{(1 + X_h)}$	Schmalko <i>et al.</i> , 1997
$C_{p_p} = 1,79 \cdot 10^3 + 2,36 \cdot 10^3 \frac{X_p}{(1 + X_p)}$	Schmalko <i>et al.</i> , 1997
$k_h = 0,142 + 0,0051 \frac{X_h}{(1 + X_h)}$	Schmalko <i>et al.</i> , 1997
$\lambda = 7020 - 803 \ln(T)$	Schmalko <i>et al.</i> , 1998
$\rho_h = 560 + 187X_h$ $\rho_p = 701 + 730X_p$	Ramallo <i>et al.</i> , 2001 Ecuación 6.17
$L_h = 2,6 \cdot 10^{-4} + 6,34 \cdot 10^{-5} X_h$	Ramallo <i>et al.</i> , 2001
$s_p = \frac{0,613 + 0,192X_p}{0,613 + 0,192X_{p0}}$	Ecuación 6.11
$D_h = 6,64 \cdot 10^{-6} (1 + X_h) e^{\left[\frac{-3733}{T_h} \right]}$	Ramallo <i>et al.</i> , 2001
$D_{pX} = 1,24 \cdot 10^{-7} (1 + 0,75X_p) e^{\frac{-2270}{T_p}} e^{412R_i}$ $D_{pB} = 9,95 \cdot 10^{-5} (1 + 0,28X_p) e^{\frac{-5968}{T_p}} e^{936R_0}$ $D_{ef} = \frac{1}{\frac{(d_B - d_x)}{d_B} \frac{1}{D_{pB}} + \frac{1}{mD_{p_x}}}$ <p>m= pendiente de la línea de equilibrio corteza-xilema=1,61</p>	Ecuaciones 7.19 y 7.21
$D_p^* = \frac{d(1 + X_p)}{4\rho_s} * \frac{1}{\frac{d(1 + X_p)}{4\rho_s D_{ef}} + \frac{m'}{k_{Gp} Y \rho_G}}$	
$D_h^* = \frac{L(1 + X_h)}{4\rho_s} * \frac{1}{\frac{L(1 + X_h)}{4\rho_s D_h} + \frac{m'}{k_{Gh} Y \rho_G}}$	

Planteo del modelo

El modelo matemático de transferencia de energía y materia se planteó en dos posibles situaciones: 1) considerando que no había resistencia externa a la transferencia de masa, utilizándose para el cálculo de la pérdida de humedad las ecuaciones 11.6 y 11.7 (Modelo 1)

y 2) considerando que había resistencia externa a la transferencia y en este caso se utilizó un coeficiente de difusión efectivo que considera ambas resistencias (D_p^* y D_h^*) (Modelo 2).

11.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

11.3.1. Modelo 1

El la Tabla 11.4 se dan los valores de contenido de humedad obtenidos con el modelo 1. Como se puede observar, en las hojas los valores predichos con el modelo fueron siempre inferiores a los experimentales; mientras que en los palos estos valores se encontraron sobreestimados y subestimados indistintamente. Sin embargo el valor medio de los palos no tenía un error elevado. Una forma de explicar este comportamiento es que la variación encontrada se debía a la forma en que se tomó la muestra del material a la salida, ya que como se verá mas adelante, el perfil de humedades en el lecho fue muy grande, produciéndose un material de salida con contenidos de humedad muy heterogéneo, lo que dificultaba tener una muestra representativa.

Tabla 11.4. Contenido de humedad (kg agua/kg ss) de las hojas y los palos a la salida del secadero (valores experimentales y calculados con el modelo 1) y el error entre ellos.

Día	Hojas			Palos		
	Experimentales	Calculados	Error%	Experimentales	Calculados	Error%
1	0,0594	0,0486	18,18	0,3633	0,4465	22,90
2	0,0390	0,0297	23,85	0,3477	0,3896	12,05
3	0,0948	0,0350	63,08	0,4102	0,3455	15,77
4	0,0791	0,0334	57,77	0,4447	0,3125	29,72
5	0,0710	0,0294	58,59	0,3649	0,2921	19,95
6	0,0500	0,0224	55,20	0,4965	0,2810	43,40
7	0,0740	0,0519	42,58	0,3439	0,4766	38,58
Valor medio	0,0668	0,0357	46,55	0,3958	0,3634	8,19

11.3.2. Modelo 2

Temperatura

En la Figura 11.1 se presentan las variaciones de temperatura calculadas con el modelo para el aire, en cada uno de los niveles del lecho. Como se puede observar, para el nivel “0” que correspondía a la entrada del aire, se tuvo una variación debido a que la misma cambia en la segunda sección de 110 °C a 100 °C. En los otros niveles del lecho, este escalón es menos acentuado. Por otra parte, en el nivel superior del lecho, principalmente a la entrada del sólido, el aire alcanzó niveles de temperatura muy bajos (inclusive a los niveles de la temperatura de entrada del sólido)

En la Figura 11.2 se puede observar la evolución de temperatura de las hojas. En los niveles bajos del lecho, la temperatura de las hojas tuvo un incremento importante en los primeros nodos y luego evolucionó lentamente hasta alcanzar prácticamente la temperatura del aire en la primera sección. Posteriormente se redujo, debido a la reducción de la temperatura del aire y mantuvo luego valores similares a la misma. En los niveles más altos, esta temperatura aumentó hasta alcanzar valores cercanos a la temperatura del aire de entrada. En cambio la evolución fue más lenta en los palos, como se puede observar en la Figura 11.3. Inclusive se pudo apreciar una disminución de la misma en los nodos por efecto de la baja temperatura del aire y de la discretización que plantea el modelo. Cabe mencionar que el área de transferencia de calor por unidad de volumen fue 10 veces menor en los palos que en las hojas. Debido a este hecho y a la mayor pérdida de humedad, la temperatura del palo no alcanzó niveles cercanos a la del aire.

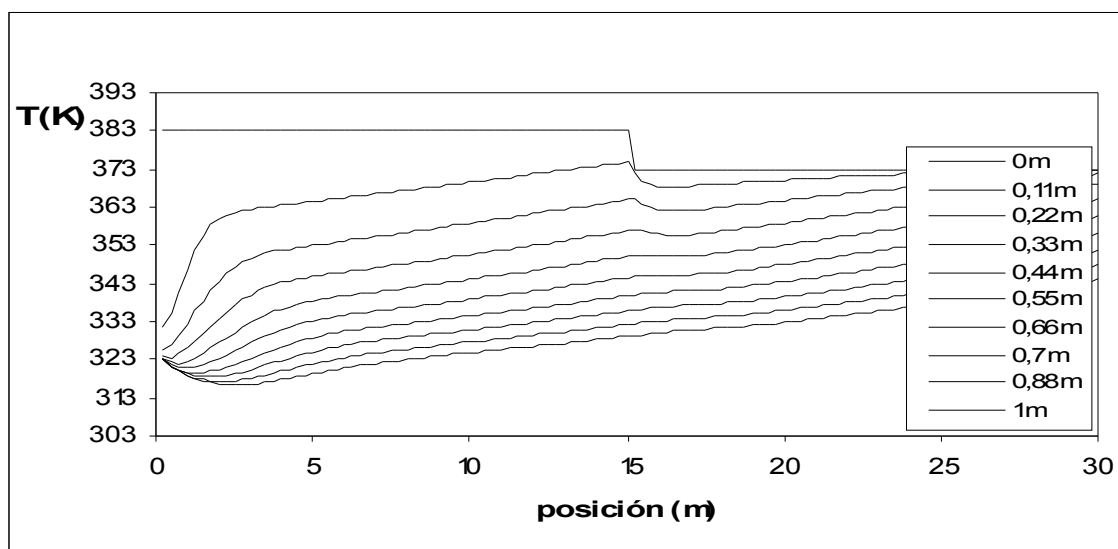


Figura 11.1. Evolución de la temperatura del aire dentro del secadero para los diferentes niveles de lecho

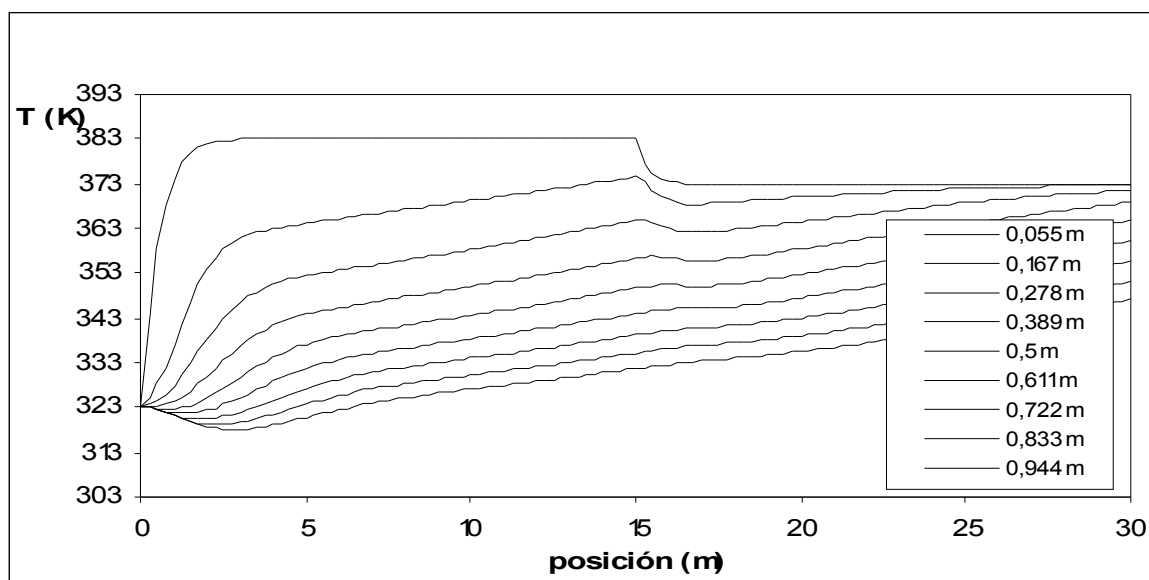


Figura 11.2. Evolución de la temperatura de las hojas dentro del secadero para los diferentes niveles de lecho

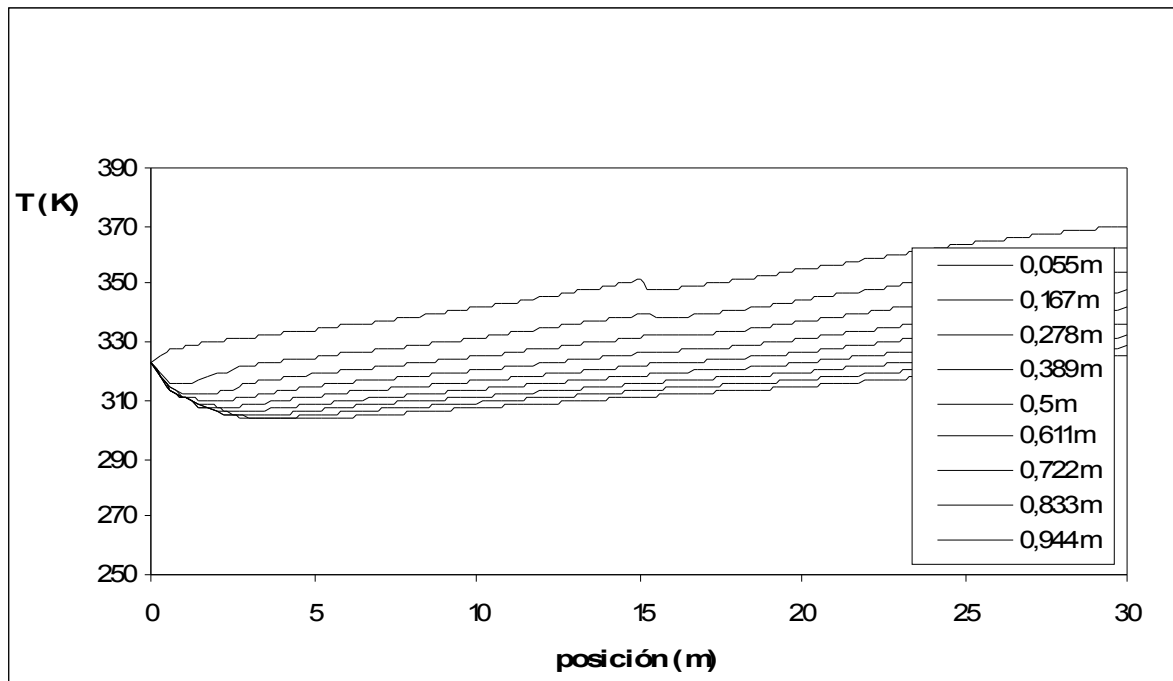


Figura 11.3. Evolución de la temperatura de los palos dentro del secadero para los diferentes niveles de lecho

Humedades

En la Figura 11.4 se puede observar las variaciones de humedad del aire en los diferentes niveles de los nodos y en función de la longitud del secadero para la experiencia 1. Se encontró que, en todos los niveles, la máxima pérdida de humedad ocurrió a una pequeña distancia de la entrada (aproximadamente 1 m), ya que en estos nodos se tuvo el efecto combinado de un alto contenido de humedad y temperatura. También se puede observar que a la mitad de la distancia, se producía un escalón en la humedad del aire debido a la disminución de la temperatura de entrada en la segunda sección.

La evolución del contenido de humedad en las hojas presentó un comportamiento típico de las curvas de secado a temperatura constante (Figura 11.5). Inclusive no se apreció variación cuando se realizó el cambio de temperatura del aire (segunda sección). El contenido de humedad a la salida fue muy bajo y se encontró una dispersión no muy elevada en los diferentes niveles. En cambio en los palos, se observó una dispersión grande de los contenidos de humedad en los diferentes niveles (Figura 11.6). Esta heterogeneidad del contenido de

humedad de los palos dificultó la obtención de una muestra representativa del material a la salida.

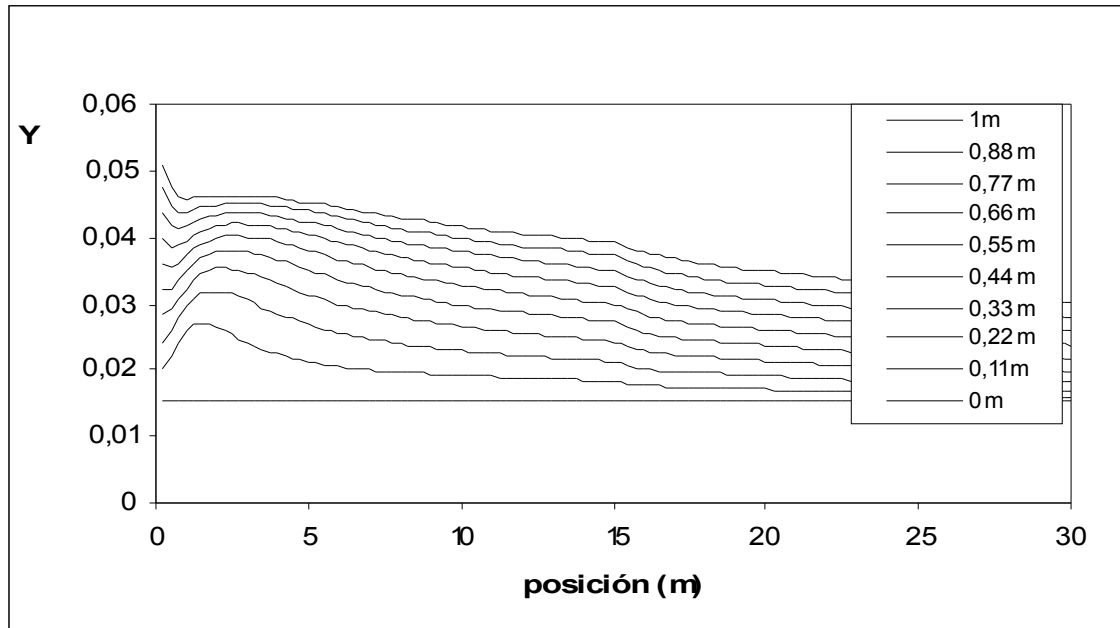


Figura 11.4. Evolución de la humedad absoluta del aire Y (kg agua/kg aire seco) dentro del secadero para los diferentes niveles de lecho

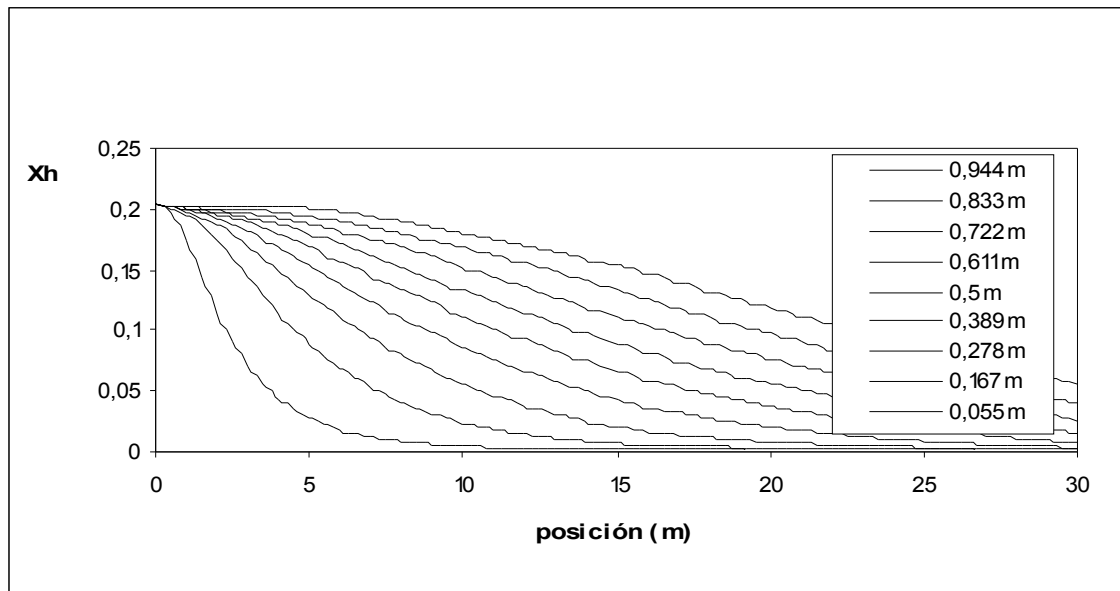


Figura 11.5. Evolución del contenido de humedad de las hojas X_h (kg agua/ kg de sólido seco) dentro del secadero para los diferentes niveles de lecho

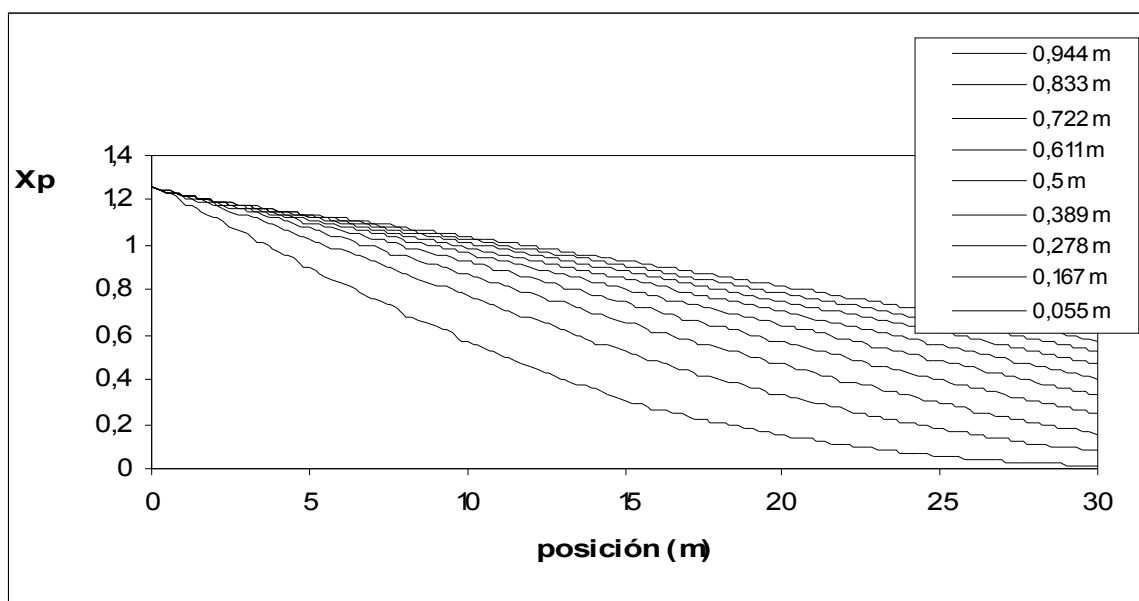


Figura 11.6. Evolución del contenido de humedad de los palos X_p (kg agua/kg de sólido seco) dentro del secadero para los diferentes niveles de lecho

En la Tabla 11.5 se observan los valores de contenido de humedad (valores experimentales y calculados con el modelo) para las 7 experiencias diferentes. Este modelo tuvo un comportamiento similar al anterior, pero con valores de errores un poco menores. Esto se puede explicar por la baja resistencia relativa que aporta el aire en la transferencia de masa. Al calcularse los valores relativos de resistencia a la transferencia de masa en ambas fases (términos de la definición de D_p^* y D_h^*), se encontró que el aire aportaba entre el 1% y el 17% de la resistencia total.

Tabla 11.5. Contenido de humedad (kg agua/kg ss) de las hojas y los palos a la salida del secadero (valores experimentales y predichos con el modelo 2) y el error entre ellos.

Día	Hojas			Palos		
	Experimentales	Calculados	Error %	Experimentales	Calculados	Error %
1	0,0594	0,0493	5,94	0,3633	0,4446	22,37
2	0,0390	0,0302	22,56	0,3477	0,3882	11,65
3	0,0948	0,0432	54,43	0,4102	0,4169	1,63
4	0,0791	0,0342	56,76	0,4447	0,3109	30,08
5	0,0710	0,0301	57,60	0,3649	0,2906	20,36
6	0,0500	0,0230	54,00	0,4965	0,2798	43,65
7	0,0740	0,0527	28,78	0,3439	0,4796	39,46
Valor medio	0,0668	0,0375	43,86	0,3958	0,3729	5,78

Contenido de clorofilas

También se estudió la evolución de la concentración de las clorofilas *a* y *b* en los diferentes niveles del lecho, considerando los resultados obtenidos en el Capítulo 9 y las mediciones experimentales realizadas en la planta industrial, mostradas en el Capítulo 4. Para ello se calculó la constante de velocidad específica en cada uno de los nodos en función del contenido de humedad y la temperatura. Luego utilizando la ecuación de degradación de primer orden (ec. 9.1) y considerando el incremento de tiempo se calculó la relación de concentraciones y a partir de ésta la degradación que ocurría en cada nodo. Los resultados obtenidos se pueden observar en la Figura 11.7 para la clorofila *a*. La clorofila *b* tuvo un comportamiento similar. La degradación principal ocurrió en los niveles inferiores, donde se tenían valores elevados de temperatura y bajos de contenido de humedad. En ellos se encontraron valores de concentración que eran la cuarta parte de los encontrados en los niveles superiores. Los valores medios experimentales y predichos fueron de 0,774 mg/g y 0,733 mg/g de sólido seco para la clorofila *a* y de 0,138 mg/g y 0,185 mg/g de sólido seco para la clorofila *b*.

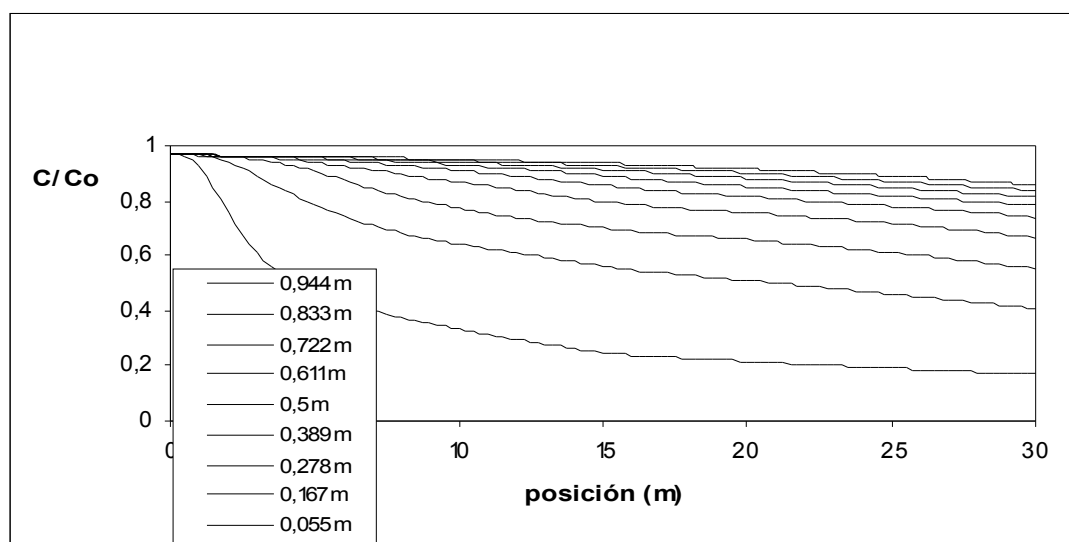


Figura 11.7. Evolución del contenido de clorofila *a* (C/C_0) en las hojas dentro del secadero para los diferentes niveles de lecho

11.4. CONCLUSIONES

Al realizar el modelado de la transferencia de calor y materia en el secadero, con el objetivo de conocer las variaciones de temperatura y humedad en las hojas y los palos de yerba mate, se encontró que existían variaciones importantes en el contenido de humedad y la temperatura en los diferentes niveles del lecho de secado.

La temperatura de las hojas se incrementó en forma rápida y alcanzó los niveles de la temperatura del aire en los nodos inferiores; mientras que la temperatura de los palos se incrementó en forma más lenta y los niveles alcanzados estuvieron alejados de la temperatura del aire.

Los valores de contenido de humedad en los palos exhibieron mucha dispersión en los diferentes niveles; mientras que la dispersión del contenido de humedad de las hojas no fue muy elevada. El contenido de clorofilas en los diferentes niveles del lecho exhibió mucha dispersión, observándose valores 4 veces superiores en la parte superior del lecho con relación a la parte inferior del mismo.

Los errores individuales obtenidos con el modelo fueron relativamente elevados, pero los valores promedios experimentales y predichos resultaron muy similares en los palos y medianamente diferente en las hojas, siendo siempre los valores estimados menores a los experimentales.

Cuando se planteo un modelo en el que no se consideraba la resistencia externa (modelo1) se obtuvieron valores de errores promedios porcentuales de contenidos de humedad más elevados que cuando se consideraba esta resistencia (modelo 2), especialmente en los palos.

