

Universidad Nacional de Misiones. Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales. Doctorado en Ciencias Aplicadas

Doctorando
Mgter. Santiago Alexi HOLOWATY

Optimización de recursos energéticos en el procesamiento de la Yerba Mate

Tesis de Doctorado presentada para obtener el título de “Doctor en Ciencias Aplicadas”

Director
Dr. Miguel Eduardo Schmalko R.

Posadas, 2017



Esta obra está licenciada bajo Licencia Creative Commons (CC) Atribución-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



UNIVERSIDAD NACIONAL DE MISIONES



FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS QUÍMICAS Y NATURALES

OPTIMIZACIÓN DE RECURSOS ENERGÉTICOS EN EL PROCESAMIENTO DE LA YERBA MATE

Por

Mgter. Santiago Alexi HOLOWATY

Tesis presentada en la Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y
Naturales de la Universidad Nacional de Misiones para optar al grado
académico de

DOCTOR EN CIENCIAS APLICADAS

Posadas, República Argentina

2017

Director

Dr. Miguel Eduardo Schmalko R.

TRIBUNAL EXAMINADOR (Resolución de Consejo Directivo N° 558/17)

Dr. Maiocchi Marcos Gabriel Universidad Nacional del Nordeste

Dr. Herrera José Luis Universidad Nacional de Misiones

Dr. Albani Oscar Alfredo Universidad Nacional de Misiones

DEFENSA ORAL Y PÚBLICA (Disposición Consejo Directivo N° 2021/17)

Posadas, 15 de Diciembre de 2017

OPTIMIZACIÓN DE RECURSOS ENERGÉTICOS EN EL PROCESAMIENTO DE LA YERBA MATE

Mgter. Santiago Alexi Holowaty

Laboratorio de yerba mate y Laboratorio central
Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales
Universidad Nacional de Misiones

COMISIÓN DE SUPERVISIÓN (Resolución Consejo Directivo N° 258-13)

Dr. Laura L. VILLALBA	Universidad Nacional de Misiones
Dr. Mario ROSENBERGER	Universidad Nacional de Misiones
Dr. Marcos MAIOCCHI	Universidad Nacional del Nordeste

CARRERA DE DOCTORADO EN CIENCIAS APLICADAS

Proyecto de Carrera N° 10933/11
Con reconocimiento de la Comisión Nacional de Evaluación y Acreditación Universitaria
(CONEAU) N° 344/11.

Agradecimientos y Dedicatoria

A Dios, mi razón de vida.

A mi Familia, mi motivación, eterno agradecimiento a mi esposa, Noelia; a mis dos hijos, Benjamin y Federico. A mis padres Andres y Laura por inspirarme a la superación.

A Miguel Schmalko, Director de la Tesis por su ayuda incondicional.

A mis colegas y equipo de trabajo: Carolina, Ana, Marcelo, Jonatan y Guillermo por su ayuda y colaboración desinteresada.

Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por financiar el doctorado.

Al Instituto Nacional de la Yerba Mate (INYM), por financiar proyectos a través del PRASY .

A las empresas yerbateras que abrieron sus puertas para realizar determinaciones y estudios, entendiendo la necesidad de apuntar a la excelencia del producto.

Resumen

Durante los últimos años la industria yerbatera se encontró frente a dos problemas referidos a la producción primaria y su impacto en la calidad del producto. El primero de ellos surge de las limitaciones impuestas por mercados externos ante la presencia de hidrocarburos aromáticos policíclicos en la yerba mate. Estos aparecen debido al contacto con gases de combustión de madera durante el procesamiento. Son compuestos cuya presencia en alimentos es cuestionada ya que pueden afectar la salud humana. El segundo problema viene del incremento de costos del combustible junto a la falta de eficiencia térmica en los equipos utilizados. El objetivo de la tesis fue buscar alternativas para afrontar los problemas mencionados y optimizar los procesos que actualmente se utilizan en los secaderos de yerba mate.