11.5. NOMENCLATURA

A	Area de transferencia promedio (m^2)
A_h	Area de transferencia promedio de una hoja (m^2)
A_p	Area de transferencia promedio de un palo de longitud unitaria (m^2)
A_{ij}	Coefficiente para calcular la conductividad térmica
C_p	Capacidad calorífica (J/kg K)
d	Diámetro del palo (m)
D	Coefficiente de difusión (m^2/s)
E	Agua evaporada (kg/s)
H	Coefficiente convectivo de transferencia de calor ($J/m^2 K$)
K	Conductividad térmica (J/m K)
k_G	Coefficiente de transferencia de masa (kg/m^2s)
L	Espesor de la hoja (m)
M	Masa molecular
M_s	Masa seca de materia (kg)
Pr	Número de Prandtl
Q	Coefficiente para calcular la viscosidad
R_i	Radio interno del palo (m)
R_o	Radio externo del palo (m)
Re	Número de Reynold
s	Coefficiente de contracción
S_{ij}	Coefficiente para calcular la conductividad térmica
t	Tiempo (s)
T	Temperatura (K)
v_s	Velocidad media de los sólidos en el secadero (m/s)
y	Fracción molar de los gases
Y	Humedad absoluta del aire (kg agua/kg gas seco)
X	Contenido de humedad (kg agua/kg sólido seco)
Z_{ij}	Coefficiente utilizado para estimar la viscosidad

Letras griegas

γ	Coefficiente que tiene en cuenta la evaporación del agua de los palos por las hojas
λ	Calor latente de evaporación (J/kg)
ρ	Densidad (kg/m^3)
μ	Viscosidad de los gases ($kg/m s$)

Subíndices

h	Hojas
g	Gases
m	Medio
p	Palos
x	Xilema
B	Corteza

SECCIÓN IV

CONCLUSIONES Y REFERENCIAS

CAPITULO 12

CONCLUSIONES

La primera parte de las conclusiones está referida a las mediciones realizadas en la planta industrial. En la misma, al realizar las mediciones de contenidos de clorofilas *a* y *b*, cafeína (en hojas) y contenido de humedad en hojas y palos, seleccionando tres diámetros diferentes, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

1) Se encontró una dispersión muy grande en los contenidos de las clorofilas *a* y *b* en las hojas antes de ser procesadas. Para la clorofila *a* se obtuvieron valores entre 0,127 y 0,243 % en peso, base húmeda y para la clorofila *b* entre 0,021 y 0,041, % base húmeda, que dependían de las edades de las hojas.

En el procesamiento se produjo una degradación muy importante de las clorofilas, principalmente en la etapa de zapecado, donde se deterioró el 80% de las presentes en las hojas verdes. En las dos etapas de secado se degradó un 11% de las clorofilas en las hojas verdes y un 57% respecto al contenido con que ingresó a esa etapa.

2) Se encontraron variaciones en los parámetros de color “a” y “b” en el procesamiento. El parámetro “a”, relacionado al color verde, redujo su valor absoluto en forma apreciable, por la degradación de las clorofilas; mientras que el parámetro “b” tuvo un pequeño incremento.

3) La pérdida total de cafeína en las hojas fue de un 30% en todo el procesamiento, encontrándose un valor levemente superior de pérdida (13%) en la segunda etapa de secado, donde el contenido de humedad fue menor.

4) El contenido de humedad de las diferentes partes de las ramas (antes de ser procesadas) varió entre el 59 y 65%, base húmeda. En el procesamiento, las hojas, debido al menor espesor, perdieron agua rápidamente, encontrándose un valor de humedad muy bajo en la segunda etapa de secado.

En los palos se encontró una dispersión muy grande del contenido de humedad, variando a la salida del segundo secadero entre 10% (base húmeda) en los palos de $2,5 \cdot 10^{-3}$ m de diámetro y 21% (base húmeda) en los palos de $7,5 \cdot 10^{-3}$ m de diámetro.

5) La eficiencia térmica, obtenida de los balances de masa y energía en el zapecador y los secaderos, fue inferior a los valores encontrados en la bibliografía. La eficiencia calculada del zapecador fue de aproximadamente un 46%, encontrándose en la

bibliografía valores entre un 55 y 75%. En los secaderos, las eficiencias térmicas calculadas fueron del 51 y 21 %, encontrándose en la bibliografía valores de eficiencias térmicas cercanos al 55%.

El estudio de las propiedades fisicoquímicas necesarias para el modelado del zapecador y el secadero, se realizó en hojas y palos por separado y a este último se lo consideró un material compuesto de corteza y xilema. Se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- 1) El coeficiente de contracción y la densidad aparente de la corteza y el xilema de los palos fueron diferentes y dependían del contenido de humedad. Esta dependencia se pudo describir con una ecuación lineal. En las hojas también se encontró una dependencia lineal de ambas propiedades con el contenido de humedad.
- 2) Las isotermas de desorción resultaron diferentes en la corteza y el xilema para cada una de las temperaturas estudiadas. Asimismo se encontró que dependían de la temperatura y esta dependencia se estudió utilizando los modelos de GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer) a bajas temperaturas y de Halsey a altas temperaturas. Los valores de las constantes fueron diferentes para los dos materiales.

En las hojas se obtuvo un mejor ajuste con el modelo de Halsey a bajas temperaturas y el de Chen a altas temperaturas. Los valores experimentales se ajustaron al modelo de GAB para estudiar la dependencia con la temperatura. Al realizar un análisis de regresión de las constantes del modelo con la temperatura, el ajuste no resultó significativo.

- 3) La relación de equilibrio de humedades de la corteza y el xilema fue independiente de la temperatura y se pudo describir con un modelo potencial. El contenido de humedad de equilibrio fue siempre mayor en el xilema a diferentes actividades de agua y esta diferencia se incrementó al aumentar la misma.
- 4) El coeficiente de difusión del agua en el xilema fue mayor que en la corteza. Esta diferencia fue muy grande a bajas temperaturas (una relación aproximada

de 20 a 60°C) y pequeña a altas temperaturas (una relación aproximada de 2 a 130°C).

El coeficiente de difusión del agua en las hojas tuvo valores similares al del xilema.

- 5) La ecuación resultante para el coeficiente de difusión del agua en la corteza y el xilema mostró una dependencia lineal con el contenido de humedad, una dependencia exponencial con la temperatura (del tipo Arrhenius) y una dependencia exponencial con el radio del palo, que se debería probablemente a las diferentes estructuras del material. Los valores de las energías de activación de la corteza fueron mayores que las del xilema y por lo tanto la variación del coeficiente de difusión con la temperatura fue mayor en la corteza.

En las hojas la dependencia del coeficiente de difusión con la temperatura fue del tipo exponencial, mientras que el contenido de humedad mostró una dependencia exponencial entre 60 y 90°C y lineal a mayores temperaturas.

- 6) La velocidad de degradación de las clorofilas *a* y *b* se pudo ajustar a una ecuación cinética de primer orden. La velocidad de degradación fue mayor para la clorofila *a* que para la *b*. Se encontró que la constante de velocidad específica dependía de la temperatura y la actividad del agua desde un nivel igual a 0,3. En el caso de la clorofila *a*, la energía de activación también dependía de la actividad del agua.

Al realizar el modelado del zapecador y del secadero, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- 1) En el zapecador, la temperatura de la hoja aumentó rápidamente en la zona de contacto con la llama, en la primera parte del recorrido, hasta alcanzar unos 135 °C. Debido a la elevada temperatura se produjo una gran evaporación de agua (variando el contenido de humedad del 60 al 16% en base húmeda) que hizo que su temperatura disminuya lentamente en la segunda etapa. Esta elevada temperatura fue la causante de la gran pérdida de las clorofilas. En los palos las variaciones de temperatura y contenido de humedad fueron bajas. Sin embargo, el modelo planteado se pudo ajustar a los valores experimentales si

se consideraba que se transfería agua de los palos a las hojas y ésta se evaporaba en ellas.

- 2) En el secadero, al tenerse un lecho relativamente alto de ramas, se producía una diferencia muy importante de contenido de humedad y temperatura de las hojas y los palos en los diferentes niveles. Las hojas ubicadas en la parte inferior del lecho alcanzaban valores similares a la temperatura del aire de entrada (110°C), mientras que las localizadas en la parte superior alcanzaban valores cercanos a 70°C. Los palos tenían un aumento menor de temperatura debido a la pérdida mas grande de humedad y a la menor relación área superficial/peso. La existencia de un gradiente de temperatura en los sólidos produjo un gradiente apreciable de humedad en las hojas y los palos. A su vez, ello causó que las clorofilas se degradaran en forma diferente en los diferentes niveles del lecho.
- 3) Los programas del modelado obtenidos podrán se utilizados para simular el secado en diferentes condiciones de entrada del aire y el sólido y minimizar de esta forma las pérdidas de clorofilas

CAPÍTULO 13

REFERENCIAS

- Abud-Archila, M.; Courtois, F.; Bonazzi, C. y Bimbenet, J.J. 2000. A compartmental model of thin-layer drying kinetics of rough rice. *Drying Technology* 18, 1389-1414.
- Ahmed, J.; Shivhare, U.S. y Raghavan, G.S.V. 2000. Rheological characteristics and kinetics of colour degradation of green chilli puree. *Journal of Food Engineering* 44, 239-244.
- AOAC.1990. Official methods of analysis, Association of Official Analytical Chemists, Washington, D.C. USA., 62.
- Arlabosse, P.; Rodier, E.; Ferrase, J.H.; Chavez, S. Y Lecomte, D. 2003. Comparison between static and dynamic methods for sorption isotherm measurements. *Drying Technology* 21, 479-497.
- Argüello, B. del V.; Scipioni, P.G. y Martos, M.S. 2000. Determinación de la actividad de la peroxidasa en Yerba Mate (*Ilex paraguariensis*). *Información Tecnológica* 11, 59-63.
- Arnosti, S.; Freire, J.T. y Sartori, D.J.M. 2000. Analysis of shrinkage phenomenon in *Bachiararia brizantha* seeds. *Drying Technology* 18, 1339-1348.
- Astrada, I. 1925. Progreso de la Yerba Mate en la República Argentina. *Revista Farmaceutica* 67, N° 3, 12.
- Azzolini, M. y Maccari J., A. 2000. Erva-Mate e seu uso medicinal. Productos alternativos e desenvolvimento da tecnologia industrial na cadeia produtiva da Erva-Mate. Proyecto plataforma tecnológica da Erva-Mate do Paraná – Curitiba- Paraná - Brasil, 92-104.
- Barth, M.M., Kerbel, E.L., Perry, A.K. y Schmidt, S.J., 1993. Modified atmosphere packaging affects ascorbic acid, enzyme activity and market quality of Broccoli. *Journal of Food Science* 58, 140-143.
- Barth, M.M., Perry, A.K., Schmidt, S.J. y Kein, B.P. 1992. Misting affects market quality and enzyme activity of broccoli during retail storage. *Journal of Food Science* 47, 954-957.
- Basilico, C. y Moyne, C. 1986. Moisture transport analysis during high temperature convective drying of wood. *Drying of Solids*. Ed. Arum S. Mujundar, 317-327.
- Bertoni, M.H.; Vigo, M.S.; Gomez, R.G.; Prat Krikum, S.D.; Känzig, R.G. y Cataneo, P. 1991. Hojas frescas de *Ilex paraguariensis* St. Hil.-I-Composición química general en función del grado de desarrollo (joven, intermedia, maduro) y de la época de cosecha para tres clones. *Anales de la Asociación Química Argentina* 79, 269-276.
- Bertoni, M.H.; Vigo, M.S.; Gomez, R.G.; Prat Krikum, S.D.; Känzig, R.G. y Cataneo, P. 1992a. Hojas frescas de *Ilex paraguariensis* St. Hil.-II-Composición química general de harinas de extracción en función del grado de desarrollo (joven, intermedia, maduro) y de la época de cosecha para tres clones. *Anales de la Asociación Química Argentina* 80, 75-81.
- Bertoni, M.H.; Prat Krikum, S.D.; Känzig, R.G. y Cataneo, P. 1992b. Hojas frescas de *Ilex paraguariensis* St. Hil.-III-Influencia de las distintas etapas del proceso tradicional de elaboración de la Yerba Mate (zapecado, secado+canchado y estacionamiento) sobre la composición de la hoja fresca del Clon 44/75, cosecha 1988. *Anales de la Asociación Química Argentina* 80, 403-501.
- Bertoni, M.H.; Prat Krikum, S.D.; Känzig, R.G. y Cattaneo, P. 1993. Hojas frescas de especies de *Ilex* (Aquifoliaceae)-IV-Composición química general de hojas de *I. dumosa* e *I. brevicuspis* de “Yerba Mate” sobre algunos valores de composición. *Anales de la Asociación química Argentina* 81, 1-8.
- Burgardt, A.C. 2000. Desenvolvimento de bebidas com extrato Erva-Mate cancheada verde. Productos alternativos e desenvolvimento da tecnologia industrial na cadeia

- productivo da Erva-Mate. Proyecto plataforma tecnológica da Erva-Mate do Paraná – Curitiba- Paraná- Brasil, 69-76.
- Canjura, F.L., Schwartz, S.J. y Nunes, R.V. 1991. Degradation kinetics of chlorophylls and chlorophyllides, *Journal of Food Science* 56, 1639-1643.
 - Código Alimentario Argentino. 2000. Art. 1194-1198. Ediciones La Rocca. Buenos Aires, 348-349.
 - Coelho, G.C.; Araujo, M.J.E. y Schenkel, E.P. 2002. Population diversity on leaf morphology of Maté (*Ilex Paraguariensis* St.-Hil., Aquifoliaceae). *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 45, 47-51.
 - Colombo U.; Nuñez, R. y Lloret, M.A. 1979. Cambios cuantitativos sufridos por pigmentos en hojas de Yerba Mate sometida a tratamientos diversos. *Jornadas de Alimentación Latinoamericana* 13, 117-118.
 - Colombo, U. y Nuñez, R. 1980. Cafeína y pigmentos vegetales. Observaciones experimentales de importancia para los procesos de la Yerba Mate. *La Alimentación Latinoamericana* 122, 22-26.
 - Crotti, L.C.; Schmalko, M.E. y Surkan, S.A. 2002. Influencia de las características físicas de las ramas en el tiempo de residencia en secaderos rotatorios. IX Congreso Argentino de Ciencia y Tecnología de los Alimentos. Buenos Aires, 7-9 de Agosto de 2002.
 - Chau, K.V. y Gaffney, J.J. 1990. A finite-difference model for heat and mass transfer in products with internal heat generation and transpiration. *Journal of Food Science* 55, 484-487.
 - Chirife, J. e Iglesias, H.A. 1978. Equations for fitting water sorption isotherms of foods: Part 1. A Review. *Journal of Food Technology* 13, 159-174.
 - Chodat, R. y Senglet, A. 1928. Sobre el sapecado de la Yerba Mate y la presencia de fermentos en el *Ilex paraguariensis*. *Secance – Francia*, 55-58.
 - De Bernardi, L.A. y Prat Krikum, S.D. 2001. Cadena alimentaria de la Yerba Mate. Diagnóstico de la región yerbatera. En [www.sagpya.mecon.gov.ar /0-3/inFusion/diagnóstico/diagnost_YM.htm](http://www.sagpya.mecon.gov.ar/0-3/inFusion/diagnóstico/diagnost_YM.htm)
 - De la Cruz-García C., González-Castro M.J., Oruña-Concha M.J., López-Hernández, J., Simal-Lozano J.A. y Simal-Gándara, J. 1997. The effects of various culinary treatments on the pigment of green beans (*Phaseolus vulgaris*, L.). *Food Research International* 30, 787-791.
 - De Paula, M.L. y Chociai, J.G. 2000. Uso e aplicacao industrial da Erva-Mate em cosméticos. Productos alternativos e desenvolvimento da tecnologia industrial na cadeia productivo da Erva-Mate. Proyecto plataforma tecnológica da Erva-Mate do Paraná – Curitiba- Brasil, 77-91.
 - Dimitri, M.J. 1988. Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería. Tomo I: Descripción de plantas cultivadas. Editorial ACME S.A.C.I., 701.
 - El Territorio. 1996. El Productivo de fecha 01/02/96: Auge de bebidas a base de Yerba., Posadas, Argentina, 1.
 - Escalada, M.A.; Mayol, M. y Kolb, N. 1999. Degradación de la cipermetrina bajo la influencia de factores biológicos y de procesamiento. *Jornadas de Investigación Científica 1999 de la Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales – Universidad Nacional de Misiones*.
 - Escudero, A. y Yantorno, J. 1937. Variaciones del contenido de ácido ascórbico durante el proceso de elaboración de la Yerba Mate. *Boletín del Instituto Municipal de la Nutrición*, Buenos Aires, 404-410.
 - Francis, F.J. Pigments and other colorants. In *Food Chemistry*; third Edition; Fennema, O.R. Ed. Marcel Dekker, Inc.: New York 1996, 659.

- García, L.A.; Kobylański, J.R., y Pilosof, A.M.R. 2001. Modelling water sorption in Okara soy milk. *Drying Technology* 18, 2091-2103.
- Gely, M.C. y Giner, S. 2000. Water-Corn equilibrium: Temperature dependence of the GAB model parameters and calculation of the heat of sorption. *Drying Technology* 18, 1449-1464.
- Gnanasekharan, V., Shewfelt, R.L. y Chinan, M.S. 1992. Detection of color changes in green vegetables. *Journal of Food Science* 57, 149-154.
- Gomez Vara, M.E.; Brioux, J.A. y Avanza, J.R. 1979. Investigaciones sobre la tecnología de la Yerba Mate- Informe APRYMA, 1-226.
- Ghoshdastidar, P.S.; Bhargava, G. y Chanbra, R.P. 2002. Computer simulation of heat transfer during drying and preheating of wet iron ore in a rotary kiln. *Drying Technology* 20, 19-35.
- Greenspan, L. 1977. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. *Journal of Research of the National Bureau of Standards* 81, 89-96.
- Gulati, A. y Ravindranath, S.D. 1996. Seasonal variation in quality of Kangra tea (*Camelia sinensis* (L)) in Himachal Pradesh. *Journal of Science and Food Agriculture* 71, 231-236.
- Heaton W.H., Rickey Y.Y. y Marangoni A.G. 1996. Discoloration of coleslaw is caused by chlorophyll degradation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 44, 395-398.
- Hoeflich, V.A.; de Conto, A.J.; Bitencourt, S.M. y Woehl, J.H. 1997. O consumo de lenha na industrialização da Erva-Mate. *Anales del I Congreso Sul-Americano da Erva-Mate y II Reunião técnica do cone sul sobre a cultura da Erva-Mate, Curitiba, Brasil*, 405.
- Hoffman, J.D. 1992. *Numerical methods for engineering and scientists*. Mc. Graw Hill, New-York
- Inazu, T.; Iwasaki, K y Furuta, T. 2001. Desorptions isotherms for japanese Noodle (Udon). *Drying Technology* 19, 1375-1384.
- IRAM 20503. 1995. Instituto de Racionalización de Materiales. Yerba Mate: Determinación de la pérdida de masa a 103°C.
- IRAM 20515. 1999. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. Norma 20515: Yerba Mate Canchada: Vocabulario.
- IRAM 20540-1. 1997. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. Norma 20540-1: Yerba Mate: Materiales y procedimientos a utilizar en la determinación de los caracteres organolépticos de la yerba mate, bajo forma de mate.
- ISO 10727. 1995. International Organization for Standardization. Norma 10727: Tea and instant tea in solid form. Method using high-performance liquid chromatography.
- Jacobacci, A. 1938. Métodos químicos para diferenciar la Yerba Mate secada en fuego Directo o en hornos. *Industria y Química* 2, 100-107.
- Känzig, R.G.; Nuñez, J. C.; Reta, M.R., Novo, M.A. y Albani, O.A. 1979. Informe del proyecto de investigación tecnológica del procesamiento de la Yerba Mate 1979, 1-7.
- Känzig, R.G.; Albani, O.A. y Reta, M.R. 1980a. Cromatografía en capa delgada del extracto etéreo de la Yerba Mate. *Publicación de la Dirección General de Industria de la Provincia de Misiones*, 1-14.
- Känzig, R.G. 1982. Estacionamiento acelerado de la Yerba Mate. *Revista Caá-Yarí de la Cámara de Molineros de Yerba Mate de Misiones* 1, 4-5.
- Känzig, R.G.; Novo, M.A.; Nuñez, J.C.; Schmalko, M.E. y Reta, M.R. 1984a . Estacionamiento acelerado de la Yerba Mate. *IV Jornadas de Comunicaciones Científicas y Tecnológicas UnaM/84. Universidad Nacional de Misiones*, 33.

- Känzig, R.G.; Novo, M.A.; Nuñez, J.C.; Schmalko, M.E. y Reta, M.R. 1984b. Importancia de la temperatura y el estacionamiento post-zapecado en la elaboración de la Yerba Mate. IV Jornadas de Comunicaciones Científicas y Tecnológicas UnaM/84. Universidad Nacional de Misiones, 32.
- Känzig, R.G.; Novo, M.A. y Schmalko, M.E. 1985. Isotermas de adsorción de la Yerba Mate estacionada. Revista de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Misiones 1, 47-51.
- Känzig, R.G.; Novo, M.A. y Schmalko, M.E. 1987a. Comparación estadística de las isotermas de adsorción de la Yerba Mate. Revista de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Misiones 5, 13-24.
- Känzig, R.G.; Novo, M.A. y Schmalko, M.E. 1987b. Isotermas de desorción de Yerba Mate zapecada. Actas de las XIV Jornadas de Investigaciones en Ciencias de la Ingeniería Química y Química Aplicada, Santa Fe, Argentina, 403-408.
- Känzig, R.G.; Reta, M.R. y Albani, O.A. 1987c. Cromatografía en capa delgada de la Yerba Mate elaborada. Revista de la Secretaría General de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de Misiones 5, 3-7.
- Känzig, R.G. y Reta, M.R. 1987d. Determinación cualitativa de aminoácidos en Yerba Mate verde y estacionada. Revista de la Secretaría General de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de Misiones 5, 8-12.
- Känzig, R.G.; Valdez, E.C.; Paredes, A.M. y Schoch, M. 1995. Comportamiento de la glucosa y la sacarosa en el proceso de elaboración de la Yerba Mate. Erva-Mate: Biología e Cultura no Cone Sul. Editora da Universidade-Universidad Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre-Brazil, 406.
- Kemp, I.C. y Oakley, D.E. 1997. Simulation and scale-up of pneumatic conveying and cascading rotary dryers. Drying Technology 15, 1699-1710.
- Kemp, I.C. and Oakley, P.E. 2002. Modeling of particulate drying in theory and practice. Drying Technology 20, 1699-1750.
- Khankari, K.K., y Patankar, S.V. 1999. Performance analysis of double-deck conveyor dryer- A computational approach. Drying Technology 17, 2055-2067.
- Kim, S.S.; Kim, S.Y.; Kim, D.W.; Shin, S.G. y Chang, K.S. 1999. Moisture sorption characteristics of composite foods filled with chocolate. Journal of Food Science 64, 300-302.
- Kohan, T. y Fanti, O. D. 1970. Influencia de la temperatura en el estacionamiento de la Yerba Mate. Revista de Investigaciones Agropecuarias del INTA, Buenos Aires, Serie 2: Biología y Biología Vegetal 7, 321-334.
- Kotik, B.E.. 1994. 2° curso de capacitación en producción de Yerba Mate. Molinería de la Yerba Mate. INTA-Estación Agropecuaria Cerro Azul, 109-112.
- Kreith, F. and Bohn, M.S. 1993. Principles of Heat Transfer. Fifth edition. West Publishing Company
- Labuza, T.P., Kaanane, A. y Chen, J.Y. 1998. Effect of temperature on the moisture sorption isotherms and water activity shift of two dehydrated foods. Journal of Food Science 50, 385-391.
- Lajollo, F., Tannenbaun, S.R. y Labuza, T.P. 1971. Reaction at limited water concentration 2: Chlorophyll degradation. Journal of Food Science 36, 850-853.
- Lau, M.H.; Tang, J.; y Swanson, B.G. 2000. Kinetics of textural and color changes in green asparagus during thermal treatments. Journal of Food Engineering 45, 231-236.
- Liang, Y.; Lu, J.; Zhang, L.; Wu, S.; y Wu, Y. 2003. Estimation of black tea quality analysis of chemical composition and color difference of tea infusions. Food Chemistry 80, 283-290.

- López-Ayerra, B.; Murcia M.A. y García Carmona, F. 1998. Lipid peroxidation and chlorophyll levels in spinach during refrigerated storage and after industrial processing. *Food Chemistry* 61, 113-118.
- Lozano, J.E.; Rotstein, E. y Urbicaín, M.J. 1983. Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture contents. *Journal of Food Science* 48, 1497-1502.
- Maccari J., A. y Rodriguez Pinto J., A. 2000. Aplicacoes potenciais da Erva-Mate em produtos de higiene e no tratamento da residuos.. *Productos Alternativos e Desenvolvimento da Tecnologia Industrial na Cadeia Produtivo da Erva-Mate. Proyecto Plataforma Tecnológica da Erva-Mate do Paraná – Curitiba- Paraná- Brasil*, 122-135.
- Maharaj V. y Sankat C.K. 1996. Quality changes in dehydrated dashen leaves: effects of blanching pre-treatments and drying conditions. *Food Research International* 29, 563-568.
- Martínez-Navarrete, V. Y Chiralt, A. 1996. Influence of roasting on water sorption isotherms of Nuts. *Food Science and Technology International* 2, 399-404.
- Martins, R.C. y Silva, C.L.M. Modelling color and chlorophyll losses of frozen green beans (*Phaseolus vulgaris*, L.). *International Journal of Refrigeration* 25, 966-974.
- Matsumoto, S., Obara, T. y Luh, B.S. 1983. Changes in chemical constituents of Kiwifruit during post-harvest ripening. *Journal of Food Science* 48, 607-611.
- Mayol, R.M. 1997. La experiencia Argentina en sistemas de poda de Yerba Mate. I Congreso Sul-Americano da Erva-Mate. II Reunião Técnica do Cone Sul sobre a Cultura da Erva-Mate. *Anais. Curitiba, Brasil*, 337-349.
- Mongpraneet, S.; Abe, T. y Tsurusake, T. 2002. Accelerated drying of welsh onion by far infrared radiation under vacuum conditions. *Journal of Food Engineering* 55, 147-156.
- Mendive y Sanguinetti. 1937. Determinación del ácido ascórbico en Yerba Mate. IIIer Congreso Sudamericano de Química, 217.
- Morawicki, R.O., Schmalko, M.E. y Känzig, R.G. 1999. Chlorophyll stability in Yerba Mate leaves in controlled atmospheres. *Brazilian Archives of Biology and Technology* 42, 85-90.
- Mourad, M.; Hemati, M. y Laguerie, C. 1996. A new correlation for the estimation of moisture diffusivity of Corn kernels from drying kinetics. *Drying Technology* 14, 876-894.
- Mujundar, A.S. 1995. *Handbook of Industrial Drying*. 2nd Edition. Marcel Dekker, Inc. New York, 535.
- Mutinelli, A. 1937a. La Yerba Mate. Publicación de la Estación Experimental de Loreto (Misiones), 301-302.
- Mutinelli, A. 1937b. El estacionamiento y la conservación de la Yerba Mate. Publicación del Ministerio de Agricultura 12, 300-303.
- Navajas Artaza, A. 1995. La economía yerbatera Argentina. *Erva-Mate: Biología e Cultura no Cone Sul*, Editora da Universidade- Universidad Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – Brasil, 23-26.
- Negi, P.S. y Roy, S.K. 2000. Effect of blanching and drying methods on β -carotene, ascorbic acid and chlorophyll retention on leafy vegetables. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie* 33, 295-298.
- Negi, P.S. y Roy, S.K. 2001. Effect of drying conditions on quality of green leaves during long term storage. *Food Research International* 34, 283-287.
- Niesteruk, P. 1996. Changes of thermal properties of fruits and vegetables during drying. *Drying Technology* 14, 415-422.