Respecto al primer problema, se buscaron tres alternativas basadas en antecedentes sobre métodos de inactivación enzimática, que en el procesamiento de la yerba mate se denomina zapecado. El mismo resulta crucial al evitar pardeamiento de las hojas. Se analizó la factibilidad de obtener un producto sin contacto con los gases de combustión, es decir, libre de humo. Se realizó la caracterización fisicoquímica, sensorial y se estimó el consumo energético requerido para obtener yerba mate con tres tipos de procesos alternativos utilizados tradicionalmente en la industria alimenticia: Zapecado con agua (ZA), Zapecado con vapor (ZV) y zapecado/secado con microondas (SMO). La yerba mate zapecada por métodos alternativos se secó con aire caliente hasta valores menores al 5 % en base húmeda. Las muestras se compararon con yerba mate obtenida por método tradicional de zapecado y secado (MT). La modificación del proceso de zapecado ha influenciado significativamente en la mayoría de los parámetros de calidad, en algunos casos se han encontrado conservación de atributos y en otros casos consecuencias indeseables para la calidad. Los cambios en el color fueron dispares, siendo el de mayor degradación el parámetro asociado a los tonos verdes, el ZV. La pérdida de solubles resultó entre 6,3 % y 7,3% para ZA y ZV respecto a sus métodos de referencia. No se encontraron diferencias para SMO. La cafeína se conservó mejor en SMO y ZV que en los métodos tradicionales, no así en ZA. Los polifenoles totales disminuyeron significativamente en ZA y ZV, y no mostraron diferencias en SMO. En todos los casos, la capacidad

antioxidante fue mayor en los tres métodos alternativos respecto al tradicional. El estudio de minerales Ca, Mg y Fe, mostró que los dos primeros presentan valores mayores solamente en SMO, respecto a métodos tradicionales, y que en ZA y ZV no se observaron diferencias. Para el Fe en todos los casos las diferencias resultaron significativas respecto al zapeado tradicional. Las muestras secas se estacionaron en condiciones de humedad y temperatura controlada para realizar el análisis sensorial. Utilizando el test del triángulo, se determinó que la yerba mate a sometida a SMO no pudo ser diferenciada respecto al método tradicional. Las diferencias encontradas en ZA y ZV no resultaron desagradables.

En cuanto al estudio energético, con la cinética de secado a 100 °C se requirieron entre 40 y 60 minutos adicionales para que las muestras procesadas con ZA y ZV alcancen los mismos valores de humedad (5% base húmeda) que en el método tradicional.

Las posibles soluciones al problema de la baja eficiencia térmica de secado y al contacto con humo, se plantearon en dos etapas. La primera de ellas consistió en el estudio de la eficiencia térmica en los secaderos que utilizan contacto directo, es decir secado con gases de combustión y comparar con equipos que utilizan secado indirecto, libre de humo. La eficiencia en los zapeadores es similar en todos los casos estudiados, y las mayores pérdidas se dan por la falta de sistemas de aislación en las paredes de los tambores metálicos. En las cintas de secado se observó que los sistemas de secado directo utilizan aberturas laterales para ingresar aire frío y mezclar con los gases de combustión, facilitando la operación de secado. Estas aberturas tienen un impacto negativo en la eficiencia térmica, que osciló entre 12% y 27 % en el mejor de los casos, respecto a los valores citados en la bibliografía, mayores al 50 %. Los secaderos que utilizan calentamiento indirecto de aire mejoraron las eficiencias de secado hasta valores cercanos a 40 %.

En una etapa siguiente se realizó la simulación y la optimización del secado en cintas superpuestas. Esto permitió analizar diversas condiciones de secado que podrían mejorar los métodos actuales. En sistemas de cintas superpuestas, los resultados más importantes mostraron que la humedad alcanzada en el secado indirecto respecto al secado con gases de combustión mejora entre 8 y 13 % en las mismas condiciones de

temperatura y humedad inicial. Esto permitiría procesar un porcentaje mayor de materia prima por unidad de tiempo o bien disminuir la temperatura de trabajo, alcanzando contenidos de humedad en la yerba mate canchada similares a los que se obtienen con el secado directo (con gases de combustión) en las mismas condiciones de temperatura y humedad inicial.

Se estudió la posibilidad de recircular una fracción de la corriente gaseosa con el secado indirecto, se estableció si se utiliza hasta 15% de esta corriente se podrían alcanzar valores de humedad menores al 2 % (bh) y cercanos a los encontrados para el secado directo, lo cual sería más que suficiente para asegurar la estabilidad del producto durante su estacionamiento.

Palabras Clave: yerba mate, métodos alternativos, secado, eficiencia, optimización.

Tabla de Contenidos

Agradecimientos y Dedicatoria.....	II
Resumen.....	III
Tabla de Contenidos	VII
Lista de Tablas	XII
Lista de Figuras.....	XIV
Nomenclatura.....	XVIII
Capítulo I. Introducción	1
I.A Introducción	1
I.B Objetivos	3
I.C Justificación.....	4
Capítulo II. Antecedentes	7
II.A La yerba mate. Consideraciones Generales.....	7
II.B Procesamiento Tradicional de la yerba mate.....	9
II.B.1 Recepción de la materia prima.....	9
II.B.2 Zapecado	10
II.B.3 Secado	12
II.B.4 El canchado	14
II.B.5 Estacionamiento de la yerba mate.....	15
II.B.6 Molienda	17
II.C Aspectos fisicoquímicos y sensoriales	20
II.C.1 Polifenoles.....	20
II.C.2 Capacidad antioxidante	22
II.C.3 Cafeína y otras metilxantinas o alcaloides purínicos metilados	23
II.C.4 Color	26

II.C.5	Hidratos de carbono	28
II.C.6	Minerales: calcio, hierro y magnesio	29
II.C.7	Atributos sensoriales. Preferencias globales.....	33
II.C.8	Otros antecedentes	35
II.D	Métodos Alternativos de Procesamiento.....	36
II.D.1	Zapecado	36
II.D.2	Secado con aire caliente.....	37
II.E	Aspectos energéticos del secado	38
II.F	Modelado y Simulación aplicado a la eficiencia térmica del secado de yerba mate. 41	
II.F.1	Modelos Matemáticos en el secado de alimentos.....	41
II.F.2	Estudio sobre la simulación de secaderos de yerba mate.	43
Capítulo III.	Métodos Alternativos de Procesamiento de yerba mate: Aspectos Físicoquímicos y Sensoriales.	44
III.A	Introducción.....	44
III.B	Materiales y métodos.....	45
III.B.1	Muestras de yerba mate.....	45
III.B.2	Secado en Planta Piloto.....	48
III.B.3	Preparación de las muestras	49
III.B.4	Estacionamiento	49
III.B.5	Contenido de humedad.....	52
III.B.6	Parámetros de color.....	52
III.B.7	Contenido de extracto acuoso	52
III.B.8	Contenido de cafeína.....	52
III.B.9	Contenido de polifenoles totales (CPT)	52

III.B.10	Capacidad Antioxidante (CAO).....	53
III.B.11	Cenizas Totales e Insolubles.	53
III.B.12	Minerales (Calcio, Hierro y Magnesio).....	54
III.B.13	Evaluación Sensorial.	54
III.B.14	Análisis Estadísticos.....	56
III.C	Resultados y Discusión.....	57
III.C.1	Parámetros fisicoquímicos.	57
III.C.2	Yerba mate Estacionada destinada a Pruebas Sensoriales.	69
III.C.3	Evaluación sensorial de yerba mate estacionada.....	73
III.C.4	Aspectos energéticos del secado post- zapecado.	74
III.D	Conclusiones.....	75
Capítulo IV.	Aspectos energéticos del secado de yerba mate. Eficiencia.....	78
IV.A	Introducción.....	78
IV.B	Materiales y Métodos	79
IV.B.1	Establecimientos Industriales	79
IV.B.2	Mediciones en la línea de producción	80
IV.B.3	Determinación de la Eficiencia Energética	82
IV.B.4	Ecuaciones de balances en el zapecador y el secadero.	82
	Cálculo de flujos de sólidos	82
	Cálculo de Flujos de Aire	83
	Cálculo de calores	84
IV.C	Resultados y Discusión.....	85
IV.C.1	Zapecadores tradicionales.	85
IV.C.2	Secaderos tipo cinta doble superpuesta con secado directo e indirecto	

IV.D	Conclusiones sobre eficiencia energética.....	92
Capítulo V.	Simulación del secado de yerba mateen secaderos de cintas superpuestas	93
V.A	Introducción	93
V.B	Materiales y Métodos	96
V.B.1	Modelado matemático.....	96
V.B.2	Suposiciones	96
V.B.3	Ecuaciones generales básicas, condiciones iniciales.	97
	Transferencia de calor.....	97
V.B.4	Transferencia de masa.....	99
V.B.5	Método de resolución.....	100
V.B.6	Propiedades	101
V.C	Resultados y Discusión	104
V.C.1	Estudios preliminares de condiciones de secado directo e indirecto con una sola cinta.....	104
V.C.2	Comparación de sistemas de Secado Directo con Indirecto en doble cintas.	105
V.C.3	Secado indirecto: Optimización del proceso.....	109
V.C.4	Sistemas de secado indirecto con recirculación.....	110
V.D	Conclusiones	112
	Conclusiones Generales	114
	Referencias Bibliográficas	116
	Anexos	133
	Anexo 1: Diagrama Psicrométrico.....	134
	Anexo2: Calor de Sorción en hojas a bajas humedades.	135