- Núñez, J.C. 1980. Secado de la Yerba Mate por circulación transversal del aire. Tesis de Grado. Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales. Universidad Nacional de Misiones
- Núñez, J.C. y Känzig, R.G. 1995. Secanza de la Yerba Mate. Erva-Mate: Biología e Cultura no Cone Sul, Editora da Universidade- Universidad Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – Brasil, 175-180.
- Pan, Y.K.; Zhao, L.J.; Dong, Z.X.; Mujundar, A.S. y Kudra, T. 1999. Intermittent drying of Carrot in a vibrated fluid bed: Effect on product quality. *Drying Technology* 17, 2323-2340.
- Paredes, A.M.; Valdez, E.C. y Känzig, R.G. 1999. Comportamiento del almidón en el proceso de elaboración de la Yerba Mate. Jornadas de Investigación Científica 1999 de la Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales – Universidad Nacional de Misiones.
- Paredes, A.M.; Valdez, E.C. y Känzig, R.G. 2000a. Variación de los hidratos de carbono durante el zapecado. Anales del 2º Congreso Sul-Americano da Erva-Mate, Encantado 19 al 23/11/00, Brasil, 178-181.
- Paredes, A.M.; Valdez, E.C.; Núñez, J.C. y Känzig, R.G. 2000b. Variación de los hidratos de carbono durante el secado de la Yerba Mate. Anales del 2º Congreso Sul-Americano da Erva-Mate, Encantado 19 al 23/11/00, Brasil, 182-185.
- Perry, R.H. and Green, D.W. 1997. Perry's Chemical Engineers' Handbook. 7º Edition Mc Graw Hill.
- Pilosof, A.M. R., Boquet, R. y Bartholomai, G.B. 1985. Kinetics of water uptake by food powders. *Journal of Food Science* 50, 278.-283.
- Prat Krikum, S.D. 1994a. 2º Curso de Capacitación en Producción de Yerba Mate. Almácigos y Viveros. INTA-Estación Agropecuaria Cerro Azul, 7-10.
- Prat Krikum, S.D. 1994b. 2º Curso de Capacitación en Producción de Yerba Mate. Cultivo in Vitro. INTA-Estación Agropecuaria Cerro Azul, 11-13.
- Prat Krikum, S.D. 1994c. 2º Curso de Capacitación en Producción de Yerba Mate. La Plantación. INTA-Estación Agropecuaria Cerro Azul, 31-33.
- Prat Krikum, S.D. 1994d. 2º Curso de Capacitación en Producción de Yerba Mate. La Cosecha. INTA-Estación Agropecuaria Cerro Azul, 47-50.
- Prat Krikum, S.D. 1994e. 2º Curso de Capacitación en Producción de Yerba Mate. La Transformación Primaria. INTA-Estación Agropecuaria Cerro Azul, 99-107.
- Prat Krikum, S.D. y Berlingheri, R.D. 1995. Disposición, distanciamiento y densidad de plantación de Yerba Mate en las Provincias de Misiones y Corrientes, Argentina. Erva-Mate: Biología y Cultura no Cone Sul. Editorial da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, 56-72.
- Purdon, M.P. y McCamey, D.A. 1988. Use of a 5-caffeoylquinic acid/caffeine ratio to monitor the Coffee roasting process. *Journal of Food Science* 52, 1680-1683.
- Quintero-Ramos, A., Bourne, J.B. y Anzaldúa-Morales, A. 1998. Optimization of low temperature blanching of frozen Jalapeño Pepper (*Capsicum annuum*) using response surface methodology. *Journal of Food Science* 63, 519-522.
- Ramallo, L.A.; Morawicki, R.O. y Schmalko, M.E. 1996. Determinación del coeficiente de transferencia de calor usando el método de la superficie de respuesta. *Información Tecnológica* 7, 163-168.
- Ramallo, L.A.; Schmalko, M.E. y Känzig, R.G. 1998. Variación de la concentración de ácido ascórbico (Vitamina C) en el procesamiento de la Yerba Mate. *Revista de Ciencia y Tecnología* 1, 25-29.

- Ramallo, L.A.; Smorccewski, M.; Valdez, E.C.; Paredes, A.M. y Schmalko, M.E. 1998. Contenido nutricional del extracto acuoso de la Yerba Mate en tres formas diferentes de consumo. *La Alimentación Latinoamericana* 225, 48-52.
- Ramallo, L.A.; Pokolenko, J.J.; Balmaceda, G.Z. y Schmalko, M.E. 2001. Moisture diffusivity, shrinkage and apparent density variation during drying of leaves at high temperatures. *International Journal of Food Properties* 4, 163-170.
- Ramallo, L.A. y Schmalko, M.E. 2000. Conductividad térmica y capacidad calorífica específica en productos vegetales. Aplicación a las hojas de Yerba Mate. *Apuntes de Clase de Operaciones y Procesos en la Industria de los Alimentos*. Universidad nacional de Misiones.
- Rao, M.A., y Rizvi, S.S.H. 1995. *Engineering Properties of Foods*. 2nd. Edition. Marcel Dekker Inc. New York, 252.
- Ryan-Stoneham, T. y Tong, C.H. 2000. Degradation kinetics of chlorophyll in Peas as a function of pH. *Food Chemistry and Toxicology* 65, 1296-1302.
- Sabatella, P; Pokolenko, J.J. y Schmalko, M.E. 2003. Estudio de la velocidad de extracción de solubles en mezclas de Yerba Mate. *Jornadas de Investigación Científico-Tecnológicas de la Universidad Nacional de Misiones, Posadas*, 30 al 31/10/03. Libro de Resúmenes, 291.
- Sakai, N. y Hayakawa, K. 1992. Two dimensional simultaneous heat and moisture transfer in composite. *Journal of Food Science* 57, 475-480.
- Santalla, E.M. y Mascheroni, R.H. 2003. Equilibrium moisture characteristics of high sunflowers seeds and kernels. *Drying Technology* 21, 147-163.
- Schiffli, C.F. 1997. Industrialização da Erva-Mate no Brasil. *Anales del I Congreso Sul-Americano da Erva-Mate y II Reunião Técnica do Cone Sul sobre a Cultura da Erva-Mate*, Curitiba, Brasil, 89-97.
- Schmalko, M.E.; Reta, M.R. y Känzig, R.G. 1988. Contenido de humedad de equilibrio de la Yerba Mate: Influencia de diversas variables. *La Alimentación Latinoamericana* 171, 18-21.
- Schmalko, M.E.; Lloret, M.A. y Känzig, R.G. 1989. Clorofila en Yerba Mate. Degradación durante el estacionamiento acelerado. *XV Jornadas sobre Investigaciones en Ciencias de la Ingeniería Química y Química Aplicada*. Neuquén 14-17/11/89, 204.
- Schmalko, M.E.; Reta, M.R. y Benitez, G. 1989. Humedad de equilibrio de la Yerba Mate a altas temperaturas (60-90°C). *XV Jornadas sobre Investigaciones en Ciencias de la Ingeniería Química y Química Aplicada*. Neuquén 14-17/11/89, 205.
- Schmalko, M.E.; Ramallo, L.A. y Morawicki, R.O. 1996. A comparison of the diffusion model and the response surface method (RSM) in estimating the drying time of *Ilex paraguariensis*. *Latin American Applied Research* 26, 215-220.
- Schmalko, M.E.; Morawicki, R.O. y Ramallo, L.A. 1997. Simultaneous determination of specific heat capacity and thermal conductivity using the finite-difference method. *Journal of Food Engineering* 31, 531-540.
- Schmalko, M.E.; Ramallo, L.A. y Morawicki, R.O. 1998. An application of simultaneous heat and mass transfer in a cylinder using the finite-difference method. *Drying Technology* 16, 283-296.
- Schmalko, M.E.; Ramallo, L.A.; Ferreyra, D. y Berlingheri, R.D. 1999. Degradación del dimetoato en la planta y en el procesamiento de la Yerba Mate. *Jornadas de Investigación Científica 1999 de la Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales – Universidad Nacional de Misiones*
- Schmalko, M.E. y Alzamora, S.M. 2001. Color, chlorophyll, caffeine and water content variation during Yerba Maté processing. *Drying Technology* 19, 599-610.

- Schwartz, S.J. y von Elbe, J.H. 1983. Kinetics of chlorophyll degradation to pyropheophytin in vegetables. *Journal of Food Science* 48, 1303-1306.
- Schwartz, S.J. y Lorenzo, T.V. 1991. Chlorophyll stability during continuous aseptic processing and storage. *Journal of Food Science* 56, 1059-1062.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca de la República Argentina. 1995. Resolución 20/95. Boletín Oficial
- Shivhare, U.S.; Gupta, A.; Bawa, A.S. y Gupta, P. 2000. Drying characteristics and product quality of Okra. *Drying Technology* 18, 409-419.
- Singh, R.P. y Heldman, D.R. *Introducción a la Ingeniería de Alimentos*. 1997. Editorial Acribia S.A., 385-394.
- Spiller, G.A. 1998. *Caffeine*, Ed. C.R.C. Press, Boca Raton, New York, 142.
- Sokhansanj, S.; Bailey, W.G. y Van Daltsen, K.B. 1999. Drying of North American Ginseng roots (*Panax quinquefolius* L.). *Drying Technology* 17, 2293-2308.
- Statgraphics Plus (Versión 7 for DOS). 1993. *STATGRAPHICS User Manual* Manugistics, Inc. Rockville, Maryland. U.S.A.
- Steet, J.A. y Tong, C.H. 1996. Degradation kinetics of green color and chlorophylls in Peas by colorimetric and HPLC. *Journal of Food Science* 61, 924-927.
- Sturgeon, L. F. 1995. Conveyor dryers. In A.S. Mujundar *Handbook of Industrial Drying*. 2nd Edition . Marcel Dekker, Inc. New York, 535.
- Suarez, C.; Chirife, J. y Viollaz, P. 1982. Shape characterization for a simple diffusion analysis of air drying of grains. *Journal of Food Science* 47, 97-100.
- Teng, S.S. y Chen, B.H. 1999. Formation of pyrochlorophylls and their derivatives in spinach leaves during heating. *Food Chemistry* 65, 367-373.
- Tolaba, M.P. y Suarez, C. 1990. Desorption isotherms of shelled maize: whole, dehulled and hulls. *International Journal of Food Science and Technology* 25, 435-441.
- Tolaba, M.P.; Suarez, C. y Viollaz, P.E. 1990. The use of a diffusional model in determining the permeability of corn pericarp. *Journal of Food Engineering* 12, 56-66.
- Tolaba, M.P.; Suarez, C. Y Viollaz, P.E. 1997. Heats and entropies of sorptions of cereal grains: A comparison between integral and differential quantities. *Drying Technology* 15, 137-150.
- Treybal, R.E. 1980. *Operaciones de Transferencia de Masa*. 2da. Edición Mc. Graw Hill, 773-774.
- Uddin, M.S.; Hawlader, N.A. y Zhou, L. 2001. Kinetics of ascorbic acid degradation in dried Kiwifruits during storage. *Drying Technology* 19, 437-446.
- Van Loey, A.; Ooms, V.; Weemaes, C.; Van den Broeck, I.; Ludikhuyze, L.; Indrawat; D. S. y Hendrickx, M. 1998. Thermal and pressure-temperature degradation of chlorophyll in broccoli (*Brassica oleracea* L.) juice: A kinetic study. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 46, 5289-5294.
- Vega, R.E.; Alvarez, P.I. y Canales, E.R. 2000. Dimensionless correlation for the heat transfer coefficient in a batch-indirect rotary drier. *Drying Technology* 18, 2351-2367.
- Viollaz, P.E. y Rovedo, C.O. 1999. Equilibrium sorptions isotherms and thermodynamics properties of starch and gluten. *Journal of Food Engineering* 40, 287-292.
- Weemaes, C.A.; Ooms, V.; Van Loey, A.M. y Hendrickx, M.E. 1999. Kinetics of chlorophyll degradation and color loss in heated broccoli juice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 47, 2404-2409.
- Xander, C.G.; Acosta, L.M.; Scipioni, G.P. y Argüello, B. Del V. 2000. Inactivación térmica de peroxidasas en *Ilex paraguariensis* St. Hil. y *dumosa*. *Anales del 2º Congreso Sul-Americano da Erva-Mate*, Encantado 19 al 23/11/00, Brasil, 366-369.

- Zogzas, N.P.; Maroulis, Z.B. y Marino-Kouris, D. 1996. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. *Drying Technology* 10, 2225-2253.

ANEXO 1: Mediciones realizadas en la planta industrial de color, contenidos de clorofilas, cafeína y humedad

Las muestras fueron tomadas de la playa de acopio (hojas verdes) y a la salida de cada una de las etapas del procesamiento (zapecado, primera y segunda cintas de secado) de la planta industrial de la empresa OAS S.A., localizada en Apóstoles, Misiones. Se recolectaron aproximadamente 100 g de muestra y se colocaron en frascos de vidrio con tapa a rosca, para ser preservadas de la humedad que pudieran absorber del ambiente antes de las determinaciones, las que fueron realizadas dentro de las 48 horas posteriores a la recolección. Se realizaron 1 vez por semana, durante los meses de mayo y julio de 1999.-

A.1. Determinación del contenido de humedad, expresado en % base húmeda

A.1.1. Contenido de humedad en las hojas

Muestra	Contenido de humedad (% b.h.)			
	Entrada al Zapecador	Salida del Zapecador	Salida de la 1° cinta	Salida de la 2° cinta
1	58,34	17,48	5,61	2,87
2	57,32	20,82	15,59	7,71
3	61,78	16,80	9,60	3,05
4	59,53	12,86	3,75	2,41
5	62,54	17,91	12,37	4,18
6	61,25	16,52	8,66	3,15
7	60,20	17,12	7,33	2,99
8	59,01	16,49	6,63	2,78
9	59,70	17,44	6,89	2,44
10	60,02	13,88	4,76	4,02
Promedios	59,97	16,73	8,12	3,56
Desviación standard	1,50	2,06	3,43	1,49
Coef. de variación	2,50 %	12,31 %	42,2 %	41,85 %

A.1.2. Contenido de humedad en los palos de 2,5 mm de diámetro

Muestra	Contenido de humedad (% b.h.)			
	Entrada al Zapecador	Salida del Zapecador	Salida de la 1° cinta	Salida de la 2° cinta
1	67,07	57,65	23,13	10,12
2	66,79	57,22	19,89	10,79
3	63,84	57,26	17,26	6,20
4	68,82	54,85	32,91	12,73
5	62,74	56,70	29,26	16,72
6	63,80	57,10	11,19	6,61
7	66,06	48,02	20,06	9,30
8	65,35	56,52	27,67	18,93
9	65,59	47,66	23,17	12,51
10	63,66	50,06	13,94	6,98
Promedio	65,37	54,30	21,85	11,09
Desvío standard	1,89	4,06	6,82	4,26
Coef. de variación	2,89 %	7,48 %	31,21 %	38,51 %

A.1.3. Contenido de humedad en los palos de 5,0 mm de diámetro

Muestra	Contenido de humedad (% b.h.)			
	Entrada al Zapecador	Salida del Zapecador	Salida de la 1° cinta	Salida de la 2° cinta
1	65,46	57,65	33,89	30,11
2	64,92	54,07	27,84	22,85
3	60,02	58,68	24,57	8,23
4	63,01	57,84	34,19	33,66
5	63,00	55,94	50,25	32,40
6	64,02	56,07	26,65	9,84
7	63,31	57,98	30,21	15,36
8	62,06	57,83	39,42	33,99
9	63,06	55,85	33,92	20,65
10	64,00	53,88	32,48	27,12
Promedio	63,29	56,58	33,38	23,42
Desvío standard	1,53	1,68	7,35	9,68
Coef. de variación	2,42 %	2,97 %	22,02 %	41,33 %

A.1.4. Contenido de humedad en los palos de 7,5 mm de diámetro

Muestra	Contenido de humedad (% b.h.)			
	Entrada al Zapecador	Salida del Zapecador	Salida de la 1° cinta	Salida de la 2° cinta
1	59,14	57,07	35,33	20,00
2	57,13	51,97	40,40	36,63
3	62,26	56,69	35,56	16,90
4	60,06	55,85	39,84	30,93
5	57,43	56,58	40,75	34,12
6	59,13	56,96	38,92	17,65
7	60,21	56,25	37,02	22,26
8	59,45	50,77	41,23	37,36
9	59,70	53,47	47,65	26,23
10	59,98	54,01	43,11	35,62
Promedio	59,45	54,96	39,98	27,77
Desvío standard	1,45	2,26	3,68	8,14
Coef. de variación	2,44 %	4,11 %	9,20 %	29,31 %

A.2. Contenido de cafeína en las hojas (% b.s.)

Muestra	Contenido de cafeína (% b.s.)			
	Entrada al Zapecador	Salida del Zapecador	Salida de la 1º cinta	Salida de la 2º cinta
1	1,85	1,61	1,51	1,24
2	1,75	1,66	1,53	1,29
3	1,73	1,62	1,50	1,22
4	1,79	1,66	1,43	1,28
5	1,79	1,66	1,52	1,26
6	1,80	1,56	1,53	1,27
7	1,78	1,66	1,41	1,29
8	1,86	1,69	1,44	1,19
9	1,74	1,63	1,51	1,18
10	1,71	1,59	1,37	1,19
Promedio	1,78	1,63	1,48	1,24
Desvío standard	0,047	0,037	0,054	0,041
Coef. de variación	2,64 %	2,27 %	3,65 %	3,31 %

A.3. Mediciones de contenido de clorofilas y parámetros de color

A.3.1. Distribución del % en peso de los diferentes tipos de hojas clasificadas de acuerdo a su color y edad (1: jóvenes; 2: intermedias y 3: viejas)

N° Muestra	Color 1 (jóvenes)	Color 2 (intermedias)	Color 3 (viejas)
1	18,35	52,09	29,56
2	10,55	63,64	25,81
3	13,00	59,03	27,97
4	11,90	66,93	21,17
5	9,00	61,36	29,64
6	10,26	62,15	27,59
7	12,56	60,60	26,84
8	12,00	63,20	24,80
Promedio	12,20	61,13	26,67
Desviación standard	2,63	4,06	2,60
Coef. de Variación	21,56%	6,64%	9,75%



Color 1



Color 2



Color 3

A.3.2. Contenido de clorofilas y parámetros de color de las hojas verdes de yerba mate correspondientes al **Color 1**

Muestra	Contenido de clorofila (mg/g de materia seca)			Relación <i>a / b</i>	Color		
	Clorofila <i>a</i>	Clorofila <i>b</i>	Clorofila total (<i>a+b</i>)		L	-a	b
1	2,980	0,482	3,462	6,183	36,69	7,00	22,64
2	3,337	0,503	3,840	6,634	37,71	8,00	24,00
3	3,142	0,417	3,559	7,535	36,65	7,65	20,60
4	3,217	0,493	3,710	6,525	38,15	8,08	24,10
5	4,605	0,729	5,334	6,317	37,51	7,69	21,14
6	3,262	0,472	3,734	6,911	37,55	7,60	21,00
7	3,677	0,673	4,350	5,464	36,06	6,96	22,00
8	2,954	0,508	3,462	5,815	37,00	7,39	22,66
9	2,219	0,491	2,710	4,519	36,69	6,98	22,55
10	2,439	0,481	2,920	5,071	37,00	7,26	22,88
Promedio	3,183	0,525	3,708	6,097	37,10	7,46	22,36
Desvío standard	0,623	0,092	0,695	0,853	0,56	0,37	1,08
Coef. de variación	19,56 %	17,45 %	18,75 %	13,99 %	1,52 %	4,98 %	4,82 %

A.3.3. Contenido de clorofilas y parámetros de color de las hojas verdes de yerba mate correspondientes al **Color 2**

N° muestra	Contenido de clorofila (mg/g de materia seca)			Relación a/b	Color		
	Clorofila a	Clorofila b	Clorofila total ($a+b$)		L	-a	b
1	5,337	0,709	6,046	7,528	32,08	6,32	11,89
2	5,171	0,699	5,870	7,398	31,26	7,53	13,19
3	6,260	0,814	7,074	7,690	31,05	6,93	12,50
4	5,007	0,695	5,702	7,204	32,78	6,64	12,01
5	5,249	0,776	6,025	6,764	30,72	6,13	11,70
6	5,271	0,599	5,870	8,800	31,84	7,38	13,35
7	4,946	0,977	5,823	5,062	30,52	7,36	12,78
8	5,533	0,949	6,482	5,830	30,74	6,73	12,11
9	4,320	0,942	5,262	4,586	31,37	7,13	12,90
10	5,118	0,779	5,897	6,570	30,72	6,13	11,70
Promedio	5,221	0,794	6,015	6,743	31,31	6,83	12,41
Desviación standard	0,463	0,120	0,455	1,214	0,69	0,50	0,58
Coef. de variación	8,86 %	15,14 %	7,56 %	18,00 %	2,20 %	7,26%	4,70 %

A.3.4. Contenido de clorofilas y parámetros de color de las hojas verdes de yerba mate correspondientes al **Color 3**

Muestra	Contenido de clorofila (mg/g de materia seca)			Relación <i>a / b</i>	Color		
	Clorofila <i>a</i>	Clorofila <i>b</i>	Clorofila total (<i>a+b</i>)		L	-a	b
1	5,642	0,892	6,534	6,325	28,51	4,76	8,10
2	5,965	0,724	6,689	8,239	28,38	4,12	6,66
3	5,942	0,782	6,724	7,598	29,19	5,32	9,07
4	6,106	0,953	7,059	6,407	29,20	5,14	9,59
5	5,442	1,301	6,743	4,183	27,51	4,09	6,26
6	6,730	0,998	7,728	6,743	28,04	3,66	6,04
7	5,811	1,167	6,978	4,979	28,61	4,53	7,26
8	6,286	1,153	7,439	5,452	28,93	4,77	8,27
9	5,953	1,246	7,199	4,778	29,40	5,88	9,60
10	6,863	1,051	7,914	6,530	28,30	4,10	6,45
Promedio	6,074	1,027	7,101	6,124	28,61	4,64	7,73
Desviación standard	0,424	0,183	0,442	1,211	0,56	0,64	1,31
Coef. de variación	6,98 %	17,84 %	6,23 %	19,77 %	1,95 %	13,84 %	16,97 %

A.3.5. Contenido de clorofilas y parámetros de color de las hojas de yerba mate la salida del zapecador.

N° muestra	Contenido de clorofila (mg/g de materia seca)			Relación a/b	Color		
	Clorofila a	Clorofila b	Clorofila total ($a+b$)		L	-a	b
1	0,919	0,203	1,112	4,527	43,41	6,83	26,35
2	0,897	0,189	1,086	4,746	48,94	5,52	19,66
3	0,844	0,161	1,005	5,242	46,69	7,07	27,87
4	1,092	0,177	1,269	6,169	40,58	5,66	24,75
5	0,834	0,249	1,083	3,349	44,17	3,91	25,19
6	1,216	0,307	1,523	3,691	45,02	5,73	23,72
Promedio	0,967	0,214	1,181	4,666	44,80	5,79	24,59
Desviación standard	0,140	0,050	0,172	0,899	2,61	1,03	2,56
Coef. de variación	14,48 %	23,17 %	14,57 %	19,27 %	5,83 %	17,77 %	10,41 %

A.3.6. Contenido de clorofilas y parámetros de color de las hojas de yerba mate a la salida de la primera etapa de secado.

Muestra	Contenido de clorofila (mg/g de materia seca)			Relación a / b	Color		
	Clorofila <i>a</i>	Clorofila <i>b</i>	Clorofila total (<i>a+b</i>)		L	-a	b
1	0,742	0,181	0,923	4,099	47,36	5,37	22,21
2	0,833	0,146	0,979	5,705	45,08	5,99	25,97
3	0,839	0,153	0,992	5,484	42,91	5,93	26,23
4	0,775	0,188	0,963	4,122	45,15	6,18	28,82
5	0,712	0,159	0,871	4,478	50,86	5,16	21,59
6	0,741	0,163	0,900	4,660	49,56	5,19	19,76
Promedio	0,774	0,138	0,912	4,758	46,82	5,64	24,10
Desvío standard	0,048	0,016	0,044	0,066	2,75	0,41	3,14
Coef. de variación	6,17 %	11,81 %	4,64 %	13,15 %	5,86 %	7,26 %	13,02 %

A.3.7. Contenido de clorofilas y parámetros de color de las hojas de yerba mate a la salida de la segunda etapa de secado.

Muestra	Contenido de clorofila (mg/g de materia seca)			Relación a / b	Color		
	Clorofila <i>a</i>	Clorofila <i>b</i>	Clorofila total (<i>a+b</i>)		L	-a	b
1	0,501	0,090	0,591	5,567	44,23	5,43	25,01
2	0,458	0,099	0,557	4,626	49,59	4,16	17,39
3	0,427	0,107	0,534	3,991	47,36	5,32	22,86
4	0,384	0,092	0,476	4,174	49,42	4,96	22,55
5	0,364	0,100	0,464	3,640	45,33	4,82	22,60
6	0,331	0,085	0,416	3,894	48,41	3,99	21,26
Promedio	0,411	0,096	0,506	4,315	47,39	4,78	21,95
Desvío standard	0,058	0,007	0,060	0,635	2,01	0,54	2,32
Coef. de variación	14,02 %	7,62 %	11,79 %	14,72 %	4,24 %	11,32 %	10,56 %

ANEXO 2: Mediciones realizadas en la planta industrial para el balance de masa y calor

A.2.1. Determinación del flujo de gas a la salida del zapecador

Se tomaron las velocidades en ocho puntos diferentes 7 días diferentes. Las velocidades están expresadas m/minuto

Día	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6	Punto 7	Punto 8
1	299	180	329	253	163	231	248	249
2	296	332	400	244	80	220	172	48
3	312	190	372	286	108	200	220	212
4	285	240	304	310	90	241	353	180
5	350	215	210	198	115	154	303	360
6	400	322	434	334	57	14	200	240
7	367	350	405	315	80	60	187	284

Valor medio = 242,88 m/min

Área de salida = 1,31 m²

Q= Velocidad*area/60= 242,88 m/min *1,31 m² /60 s/min= 5,30m³/s

Volumen húmedo= 1,3316 m³/Kgas

Gs= 5,30 m³/s /1,3316 m³/Kgas *3600 s/h= 14328 Kg/h

A.2.2. Determinación de los flujos de gases en la entrada del primer secadero

Se tomaron tres mediciones correspondientes a la primera entrada (sobre un total de 12 entradas) y las otras tres correspondientes a la otra entrada de gas.

Día	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6
1	801	959	739	726	754	688
2	630	721	675	702	716	648
3	925	585	495	794	806	714
4	845	890	688	688	654	596
5	976	878	725	735	713	643
6	894	820	780	804	756	705
7	928	892	786	756	725	721

Primera entrada (Puntos 1,2 y 3)

Valor medio de la primera entrada = 792 m/min= 13,2 m/s

Area de entrada 12 tubos* π *(0,19m)²/4 = 0,340 m²

V_{3a} = Velocidad*area = 13,2 m/s*0,340 m² = 4,488 m³/s*3600s/h = 16157 m³/h

$$V_{3b} = 15842 \text{ m}^3/\text{h}$$

Segunda entrada (Puntos 4,5 y 6)

$$\text{Valor medio de la primera entrada} = 716,4 \text{ m}/\text{min} = 11,94 \text{ m}/\text{s}$$

$$\text{Area de entrada } 13 \text{ tubos} * \pi * (0.19\text{m})^2 / 4 = 0,3686 \text{ m}^2$$

$$V_{3b} = \text{Velocidad} * \text{area} = 11,94 \text{ m}/\text{s} * 0,3686 \text{ m}^2 = 4,401 \text{ m}^3/\text{s} * 3600 \text{ s}/\text{h} = 15842 \text{ m}^3/\text{h}$$

A.2.3. Entrada de gases en el segundo secadero

Se tomaron siete mediciones correspondientes a tres puntos de entrada (sobre un total de 21entradas).