Lista de Tablas

Tabla II-1: Descriptores de olor en yerba mate referenciados a sustancias	34
Tabla III-1. Tabla comparativa de parámetros fisicoquímicos determinados en yerba mate para cada tipo de procesamiento y su referencia con el método tradicional	61
Tabla III-2(continuación). Tabla comparativa de parámetros fisicoquímicos determinados en yerba mate para cada tipo de procesamiento y su referencia con el método tradicional.	62
Tabla III-3: Valores medios con desviaciones típicas de los parámetros de color en los pares estudiados.	72
Tabla III-4: Resultados del análisis comparativo estadístico con la prueba Z.....	73
Tabla IV-1: Datos requeridos para los balances medidos en los zapecadores.....	85
Tabla IV-2: Distribución y Eficiencia energética en zapecadores industriales que utilizan chip de madera como combustibles comparados con la bibliografía.....	86
Tabla IV-3: Datos medidos en los secaderos de cinta requeridos para los balances ..	87
Tabla IV-4: Distribución y Eficiencia energética en secaderos industriales tipo cinta dobles superpuestas que utilizan chip de madera como combustibles comparados con la bibliografía. (SECADO DIRECTO)	90
Tabla IV-5: Distribución y Eficiencia energética en secaderos industriales tipo cinta dobles superpuestas comparados con la bibliografía. (SECADO INDIRECTO).....	91
Tabla V-1: Propiedades y coeficientes de la fase gaseosa utilizadas en la aplicación del modelo y su fuente	102
Tabla V-2: Propiedades y coeficientes del sólido utilizados en la aplicación del modelo y su fuente.	103
Tabla V-3: Condiciones de secado utilizadas para modelar el contenido de humedad de la yerba mate en el secadero tipo cinta.....	104
Tabla V-4: Condiciones iniciales del Secadero en las dos cintas para la simulación utilizando gases de combustión y aire caliente.	105

Tabla V-5: Resultados principales de la simulación en las diferentes condiciones operativas.	108
Tabla V-6: Condiciones iniciales del Secadero en las dos cintas para la simulación para el mejoramiento en el procesamiento.....	109
Tabla V-7: Condiciones iniciales para los sistemas con recirculación de aire caliente	111
Tabla V-8: Resultados principales de la simulación en las diferentes condiciones operativas del secado indirecto con recirculación.	112

Lista de Figuras

Figura II-1. Árbol de yerba mate sin cosechar de la zona Sur de la Provincia de Misiones.....	7
Figura II-2.Descargade materia prima en la "planchada" o depósito en un establecimiento industrial de procesamiento primario (Secadero).	9
Figura II-3.Alimentaciónmecánica a la cinta transportadora del zapecador.....	10
Figura II-4. Tubo zapecador vista exterior (a)e interior (b) durante el funcionamiento.	10
Figura II-5. Esquemade un secadero de yerba matede tipo doble cinta superpuesta..	13
Figura II-6.yerba mate canchada luego del secado en bolsas de polietileno acondicionadas para el estacionamiento.	15
Figura II-7: Estructura de polifenoles presentes en yerba mate.....	20
Figura II-8:Ácidos mono y di-cafeoil y feruloilquínicos obtenida de Stalmach y col, (2006).....	21
Figura II-9: Estructura de las metilxantinas.....	24
Figura II-10: Estructura de la clorofila	26
Figura II-11: Comparativo de sistemas de quemadores utilizados (a) Hornos a leña (b) Quemadores que utilizan chip de madera.	40
Figura III-1: Esquema de obtención de muestras por diferentes métodos.....	46
Figura III-2: Imagen del zapecador que utiliza agua caliente. Patente V.H. Lorenzo.	47
Figura III-3: Esquema del secadero de planta piloto utilizado en las experiencias de secado.....	48
Figura III-4: Diagrama esquemático de la cámara de estacionamiento acelerado a escala laboratorio.	49
Figura III-5: Imagen del controlador de humedad y temperatura utilizado en la cámara de estacionamiento.....	50