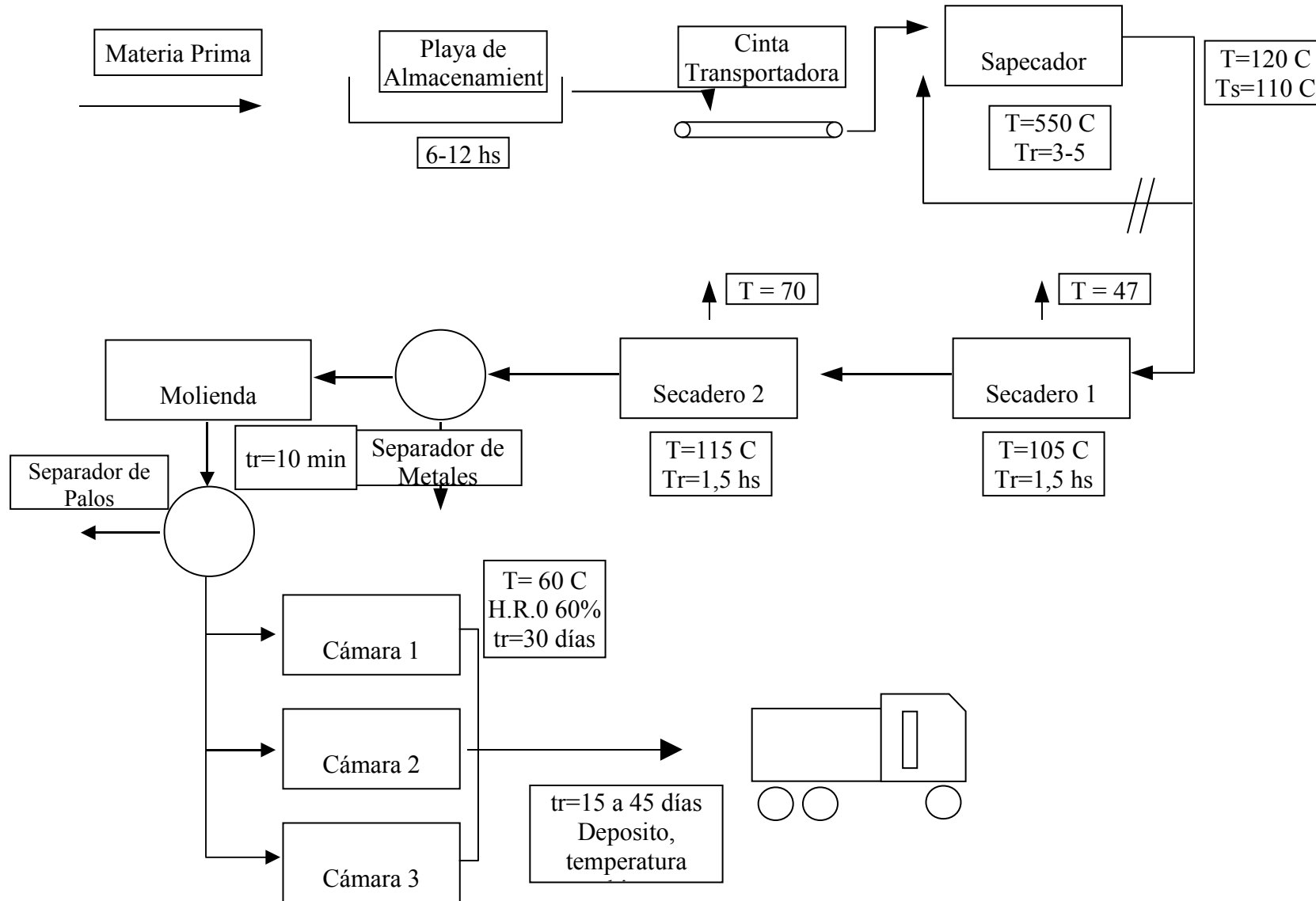
Día	Punto 1	Punto 2	Punto 3
1	200	165	300
2	224	176	330
3	196	196	360
4	210	162	225
5	197	168	300
6	240	193	212
7	197	182	216

$$\text{Valor medio} = 221,4 \text{ m}/\text{min} / 60\text{s}/\text{min} = 3,69 \text{ m}/\text{s}$$

$$\text{Area total} = 21 * 0,2 * 0,2 \text{ m}^2 = 0,84 \text{ m}^2$$

$$V_5 = \text{Velocidad} * \text{area} = 3,69 \text{ m}/\text{s} * 0,84 \text{ m}^2 * 3600\text{s}/\text{h} = 11158,6 \text{ m}^3/\text{h}$$

Figura A.2.1. Diagrama de flujo del secadero a estudiar



ANEXO 3: Contenido de humedad de equilibrio de los palos para diferentes actividades de agua; cálculo de las constantes de GAB y Halsey de las isothermas de sorción y equilibrio corteza-xilema

A.3.1. Valores individuales de contenido de humedad de equilibrio para la corteza y el xilema (% base seca)

Las determinaciones se realizaron por triplicado. Se utilizaron las siguientes soluciones salinas saturadas: LiCl, MgCl₂, CoCl₂, NaBr, NaNO₃, NaCl y KCl.

A.3.1.1. Temperatura: 30 °C

Actividad del Agua	Contenido de humedad Valores individuales	Valor medio	Desviación Standard
0,113	Corteza: 4,75 -4,80 -4,03	4,86	0,149
	Xilema: 4,69 -4,35 -4,61	4,55	0,178
0,324	Corteza: 7,31 -7,27 -6,95	7,29	0,028
	Xilema: 7,18 -7,34 -7,37	7,30	0,102
0,560	Corteza: 10,24 -10,05 -9,89	10,06	0,175
	Xilema: 11,17 -11,24 -11,31	11,24	0,070
0,614	Corteza: 10,92 -10,58 -10,64	10,71	0,181
	Xilema: 11,40 -11,79 -12,36	11,85	0,483
0,731	Corteza: 14,38 -15,97 -16,44	15,60	1,080
	Xilema: 17,24 -17,82 -16,98	17,35	0,430
0,751	Corteza: 18,52 -18,88 -19,29	18,90	0,385
	Xilema: 24,44 -23,95 -24,07	24,15	0,255
0,836	Corteza: 23,73 -25,91 -24,84	24,83	1,090
	Xilema: 34,16 -36,50 -37,89	36,18	1,885

A.3.1.2. Temperatura: 40 °C

Actividad del Agua	Contenido de humedad Valores individuales	Valor medio	Desviación Standard
0,112	Corteza: 3,02 -3,15 -3,22	3,13	0,101
	Xilema: 3,03 -2,62 -2,64	2,76	0,231
0,316	Corteza: 6,69 -6,88 -7,32	6,96	0,323
	Xilema: 8,12 -7,59 -8,03	7,91	0,284
0,532	Corteza: 9,54 -9,15 -9,59	9,43	0,241
	Xilema: 10,27 -10,43 -10,29	10,33	0,087
0,555	Corteza: 10,27 -9,48 -10,01	9,92	0,403
	Xilema: 10,85-10,03-11,13	10,67	0,572
0,710	Corteza: 13,70 -13,35 -12,85	13,30	0,427
	Xilema: 15,94 -16,81 -15,45	16,07	0,689
0,747	Corteza: 16,20 -16,92 -17,75	16,96	0,776
	Xilema: 23,52 -24,39 -23,67	23,86	0,465
0,823	Corteza: 22,43 -22,94 -23,91	23,09	0,752
	Xilema: 35,42 -39,95 -37,60	37,66	2,265

A.3.1.3. Temperatura: 50 °C

Actividad del Agua	Contenido de humedad Valores individuales	Valor medio	Desviación Standard
0,111	Corteza: 2,90 -2,56 -3,19	2,88	0,315
	Xilema: 3,08 -3,01 -2,78	2,96	0,157
0,305	Corteza: 6,87 -6,75 -6,32	6,65	0,289
	Xilema: 7,03 -7,40 -7,93	7,45	0,452
0,500	Corteza: 7,30 -6,97 -7,36	7,21	0,210
	Xilema: 8,99 -8,79 -8,72	8,83	0,140
0,509	Corteza: 8,98 -8,60 -9,02	8,67	0,232
	Xilema: 10,12 -9,82 -9,38	9,77	0,372
0,690	Corteza: 11,12 -11,64 -11,48	11,41	0,266
	Xilema: 13,83 -14,24 -13,17	13,75	0,539
0,744	Corteza: 17,25 -16,38 -17,34	16,99	0,530
	Xilema: 23,62 -23,46 -22,58	23,22	0,560
0,812	Corteza: 20,34 -23,02 -22,49	21,95	1,419
	Xilema: 30,74 -34,39 -32,94	32,69	1,838
	Xilema: 114,18 -113,13 -107,38	111,56	3,661

A.3.1.4. Temperatura: 60 °C

Actividad del Agua	Contenido de humedad Valores individuales	Valor medio	Desviación Standard
0,110	Corteza: 2,44 -2,56 -2,54	2,51	0,064
	Xilema: 2,42 -2,43 -2,56	2,47	0,078
0,293	Corteza: 6,04 -5,98 -6,02	6,01	0,031
	Xilema: 6,51 -7,03 -6,96	6,83	0,282
0,467	Corteza: 7,27 -6,84 -6,88	7,00	0,238
	Xilema: 8,63 -8,82 -8,57	8,67	0,131
0,497	Corteza: 7,93 -8,46 -8,80	8,40	0,438
	Xilema: 9,27 -9,62 -10,19	9,69	0,464
0,674	Corteza: 10,82 -10,95 -11,32	11,03	0,259
	Xilema: 13,78 -14,19 -13,34	13,77	0,425
0,745	Corteza: 16,25 -16,07 -16,33	16,82	0,133
	Xilema: 21,38 -21,57 -20,94	21,30	0,323
0,802	Corteza: 18,60 -17,78 -18,19	18,19	0,410
	Xilema: 28,15 -27,43 -27,86	27,81	0,362

A.3.1.5. Temperatura: 70 °C

Actividad del Agua	Contenido de humedad Valores individuales	Valor medio	Desviación Standard
0,108	Corteza: 2,13 -2,26 -2,22	2,20	0,067
	Xilema: 1,95 -1,79 -2,04	1,93	0,127
0,278	Corteza: 5,98 -6,03 -5,73	5,91	0,161
	Xilema: 6,15 -6,58 -6,95	6,56	0,400
0,470	Corteza: 6,22 -5,87 -6,08	6,06	0,176
	Xilema: 6,68 -5,97 -5,84	6,16	0,452
0,497	Corteza: 6,87 -6,92 -7,28	7,02	0,224
	Xilema: 7,64 -7,68 -8,24	7,85	0,335
0,660	Corteza: 10,30 -10,70 -10,34	10,45	0,220
	Xilema: 11,80 -12,42 -11,66	11,96	0,404
0,751	Corteza: 17,78 -16,11 -17,11	17,01	0,841
	Xilema: 17,64 -18,48 -17,84	17,99	0,439
0,795	Corteza: 18,38 -17,91 -16,24	17,51	1,125
	Xilema: 21,52 -22,39 -24,91	22,94	1,761

A.3.1.6. Temperatura: 80 °C

Actividad del Agua	Contenido de humedad Valores individuales	Valor medio	Desviación Standard
0,105	Corteza: 1,81 -1,66 -1,74	1,74	0,075
	Xilema: 1,81 -1,98 -1,68	1,82	0,150
0,260	Corteza: 4,98 -4,38 -4,76	4,71	0,304
	Xilema: 4,90 -5,23 -5,62	5,25	0,360
0,514	Corteza: 5,43 -5,29 -5,23	5,32	0,103
	Xilema: 5,83 -5,57 -5,64	5,68	0,135
0,652	Corteza: 6,22 -6,96 -7,03	6,74	0,449
	Xilema: 7,28 -7,52 -7,39	7,40	0,120
0,763	Corteza: 10,82 -12,22 -11,74	11,60	0,711
	Xilema: 10,64 -11,88 -11,74	11,42	0,679
0,789	Corteza: 12,32 -11,74 -12,63	12,23	0,452
	Xilema: 12,04 -12,38 -11,88	12,10	0,255

A.3.1.7. Temperatura: 90 °C

Actividad del Agua	Contenido de humedad Valores individuales	Valor medio	Desviación Standard
0,102	Corteza: 2,03 -2,06 -1,86	1,98	0,108
	Xilema: 2,25 -2,72 -2,10	2,36	0,323
0,241	Corteza: 3,44 -3,78 -3,28	3,50	0,255
	Xilema: 3,83 -4,08 -4,16	4,02	0,172
0,650	Corteza: 5,82 -6,01 -6,26	6,03	0,221
	Xilema: 6,23 -6,31 -6,04	6,19	0,139
0,785	Corteza: 10,71 -11,79 -10,92	11,14	0,572
	Xilema: 10,72 -10,87 -10,42	10,67	0,230

A.3.2. Constantes de los modelos de isotermas de sorción, errores promedios porcentuales (EPP) y coeficiente de correlación (r1)

Para valores de contenido de humedad expresados en base seca

A.3.2.1. Constantes de la ecuación de Halsey

Temperatura	30 °C		40 °C		50 °C		60 °C	
	Corteza	Xilema	Corteza	Xilema	Corteza	Xilema	Corteza	Xilema
a	0,0347	0,0631	0,0288	0,0655	0,0297	0,0578	0,0293	0,0591
r	1,22	1,01	1,30	1,02	1,25	1,06	1,23	1,03
EPP	8,94	11,68	6,67	12,39	10,17	12,01	10,32	9,90
r1	0,984	0,985	0,988	0,980	0,980	0,978	0,981	0,983

Temperatura	70 °C		80 °C		90 °C	
	Corteza	Xilema	Corteza	Xilema	Corteza	Xilema
a	0,0326	0,0502	0,0151	0,0135	0,0095	0,0053
r	1,22	1,06	1,31	1,37	1,43	1,66
EPP	11,65	13,82	16,13	16,24	11,23	11,10
r1	0,970	0,966	0,950	0,936	0,983	0,978

Errores promedios:

Corteza: 10,73 %

Xilema: 12,45 %

A.3.2.2. Constantes de la ecuación de GAB

Temperatura	30 °C		40 °C		50 °C		60 °C	
	Corteza	Xilema	Corteza	Xilema	Corteza	Xilema	Corteza	Xilema
Xm	0,0509	0,0548	0,0486	0,0523	0,0463	0,0510	0,0403	0,0458
K	0,954	0,990	0,959	1,00	0,972	1,02	0,989	1,05
C	20,15	14,56	16,84	12,52	11,81	10,91	10,68	9,29
EPP	11,11	11,14	6,23	14,11	9,69	11,72	8,65	9,79
r1	0,985	0,968	0,988	0,984	0,977	0,977	0,979	0,989

Temperatura	70 °C		80 °C		90 °C	
	Corteza	Xilema	Corteza	Xilema	Corteza	Xilema
Xm	0,411	0,0390	0,0275	0,0328	0,0212	0,0245
K	0,98	1,05	0,99	0,93	1,03	0,98
C	11,25	13,67	24,82	20,86	166,1	448,8
EPP	11,64	13,91	13,98	14,01	10,37	10,82
r1	0,965	0,983	0,961	0,956	0,985	0,972

Errores promedios:

Corteza: 9,93 %

Xilema: 12,05 %

A.3.3. Constantes de los modelos de relación de contenidos de humedad del xilema y la corteza, errores promedios porcentuales (EPP) y coeficiente de correlación (r1)

A.3.3.1. Constantes de la ecuación logarítmica

Temperatura, °C	A	B	EPP	r1
30	-0,191	1,131	8,25	0,996
40	-0,085	1,098	9,44	0,995
50	0,051	1,068	8,02	0,996
60	-0,120	1,146	3,51	0,999
70	-0,130	1,098	5,22	0,999
80	-0,045	1,062	6,98	0,998
90	0,049	1,028	10,61	0,994
Promedio			7,43	

A.3.3.2. Constantes de la Ecuación lineal

Temperatura, °C	A	B	EPP	r1
30	-0,0355	1,507	14,78	0,989
40	-0,0507	1,750	20,74	0,987
50	-0,0263	1,558	8,75	0,996
60	-0,0244	1,552	10,84	0,990
70	-0,0098	1,243	5,95	0,985
80	0,0056	0,952	5,81	0,997
90	0,0074	0,896	2,84	0,999
Promedio			9,96	

ANEXO 4: Datos de cinética de secado de los palos con y sin corteza

Experiencia 70.1

Palos sin corteza

Diámetro original: 2,5 mm – Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 1,7 mm – Desviación standard: 0,14

Nº palos: 50

Temperatura del aire: 70 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 1,47 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de humedad, %bs
0	321,67
10	77,34
20	15,27
30	7,88
40	4,12

Experiencia 70.2

Palos sin corteza

Diámetro original: 2,5 mm– Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 1,8 mm – Desviación standard: 0,16

Nº palos: 40

Temperatura del aire: 70 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 1,47 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	171,47
10	62,55
20	28,51
30	10,21
40	4,32

Experiencia 70.3

Palos con corteza

Diámetro: 2,5 mm – Longitud: 5 cm

Nº palos: 37

Temperatura del aire: 70 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 2,30 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	148,90	90	65,48	180	20,74
10	132,31	100	59,78	190	17,17
20	120,05	110	54,42	200	13,74
30	112,21	120	48,46	210	10,90
40	103,51	130	42,86	220	8,94
50	94,14	140	37,92	230	6,87
60	86,12	150	33,18		
70	79,20	160	28,60		
80	72,04	170	24,28		

Experiencia 70.4

Palos con corteza

Diámetro: 2,5 mm – Longitud: 5 cm

Nº palos: 40

Temperatura del aire: 70 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 2,30 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	169,57	90	61,39	180	18,65
10	146,47	100	54,98	190	16,34
20	132,76	110	48,44	200	14,24
30	121,11	120	41,76	210	12,35
40	105,84	130	36,99	220	11,76
50	87,71	140	32,35	230	10,40
60	82,46	150	27,83	240	9,19
70	76,05	160	24,37	250	8,14
80	65,21	170	21,09	260	7,21

Experiencia 70.5

Palos sin corteza

Diámetro original: 5,0 mm– Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 3,9 mm – Desviación standard: 0,26

N° palos: 20

Temperatura del aire: 70 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 1,47 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	104,10	70	15,24
10	64,39	80	10,26
20	49,77	90	8,60
30	39,19	100	6,24
40	31,32		
50	27,80		
60	20,07		

Experiencia 70.6

Palos sin corteza

Diámetro original: 5,0 mm– Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 4,0 mm – Desviación standard: 0,41

N° palos: 20

Temperatura del aire: 70 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 1,47 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	178,04	70	12,82
10	93,70	80	8,04
20	65,65	90	6,74
30	49,78		
40	38,04		
50	27,39		
60	17,17		

Experiencia 70.7

Palos con corteza

Diámetro: 5,0 mm – Longitud: 5 cm

Nº palos: 20

Temperatura del aire: 70 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 2,30 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	141,97	120	59,08	240	28,39	360	13,84
10	128,11	130	55,74	250	27,06	370	13,09
20	117,69	140	51,34	260	25,27	380	12,39
30	110,90	150	48,57	270	23,65	390	11,73
40	103,54	160	45,03	280	22,18	400	11,12
50	96,94	170	42,42	290	20,65	410	10,54
60	90,25	180	39,64	300	19,61	420	10,00
70	84,51	190	36,71	310	18,48	430	9,51
80	78,39	200	35,18	320	17,43	440	9,04
90	72,94	210	33,65	330	16,44		
100	68,45	220	31,48	340	15,52		
110	63,19	230	29,73	350	19,65		

Experiencia 70.8

Palos con corteza

Diámetro: 5,0 mm – Longitud: 5 cm

Nº palos: 15

Temperatura del aire: 70 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 2,30 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	133,21	120	54,83	240	19,27	360	9,23
10	122,79	130	51,40	250	18,87	370	8,68
20	114,26	140	47,61	260	18,14		
30	105,87	150	43,46	270	16,88		
40	98,55	160	40,03	280	15,72		
50	91,79	170	36,96	290	14,66		
60	86,24	180	34,25	300	13,67		
70	80,55	190	30,46	310	12,77		
80	75,09	200	26,22	320	11,94		
90	69,85	210	22,74	330	11,17		
100	64,89	220	21,25	340	10,47		
110	59,88	230	20,76	350	9,82		

Experiencia 70.9

Palos sin corteza

Diámetro original: 7,5 mm– Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 6,0 mm – Desviación standard: 0,45

N° palos: 10

Temperatura del aire: 70 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 1,47 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	163,42	70	25,70
10	99,46	80	20,84
20	72,61	90	16,40
30	58,56	100	13,27
40	48,29	110	10,03
50	38,74	120	6,67
60	30,99		

Experiencia 70.10

Palos sin corteza

Diámetro original: 7,5 mm– Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 6,2 mm – Desviación standard: 0,35

N° palos: 10

Temperatura del aire: 70 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 1,47 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	115,15	80	15,98
10	73,55	90	13,96
20	57,44	100	12,21
30	46,14	110	10,74
40	37,47	120	8,81
50	30,72	130	7,18
60	23,83	140	5,68
70	19,83		

Experiencia 70.11

Palos con corteza

Diámetro: 7,5 mm – Longitud: 5 cm

Nº palos: 10

Temperatura del aire: 70 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 2,30 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	123,09	120	63,06	240	35,70	360	17,70
10	113,48	130	60,53	250	33,96	370	16,54
20	107,51	140	58,00	260	32,22	380	15,38
30	101,04	150	55,43	270	30,27	390	14,30
40	94,32	160	52,86	280	28,32	400	13,23
50	87,36	170	50,50	290	26,87	410	12,22
60	83,60	180	48,14	300	25,42	420	11,20
70	79,90	190	45,82	310	23,92	430	10,90
80	76,25	200	43,49	320	22,43	440	10,83
90	72,85	210	41,88	330	21,10	450	10,10
100	69,45	220	40,26	340	19,78	460	9,40
110	66,20	230	37,98	350	18,74	470	8,73

Experiencia 70.12

Palos con corteza

Diámetro: 7,5 mm – Longitud: 5 cm

Nº palos: 9

Temperatura del aire: 70 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 2,30 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	130,61	120	60,36	240	29,41	360	12,14
10	119,06	130	57,39	250	27,39	370	11,34
20	110,82	140	53,73	260	25,64	380	10,31
30	104,64	150	49,38	270	24,15	390	9,05
40	96,48	160	47,77	280	22,66	400	7,79
50	89,84	170	45,67	290	22,02	410	6,78
60	84,73	180	43,08	300	19,23	420	
70	81,07	190	40,72	310	17,44	430	
80	77,26	200	38,36	320	16,01	440	
90	73,29	210	35,99	330	14,94	450	
100	69,02	220	33,62	340	13,87	460	
110	64,71	230	31,43	350	12,94	470	

Experiencia 80.1

Palos sin corteza

Diámetro original: 2,5 mm– Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 2,0 mm – Desviación standard: 0,23

N° palos: 30

Temperatura del aire: 80 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,94 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	166,06
10	54,59
20	17,43
30	8,31
40	4,19

Experiencia 80.2

Palos sin corteza

Diámetro original: 2,5 mm– Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 1,7 mm – Desviación standard: 0,24

N° palos: 48

Temperatura del aire: 80 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,94 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	313,24
10	62,10
20	12,33
30	5,02

Experiencia 80.3

Palos con corteza

Diámetro: 2,5 mm – Longitud: 5 cm

Nº palos: 20

Temperatura del aire: 80 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 1,43 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	216,89	90	20,44
10	155,26	100	17,82
20	127,36	110	14,34
30	102,01	120	11,62
40	79,10	130	8,09
50	62,05		
60	48,87		
70	37,63		
80	27,94		

Experiencia 80.4

Palos con corteza

Diámetro: 2,5 mm – Longitud: 5 cm

Nº palos: 32

Temperatura del aire: 80 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 1,43 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	172,49	90	23,49
10	131,40	100	18,61
20	110,86	110	14,68
30	95,75	120	11,69
40	78,51	130	9,17
50	61,04		
60	46,64		
70	37,82		
80	30,10		

Experiencia 80.5

Palos sin corteza

Diámetro original: 5,0 mm– Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 4,0 mm – Desviación standard: 0,36

Nº palos: 20

Temperatura del aire: 80 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,94 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	127,55	70	9,69
10	72,29	80	7,31
20	50,34	90	5,27
30	37,24		
40	26,28		
50	18,96		
60	13,69		

Experiencia 80.6

Palos sin corteza

Diámetro original: 5,0 mm– Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 4,0 mm – Desviación standard: 0,25

Nº palos: 20

Temperatura del aire: 80 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,94 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	190,73	70	7,06
10	93,38	80	4,42
20	59,16		
30	39,29		
40	26,49		
50	16,56		
60	9,93		

Experiencia 80.7

Palos con corteza

Diámetro: 5,0 mm – Longitud: 5 cm

Nº palos: 20

Temperatura del aire: 80 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 1,43 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	153,61	80	60,12	160	22,25
10	135,55	90	53,47	170	19,22
20	120,52	100	47,54	180	16,76
30	108,09	110	41,91	190	14,45
40	97,54	120	36,27	200	11,71
50	88,73	130	32,08	210	9,63
60	78,32	140	28,18		
70	67,77	150	24,57		

Experiencia 80.8

Palos con corteza

Diámetro: 5,0 mm – Longitud: 5 cm

Nº palos: 20

Temperatura del aire: 80 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 1,43 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	151,60	80	60,38	160	20,32
10	133,93	90	53,34	170	17,32
20	117,20	100	46,86	180	15,50
30	107,59	110	40,93	190	13,68
40	97,15	120	36,06	200	11,86
50	86,71	130	31,20	210	10,56
60	77,54	140	26,33	220	9,26
70	68,76	150	23,33		

Experiencia 80.9

Palos sin corteza

Diámetro original: 7,5 mm– Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 6,4 mm – Desviación standard: 0,30

Nº palos: 8

Temperatura del aire: 80 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,94 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	131,43	80	19,23
10	77,86	90	16,13
20	58,93	100	13,39
30	47,32	110	10,89
40	39,82	120	9,11
50	32,91	130	8,04
60	27,20	140	6,73
70	22,68	150	5,53

Experiencia 80.10

Palos sin corteza

Diámetro original: 7,5 mm– Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 6,2 mm – Desviación standard: 0,19

Nº palos: 9

Temperatura del aire: 80 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,94 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	162,07	80	18,39
10	92,34	90	14,75
20	67,43	100	11,30
30	51,92	110	10,03
40	41,95	120	8,30
50	34,29	130	6,13
60	27,59	140	5,41
70	22,22		

Experiencia 80.11

Palos con corteza

Diámetro: 7,5 mm – Longitud: 5 cm

Nº palos: 6

Temperatura del aire: 80 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 1,43 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	146,88	80	58,83	160	23,81	240	12,26
10	128,57	90	52,28	170	21,82	250	12,01
20	115,33	100	46,73	180	19,54	260	11,28
30	103,27	110	41,17	190	16,96	270	10,01
40	92,11	120	36,61	200	15,87	280	9,04
50	82,69	130	33,04	210	14,81	290	7,50
60	74,11	140	29,76	220	13,76		
70	66,37	150	26,68	230	12,99		

Experiencia 80.12

Palos con corteza

Diámetro: 7,5 mm – Longitud: 5 cm

Nº palos: 9

Temperatura del aire: 80 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 1,43 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	140,28	80	65,89	160	28,48	240	12,08
10	123,38	90	59,66	170	24,65	250	10,57
20	112,01	100	53,99	180	22,56	260	9,46
30	102,94	110	48,88	190	20,47		
40	93,95	120	44,21	200	18,38		
50	85,02	130	39,96	210	16,72		
60	78,07	140	36,13	220	15,05		
70	71,70	150	32,30	230	13,39		

Experiencia 90.1

Palos sin corteza

Diámetro original: 2,5 mm– Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 1,7 mm – Desviación standard: 0,23

N° palos: 30

Temperatura del aire: 90 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,90 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	230,99
10	46,48
20	10,56

Experiencia 90.2

Palos sin corteza

Diámetro original: 2,5 mm– Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 1,8 mm – Desviación standard: 0,15

N° palos: 40

Temperatura del aire: 90 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,90 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	180,62
10	44,49
20	11,45
30	4,96

Experiencia 90.3

Palos con corteza

Diámetro: 2,5 mm – Longitud: 5 cm

Nº palos: 20

Temperatura del aire: 90 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 1,30 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	335,67	80	9,41
10	247,85	90	4,69
20	172,21		
30	110,03		
40	65,15		
50	37,54		
60	27,34		
70	16,56		

Experiencia 90.4

Palos con corteza

Diámetro: 2,5 mm – Longitud: 5 cm

Nº palos: 20

Temperatura del aire: 90 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 1,30 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	176,58	80	12,23
10	123,88	90	8,46
20	86,35	100	6,17
30	60,00		
40	40,23		
50	27,04		
60	20,70		
70	16,94		

Experiencia 90.5

Palos sin corteza

Diámetro original: 5,0 mm– Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 3,9 mm – Desviación standard: 0,06

N° palos: 20

Temperatura del aire: 90 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,90 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	171,19	70	6,89
10	80,17	80	5,01
20	50,73		
30	33,40		
40	22,76		
50	15,03		
60	10,44		

Experiencia 90.6

Palos sin corteza

Diámetro original: 5,0 mm– Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 3,7 mm – Desviación standard: 0,29

N° palos: 20

Temperatura del aire: 90 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,90 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	143,08	60	6,72
10	63,64	70	4,15
20	39,33		
30	24,31		
40	17,79		
50	9,49		

Experiencia 90.7

Palos con corteza

Diámetro: 5,0 mm – Longitud: 5 cm

Nº palos: 20

Temperatura del aire: 90 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 1,30 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	198,12	90	45,70
10	167,92	100	38,03
20	146,17	110	30,99
30	124,41	120	25,67
40	108,61	130	21,44
50	89,51	140	18,62
60	73,24	150	15,34
70	64,95	160	12,83
80	52,58	170	9,29

Experiencia 90.8

Palos con corteza

Diámetro: 5,0 mm – Longitud: 5 cm

Nº palos: 20

Temperatura del aire: 90 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 1,30 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	168,06	90	38,56
10	140,19	100	31,13
20	117,77	110	24,97
30	99,19	120	20,09
40	86,88	130	16,84
50	73,98	140	13,78
60	63,41	150	10,92
70	56,76	160	9,06
80	48,47		

Experiencia 90.9

Palos sin corteza

Diámetro original: 7,5 mm– Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 5,9 mm – Desviación standard: 0,27

Nº palos: 10

Temperatura del aire: 90 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,90 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	161,12	80	13,38
10	83,18	90	10,25
20	59,31	100	7,84
30	46,84	110	6,15
40	34,90	120	4,82
50	26,76		
60	21,34		
70	16,88		

Experiencia 90.10

Palos sin corteza

Diámetro original: 7,5 mm– Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 6,1 mm – Desviación standard: 0,62

Nº palos: 10

Temperatura del aire: 90 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,90 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	135,22	80	9,87
10	77,57	90	8,64
20	53,30	100	7,09
30	39,86		
40	31,51		
50	22,86		
60	16,98		
70	12,66		

Experiencia 90.11

Palos con corteza

Diámetro: 7,5 mm – Longitud: 5 cm

Nº palos: 10

Temperatura del aire: 90 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 1,30 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	212,00	90	57,38	180	16,05
10	171,91	100	49,83	190	13,90
20	152,72	110	43,32	200	12,50
30	134,65	120	37,79	210	10,77
40	116,96	130	32,96	220	9,03
50	100,25	140	28,84		
60	88,04	150	24,79		
70	76,61	160	21,49		
80	65,97	170	18,94		

Experiencia 90.12

Palos con corteza

Diámetro: 7,5 mm – Longitud: 5 cm

Nº palos: 9

Temperatura del aire: 90 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 1,30 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	232,99	90	70,90	180	17,77
10	200,85	100	65,26	190	14,61
20	179,36	110	58,10	200	11,96
30	158,71	120	49,41	210	9,81
40	138,75	130	40,95	220	8,24
50	119,12	140	34,24		
60	103,72	150	29,27		
70	92,21	160	25,44		
80	81,27	170	21,60		

Experiencia 100.1

Palos sin corteza

Diámetro original: 2,5 mm– Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 1,9 mm – Desviación standard: 0,32

N° palos: 30

Temperatura del aire: 100 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	290,06
10	54,04
20	16,15
30	7,84

Experiencia 100.2

Palos sin corteza

Diámetro original: 2,5 mm– Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 1,9 mm – Desviación standard: 0,16

N° palos: 45

Temperatura del aire: 100 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	178,81
10	47,22
20	9,92
30	4,07

Experiencia 100.3

Palos con corteza

Diámetro: 2,5 mm – Longitud: 5 cm

N° palos: 20

Temperatura del aire: 100 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	312,79
10	202,34
20	130,99
30	78,95
40	38,60
50	16,95
60	8,85

Experiencia 100.4

Palos con corteza

Diámetro: 2,5 mm – Longitud: 5 cm

N° palos: 30

Temperatura del aire: 100 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	210,38
10	133,65
20	93,08
30	59,59
40	33,96
50	18,55
60	10,14
70	5,90

Experiencia 100.5

Palos sin corteza

Diámetro original: 5,0 mm– Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 4,1 mm – Desviación standard: 0,46

N° palos: 20

Temperatura del aire: 100 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	167,89
10	72,73
20	43,52
30	24,76
40	12,77
50	8,51

Experiencia 100.6

Palos sin corteza

Diámetro original: 5,0 mm– Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 3,5 mm – Desviación standard: 0,26

N° palos: 20

Temperatura del aire: 100 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	222,41
10	101,68
20	54,90
30	24,5
40	11,8
50	4,8

Experiencia 100.7

Palos con corteza

Diámetro: 5, mm – Longitud: 5 cm

Nº palos: 15

Temperatura del aire: 100 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,0 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	204,5	90	23,20
10	172,3	100	16,74
20	147,77	110	10,38
30	116,85	120	6,02
40	88,69		
50	66,23		
60	48,69		
70	39,12		
80	29,77		

Experiencia 100.8

Palos con corteza

Diámetro: 5,0 mm – Longitud: 5 cm

Nº palos: 15

Temperatura del aire: 100 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	202,21	90	28,21
10	162,03	100	19,67
20	145,66	110	16,25
30	121,94	120	9,80
40	96,90	130	7,33
50	82,48		
60	60,09		
70	49,46		
80	38,26		

Experiencia 100.9

Palos sin corteza

Diámetro original: 7,5 mm– Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 6,0 mm – Desviación standard: 0,51

Nº palos: 10

Temperatura del aire: 100 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	175,08	80	7,23
10	92,60	90	5,14
20	60,45		
30	45,18		
40	31,83		
50	25,40		
60	17,85		
70	12,70		

Experiencia 100.10

Palos sin corteza

Diámetro original: 7,5 mm– Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 5,9 mm – Desviación standard: 0,16

Nº palos: 10

Temperatura del aire: 100 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	158,17	80	5,89
10	84,62		
20	55,53		
30	36,54		
40	25,12		
50	17,43		
60	12,62		
70	8,17		

Experiencia 100.11

Palos con corteza

Diámetro: 7,5 mm – Longitud: 5 cm

Nº palos: 10

Temperatura del aire: 100 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	199,19	90	32,22
10	165,36	100	26,57
20	138,32	110	20,94
30	118,76	120	18,18
40	96,09	130	15,54
50	80,32	140	12,24
60	66,17	150	9,44
70	54,43		
80	42,46		

Experiencia 100.12

Palos con corteza

Diámetro: 7,5 mm – Longitud: 5 cm

Nº palos: 10

Temperatura del aire: 100 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	156,93	90	25,61
10	129,74	100	22,01
20	109,52	110	18,31
30	92,80	120	14,50
40	76,72	130	11,39
50	62,33	140	8,85
60	50,79		
70	40,70		
80	32,31		

Experiencia 110.1

Palos sin corteza

Diámetro original: 2,5 mm– Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 1,8 mm – Desviación standard: 0,27

N° palos: 50

Temperatura del aire: 110 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	269,43
5	85,49
10	30,27
15	8,92

Experiencia 110.2

Palos sin corteza

Diámetro original: 2,5 mm– Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 1,8 mm – Desviación standard: 0,24

N° palos: 40

Temperatura del aire: 110 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	197,54
5	69,92
10	27,06
15	8,84

Experiencia 110.3

Palos con corteza

Diámetro: 2,5 mm – Longitud: 5 cm

N° palos: 30

Temperatura del aire: 110 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	327,26	25	49,57
5	256,41	30	34,19
10	187,61	35	8,97
15	127,35		
20	79,06		

Experiencia 110.4

Palos con corteza

Diámetro: 2,5 mm – Longitud: 5 cm

N° palos: 30

Temperatura del aire: 110 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	166,64	25	37,18
5	120,82	30	19,06
10	91,55	35	9,04
15	75,33		
20	56,90		

Experiencia 110.5

Palos sin corteza

Diámetro original: 5,0 mm– Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 3,9 mm – Desviación standard: 0,39

Nº palos: 15

Temperatura del aire: 110 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	197,68
5	117,00
10	81,43
15	50,52
20	35,95
25	27,35
30	18,75
35	12,70
40	8,25

Experiencia 110.6

Palos sin corteza

Diámetro original: 5,0 mm– Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 3,8 mm – Desviación standard: 0,32

Nº palos: 23

Temperatura del aire: 110 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	153,25
5	95,04
10	68,02
15	46,72
20	34,09
25	23,64
30	14,96
35	9,87
40	5,10

Experiencia 110.7

Palos con corteza

Diámetro: 5, mm – Longitud: 5 cm

N° palos: 15

Temperatura del aire: 110 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,0 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	199,38	45	45,31
5	181,24	50	35,93
10	157,87	55	29,04
15	136,72	60	21,62
20	116,64	65	16,54
25	97,93	70	11,45
30	81,40	75	9,98
35	67,73	80	8,50
40	56,60		

Experiencia 110.8

Palos con corteza

Diámetro: 5,0 mm – Longitud: 5 cm

N° palos: 15

Temperatura del aire: 110 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	162,45	45	36,42
5	138,42	50	29,66
10	121,03	55	24,16
15	102,13	60	20,15
20	88,24	65	16,27
25	74,99	70	12,39
30	63,08	75	10,45
35	52,07	80	8,51
40	42,80	85	6,89

Experiencia 110.9

Palos sin corteza

Diámetro original: 7,5 mm– Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 5,8 mm – Desviación standard: 0,25

N° palos: 19

Temperatura del aire: 110 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	162,99	40	19,05
5	112,87	45	16,05
10	81,22	50	13,05
15	60,43	55	10,73
20	47,13	60	7,41
25	38,61		
30	30,09		
35	24,57		

Experiencia 110.10

Palos sin corteza

Diámetro original: 7,5 mm– Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 6,1 mm – Desviación standard: 0,40

N° palos: 10

Temperatura del aire: 110 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	139,21	40	19,28
5	93,30	45	15,28
10	75,82	50	11,27
15	57,82	55	9,40
20	46,57	60	7,52
25	37,82	65	5,64
30	29,06		
35	24,18		

Experiencia 110.11

Palos con corteza

Diámetro: 7,5 mm – Longitud: 5 cm

Nº palos: 15

Temperatura del aire: 110 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	201,22	60	44,58
5	183,85	65	39,44
10	160,07	70	34,29
15	142,04	75	30,02
20	126,88	80	26,76
25	112,17	85	23,66
30	97,23	90	20,55
35	85,45	95	17,01
40	73,67	100	14,71
45	65,32	105	10,54
50	56,97	110	8,61
55	50,78		

Experiencia 110.12

Palos con corteza

Diámetro: 7,5 mm – Longitud: 5 cm

Nº palos: 10

Temperatura del aire: 110 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	153,17	60	34,34
5	137,15	65	31,01
10	124,14	70	27,68
15	108,84	75	24,15
20	97,81	80	20,60
25	86,94	85	18,00
30	76,07	90	15,40
35	67,80	95	12,63
40	59,52	100	10,30
45	52,44	105	7,65
50	45,37	110	5,56
55	39,06		

Experiencia 120.1

Palos sin corteza

Diámetro original: 2,5 mm– Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 1,9 mm – Desviación standard: 0,27

Nº palos: 50

Temperatura del aire: 120 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	303,56
5	90,44
10	30,67
15	6,81

Experiencia 120.2

Palos sin corteza

Diámetro original: 2,5 mm– Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 1,9 mm – Desviación standard: 0,31

Nº palos: 50

Temperatura del aire: 120 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	261,24
5	82,54
10	28,48
15	6,20

Experiencia 120.3

Palos con corteza

Diámetro: 2,5 mm – Longitud: 5 cm

Nº palos: 30

Temperatura del aire: 120 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	363,12
5	270,46
10	188,35
15	121,39
20	46,12
25	10,79

Experiencia 120.4

Palos con corteza

Palos con corteza

Diámetro: 2,5 mm – Longitud: 5 cm

Nº palos: 30

Temperatura del aire: 120 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	360,00
5	273,04
10	195,22
15	122,17
20	59,13
25	19,56
30	5,83

Experiencia 120.5

Palos sin corteza

Diámetro original: 5,0 mm– Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 3,8 mm – Desviación standard: 0,38

N° palos: 20

Temperatura del aire: 120 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	184,02
5	89,42
10	62,92
15	40,89
20	24,22
25	12,96
30	7,56
35	4,63

Experiencia 120.6

Palos sin corteza

Diámetro original: 5,0 mm– Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 3,8 mm – Desviación standard: 0,32

N° palos: 20

Temperatura del aire: 120 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	178,92
5	100,81
10	65,16
15	41,39
20	28,39
25	16,51
30	10,68
35	5,30

Experiencia 120.7

Palos con corteza

Diámetro: 5, mm – Longitud: 5 cm

N° palos: 15

Temperatura del aire: 120 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,0 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	195,78	45	20,75
5	163,78	50	15,65
10	129,08	55	10,20
15	103,57	60	6,72
20	89,12		
25	70,07		
30	52,89		
35	38,97		
40	25,68		

Experiencia 120.8

Palos con corteza

Diámetro: 5,0 mm – Longitud: 5 cm

N° palos: 15

Temperatura del aire: 120 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	186,39	45	37,62
5	163,11	50	25,77
10	147,05	55	13,61
15	125,41	60	7,38
20	118,80		
25	94,54		
30	78,69		
35	63,44		
40	50,15		

Experiencia 120.9

Palos sin corteza

Diámetro original: 7,5 mm– Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 6,0 mm – Desviación standard: 0,35

N° palos: 105

Temperatura del aire: 120 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	171,38	40	13,82
5	111,21	45	10,29
10	79,41	50	7,76
15	61,25		
20	43,62		
25	33,16		
30	24,54		
35	18,68		

Experiencia 120.10

Palos sin corteza

Diámetro original: 7,5 mm– Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 6,1 mm – Desviación standard: 0,50

N° palos: 15

Temperatura del aire: 120 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	158,84	40	14,14
5	105,36	45	10,15
10	76,85	50	6,16
15	57,24		
20	45,50		
25	35,12		
30	25,54		
35	19,84		

Experiencia 120.11

Palos con corteza

Diámetro: 7,5 mm – Longitud: 5 cm

Nº palos: 10

Temperatura del aire: 120 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	197,46	50	39,61
5	179,86	55	34,56
10	159,67	60	29,51
15	137,20	65	25,42
20	114,15	70	20,33
25	95,27	75	14,36
30	83,08	80	9,36
35	71,20		
40	59,31		
45	47,96		

Experiencia 120.12

Palos con corteza

Diámetro: 7,5 mm – Longitud: 5 cm

Nº palos: 10

Temperatura del aire: 120 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	176,49	50	44,85
5	167,21	55	37,20
10	148,99	60	29,56
15	131,79	65	23,51
20	118,09	70	17,58
25	95,78	75	12,71
30	80,47	80	7,85
35	70,86		
40	61,25		
45	52,05		

Experiencia 130.1

Palos sin corteza

Diámetro original: 2,5 mm– Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 1,8 mm – Desviación standard: 0,15

N° palos: 50

Temperatura del aire: 130 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	320,98
5	91,11
10	17,93
15	3,80

Experiencia 130.2

Palos sin corteza

Diámetro original: 2,5 mm– Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 1,9 mm – Desviación standard: 0,23

N° palos: 40

Temperatura del aire: 130 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	187,11
5	41,99
10	4,15

Experiencia 130.3

Palos con corteza

Palos con corteza

Diámetro: 2,5 mm – Longitud: 5 cm

N° palos: 30

Temperatura del aire: 130 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	350,43
5	250,00
10	158,26
15	63,04
20	9,52

Experiencia 130.4

Palos con corteza

Diámetro: 2,5 mm – Longitud: 5 cm

N° palos: 40

Temperatura del aire: 130 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	129,91
5	74,43
10	38,29
15	15,74
20	4,84

Experiencia 130.5

Palos sin corteza

Diámetro original: 5,0 mm– Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 3,9 mm – Desviación standard: 0,30

N° palos: 15

Temperatura del aire: 130 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	195,42
5	109,21
10	61,50
15	35,03
20	15,75
25	7,58

Experiencia 130.6

Palos sin corteza

Diámetro original: 5,0 mm– Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 4,0 mm – Desviación standard: 0,34

N° palos: 20

Temperatura del aire: 130 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	189,41
5	129,03
10	80,72
15	44,49
20	24,58
25	13,98
30	4,87

Experiencia 130.7

Palos con corteza

Diámetro: 5, mm – Longitud: 5 cm

N° palos: 15

Temperatura del aire: 130 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,0 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	196,39
5	172,36
10	148,85
15	103,59
20	76,01
25	55,31
30	31,84
35	19,55
40	12,66
45	6,89

Experiencia 130.8

Palos con corteza

Diámetro: 5,0 mm – Longitud: 5 cm

N° palos: 15

Temperatura del aire: 130 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	203,68
5	165,26
10	122,11
15	85,96
20	67,72
25	57,54
30	42,13
35	28,56
40	18,87
45	6,58

Experiencia 130.9

Palos sin corteza

Diámetro original: 7,5 mm– Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 5,9 mm – Desviación standard: 0,26

N° palos: 15

Temperatura del aire: 130 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	161,76
5	106,06
10	76,86
15	51,37
20	33,06
25	22,51
30	16,60
35	9,48
40	6,26

Experiencia 130.10

Palos sin corteza

Diámetro original: 7,5 mm– Longitud: 5 cm

Diámetro final: Valor medio: 5,9 mm – Desviación standard: 0,29

N° palos: 10

Temperatura del aire: 130 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	157,79
5	104,82
10	71,37
15	50,53
20	36,35
25	25,84
30	15,33
35	9,58
40	5,82

Experiencia 130.11

Palos con corteza

Diámetro: 7,5 mm – Longitud: 5 cm

Nº palos: 10

Temperatura del aire: 130 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	195,60	40	48,34
5	180,79	45	43,02
10	157,26	50	34,70
15	127,07	55	25,44
20	96,38	60	18,54
25	79,02	65	10,25
30	65,33		
35	55,31		

Experiencia 130.12

Palos con corteza

Diámetro: 7,5 mm – Longitud: 5 cm

Nº palos: 10

Temperatura del aire: 130 °C

Contenido de humedad de equilibrio: 0,00 g/100gss

Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs	Tiempo (min)	Cont.de hum., %bs
0	152,35	40	35,70
5	139,26	45	26,69
10	126,27	50	17,58
15	106,57	55	13,92
20	88,98	60	11,58
25	74,05	65	8,40
30	59,43		
35	47,54		

ANEXO 5: Programas para calcular las constantes del coeficiente de difusión del agua en los palos de yerba mate

En este anexo se presentan los programas utilizados para el cálculo del coeficiente de difusión de humedad en el xilema y el palo con corteza, explicado en el capítulo 7. Los datos experimentales utilizados se dan en el anexo 4.

La ecuación para determinar el coeficiente de difusión, se expresa de la siguiente forma:

$$D = A * (1 + B * X) * e^{-\frac{C}{T}}$$

Siendo:

D= coeficiente de difusión (m²/s)

A, B y C= parámetros utilizados para minimizar el error . Se introducen por teclado

X = contenido de humedad, base seca

T = temperatura en °K

Con el modelo planteado se calculaba el contenido de humedad y se minimizaba el error promedio porcentual, utilizando la ecuación 3 del capítulo 6.

El procedimiento de cálculo seguido en el capítulo 7 es el siguiente: en primer término se determina la ecuación para el coeficiente de difusión del xilema, o palos sin corteza, entre 70 y 100°C (item 5.1). Utilizando esta ecuación se determina la ecuación para el coeficiente de difusión del xilema, entre 110 y 130°C (item 5.2). En una tercera etapa, se determinó la ecuación para el coeficiente de difusión del agua en la corteza, entre 70 y 100°C, utilizando la ecuación determinada en el punto 5.1 para el xilema (item 5.3). Utilizando las ecuaciones determinadas en los puntos 5.1, 5.2 y 5.3 de este anexo se determinó la ecuación del coeficiente de difusión para el agua en la corteza, entre 110 y 130°C.

A.5.1. Palos sin corteza, entre 70 y 100°C

10 REM" Cálculo del coeficiente de difusión considerando al palo con un solo nodo. Palos sin corteza a 70, 80 y 90°C y 2.5 mm "

20 DIM X1(605),T1(605),XM(30),X(5,305),T(5,305),R(11),DR(11),XC(305),W(11)

30 INPUT "A,B,C,"; A,B,C

40 EPP=0:M=0:EPP2=0

50 GOTO 100

100 PRINT "Experiencia 70.1"

110 R0=.00085:DT=1:M1=3:XA=.0147: T0=25:TA=70: H=112.8: X0=3.2167: KG=.185:YA=8.000001E-03:
N=2: DR0= .000425: M=20: YA=8.000001E-03

115 XM(1)=.7734: XM(2)=.1527: XM(3)=.078: XM(4)=.0412

117 GOSUB 620

200 PRINT"Experiencia 70.2"

210 R0=.0009: DT=1: M1=3: XA=.0147: T0=25: TA=70: H=109.6: X0=1.7447: KG=.179:
YA=8.000001E-03: N=2:DR0=.00045: M=20

215 XM(1)=.6255: XM(2)=.2081: XM(3)=.0821: XM(4)=.0432

217 GOSUB 620

300 PRINT "Experiencia 80.1"

310 R0=.001: DT=1: M1=3: XA=.0094: T0=25: TA=80: H=103.8: X0=1.6606: KG=.175: YA=8.000001E-03:

N=2: DR0=.0005: M=20

```

315 XM(1)=.5459: XM(2)=.1743: XM(3)=.0831: XM(4)=.0419
317 GOSUB 620
400 PRINT "Experiencia 80.2"
410 R0=.00085: DT=1: M1=3: XA=.0094: T0=25: TA=80: H=112.6: X0=3.1324: KG=.188:
    YA=8.000001E-03: N=2: DR0=.000425: M=20
415 XM(1)=.621: XM(2)=.1233: XM(3)=.0502
417 GOSUB 620
500 PRINT "Experiencia 90.1"
510 R0=.00085: DT=1: M1=2: XA=8.999999E-03: T0=25: TA=90: H=113.7: X0=2.3099: KG=.184:
    YA=8.000001E-03: N=2: DR0=.000425: M=20
515 XM(1)=.4648: XM(2)=8.560001E-02
517 GOSUB 620
600 PRINT "Experiencia 90.2"
610 R0=.0009: DT=1: M1=2: XA=8.999999E-03: T0=25: TA=90: H=110.5: X0=1.8062: KG=.179:
    YA=8.000001E-03: N=2: DR0=.00045: M=20
615 XM(1)=.4449: XM(2)=.0845: XM(3)=.0496
617 GOSUB 620
619 GOTO 800
620 EPP1=0: X1(1)=X0: T1(1)=T0: R=R0
625 FOR J=1 TO M1
630 FOR T=1 TO 600
635 DEN=458+1040*(X1(T)/(1+X1(T)))
640 DIF= A*(1+B*X1(T))*EXP(-C/(T1(T)+273.16))*EXP(206*2*R0)
645 DIFA=R*(1+X1(T))/DEN/2/(R/2/DIF*(1+X1(T))/DEN+M/KG): XE=X1(T)-DIFA/DIF*(X1(T)-XA)
650 CP=1790+2360*(X1(T)/(1+X1(T)))
655 LA=7020000!-803000!*LOG(T1(T)+273.16)
660 X1(T+1)= XA+(X1(T)-XA)*EXP(-2.4048^2*DIF*DT/R^2)
665 T1(T+1)= T1(T)+1/CP/DEN*(H/R*DT*(TA-T1(T))-LA*(X1(T)-X1(T+1))*DEN/(1+X1(T)))
666 XS=XE*100: TS=T1(T): GOSUB 4510
667 M=1/B1*(-A1/LOG(FI/100))^(1/B1-1)*(A1/(FI/100*(LOG(FI/100)^2)))
670 R=(R^2+(R0^2)*.038*(X1(T+1)-X1(T)))^5
675 NEXT T
680 EPP1=EPP1+ABS(X1(T)-XM(J))*100/XM(J)
685 PRINT X1(T), XM(J)
686 X1(1)=X1(T): T1(1)=T1(T)
690 NEXT J
692 M=M+M1
695 PRINT EPP1/M1: EPP=EPP + EPP1/M1: EPP2=EPP2+EPP1
697 RETURN
800 PRINT "Experiencia 100.1"
810 R0=.00095: DT=1: M1=2: XA=0: T0=25: TA=100: H=106!: X0=2.9006: M2=300: KG=.169:
    YA=8.000001E-03: N=2: DR0=.000475: M=20
815 XM(1)=.5404: XM(2)=.1015: XM(3)=.0384
817 GOSUB 620
900 PRINT "Experiencia 100.2"
910 R0=.00095: DT=1: M1=2: XA=0: T0=25: TA=100: H=106!: X0=1.7381: M2=300: KG=.169:
    YA=8.000001E-03: N=2: DR0=.000475: M=20
915 XM(1)=.4022: XM(2)=.0792: XM(3)=.0407: XM(4)=0: XM(5)=0: XM(6)=0: XM(7)=0: XM(8)=0: XM(9)=0
917 GOSUB 620
1000 REM " Experiencias con 5.0 mm"
1100 PRINT "Experiencia 70.5"
1101 R0=.00193: DR0=.0006433: N=3: DT=1: M1=8: XA=.0147: T0=25: TA=70: H=74.8: X0=1.041:
    KG=.123: YA=8.000001E-03: M=20
1102 XM(1)=.6439: XM(2)=.4977: XM(3)=.3919: XM(4)=.3032: XM(5)=.228: XM(6)=.1807: XM(7)=.1324:
    XM(8)=8.959999E-02: XM(9)=.066: XM(10)=.04241104 GOSUB 3104
1200 PRINT "Experiencia 70.6"
1201 R0=.002: DT=1: DR0=.000667: N=3: M1=8: XA=.0147: T0=25: TA=70: H=73.5: X0=1.7804: KG=.12:
    YA=8.000001E-03: M=20
1202 XM(1)=.937: XM(2)=.6565: XM(3)=.4978: XM(4)=.3804: XM(5)=.2739: XM(6)=.1817: XM(7)=.1382:
    XM(8)=.09043: XM(9)=.0774
1204 GOSUB 3104

```

```

1300 PRINT "Experiencia 80.5"
1301 R0=.002: DT=1: DR0=.000667: N=3: M1=8: XA=.0094: T0=25: TA=80: H=73.4: X0=1.2755:
KG=.123:
    YA=8.000001E-03: M=20
1302 XM(1)=.7229: XM(2)=.5034001: XM(3)=.3724: XM(4)=.2628: XM(5)=.1896: XM(6)=.1369:
    XM(7)=.0969: XM(8)=.0731: XM(9)=.0527
1304 GOSUB 3104
1400 PRINT "Experiencia 80.6"
1401 R0=.0018: DT=1: DR0=6.000001E-04: N=3: M1=7: XA=.0094: T0=25: TA=80: H=77.3: X0=1.9073:
    KG=.129: YA=8.000001E-03: M=20
1402 XM(1)=.9338: XM(2)=.5916: XM(3)=.3929: XM(4)=.2649: XM(5)=.1656: XM(6)=.0993: XM(7)=.0706:
    XM(8)=.0442
1404 GOSUB 3104
1500 PRINT "Experiencia 90.5"
1501 R0=.00196: DT=1: DR0=.000653: N=3: M1=7: XA=8.999999E-03: T0=25: TA=90: H=74.5:
    X0=1.7119: KG=.121: YA=8.000001E-03: M=20
1502 XM(1)=.8017: XM(2)=.5073001: XM(3)=.334: XM(4)=.2276: XM(5)=.1503: XM(6)=.1044:
    XM(7)=.0689: XM(8)=.0501
1504 GOSUB 3104
1600 PRINT "Experiencia 90.6"
1601 R0=.00185: DT=1: DR0=6.150001E-04: N=3: M1=6: XA=8.999999E-03: T0=25: TA=90: H=77.1:
    X0=1.4308: KG=.125: YA=8.000001E-03: M=20
1602 XM(1)=.6364: XM(2)=.3933: XM(3)=.2431: XM(4)=.1779: XM(5)=.0949: XM(6)=.0672: XM(7)=.0415
1604 GOSUB 3104
1700 PRINT "Experiencia 100.5"
1710 R0=.002055: DT=1: M1=5: XA=0: T0=25: TA=100: H=72.1: X0=1.6789: M2=600: N=3:
DR0=.000685:
    KG=.115: YA=8.000001E-03: M=20
1715 XM(1)=.7273: XM(2)=.4352: XM(3)=.2476: XM(4)=.1477: XM(5)=.0951
1720 GOSUB 3104
1800 PRINT "Experiencia 100.6"
1810 R0=.00175: DT=1: M1=4: XA=0: T0=25: TA=100: H=74.8: X0=2.2241: M2=600: N=3:
DR0=.0005834:
    KG=.124: YA=8.000001E-03: M=20
1815 XM(1)=1.0168: XM(2)=.549: XM(3)=.2465: XM(4)=.1148: XM(5)=.0448
1820 GOSUB 3104
2000 REM "Experiencias de 7.5mm"
2100 PRINT "Experiencia 70.9"
2101 R0=.003: DT=1: DR0=6.000001E-04: N=5: M1=11: XA=.0147: T0=25: TA=70: H=60.4: X0=1.6342:
    KG=.099: YA=8.000001E-03: M=20
2102 XM(1)=.9946: XM(2)=.7261: XM(3)=.5886: XM(4)=.4829: XM(5)=.3874: XM(6)=.3099: XM(7)=.267:
    XM(8)=.2184: XM(9)=.178: XM(10)=.1527: XM(11)=.1203: XM(12)=.0867
2104 GOSUB 3104
2200 PRINT "Experiencia 70.10"
2201 R0=.0031: DT=1: DR0=.00062: N=5: M1=12: XA=.0147: T0=25: TA=70: H=59.1: X0=1.1515:
KG=.097:
    YA=8.000001E-03: M=20
2202 XM(1)=.7355: XM(2)=.5744: XM(3)=.4614: XM(4)=.3747: XM(5)=.3072: XM(6)=.2383: XM(7)=.1983:
    XM(8)=.1598: XM(9)=.1396: XM(10)=.1221: XM(11)=.1074
2203 XM(12)=.0881: XM(13)=.0718: XM(14)=.0568
2204 GOSUB 3104
2300 PRINT "Experiencia 80.9"
2301 R0=.0032: DT=1: DR0=.00064: N=5: M1=12: XA=.0094: T0=25: TA=80: H=58: X0=1.3143: KG=.097:
    YA=8.000001E-03: M=20
2302 XM(1)=.7786: XM(2)=.5893: XM(3)=.4732: XM(4)=.3982: XM(5)=.3291: XM(6)=.272: XM(7)=.2268:
    XM(8)=.1923: XM(9)=.1613: XM(10)=.1339: XM(11)=.1089
2303 XM(12)=.0911: XM(13)=.0804: XM(14)=.0673: XM(15)=.0553
2304 GOSUB 3104
2400 PRINT "Experiencia 80.10"
2401 R0=.0031: DT=1: DR0=.00062: N=5: M1=12: XA=.0094: T0=25: TA=80: H=58.9: X0=1.6207:
    KG=.098: YA=8.000001E-03: M=20

```



```

2402 XM(1)=.9234: XM(2)=.6743: XM(3)=.5192001: XM(4)=.4195: XM(5)=.3429: XM(6)=.2759:
      XM(7)=.2222: XM(8)=.1839: XM(9)=.1475: XM(10)=.113
2403 XM(11)=.1003:XM(12)=.083:XM(13)=.0613:XM(14)=.0541
2404 GOSUB 3104
2500 PRINT "Experiencia 90.9"
2501 R0=.00294: DT=1: DR0=.000588: N=5: M1=10: XA=8.999999E-03: T0=25: TA=90: H=61.2:
      X0=1.6112: KG=.099: YA=8.000001E-03: M=20
2502 XM(1)=.8318: XM(2)=.5931: XM(3)=.4684: XM(4)=.349: XM(5)=.2676: XM(6)=.2134: XM(7)=.1688:
      XM(8)=.1338: XM(9)=.1025: XM(10)=.0784: XM(11)=.0615: XM(12)=.0482
2504 GOSUB 3104
2600 PRINT "Experiencia 90.10"
2601 R0=.0031: DT=1: DR0=.00062: N=5: M1=9: XA=8.999999E-03: T0=25: TA=90: H=59.6: X0=1.3522:
      KG=.097: YA=8.000001E-03: M=20
2602 XM(1)=.8057: XM(2)=.573: XM(3)=.4186: XM(4)=.3351: XM(5)=.2486: XM(6)=.1898: XM(7)=.1466:
      XM(8)=.1187: XM(9)=.0964: XM(10)=.0709
2604 GOSUB 3104
2700 PRINT "Experiencia 100.9"
2710 R0=.003: DT=1: M1=8: XA=0: T0=25: TA=100: H=59.6: X0=1.7508: M2=600: N=5:
      DR0=6.000001E-04: KG=.095: YA=8.000001E-03: M=20
2715 XM(1)=.926: XM(2)=.6045: XM(3)=.4518: XM(4)=.3183: XM(5)=.254: XM(6)=.1785: XM(7)=.127:
      XM(8)=.0723: XM(9)=.0514
2720 GOSUB 3104
2800 PRINT "Experiencia 100.10"
2810 R0=.00295: DT=1: M1=8: XA=0: T0=25: TA=100: H=60.1: X0=1.5817: M2=600: N=5:DR0=.00059:
      KG=.096: YA=8.000001E-03: M=20
2815 XM(1)=.8462: XM(2)=.5553: XM(3)=.3854: XM(4)=.2712: XM(5)=.1943: XM(6)=.1462: XM(7)=.1017:
      XM(8)=.0889
2820 GOSUB 3104
3000 GOTO 3700
3104 R(0)=R0
3106 DEN=458+1040*(X0/(1+X0))
3108 DIF=A*(1+B*X0)*EXP(-C/(T0+273.16))*EXP(206*2*R0)
3109 FOR I=1 TO N
3110 X(I,0)=X0: T(I,0)=T0: DR(I)=DR0
3112 R(I)=R(I-1)-DR(I)/2-DR(I-1)/2: W(I)=2*R(I)*DR(I)/R0^2
3113 NEXT I
3114 EPP1=0:XC(1)=X0:XC(0)=X0
3115 REM" Cálculo de las humedades"
3116 FOR J=1 TO M1
3117 FOR Q=1 TO 2
3118 FOR T=0 TO 299
3119 REM" Nodo1"
3120 DEN=458+1040*(X(1,T)/(1+X(1,T)))
3122 DIF=A*(1+B*X(1,T))*EXP(-C/(T(1,T)+273.16))*EXP(206*2*R0):
      DIFA1=DR(1)/2*(1+X(1,T))/DEN/(DR(1)/DIF/2/DEN*(1+X(1,T))+M/KG)
3123 XS=XE:GOSUB 4500
3124 K=.124+.613*(X(1,T)/(1+X(1,T)))
3125 CP=1790+2360*(X(1,T)/(1+X(1,T)))
3126 LA=7020000!-803000!*LOG(T(1,T)+273.16)
3127 REM XE=XE*(1+X(1,T))/(1+XE)
3128 X(1,T+1)=X(1,T)+DT/(2*R(0)*DR(1)-DR(1)^2)*(DIF/DR(1)*(X(2,T)-X(1,T))*2*(R(1)-DR(1)/2)-
      4*DIFA1/DR(1)*(X(1,T)-XA)*R(0))
3129 T(1,T+1)=T(1,T)+2*DT/DEN/CP/DR(1)/(2*R(0)-DR(1))*(H*R(0)*(TA-T(1,T))-K*(R(0)-
      DR(1))/DR(1)*(T(1,T)-T(2,T))-R0^2*DEN/(1+XC(T))*(XC(T)-XC(T+1))*LA)
3130 REM" NODOS 2 A N-1"
3131 FOR I=2 TO N-1
3132 DEN=458+1040*(X(I,T)/(1+X(I,T)))
3133 DIF=A*(1+B*X(I,T))*EXP(-C/(T(I,T)+273.16))*EXP(206*2*R0)
3134 K=.124+.613*(X(I,T)/(1+X(I,T)))
3135 CP=1790+2360*(X(I,T)/(1+X(I,T)))
3136 X(I,T+1)=X(I,T)+2*DIF*DT/DR(I)^2/(2*R(I)+DR(I))*((X(I+1,T)-X(I,T))*(R(I)-DR(I)/2)-(X(I,T)-X(I-

```

```

1,T))* (R(I)+DR(I)/2))
3138 T(I,T+1)= T(I,T)+ 2*K*DT/DR(I)^2/(2*R(I)+DR(I))/DEN/CP*((T(I-1,T)-T(I,T))* (R(I)+DR(I)/2)-
(T(I,T)-T(I+1,T))* (R(I)-DR(I)/2))
3140 DIF= A*(1+B*X(I,T))*EXP(-C/(T(I,T)+273.16))*EXP(206*2*R0)
3142 NEXT I
3143 REM"NODO N"
3144 DEN=458+1040*(X(N,T)/(1+X(N,T)))
3145 DIF=A*(1+B*X(N,T))*EXP(-C/(T(N,T)+273.16))*EXP(206*2*R0)
3147 K= .124+.613*(X(N,T)/(1+X(N,T)))
3148 CP=1790+2360*(X(N,T)/(1+X(N,T)))
3149 X(N,T+1)=X(N,T)-2*DIF*DT/DR(N)^2*(X(N,T)-X(N-1,T))
3155 LA=7020000!-803000!*LOG(T(N,T)+273.16)
3158 T(N,T+1)=T(N,T)+2*K*DT/DR(N)^2/DEN/CP*(T(N-1,T)-T(N,T))
3160 REM"CALCULO DE LOS NUEVOS RADIOS"
3161 R(0)=0:XC(T+2)=0
3162 FOR I=1 TO N
3163 DR(I)=DR(I)*(1-.038*(X(I,T)-X(I,T+1))):XC(T+2)=XC(T+2)+W(I)*X(I,T+1)
3164 R(0)=R(0)+DR(I)
3165 NEXT I
3166 XE=X(1,T)-DIFA1/DIF*(X(1,T)-XA):XS=XE*100:GOSUB 4500
3167 M=1/B1*(-A1/LOG(FI/100))^(1/B1-1)*(A1/(FI/100*(LOG(FI/100)^2)))
3168 FOR I=1 TO N
3170 R(I)= R(I-1)-DR(I)/2-DR(I-1)/2
3172 NEXT I
3174 NEXT T
3175 XC(1)=XC(T-1):XC(0)=XC(T-2)
3176 FOR I=1 TO N
3177 X(I,0)=X(I,T):T(I,0)=T(I,T)
3178 NEXT I
3179 NEXT Q
3180 REM" Cálculo de las humedades medias"
3181 XC(J)=0
3182 FOR I=1 TO N
3183 XC(J)=XC(J)+W(I)*X(I,T)
3184 X(I,0)=X(I,T)
3185 NEXT I
3186 EPP1= EPP1+ ABS(XC(J)-XM(J))*100/XM(J)
3187 PRINT XC(J),XM(J)
3188 NEXT J
3190 PRINT "epp1=";EPP1/M1
3192 EPP= EPP + EPP1/M1:EPP2=EPP2+EPP1
3194 RETURN
3700 PRINT "A= ";A;" B= ";B;" C= ";C;" epp= ";EPP/24 ;" epp2=";EPP2
4000 END
4500 REM" Cálculo de la humedad de equilibrio"
4505 XS=X(1,T)*100:TS=T(1,T)
4510 PT=10^(7.05-3090.54/(TS^1.196+500.2))
4520 IF TS<=30 THEN 4630
4530 IF TS<=40 THEN 4640
4540 IF TS<=50 THEN 4650
4550 IF TS<=60 THEN 4660
4560 IF TS<=70 THEN 4670
4570 IF TS<=80 THEN 4680
4580 IF TS<=90 THEN 4690
4590 FI1=EXP(-6.84/XS^1.428):PT1=FI1*PT: YS=(18/29)*PT1/(760-PT1):
A1=6.84:B1=1.428:FI=FI1:GOTO 4710
4630 FI1=EXP(-6.5/XS^1.007):PT1=FI1*PT: YS=(18/29)*PT1/(760-PT1): A1=6.5:B1=1.007:FI=FI1
4640 TT= 30: A1=6.5:B1=1.007: A2=7.01:B2=1.015: GOTO 4700
4650 TT= 40: A1=7.01:B1=1.015: A2=7.66:B2=1.061: GOTO 4700
4660 TT= 50: A1=7.66:B1=1.061: A2=6.88:B2=1.033: GOTO 4700
4670 TT= 60: A1=6.88:B1=1.033: A2=5.98:B2=1.063: GOTO 4700

```

```

4680 TT= 70: A1=5.98:B1=1.063: A2=7.06:B2=1.366: GOTO 4700
4690 TT= 80: A1=7.06:B1=1.366: A2=11.01:B2=1.658: GOTO 4700
4700 FI1=EXP(-A1/XS^B1): FI2= EXP(-A2/XS^B2)
4705 FI= FI1+(FI2-FI1)*(TS-TT)/10: PT1=FI*PT: YS=(18/29)*PT1/(760-PT1)
4710 RETURN

```

A.5.2. Palos sin corteza, entre 110 y 130°C

```

10 REM" Cálculo del coeficiente de difusión de palos sin corteza a 110,120 y 130°C. Palos de 2.5 mm=1
   nodo; palos de 5.0 mm=3 nodos y palos de 7.5mm= 5 nodos"
20 DIM X1(305),T1(305),XM(30),X(5,305),T(5,305),R(11),DR(11),XC(305),W(11)
30 INPUT "A,B,C,"; A,B,C
40 EPP=0:M=0:EPP2=0
50 GOTO 100
100 PRINT "Experiencia 110.1"
110 R0=.000875: DT=1: M1=3: XA=0: T0=25: TA=110: H=110.4: X0=2.6943: KG=.185:
   YA=8.000001E-03: N=1: DR0=.000875
115 XM(1)=.8549: XM(2)=.3027: XM(3)=.0892
117 GOSUB 4620
200 PRINT"Experiencia 110.2"
210 R0=.0009: DT=1: M1=3: XA=0: T0=25: TA=110: H=106.9: X0=1.9754: KG=.179:
   YA=8.000001E-03: N=1: DR0=.0009
215 XM(1)=.6992: XM(2)=.2706: XM(3)=.0884
217 GOSUB 4620
300 PRINT "Experiencia 120.1"
310 R0=.00095: DT=1: M1=3: XA=0: T0=25: TA=120: H=106: X0=3.0356: KG=.175:
   YA=8.000001E-03: N=1: DR0=.00095
315 XM(1)=.9044: XM(2)=.3067: XM(3)=.0681
317 GOSUB 4620
400 PRINT "Experiencia 120.2"
410 R0=.00095: DT=1: M1=3: XA=0: T0=25: TA=120: H=106: X0=2.6124: KG=.188:
   YA=8.000001E-03: N=1: DR0=.00095
415 XM(1)=.8254: XM(2)=.2848: XM(3)=.062
417 GOSUB 4620
500 PRINT "Experiencia 130.1"
510 R0=.0009: DT=1: M1=3: XA=0: T0=25: TA=130: H=109.1: X0=3.2098: KG=.184:
   YA=8.000001E-03: N=1: DR0=.0009
515 XM(1)=.911: XM(2)=.1793: XM(3)=.038
517 GOSUB 4620
600 PRINT "Experiencia 130.2"
610 R0=.00085: DT=1: M1=2: XA=0: T0=25: TA=130: H=112.3: X0=1.8711: KG=.179:
   YA=8.000001E-03: N=1: DR0=.00085
615 XM(1)=.4199: XM(2)=.0415
617 GOSUB 4620
1000 REM" Experiencias con 5.0 mm"
1100 PRINT "Experiencia 110.5"
1101 R0=.00195: DR0=.00065 :N=3: DT=1: M1=8: XA=0: T0=25: TA=110: H=74!: X0=1.9768: KG=.123:
   YA=8.000001E-03
1102 XM(1)=1.17: XM(2)=.8143: XM(3)=.5052001: XM(4)=.3595: XM(5)=.2735: XM(6)=.1875:
   XM(7)=.127: XM(8)=8.250001E-02
1104 GOSUB 3104
1200 PRINT "Experiencia 110.6"
1201 R0=.001905: DT=1: DR0=.000635: N=3: M1=8: XA=0: T0=25: TA=110: H=74.8: X0=1.5325: KG=.12:
   YA=8.000001E-03
1202 XM(1)=.9504: XM(2)=.6802: XM(3)=.4672: XM(4)=.3409: XM(5)=.2364: XM(6)=.1496: XM(7)=.0987:
   XM(8)=.051:XM(9)=0:XM(10)=0
1204 GOSUB 3104
1300 PRINT "Experiencia 120.5"
1301 R0=.0019: DT=1: DR0=.000633: N=3: M1=7: XA=0: T0=25: TA=120: H=74.9: X0=1.8402: KG=.123:

```

```

YA=8.000001E-03
1302 XM(1)=.8942: XM(2)=.6292: XM(3)=.4089: XM(4)=.2422: XM(5)=.1296: XM(6)=.0756: XM(7)=.0463:
1304 GOSUB 3104
1400 PRINT "Experiencia 120.6"
1401 R0=.0019: DT=1: DR0=.000633: N=3: M1=7: XA=0: T0=25: TA=120: H=74.9: X0=1.7892: KG=.129:
YA=8.000001E-03
1402 XM(1)=1.0081: XM(2)=.6516: XM(3)=.4139: XM(4)=.2839: XM(5)=.1651: XM(6)=.1068: XM(7)=.053:
1404 GOSUB 3104
1500 PRINT "Experiencia 130.5"
1501 R0=.00185: DT=1: DR0=.000617: N=3: M1=5: XA=0: T0=25: TA=130: H=76.1: X0=1.9542: KG=.121:
YA=8.000001E-03
1502 XM(1)=1.0921: XM(2)=.615: XM(3)=.3503: XM(4)=.1575: XM(5)=.0758:
1504 GOSUB 3104
1600 PRINT "Experiencia 130.6"
1601 R0=.002: DT=1: DR0=.000667: N=3: M1=6: XA=0: T0=25: TA=130: H=73.2: X0=1.8941: KG=.125:
YA=8.000001E-03
1602 M(1)=1.2903: XM(2)=.8072: XM(3)=.4449: XM(4)=.2458: XM(5)=.1398: XM(6)=.0487:
1604 GOSUB 3104
2000 REM "Palos de 7.5mm"
2100 PRINT "Experiencia 110.9"
2101 R0=.0029: DT=1: DR0=.00058: N=5: M1=12: XA=0: T0=25: TA=110: H=60.7: X0=1.6292 :KG=.099:
YA=8.000001E-03
2102 XM(1)=1.1287: XM(2)=.8122: XM(3)=.6043: XM(4)=.4713: XM(5)=.3861: XM(6)=.3009:
XM(7)=.2457: XM(8)=.1905: XM(9)=.1605: XM(10)=.1305: XM(11)=.1073: XM(12)=.0741
2104 GOSUB 3104
2200 PRINT "Experiencia 110.10"
2201 R0=.00305: DT=1: DR0=.00061: N=5: M1=13: XA=0: T0=25: TA=110: H=59.2: X0=1.3921: KG=.097:
YA=8.000001E-03
2202 XM(1)=.933: XM(2)=.7582: XM(3)=.5784: XM(4)=.4657: XM(5)=.3782: XM(6)=.2908: XM(7)=.2418:
XM(8)=.1928: XM(9)=.1528: XM(10)=.1127: XM(11)=9.399999E-02
2203 XM(12)=.0752: XM(13)=.0564
2204 GOSUB 3104
2300 PRINT "Experiencia 120.9"
2301 R0=.003: DT=1: DR0=6.000001E-04: N=5: M1=10: XA=0: T0=25: TA=120: H=59.6: X0=1.7138:
KG=.097: YA=8.000001E-03
2302 XM(1)=1.1121: XM(2)=.7941: XM(3)=.6125: XM(4)=.4362: XM(5)=.3316: XM(6)=.2454:
XM(7)=.1868: XM(8)=.1382: XM(9)=.1029: XM(10)=.0776
2304 GOSUB 3104
2400 PRINT "Experiencia 120.10"
2401 R0=.00305: DT=1: DR0=.00061: N=5: M1=10: XA=0: T0=25: TA=120: H=58.9: X0=1.5884: KG=.098:
YA=8.000001E-03
2402 XM(1)=1.0536: XM(2)=.7685: XM(3)=.5724: XM(4)=.455: XM(5)=.3512: XM(6)=.2554: XM(7)=.1984:
XM(8)=.1414: XM(9)=.1015: XM(10)=.0616
2404 GOSUB 3104
2500 PRINT "Experiencia 130.9"
2501 R0=.00295: DT=1: DR0=.00059: N=5: M1=8: XA=0: T0=25: TA=130: H=60.3: X0=1.6176: KG=.099:
YA=8.000001E-03
2502 XM(1)=1.0606: XM(2)=.7686: XM(3)=.5137: XM(4)=.3306: XM(5)=.2251: XM(6)=.166: XM(7)=.0948:
XM(8)=.0626
2504 GOSUB 3104
2600 PRINT "Experiencia 130.10"
2601 R0=.00295: DT=1: DR0=.00059: N=5: M1=8: XA=0: T0=25: TA=130: H=60.3: X0=1.5779: KG=.097:
YA=8.000001E-03
2602 XM(1)=1.0482: XM(2)=.7137: XM(3)=.5053: XM(4)=.3635: XM(5)=.2584: XM(6)=.1533:
XM(7)=.0958: XM(8)=.0582
2604 GOSUB 3104
3000 GOTO 3700
3104 R(0)=R0
3106 DEN=458+1040*(X0/(1+X0))
3109 FOR I=1 TO N
3110 X(I,0)=X0:T(I,0)=T0: DR(I)=DR0

```

```

3112 R(I)= R(I-1)-DR(I)/2-DR(I-1)/2: W(I)= 2*R(I)*DR(I)/R0^2
3113 NEXT I
3114 EPP1=0:XC(1)=X0:XC(0)=X0
3115 REM"Cálculo de las Humedades"
3116 FOR J=1 TO M1
3118 FOR T=0 TO 299
3119 REM"Nodo1"
3120 DEN=458+1040*(X(1,T)/(1+X(1,T)))
3122 XS=X(1,T):TS=T(1,T):GOSUB 4700
3124 K= .124+.613*(X(1,T)/(1+X(1,T)))
3125 CP=1790+2360*(X(1,T)/(1+X(1,T)))
3126 LA=7020000!-803000!*LOG(T(1,T)+273.16)
3128 X(1,T+1)= X(1,T)+DT/(2*R(0)*DR(1)-DR(1)^2)*(DIF/DR(1)*(X(2,T)-X(1,T))*2*(R(1)-DR(1)/2)-
4*DIF/DR(1)*(X(1,T)-XA)*R(0))
3129 T(1,T+1)= T(1,T)+2*DT/DEN/CP/DR(1)/(2*R(0)-DR(1))*(H*R(0)*(TA-T(1,T))-K*(R(0)-
DR(1))/DR(1)*(T(1,T)-T(2,T))-R(0)^2*DEN/(1+XC(T))*(XC(T)-XC(T+1))*LA)
3130 REM"NODOS 2 A N-1"
3131 FOR I=2 TO N-1
3132 DEN=458+1040*(X(I,T)/(1+X(I,T)))
3133 XS=X(I,T):TS=T(I,T):GOSUB 4700
3134 K= .124+.613*(X(I,T)/(1+X(I,T)))
3135 CP=1790+2360*(X(I,T)/(1+X(I,T)))
3136 X(I,T+1)= X(I,T)+ 2*DIF*DT/DR(I)^2/(2*R(I)+DR(I))*((X(I+1,T)-X(I,T))*(R(I)-DR(I)/2)-(X(I,T)-
X(I-1,T))*(R(I)+DR(I)/2))
3138 T(I,T+1)= T(I,T)+ 2*K*DT/DR(I)^2/(2*R(I)+DR(I))/DEN/CP*((T(I-1,T)-T(I,T))*(R(I)+DR(I)/2)-
(T(I,T)-T(I+1,T))*(R(I)-DR(I)/2))
3142 NEXT I
3143 REM"NODO N"
3144 DEN=458+1040*(X(N,T)/(1+X(N,T)))
3145 XS=X(N,T):TS=T(N,T):GOSUB 4700
3147 K= .124+.613*(X(N,T)/(1+X(N,T)))
3148 CP=1790+2360*(X(N,T)/(1+X(N,T)))
3149 X(N,T+1)=X(N,T)-2*DIF*DT/DR(N)^2*(X(N,T)-X(N-1,T))
3158 T(N,T+1)=T(N,T)+2*K*DT/DR(N)^2/DEN/CP*(T(N-1,T)-T(N,T))
3160 REM"CALCULO DE LOS NUEVOS RADIOS"
3161 R(0)=0:XC(T+2)=0
3162 FOR I=1 TO N
3163 DR(I)=DR(I)*(1-.038*(X(I,T)-X(I,T+1))):XC(T+2)=XC(T+2)+W(I)*X(I,T+1)
3164 R(0)=R(0)+DR(I)
3165 NEXT I
3168 FOR I=1 TO N
3170 R(I)= R(I-1)-DR(I)/2-DR(I-1)/2
3172 NEXT I
3174 NEXT T
3176 FOR I=1 TO N
3177 X(I,0)=X(I,T):T(I,0)=T(I,T)
3178 NEXT I
3180 XC(0)=XC(T-1):XC(1)=XC(T)
3181 XC(J)=0
3182 FOR I=1 TO N
3183 XC(J)=XC(J)+W(I)*X(I,T)
3184 X(I,0)=X(I,T)
3185 NEXT I
3186 EPP1= EPP1+ ABS(XC(T+1)-XM(J))*100/XM(J)
3187 PRINT XC(T+1),XM(J)
3188 NEXT J
3190 PRINT "epp1=";EPP1/M1
3192 EPP= EPP + EPP1/M1:EPP2=EPP2+EPP1
3194 RETURN
3700 PRINT "A= ";A;" B= ";B;" C= ";C;" epp= ";EPP/18;" epp2=";EPP2
4000 END

```

```

4620 EPP1=0:X1(1)=X0: T1(1)=T0:R=R0: X1(2)=X0
4625 FOR J=1 TO M1
4630 FOR T=1 TO 300
4635 DEN=458+1040*(X1(T)/(1+X1(T)))
4640 IF T1(T)>100 THEN 4645
4641 DIF=1.24E-07*(1+.75*X1(T))*EXP(-2270/(T1(T)+273.16))*EXP(206*2*R0):GOTO 4650
4645 DIF= A*(1+B*X1(T))*EXP(-C/(T1(T)+273.16))*EXP(206*2*R0)
4650 CP=1790+2360*(X1(T)/(1+X1(T)))
4655 LA=7020000!-803000!*LOG(T1(T)+273.16)
4660 X1(T+1)= XA+(X1(T)-XA)*EXP(-2.4048^2*DIF*DT/R^2)
4665 T1(T+1)= T1(T)+1/CP/DEN*(H/R*DT*(TA-T1(T))-LA*(X1(T)-X1(T+1))*DEN/(1+X1(T)))
4670 R=(R^2+(R0^2)*.038*(X1(T+1)-X1(T)))^.5
4675 NEXT T
4680 EPP1=EPP1+ABS(X1(T)-XM(J))*100/XM(J)
4685 PRINT X1(T),XM(J)
4686 X1(1)=X1(T):T1(1)=T1(T):X1(2)=X1(T+1)
4690 NEXT J
4695 PRINT EPP1/M1: EPP=EPP + EPP1/M1:EPP2=EPP2+EPP1
4697 RETURN
4700 IF TS>100 THEN 4705
4702 DIF=1.24E-07*(1+.75*XS)*EXP(-2270/(TS+273.16))*EXP(206*2*R0):GOTO 4707
4705 DIF= A*(1+B*XS)*EXP(-C/(TS+273.16))*EXP(206*2*R0)
4707 RETURN

```

A.5.3. Palos con corteza, entre 70 y 100°C

11 REM" Programa para calculo de 2.5 mm , 5.0 y 7.5 mm 70 – 100°C, con corteza"

```

20 DIM XX1(605), XC(605), TC(605),XM(605),XT(70),XX(6,605),T(6,605), R(6),DR(6),W(6)
30 INPUT "A,B,C";A,B,C
40 EPP=0:EPP2=0:M=0
50 GOTO 100
100 PRINT "Experiencia 70.3"
110 R0=.00125: R1=.000905: DT=1 : M1=23: XCA=.0236: T0=25:TA=70: H=93!: KG=.152: YA=.001:
X0=1.489
120 XT(1)=1.3431: XT(2)= 1.2205: XT(3)= 1.1421: XT(4)= 1.0551: XT(5)=.9614: XT(6)= .8812:
XT(7)=.812: XT(8)=.7404: XT(9)=.6748: XT(10)= .6178
130 XT(11)=.5642: XT(12)= .5046: XT(13)= .4486: XT(14)= .3992: XT(15)=.3518: XT(16)= .306:
XT(17)=.2628: XT(18)=.2274: XT(19)=.1917: XT(20)= .1574: XT(21)=.129
135 XT(22)=.1094: XT(23)=8.869999E-02
140 GOSUB 3000
200 PRINT "Experiencia 70.4"
210 R0=.00125: R1=.000905: DT=1 : M1=26: XCA=.0236: T0=25: TA=70: H=93!: KG=.152: YA=.001:
X0=1.6957
220 XT(1)=1.4647: XT(2)= 1.3276: XT(3)= 1.2111: XT(4)= 1.0584: XT(5)=.8771: XT(6)= .8246:
XT(7)=.7605: XT(8)=.6521: XT(9)=.6139: XT(10)= .5498
230 XT(11)=.4844: XT(12)= .4176: XT(13)= .3699: XT(14)= .3235: XT(15)=.2783: XT(16)= .2437:
XT(17)=.2109: XT(18)=.1865: XT(19)=.1634: XT(20)= .1424: XT(21)=.1235
235 XT(22)=.1176: XT(23)= .104: XT(24)= .0919: XT(25)= .0814: XT(26)=.0721
240 GOSUB 3000
300 PRINT "Experiencia 80.3"
310 R0=.00125: R1=.000905: DT=1 : M1=14: XCA=.0143: T0=25: TA=80: H=92.8: KG=.155: YA=.001:
X0=2.1689
320 XT(1)=1.5926: XT(2)= 1.3036: XT(3)=1.0501: XT(4)= .841: XT(5)=.6505: XT(6)= .5187: XT(7)=.4063:
XT(8)=.3094: XT(9)=.2344
330 XT(10)=.2082: XT(11)= .1734: XT(12)= .1462: XT(13)= .1109: XT(14)=.0824
340 GOSUB 3000
400 PRINT "Experiencia 80.4"
410 R0=.00125: R1=.000905: DT=1 : M1=13: XCA=.0143: T0=25: TA=80: H=92.8: KG=.155: YA=.001:
X0=1.7249

```

```

420 XT(1)=1.354: XT(2)= 1.1486: XT(3)= .9975: XT(4)= .7251: XT(5)=.6504: XT(6)= .4964: XT(7)=.4132:
    XT(8)=.341: XT(9)=.2749 XT(10)= .2261
430 XT(11)=.1868: XT(12)= .1569:XT(13)= .1143
440 GOSUB 3000
500 PRINT "Experiencia 90.3"
510 R0=.00125: R1=.000905: DT=1 : M1=9: XCA=.013: T0=25: TA=90: H=92.8: KG=.152: YA=.001:
    X0=3.3567
520 XT(1)=2.4784: XT(2)= 1.7221: XT(3)=1.1003: XT(4)= .6515:XT(5)=.3758
530 XT(6)=.2734: XT(7)= .1656: XT(8)=.0941: XT(9)= .0466
540 GOSUB 3000
600 PRINT "Experiencia 90.4"
610 R0=.00125: R1=.000905: DT=1 : M1=10: XCA=.013: T0=25: TA=90: H=92.8: KG=.152: YA=.001:
    X0=1.7658
620 XT(1)=1.2688: XT(2)= .8935: XT(3)= .63: XT(4)= .4323: XT(5)=.3004: XT(6)= .237
630 XT(7)=.1994: XT(8)= .1523: XT(9)= .1146: XT(10)= .0917
640 GOSUB 3000
700 PRINT "Experiencia 100.3"
710 R0=.00125: R1=.000905: DT=1 : M1=6: XCA=0: T0=25: TA=100: H=92.4: KG=.147: YA=.001:
    X0=3.1279
720 XT(1)=2.0236: XT(2)=1.3099: XT(3)= .7895: XT(4)= .386: XT(5)=.1695: XT(6)= .0885
740 GOSUB 3000
800 PRINT "Experiencia 100.4"
810 R0=.00125: R1=.000905: DT=1 : M1=6: XCA=0: T0=25: TA=100: H=92.4: KG=.147: YA=.001:
    X0=2.1038
820 XT(1)=1.3365: XT(2)=.9308: XT(3)= .5959: XT(4)= .3396: XT(5)=.1855: XT(6)=.1014
840 GOSUB 3000
1000 REM " Datos de 5.0mm"
1010 WX= .6:WC=.4
1100 PRINT "Experiencia 70.7"
1110 R0=.0025: R1=.00193: DT=1 : M1=40: N=3: XCA=.0236: T0=25: TA=70: H=65.76: KG=.108:
    YA=.001: X0=1.4197
1120 XT(1)=1.2511: XT(2)= 1.1469: XT(3)= 1.079: XT(4)= 1.0054: XT(5)=.9394: XT(6)= .8725:
    XT(7)=.8351: XT(8)=.7539: XT(9)=.6994: XT(10)= .6545
1130 XT(11)=.6019: XT(12)= .5608: XT(13)= .5274: XT(14)= .4834: XT(15)=.4557: XT(16)= .4203:
    XT(17)=.3942: XT(18)=.3664: XT(19)=.3371: XT(20)= .3218: XT(21)=.3065
1140 XT(22)=.2848: XT(23)= .2673: XT(24)= .2539: XT(25)= .2406: XT(26)=.2227: XT(27)= .2063:
    XT(28)=.1918: XT(29)=.1765
1145 XT(30)=.1661: XT(31)= .1548: XT(32)= .1443: XT(33)= .1344: XT(34)=.1252: XT(35)= .1165:
    XT(36)=.1084: XT(37)=.1009
1146 XT(38)=.0939: XT(39)= .0873: XT(40)= .0712
1150 GOSUB 3000
1200 PRINT "Experiencia 70.8"
1210 R0=.0025: R1=.00193: DT=1 : M1=37: N=3: XCA=.0236: T0=25: TA=70: H=65.76: KG=.108:
    YA=.001: X0=1.3321
1220 XT(1)=1.2279: XT(2)= 1.1426: XT(3)= 1.0587: XT(4)= .9855: XT(5)=.9179: XT(6)= .8624:
    XT(7)=.8055: XT(8)=.7509: XT(9)=.6985: XT(10)= .6489
1230 XT(11)=.5988: XT(12)= .5483: XT(13)= .514: XT(14)= .4761: XT(15)=.4346: XT(16)= .4003:
    XT(17)=.3936: XT(18)=.3425: XT(19)=.3046: XT(20)= .2622: XT(21)=.2274
1240 XT(22)=.2125: XT(23)= .1976
1245 XT(24)=.1927: XT(25)= .1887: XT(26)= .1814: XT(27)= .1688: XT(28)=.1572: XT(29)= .1466:
    XT(30)=.1367: XT(31)=.1277: XT(32)=.1194: XT(33)= .1117: XT(34)=.1047
1246 XT(35)=.0982: XT(36)= .0923: X(M7)=.0868
1250 GOSUB 3000
1300 PRINT "Experiencia 80.7"
1310 R0=.0025: R1=.00193: DT=1 : M1=21: N=3: XCA=.0143: T0=25: TA=80: H=65.62: KG=.11: YA=.001:
    X0=1.5361
1320 XT(1)=1.3555: XT(2)= 1.2052: XT(3)= 1.0809: XT(4)= .9754:XT(5)=.8873: XT(6)= .7832:
    XT(7)=.6777: XT(8)=.6012: XT(9)=.5347: XT(10)= .4754
1330 XT(11)=.4149: XT(12)= .3627: XT(13)= .3208: XT(14)= .2818: XT(15)=.2457: XT(16)= .2225:
    XT(17)=.1922:XT(18)=.1676: XT(19)=.1445: XT(20)= .1171: XT(21)=.0963
1350 GOSUB 3000

```

```

1400 PRINT "Experiencia 80.8"
1410 R0=.0025: R1=.00193: DT=1 : M1=21: N=3: XCA=.0143: T0=25: TA=80: H=65.62: KG=.11: YA=.001:
      X0=1.516
1420 XT(1)=1.3393: XT(2)= 1.172: XT(3)= 1.0759: XT(4)= .9715: XT(5)=.8671: XT(6)= .7754:
      XT(7)=.6876: XT(8)=.6038: XT(9)=.5334 XT(10)= .4686
1430 XT(11)=.4093: XT(12)= .3606: XT(13)= .312: XT(14)= .2633: XT(15)=.2333: XT(16)= .2032:
      XT(17)=.1732: XT(18)=.155: XT(19)=.1368: XT(20)= .1186: XT(21)=.1056
1450 GOSUB 3000
1500 PRINT "Experiencia 90.7"
1510 R0=.0025: R1=.00193: DT=1 : M1=17: N=3: XCA=.013: T0=25: TA=90: H=65.62: KG=.108: YA=.001:
      X0=1.9812
1520 XT(1)=1.6492: XT(2)= 1.4317: XT(3)= 1.2341: XT(4)=1.0561: XT(5)=.8651: XT(6)= .7024:
      XT(7)=.6195: XT(8)=.4958: XT(9)=.427: XT(10)= .3503
1530 XT(11)=.2799: XT(12)= .2267: XT(13)= .1844: XT(14)= .1562: XT(15)=.1234: XT(16)= .0983:
      XT(17)=.0629
1550 GOSUB 3000
1600 PRINT "Experiencia 90.8"
1610 R0=.0025: R1=.00193: DT=1 : M1=15 :N=3: XCA=.013: T0=25: TA=90: H=65.62: KG=.108: YA=.001:
      X0=1.6806
1620 XT(1)=1.4019: XT(2)= 1.1777: XT(3)= .9919: XT(4)=.8688: XT(5)=.7398: XT(6)= .6341: XT(7)=.5676:
      XT(8)=.4847: XT(9)=.3856: XT(10)= .3113
1630 XT(11)=.2497: XT(12)= .2009: XT(13)= .1684: XT(14)= .1378:XT(15)=.1092
1650 GOSUB 3000
1700 PRINT "Experiencia 100.7"
1710 R0=.0025: R1=.00193: DT=1 : M1=12: N=3: XCA=.001: T0=25: TA=100: H=65.3: KG=.104: YA=.001:
      X0=2.0485
1720 XT(1)=1.73: XT(2)= 1.4877: XT(3)= 1.1785: XT(4)=.8969: XT(5)=.6723: XT(6)= .4969: XT(7)=.39:
      XT(8)=.2977: XT(9)=.232: XT(10)= .1674: XT(11)= .1038: XT(12)=.0726
1750 GOSUB 3000
1800 PRINT "Experiencia 100.8"
1810 R0=.0025: R1=.00193: DT=1 : M1=12: N=3: XCA=.001: T0=25: TA=100: H=65.3: KG=.104: YA=.001:
      X0=2.0221
1820 XT(1)=1.6103: XT(2)= 1.4566: XT(3)= 1.2194: XT(4)=.969: XT(5)=.8248: XT(6)= .6009: XT(7)=.4946:
      XT(8)=.3826: XT(9)=.2821: XT(10)= .1967: XT(11)= .1725
1830 XT(12)= .0981
1850 GOSUB 3000
2000 REM" Datos de 7.5mm"
2010 WX= .65:WC=.35
2100 PRINT "Experiencia 70.11"
2110 R0=.00375: R1=.00302: DT=1 : M1=37: N=5: XCA=.0236: T0=25: TA=70: H=53.69: KG=.088:
      YA=.001: X0=1.2309
2120 XT(1)=1.0348: XT(2)= .9751: XT(3)= .9104: XT(4)= .8432: XT(5)=.7736: XT(6)= .736: XT(7)=.699:
      XT(8)=.6625: XT(9)=.6285: XT(10)= .5945
2130 XT(11)=.5626: XT(12)= .5306: XT(13)= .5053: XT(14)= .4801: XT(15)=.4543: XT(16)= .4286:
      XT(17)=.405: XT(18)=.3814: XT(19)=.3582: XT(20)= .33491: XT(21)=.3188
2140 XT(22)=.3026: XT(23)= .2798: XT(24)= .257: XT(25)= .2396: XT(26)=.2222: XT(27)= .2027:
      XT(28)=.1832: XT(29)=.1687: XT(30)= .1542
2145 XT(31)=.1392: XT(32)= .1243: XT(33)= .111: XT(34)= .0978: XT(35)=8.739999E-02: XT(36)= .077:
      XT(37)=.0654
2150 GOSUB 3000
2200 PRINT "Experiencia 70.12"
2210 R0=.00375: R1=.00302: DT=1 : M1=38: N=5: XCA=.0236: T0=25: TA=70: H=53.69: KG=.088:
      YA=.001: X0=1.3061
2220 XT(1)=1.1606: XT(2)= 1.0782: XT(3)= 1.0364: XT(4)= .9348: XT(5)=.8684: XT(6)= .8173:
      XT(7)=.7807: XT(8)=.7426: XT(9)=.7029: XT(10)= .6602
2230 XT(11)=.6371: XT(12)= .5736: XT(13)= .5439: XT(14)= .5073001: XT(15)=.4638: XT(16)= .4477:
      XT(17)=.4267: XT(18)=.4008: XT(19)=.3772: XT(20)= .3536: XT(21)=.3299
2240 XT(22)=.3062: XT(23)= .2843: XT(24)= .2641: XT(25)= .2439: XT(26)=.2264: XT(27)= .2115:
      XT(28)=.1966: XT(29)=.1802: XT(30)= .1623
2245 XT(31)=.1444: XT(32)= .1301: XT(33)= .1194: XT(34)= .1087: XT(35)=.0994: XT(36)= .0914:
      XT(37)=8.340001E-02: XT(38)=.0731

```



```

2250 GOSUB 3000
2300 PRINT "Experiencia 80.11"
2310 R0=.00375: R1=.00302: DT=1 : M1=27: N=5: XCA=.0143: T0=25: TA=80: H=53.58:
      KG=9.000001E-02: YA=.001: X0=1.4688
2320 XT(1)=1.2857: XT(2)= 1.1533: XT(3)= 1.0327: XT(4)= .9211: XT(5)=.8269: XT(6)= .7411:
      XT(7)=.6637: XT(8)=.5883: XT(9)=.5228001: XT(10)= .4673
2330 XT(11)=.4117: XT(12)= .3661: XT(13)= .3304: XT(14)= .2976: XT(15)=.2668: XT(16)= .2381:
      XT(17)=.2182: XT(18)=.1954: XT(19)=.1696: XT(20)= .1587: XT(21)=.1481
2340 XT(22)=.1376: XT(23)= .1299: XT(24)= .1226: XT(25)= .1201:XT(26)=.1128: XT(27)= .1001
2350 GOSUB 3000
2400 PRINT "Experiencia 80.12"
2410 R0=.00375: R1=.00302: DT=1 : M1=25: N=5: XCA=.0143: T0=25: TA=80: H=53.58:
      KG=9.000001E-02: YA=.001: X0=1.4028
2420 XT(1)=1.2338: XT(2)= 1.1201: XT(3)= 1.0294: XT(4)= .9395: XT(5)=.8502: XT(6)= .7807:
      XT(7)=.717: XT(8)=.6589: XT(9)=.5966: XT(10)= .5399
2430 XT(11)=.4888: XT(12)= .4421: XT(13)= .3996: XT(14)= .3613: XT(15)=.323: XT(16)= .2848:
      XT(17)=.2465: XT(18)=.2256: XT(19)=.2047: XT(20)= .1838: XT(21)=.1672
2440 XT(22)=.1505: XT(23)= .1339: XT(24)= .1208: XT(25)= .1057
2450 GOSUB 3000
2500 PRINT "Experiencia 90.11"
2510 R0=.00375: R1=.00302: DT=1 : M1=22: N=5: XCA=.013: T0=25: TA=90: H=53.58: KG=.088:
      YA=.001: X0=2.12
2520 XT(1)=1.7191: XT(2)= 1.5272: XT(3)= 1.3465: XT(4)= 1.1696: XT(5)=1.0025: XT(6)= .8804:
      XT(7)=.7661: XT(8)=.6597 :XT(9)=.5738: XT(10)= .4983
2530 XT(11)=.4332: XT(12)= .3779: XT(13)= .3296: XT(14)= .2884: XT(15)=.2479: XT(16)= .2149:
      XT(17)=.1894: XT(18)=.1605: XT(19)=.139: XT(20)= .125: XT(21)=.1077: XT(22)= .0903
2550 GOSUB 3000
2600 PRINT "Experiencia 90.12"
2610 R0=.00375: R1=.00302: DT=1 : M1=21: N=5: XCA=.013: T0=25: TA=90: H=53.58: KG=.088:
      YA=.001: X0=2.3299
2620 XT(1)=2.0085: XT(2)= 1.7936: XT(3)= 1.5871: XT(4)= 1.3875: XT(5)=1.1912: XT(6)= 1.0372:
      XT(7)=.9221: XT(8)=.8127: XT(9)=.709: XT(10)= .6526
2630 XT(11)=.581: XT(12)= .4941: XT(13)= .4095: XT(14)= .3424: XT(15)=.2927: XT(16)= .2544:
      XT(17)=.216: XT(18)=.1777: XT(19)=.1461: XT(20)= .1196: XT(21)=.0981
2650 GOSUB 3000
2700 PRINT "Experiencia 100.11"
2710 R0=.00375: R1=.00302: DT=1 : M1=15: N=5: XCA=.001: T0=25: TA=100: H=53.3: KG=.085:
      YA=.001: X0=1.9919
2720 XT(1)=1.6736: XT(2)= 1.4032: XT(3)= 1.2076: XT(4)= .9809: XT(5)=.8232: XT(6)= .6817:
      XT(7)=.5643: XT(8)=.4446: XT(9)=.3422 :XT(10)= .2857
2730 XT(11)=.2294: XT(12)= .2018: XT(13)= .1754: XT(14)= .1424: XT(15)=.1132
2750 GOSUB 3000
2800 PRINT "Experiencia 100.12"
2810 R0=.00375: R1=.00302: DT=1 : M1=15: N=5: XCA=.001: T0=25: TA=100: H=53.3: KG=.085:
      YA=.001: X0=1.5693
2820 XT(1)=1.3174: XT(2)= 1.1152: XT(3)= .958: XT(4)= .7972: XT(5)=.6533: XT(6)= .5279: XT(7)=.427:
      XT(8)=.3431: XT(9)=.2761: XT(10)= .2401
2830 XT(11)=.2031: XT(12)= .165: XT(13)= .1339: XT(14)=.1014
2850 GOSUB 3000
2990 GOTO 5000
3000 REM" Cálculo de las humedades"
3010 EPP1=0: TC(1)=T0: MX=1 : MC=20: XM(1)=X0: XM(0)=X0
3020 WC=(R0^2-R1^2)/R0^2: WX=R1^2/R0^2: RX=R1: XC(1)=X0: XX1(1)=X0: XX1(0)=X0: DR0=R0-R1:
      DRC=DR0: XXA= .936*(XC(1))^1.092
3050 FOR J=1 TO M1
3055 FOR T=1 TO 600
3060 DENT=701+730*XM(T)/(1+XM(T)): DENX= 458+1040*XX1(T)/(1+XX1(T)):
      DENC=DENT/.47-.53/.47*DENX
3070 CP=1790+2360*(XM(T)/(1+XM(T))):LA=7020000!-803000!*LOG(TC(T)+273.16)
3080 DIFX= 1.24E-07*(1+.75*XX1(T))*EXP(-2270/(TC(T)+273.16))*EXP(206*2*RX)
3090 DIFC= A*(1+B*XC(T))*EXP(-C/(TC(T)+273.16))*EXP(468*2*R0)

```

```

3100 DIFXC=(RX/2+DRC/2)*(1+XM(T))/DENT*1/(RX/2*(1+XM(T)))/DIFX/DENX +
      DRC/2*(1+XC(T)*MX/DIFC/DENC))
3110 DIFCA= DRC*(1+XC(T))/2/DENC/(DRC*(1+XC(T))/2/DIFC/DENC+MC/KG)
3115 XCE=XC(T)-DIFCA/DIFC*(XC(T)-XCA)
3116 R0=RX+DRC
3120 XC(T+1)= XC(T)+(1+XC(T))*DT/(R0^2-RX^2)/DENC*(2*DIFXC*DENT/(R0/2)/(1+
      XM(T))*(XX1(T)-XXA)*RX-4*DIFCA/DRC*DENC/(1+XC(T))*(XC(T)-XCA)*R0)
3130 XX1(T+1)= XXA+(XX1(T)-XXA)*EXP(-2.4048^2*DIFX*DT/RX^2)
3138 XM(T+1)= WC*XC(T+1)+WX*XX1(T+1)
3140 TC(T+1)=TC(T)+1/CP/DENT*(H/R0*DT*(TA-TC(T))-LA*(XM(T-1)-XM(T))*DENT/(1+XM(T)))
3145 XM(T+1)= WC*XC(T+1)+WX*XX1(T+1)
3150 XS=XCE*100:TS=TC(T):GOSUB 4000
3160 MC=1/B1*(-A1/LOG(FI))^(1/B1-1)*(A1/(FI*(LOG(FI))^2))
3170 XXA= .936*XC(T+1)^1.092 : MX=1.022*XCE^.092
3180 RX=RX*(1-.37*(XX1(T)-XX1(T+1)))
3190 DRC= DRC*(.478+.218*XC(T+1))/(.478+.218*XC(T))
3200 NEXT T
3210 EPP1= EPP1 + ABS(XM(T)-XT(J))/XT(J)*100
3220 PRINT XT(J), XM(T)
3230 XM(1)=XM(T):XM(0)=XM(T-1):XX1(1)=XX1(T):XC(1)=XC(T):TC(1)=TC(T)
3240 NEXT J
3250 PRINT EPP1/M1
3260 EPP= EPP+EPP1/M1:EPP2= EPP2+EPP1:M=M+M1
3270 RETURN
3995 GOTO 5000

```

4000 REM" **Cálculo de las humedades de equilibrio**"

```

4110 PT=10^(7.05-3090.54/(TS^1.196+500.2))
4120 IF TS<=30 THEN 4230
4130 IF TS<=40 THEN 4240
4140 IF TS<=50 THEN 4250
4150 IF TS<=60 THEN 4260
4160 IF TS<=70 THEN 4270
4170 IF TS<=80 THEN 4280
4180 IF TS<=90 THEN 4290
4190 F11=EXP(-6.84/XS^1.43):PT1=F11*PT: YS=(18/29)*PT1/(760-PT1): A1=6.84:B1=1.43:FI=F11:
      GOTO 4310
4230 F11=EXP(-9.5/XS^1.22):PT1=F11*PT: YS=(18/29)*PT1/(760-PT1): A1=9.5:B1=1.22:FI=F11
4240 TT= 30: A1=9.5:B1=1.22: A2=11.3:B2=1.3: GOTO 4300
4250 TT= 40: A1=11.3:B1=1.3: A2=9.28:B2=1.25: GOTO 4300
4260 TT= 50: A1=9.28:B1=1.25: A2=8.59:B2=1.23: GOTO 4300
4270 TT= 60: A1=8.59:B1=1.23: A2=7.46:B2=1.22: GOTO 4300
4280 TT= 70: A1=7.46:B1=1.22: A2=6.05:B2=1.31: GOTO 4300
4290 TT= 80: A1=6.05:B1=1.31: A2=6.84:B2=1.43: GOTO 4300
4300 F11=EXP(-A1/XS^B1): F12= EXP(-A2/XS^B2)
4305 FI= F11+(F12-F11)*(TS-TT)/10: PT1=FI*PT: YS=(18/29)*PT1/(760-PT1)
4310 IF FI>.05 THEN 4315
4311 FI=.05
4315 IF FI<.95 THEN 4320
4316 FI=.95
4320 RETURN
5000 PRINT "A= ";A;" B= ";B;" C= ";C;" epp= ";EPP/24," epp2= "; EPP2/M
6000 END

```

A.5.4. Palos con corteza, entre 110 y 130°C

```

11 REM" Programa para calculo de 2.5 mm, 5.0 y 7.5 mm a 110,120 y 130°C en palos con corteza"
20 DIM XX1(605), XC(605), TC(605),XM(605),XT(70),XX(6,605),T(6,605), R(6),DR(6),W(6)
30 INPUT "A,B,C";A,B,C

```

```

40 EPP=0:EPP2=0:M=0
50 GOTO 90
90 WC=.47:WX=.53
100 PRINT "Experiencia 110.3"
110 R0=.00125: R1=.000905: DT=1 : M1=7: XCA=0: T0=25: TA=110: H=92.4: KG=.146: YA=.001:
    X0=3.2726
120 XT(1)=2.5641: XT(2)= 1.8761: XT(3)= 1.2735: XT(4)= .7906: XT(5)=.4957: XT(6)= .3419:XT(7)=.0897
140 GOSUB 3000
200 PRINT "Experiencia 110.4"
210 R0=.00125: R1=.000905: DT=1 : M1=7: XCA=0: T0=25: TA=110: H=92.4: KG=.146: YA=.001:
    X0=1.6664
220 XT(1)=1.2082: XT(2)= .9155: XT(3)= .7533: XT(4)= .569: XT(5)=.3718 :XT(6)= .1906: XT(7)=.0904
240 GOSUB 3000
300 PRINT "Experiencia 120.3"
310 R0=.00125: R1=.000905: DT=1 : M1=5: XCA=0: T0=25: TA=120: H=92.4: KG=.146: YA=.001:
    X0=3.6312
320 XT(1)=2.7046: XT(2)= 1.8835: XT(3)=1.2139: XT(4)= .4612: XT(5)=.1079
340 GOSUB 3000
400 PRINT "Experiencia 120.4"
410 R0=.00125: R1=.000905: DT=1 : M1=6: XCA=0: T0=25: TA=120: H=92.4: KG=.146: YA=.001: X0=3.6
420 XT(1)=2.7304: XT(2)= 1.9522: XT(3)= 1.2217: XT(4)= .5913: XT(5)=.1956: XT(6)=.0583
440 GOSUB 3000
500 PRINT "Experiencia 130.3"
510 R0=.00125: R1=.000905: DT=1 : M1=4: XCA=0: T0=25: TA=130: H=92.6: KG=.146: YA=.001:
    X0=3.5043
520 XT(1)=2.5: XT(2)= 1.5826: XT(3)=.6304: XT(4)= .0952
540 GOSUB 3000
600 PRINT "Experiencia 130.4"
610 R0=.00125: R1=.000905: DT=1 : M1=4: XCA=0: T0=25: TA=130: H=92.6: KG=.146: YA=.001:
    X0=1.2991
620 XT(1)=.7443: XT(2)= .3829: XT(3)= .1574: XT(4)= .0484
640 GOSUB 3000
1000 REM " Datos de 5.0mm"
1010 WX=.6:WC=.4
1100 PRINT "Experiencia 110.7"
1110 R0=.0025: R1=.00193: DT=1 : M1=16: N=3: XCA=0: T0=25: TA=110: H=65.3: KG=.103: YA=.001:
    X0=1.9938
1120 XT(1)=1.8124: XT(2)= 1.5787: XT(3)= 1.3672: XT(4)= 1.1669: XT(5)=.9793: XT(6)= .814:
    XT(7)=.6773: XT(8)=.566: XT(9)=.4531: XT(10)= .3593
1130 XT(11)=.2904: XT(12)= .2162: XT(13)= .1654: XT(14)= .1145: XT(15)=.0998: XT(16)= .085
1150 GOSUB 3000
1200 PRINT "Experiencia 110.8"
1210 R0=.0025: R1=.00193: DT=1 : M1=17: N=3: XCA=0: T0=25: TA=110: H=65.3: KG=.103: YA=.001:
    X0=1.6245
1220 XT(1)=1.3842: XT(2)= 1.2103: XT(3)= 1.0213: XT(4)= .8824: XT(5)=.7499: XT(6)= .6308:
    XT(7)=.5207: XT(8)=.428: XT(9)=.3642: XT(10)= .2966
1230 XT(11)=.2416: XT(12)= .2015: XT(13)= .1627: XT(14)= .1239: XT(15)=.1045: XT(16)= .0851:
    XT(17)=.0689
1250 GOSUB 3000
1300 PRINT "Experiencia 120.7"
1310 R0=.0025: R1=.00193: DT=1 : M1=12: N=3: XCA=0: T0=25: TA=120: H=65.3: KG=.103: YA=.001:
    X0=1.9578
1320 XT(1)=1.6378: XT(2)= 1.2908: XT(3)= 1.0357: XT(4)= .8912: XT(5)=.7007: XT(6)= .5289:
    XT(7)=.3897: XT(8)=.2568: XT(9)= .2075
1330 XT(10)=.1565: XT(11)=.102: XT(12)= .0672
1350 GOSUB 3000
1400 PRINT "Experiencia 120.8"
1410 R0=.0025: R1=.00193: DT=1 : M1=12: N=3: XCA=0: T0=25: TA=120: H=65.3: KG=.103:
    YA=.001: X0=1.8639
1420 XT(1)=1.6311: XT(2)= 1.4705: XT(3)= 1.2541: XT(4)=1.188: XT(5)=.9459: XT(6)= .7869:
    XT(7)=.6344: XT(8)=.5015: XT(9)=.3762: XT(10)= .2577

```

1430 XT(11)=.1361: XT(12)= .0738
1450 GOSUB 3000
1500 PRINT "Experiencia 130.7"
1510 R0=.0025: R1=.00193: DT=1 : M1=9: N=3: XCA=0: T0=25: TA=130: H=65.5: KG=.103:
YA=.001: X0=1.9639
1520 XT(1)=1.7236: XT(2)= 1.4885: XT(3)= 1.0359: XT(4)=.7601: XT(5)=.5531: XT(6)= .3184:
XT(7)=.1955: XT(8)=.1266: XT(9)=.0689
1550 GOSUB 3000
1600 PRINT "Experiencia 130.8"
1610 R0=.0025: R1=.00193: DT=1 : M1=9: N=3: XCA=0: T0=25: TA=130: H=65.5: KG=.103: YA=.001:
X0=2.0368
1620 XT(1)=1.6526: XT(2)= 1.2211: XT(3)= .8596: XT(4)=.6772: XT(5)=.5754: XT(6)=.4213: XT(7)=.2856:
XT(8)=.1887: XT(9)=6.580001E-02
1650 GOSUB 3000
2000 REM" Datos de 7.5mm"
2010 WX= .65:WC=.35
2100 PRINT "Experiencia 110.11"
2110 R0=.00375: R1=.00302: DT=1 : M1=22: N=5: XCA=0: T0=25: TA=110: H=53.3: KG=9.000001E-02:
YA=.001: X0=2.0122
2120 XT(1)=1.8385: XT(2)= 1.6007: XT(3)= 1.4204: XT(4)= 1.2688: XT(5)=1.1217: XT(6)= .9723:
XT(7)=.8545: XT(8)=.7367: XT(9)=.6532: XT(10)= .5697
2130 XT(11)=.5078: XT(12)= .4458: XT(13)= .3944: XT(14)=.3429: XT(15)= .3002: XT(16)=.2676:
XT(17)=.2366: XT(18)=.2055: XT(19)=.1701: XT(20)= .1471: XT(21)=.1054
2140 XT(22)=.0861
2150 GOSUB 3000
2200 PRINT "Experiencia 110.12"
2210 R0=.00375: R1=.00302: DT=1 : M1=22: N=5: XCA=0: T0=25: TA=110: H=53.3: KG=9.000001E-02:
YA=.001: X0=1.5317
2220 XT(1)=1.3715: XT(2)= 1.2414: XT(3)= 1.0884: XT(4)= .9781: XT(5)=.8694: XT(6)= .7607:
XT(7)=.678: XT(8)=.5952: XT(9)=.5244: XT(10)= .4537
2230 XT(11)=.3986: XT(12)= .3434: XT(13)= .3101: XT(14)= .2768: XT(15)=.2414: XT(16)= .206:
XT(17)=.18: XT(18)=.154: XT(19)=.1263: XT(20)= .103
2240 XT(21)=.0765: XT(22)= .0556
2250 GOSUB 3000
2300 PRINT "Experiencia 120.11"
2310 R0=.00375: R1=.00302: DT=1 : M1=16: N=5: XCA=0: T0=25: TA=120: H=53.3: KG=9.000001E-02:
YA=.001: X0=1.9746
2320 XT(1)=1.7986: XT(2)= 1.5967: XT(3)= 1.372: XT(4)= 1.1415: XT(5)=.9527: XT(6)= .8308:
XT(7)=.7120: XT(8)=.5931: XT(9)=.4796: XT(10)= .3961
2330 XT(11)=.3456: XT(12)= .2951: XT(13)= .2542: XT(14)= .2033: XT(15)=.1436: XT(16)=.0936
2350 GOSUB 3000
2400 PRINT "Experiencia 120.12"
2410 R0=.00375: R1=.00302: DT=1 : M1=16: N=5: XCA=0: T0=25: TA=120: H=53.3: KG=9.000001E-02:
YA=.001: X0=1.7699
2420 XT(1)=1.6321: XT(2)= 1.4899: XT(3)= 1.3179: XT(4)= 1.1809: XT(5)=.9578: XT(6)= .8047:
XT(7)=.7086: XT(8)=.6125: XT(9)=.5205: XT(10)= .4485
2430 XT(11)=.372: XT(12)= .2956: XT(13)= .2351: XT(14)= .1758: XT(15)= .1271: XT(16)=.0785
2450 GOSUB 3000
2500 PRINT "Experiencia 130.11"
2510 R0=.00375: R1=.00302: DT=1 : M1=13: N=5: XCA=0: T0=25: TA=130: H=53.5: KG=.089: YA=.001:
X0=1.956
2520 XT(1)=1.8079: XT(2)= 1.5726: XT(3)= 1.2707: XT(4)= .9638: XT(5)=.7902: XT(6)= .6533:
XT(7)=.5531: XT(8)=.4834: XT(9)=.4302: XT(10)= .347: XT(11)=.2544: XT(12)= .1854: XT(13)=.1025
2550 GOSUB 3000
2600 PRINT "Experiencia 130.12"
2610 R0=.00375: R1=.00302: DT=1 : M1=13: N=5: XCA=0: T0=25: TA=130: H=53.5: KG=.089: YA=.001:
X0=1.5235
2620 XT(1)=1.3926: XT(2)= 1.2627: XT(3)= 1.0657: XT(4)= .8898: XT(5)=.7405: XT(6)= .5943:
XT(7)=.4756: XT(8)=.357: XT(9)=.2669: XT(10)= .1758
2630 XT(11)=.1392: XT(12)= .1158: XT(13)= .084
2650 GOSUB 3000

```

2990 GOTO 5000
3000 REM" Cálculo de las humedades"
3010 EPP1=0:TC(1)=T0:MX=1 : MC=20: XM(1)=X0:XM(0)=X0
3020 WC=(R0^2-R1^2)/R0^2: WX=R1^2/R0^2: RX=R1: XC(1)=X0:XX1(1)=X0:XX1(0)=X0:
      DR0=R0-R1: DRC=DR0: XXA= .936*(XC(1))^1.092
3050 FOR J=1 TO M1
3055 FOR T=1 TO 300
3060 DENT=701+730*XM(T)/(1+XM(T)): DENX= 458+1040*XX1(T)/(1+XX1(T)):
      DENC=DENT/.47-.53/.47*DENX
3070 CP=1790+2360*(XM(T)/(1+XM(T))):LA=7020000!-803000!*LOG(TC(T)+273.16)
3080 GOSUB 4100
3090 GOSUB 4200
3100 DIFXC=(RX/2+DRC/2)*(1+XM(T))/DENT*1/(RX/2*(1+XM(T))/DIFX/DENX +
      DRC/2*(1+XC(T))*MX/DIFC/DENC))
3110 DIFCA=DRC*(1+XC(T))/2/DENC/(DRC*(1+XC(T))/2/DIFC/DENC+MC/KG)
3116 R0=RX+DRC
3120 XC(T+1)= XC(T)+(1+XC(T))*DT/(R0^2-RX^2)/DENC*(2*DIFXC*DENT/(R0/2)/(1+
      +XM(T))*(XX1(T)-XXA)*RX-4*DIFCA/DRC*DENC/(1+XC(T))*(XC(T)-XCA)*R0)
3130 XX1(T+1)= XXA+(XX1(T)-XXA)*EXP(-2.4048^2*DIFX*DT/RX^2)
3138 XM(T+1)= WC*XC(T+1)+WX*XX1(T+1)
3140 TC(T+1)=TC(T)+1/CP/DENT*(H/R0*DT*(TA-TC(T))-LA*(XM(T-1)-XM(T))*DENT/(1+XM(T)))
3145 XM(T+1)= WC*XC(T+1)+WX*XX1(T+1)
3170 XXA= .936*XC(T+1)^1.092 : MX=1.022*XC(T+1)^.092
3180 RX=RX*(1-.37*(XX1(T)-XX1(T+1)))
3190 DRC= DRC*(.478+.218*XC(T+1))/(.478+.218*XC(T))
3195 REM PRINT T,J,TC(T),DIFC,DIFX
3200 NEXT T
3210 EPP1= EPP1 + ABS(XM(T)-XT(J))/XT(J)*100
3220 PRINT XT(J), XM(T)
3230 XM(1)=XM(T):XX1(1)=XX1(T):XC(1)=XC(T):TC(1)=TC(T):XM(0)=XM(T-1)
3240 NEXT J
3250 PRINT EPP1/M1
3260 EPP= EPP+EPP1/M1:EPP2= EPP2+EPP1:M=M+M1
3270 RETURN
3995 GOTO 5000
4000 REM" Cálculo de los coeficientes de difusión"
4100 IF TC(T)>100 THEN 4120
4110 DIFX= 1.24E-07*(1+.75*XX1(T))*EXP(-2270/(TC(T)+273.16))*EXP(206*2*RX):GOTO 4130
4120 DIFX= .0000118*(1+1.55*XX1(T))*EXP(-3928/(TC(T)+273.16))*EXP(206*2*RX)
4130 RETURN
4200 IF TC(T)>100 THEN 4220
4210 DIFC= .0000995*(1+.28*XC(T))*EXP(-5968/(TC(T)+273.16))*EXP(468*2*R0):GOTO 4230
4220 DIFC= A*(1+B*XC(T))*EXP(-C/(TC(T)+273.16))*EXP(468*2*R0)
4230 RETURN
5000 PRINT "A= ";A;" B= ";B;" C= ";C;" epp= ";EPP/18," epp2= "; EPP2/M
6000 END

```

ANEXO 6: Mediciones realizadas de contenido de clorofilas *a* y *b*

A.6.1. Temperatura= 50 °C

A.6.1.1. $a_w = 0,812$

$C_{A0} = 1,683$

$C_{B0} = 0,853$

$a_{\infty}^* = 4,93$

Tiempo (h)	C_A/C_{A0}	C_B/C_{B0}	L	a	b
0	1,0000	1,0000	40,62	-4,97	28,22
6	0,6600	0,8359	42,97	-2,85	27,79
12	0,4316	0,6964	42,83	-1,51	27,91
18	0,3168	0,6038	41,98	-0,27	27,07
24	0,2460	0,5041	42,11	0,33	27,73
42		0,3482	41,94	1,54	27,11

A.6.1.2. $a_w = 0,690$

$C_{A0} = 1,722$

$C_{B0} = 0,766$

$a_{\infty}^* = 4,10$

Tiempo (h)	C_A/C_{A0}	C_B/C_{B0}	L	a	b
0	1,0000	1,0000	43,46	-6,24	29,12
6	0,8345	0,9073	43,30	-5,12	28,57
12	0,7265	0,8668	43,95	-4,50	28,85
24	0,5331	0,7833	43,75	-3,32	28,79
48	0,3107	0,6462	42,90	-1,76	30,43
72		0,5470	42,88	-0,51	29,16

A.6.1.3. $a_w = 0,509$

$C_{A0} = 1,795$

$C_{B0} = 0,805$

$a_{\infty}^* = 2,67$

Tiempo (h)	C_A/C_{A0}	C_B/C_{B0}	L	a	b
0	1,0000	1,0000	43,79	-6,00	27,05
12	0,8340	0,9304	44,31	-5,29	29,66
24	0,7265	0,8907	44,20	-4,64	29,92
48	0,5376	0,7752	44,26	-3,76	29,00
72	0,4524	0,7242	44,00	-3,07	28,76
120	0,3292	0,6186	43,78	-1,95	29,39
192	0,1788	0,4422	44,59	-0,93	30,59

A.6.1.4. $a_w = 0,305$

$C_{A0} = 1,802$

$C_{B0} = 0,792$

$a_{\infty}^* = -0,25$

Tiempo (h)	C_A/C_{A0}	C_B/C_{B0}	L	a	b
0	1,0000	1,0000	44,83	-6,89	29,87
24	0,8457	0,9242	44,57	-5,59	29,13
48	0,7525	0,8750	43,45	-5,39	30,01
144	0,5627	0,6578	44,38	-3,72	30,00
264	0,2358	0,3005	45,08	-2,53	28,95
408	0,1077	0,1616	46,32	-1,98	27,82

A.6.1.5. $a_w = 0,111$

$C_{A0} = 11,687$

$C_{B0} = 0,764$

$a_{\infty}^* = 0,82$

Tiempo (h)	C_A/C_{A0}	C_B/C_{B0}	L	a	b
0	1,0000	1,0000	44,15	-5,95	27,22
48	0,9419	0,9463	44,51	-5,91	29,77
144	0,5892	0,6047	43,52	-5,43	28,29
264	0,2993	0,3141	43,12	-4,27	27,75
408	0,1393	0,1754	43,45	-3,16	26,46

A.6.2. Temperatura= 60°C

A.6.2.1. $a_w = 0,802$

$C_{A0} = 1,437$

$C_{B0} = 0,743$

$a_{\infty}^* = 6,06$

Tiempo (h)	C_A/C_{A0}	C_B/C_{B0}	L	a	b
0	1,0000	1,0000	40,89	-4,56	27,30
3	0,6792	0,8412	41,17	-2,32	26,55
6	0,3953	0,6231	40,70	-0,42	26,39
10	0,2394	0,4563	40,83	1,09	26,30
15	0,1072	0,2988	41,89	1,76	26,16
21		0,1884	40,09	2,66	25,84

A.6.2.2. $a_w = 0,674$

$C_{A0} = 1,794$

$C_{B0} = 0,713$

$a_{\infty}^* = 4,57$

Tiempo (h)	C_A/C_{A0}	C_B/C_{B0}	L	a	b
0	1,0000	1,0000	42,37	-6,68	27,73
4	0,7659	0,8948	42,03	-4,96	27,30
9	0,5212	0,7658	42,24	-3,44	27,69
15	0,3802	0,7041	42,13	-2,23	27,23
21	0,2709	0,6073	42,45	-1,18	27,89
33	0,1477	0,4516	42,33	0,02	28,22
48	0,0691	0,3226	42,83	0,99	28,70

A.6.2.3. $a_w = 0,497$

$C_{A0} = 1,850$

$C_{B0} = 0,738$

$a_{\infty}^* = 2,63$

Tiempo (h)	C_A/C_{A0}	C_B/C_{B0}	L	a	b
0	1,0000	1,0000	42,30	-6,65	27,61
8	0,6816	0,8442	43,31	-4,76	27,83
16	0,4022	0,6995	42,64	-3,05	28,00
30	0,2741	0,5867	42,03	-1,65	27,27
48	0,1600	0,4661	42,19	-0,79	28,58
72	0,0838	0,3550	42,80	0,10	27,65
96		0,2900	43,06	0,59	28,37

A.6.2.4. $a_w = 0,293$

$C_{A0} = 1,762$

$C_{B0} = 0,708$

$a_{\infty}^* = 1,70$

Tiempo (h)	C_A/C_{A0}	C_B/C_{B0}	L	a	b
0	1,0000	1,0000	42,69	-6,61	27,65
16	0,6873	0,8206	41,93	-4,91	27,03
36	0,4881	0,6653	42,79	-4,32	28,26
60	0,3417	0,5353	42,23	-3,17	27,58
84	0,2457	0,4057	42,50	-2,43	28,23
120	0,1300	0,2585	42,83	-1,64	27,87
172		0,1638	44,05	-0,99	27,92

A.6.2.5. $a_w = 0,110$

$C_{A0} = 1,850$

$C_{B0} = 0,742$

$a_{\infty}^* = 1,74$

Tiempo (h)	C_A/C_{A0}	C_B/C_{B0}	L	a	b
0	1,0000	1,0000	42,02	-6,75	27,73
16	0,7854	0,8208	41,97	-5,85	27,70
36	0,5946	0,6604	41,85	-5,23	27,55
60	0,4103	0,5283	41,35	-4,24	27,39
84	0,3049	0,3827	42,83	-3,74	27,90
120	0,1773	0,2358	42,65	-2,85	26,66
172	0,1027	0,1617	43,17	-2,25	26,51

A.6.3. Temperatura= 70°C

A.6.3.1. $a_w = 0,795$

$C_{A0} = 1,062$

$C_{B0} = 0,603$

$a_{\infty}^* = 5,33$

Tiempo (h)	C_A/C_{A0}	C_B/C_{B0}	L	a	b
0	1,0000	1,0000	38,92	-2,2	25,83
1	0,7881	0,8607	37,24	-0,93	24,87
2	0,6205	0,7977	38,80	-1,06	24,97
3	0,4661	0,6750	38,73	-0,24	25,73
4	0,3804	0,6169	38,45	0,37	25,26
6	0,2655	0,5390	39,92	1,09	25,39
9	0,1120	0,3449	38,79	2,03	24,73
14	0,0640	0,2139	39,81	2,73	24,85

A.6.3.2. $a_w = 0,660$

$C_{A0} = 1,033$

$C_{B0} = 0,517$

$a_{\infty}^* = 6,10$

Tiempo (h)	C_A/C_{A0}	C_B/C_{B0}	L	a	b
0	1,0000	1,0000	43,96	-3,89	28,31
1,5	0,8064	0,9207	44,21	-3,11	28,57
3	0,6283	0,8046	43,42	-2,20	28,93
4,5	0,5024	0,7408	42,84	-1,62	28,74
6,5	0,3659	0,6267	43,57	-0,97	29,16
10	0,2623	0,5532	44,46	-0,11	28,34
13	0,1510	0,4236	43,87	0,96	28,86
18	0,0852	0,3598	44,31	1,37	28,52

A.6.3.3. $a_w = 0,497$

$C_{A0} = 1,042$

$C_{B0} = 0,530$

$a_{\infty}^* = 5,78$

Tiempo (h)	C_A/C_{A0}	C_B/C_{B0}	L	a	b
0	1,0000	1,0000	44,83	-4,08	29,00
2,5	0,7562	0,8396	44,76	-3,22	28,87
5	0,5518	0,7170	44,77	-2,57	29,03
8	0,3656	0,6113	45,46	-1,66	29,98
11,5	0,1987	0,5057	45,21	-0,72	29,51
17		0,3698	45,31	0,35	29,82
26		0,2887	44,53	0,89	30,11

A.6.3.4. $a_w = 0,278$

$C_{A0} = 0,950$

$C_{B0} = 0,473$

$a_{\infty}^* = 4,19$

Tiempo (h)	C_A/C_{A0}	C_B/C_{B0}	L	a	b
0	1,0000	1,0000	45,90	-4,66	30,03
6	0,6958	0,8097	44,95	-3,70	29,88
12	0,4568	0,6448	45,68	-2,98	30,05
18	0,33158	0,5624	45,01	-2,41	30,44
30	0,1505	0,3932	45,68	-1,38	29,39
42	0,0547	0,2241	45,68	-0,72	30,23
56		0,1628	46,65	0,11	30,38
70		0,0951	46,91	0,36	30,20

A.6.3.5. $a_w = 0,108$

$C_{A0} = 0,940$

$C_{B0} = 0,472$

$a_{\infty}^* = 2,46$

Tiempo (h)	C_A/C_{A0}	C_B/C_{B0}	L	a	b
0	1,0000	1,0000	45,67	-4,56	30,10
6	0,7574	0,7967	44,99	-3,92	29,65
12	0,5851	0,6452	45,02	-3,24	30,11
18	0,4681	0,5249	44,69	-2,56	29,00
30	0,1691	0,3154	45,62	-1,66	29,68
42	0,0638	0,1805	45,29	-0,99	29,45
56	0,0309	0,1286	46,59	-0,68	28,78
70	0,0138		47,05	-0,46	29,02

A.6.4. Temperatura= 80°C

A.6.4.1. $a_w = 0,795$

$C_{A0} = 1,249$

$C_{B0} = 0,713$

$a_{\infty}^* = 8,91$

Tiempo (h)	C_A/C_{A0}	C_B/C_{B0}	L	a	b
0	1,0000	1,0000	43,18	-4,28	30,14
0,58	0,8751	0,9130	43,54	-3,56	29,16
1,17	0,7150	0,8205	44,31	-2,62	29,63
2	0,4548	0,6578	43,68	-0,51	28,31
3	0,2362	0,4418	42,98	1,03	28,91
4,25	0,1049	0,2735	42,87	1,83	28,18
6	0,0264	0,1543	42,77	2,91	27,99
8	0,0136	0,0926	42,23	3,24	28,04

A.6.4.2. $a_w = 0,652$

$C_{A0} = 1,211$

$C_{B0} = 0,646$

$a_{\infty}^* = 4,50$

Tiempo (h)	C_A/C_{A0}	C_B/C_{B0}	L	a	b
0	1,0000	1,0000	45,71	-4,47	30,94
0,833	0,8076	0,8994	45,45	-3,48	30,79
1,333	0,5037	0,7152	45,19	-1,25	30,54
1,833	0,3559	0,5867	45,43	-0,59	29,98
3	0,2766	0,5062	45,69	0,26	30,50
4,25	0,1552	0,3638	45,32	1,32	30,12
6	0,0495	0,2368	45,07	2,05	29,33
9	0,0182	0,1455	45,12	2,50	29,57
14	0,0173	0,1130	45,91	2,62	29,38

A.6.4.3. $a_w = 0,514$

$C_{A0} = 1,154$

$C_{B0} = 0,548$

$a_{\infty}^* = 4,79$

Tiempo (h)	C_A/C_{A0}	C_B/C_{B0}	L	a	b
0	1,0000	1,0000	46,60	-5,48	30,11
1,5	0,6820	0,8412	46,91	-3,65	30,46
3	0,4029	0,6788	46,84	-2,19	31,02
4,5	0,2790	0,5931	47,05	-1,42	31,24
6	0,2019	0,5164	47,05	-0,87	31,31
8	0,1464	0,4580	47,53	-0,28	32,07
11	0,0763	0,3595	46,77	0,20	31,50
15	0,0485	0,1496	46,53	1,96	31,56

A.6.4.4. $a_w = 0,260$

$C_{A0} = 1,075$

$C_{B0} = 0,488$

$a_{\infty}^* = 5,14$

Tiempo (h)	C_A/C_{A0}	C_B/C_{B0}	L	a	b
0	1,0000	1,0000	47,13	-5,79	31,67
3	0,7051	0,7971	47,25	-4,83	31,98
6	0,5330	0,6967	46,62	-3,97	32,16
10	0,4167	0,6168	46,30	-3,44	32,06
14	0,2195	0,4098	46,40	-1,80	31,84
18	0,1842	0,3422	46,72	-1,59	31,73
24	0,0995	0,2705	46,84	-0,91	31,63
30	0,0363	0,1701	47,62	-0,38	31,80

A.6.4.5. $a_w = 0,105$

$C_{A0} = 1,084$

$C_{B0} = 0,517$

$a_{\infty}^* = 10,67$

Tiempo (h)	C_A/C_{A0}	C_B/C_{B0}	L	a	b
0	1,0000	1,0000	46,18	-5,69	30,87
3	0,8524	0,8781	47,09	-5,25	32,62
6	0,6827	0,7756	46,06	-4,74	31,78
10	0,5424	0,6499	46,29	-4,24	32,27
14	0,3755	0,5010	45,83	-3,07	31,84
18	0,3109	0,4159	46,36	-2,98	31,98
24	0,2288	0,3133	46,21	-2,28	31,30
30	0,1301	0,2089	46,18	-5,69	30,87