Figura III-6: Ventilador de flujo axial utilizado para la circulación del aire y vapor dentro de la cámara	50
Figura III-7: Imagen del tipo de bolsa utilizada y la yerba mate canchada lista para su estacionamiento.....	51
Figura III-8: Imagen del interior de la cámara de estacionamiento acelerado vacía y en proceso de carga de las muestras (12-15 bolsas de 1kg. aproximadamente).	51
Figura III-9:Obtención del extracto simulando un mate cebado.	54
Figura III-10: Presentación de la prueba sensorial para cada participante.	55
Figura III-11: Plantilla modelo de test del triángulo utilizada en la prueba sensorial.	56
Figura III-12: Tabla de medias del parámetro de color L según el tipo de procesamiento	57
Figura III-13: Tabla de medias del parámetro de color a según el tipo de procesamiento	58
Figura III-14: Tabla de medias del parámetro de color b según el tipo de procesamiento	59
Figura III-15: Tabla de medias del extracto acuoso según el tipo de procesamiento .	60
Figura III-16: Tabla de medias de la Cafeína según el tipo de procesamiento.....	63
Figura III-17: Tabla de medias del contenido de polifenoles totales según el tipo de procesamiento	64
Figura III-18: Tabla de medias de la capacidad antioxidante según el tipo de procesamiento	65
Figura III-19: Tabla de medias del contenido de cenizas totales según el tipo de procesamiento	66
Figura III-20: Tabla de medias del contenido de cenizas insolubles en ácido según el tipo de procesamiento	66
Figura III-21: Tabla de medias del contenido de Calcio según el tipo de procesamiento.	67

Figura III-22: Tabla de medias del contenido de Magnesio según el tipo de procesamiento.	68
Figura III-23: Tabla de medias del contenido de Hierro según el tipo de procesamiento.	68
Figura III-24: Diferencias de color entre muestras estacionadas zapecadas con chip y zapecadas con agua.	69
Figura III-25: Diferencias de color entre muestras estacionadas zapecadas con chip y zapecadas con vapor.	69
Figura III-26: Diferencias de color entre muestras estacionadas zapecadas con chip y procesadas microondas..	70
Figura III-27: Parámetros de color con intervalos de confianza en muestras zapecadas con agua y con el método tradicional.	70
Figura III-28: Parámetros de color en yerba mate estacionada con intervalos de confianza en muestras zapecadas con vapor y con por el método tradicional.....	71
Figura III-29: Cinética de secado según el tipo de zapecado previo	75
Figura IV-1: Esquema de un zapecador y puntos de medición.	80
Figura IV-2: Esquema de un zapecador y puntos de medición.	81
Figura V-1: Esquema del secadero de cintas tipo que se va a simular.	94
Figura V-2: Discretización del secadero como dominios independientes (cada cinta por separado).....	100
Figura V-3: Perfil de humedad promedio en la yerba mate en la cinta superior e inferior utilizando el secado directo(gases de combustión).....	106
Figura V-4: Perfil de humedad promedio en la yerba mate en la cinta superior e inferior utilizando secado indirecto (aire caliente).	106
Figura V-5: Perfil de Temperatura del aire en la cinta superior e inferior utilizando secado directo (gases de combustión).....	107

Figura V-6: Perfil de Temperatura del aire en la cinta superior e inferior utilizando secado indirecto (aire caliente). 107

Nomenclatura

%p/v	Peso de soluto por volumen de solución en términos porcentuales.
%v/v	Volumen de soluto por volumen de solución en términos porcentuales.
AC	Estacionamiento Acelerado.
a_w	Actividad del agua, expresada en valores entre 0 y 1.
bh	Expresión en base húmeda.
bs	Expresión en base seca.
C	Concentración de cualquier componente durante cualquier momento del estacionamiento.
CAO	Capacidad Antioxidante.
C_0	Concentración de cualquier componente a tiempo cero.
CPT	Contenido Total de Polifenoles.
EA	Extracto acuoso de yerba mate (expresado en gramos de solubles/ 100 gramos de sólido seco).
% EAA	Equivalentes de Ácido Ascórbico, porcentual, expresado para la Capacidad Antioxidante
%EAG	Equivalentes de Ácido Gálico, porcentual, expresado para la concentración de Polifenoles Totales.
g/ 100 g ss	Gramos por cada cien gramos de sólidos secos.
g/l	Concentración expresada en gramos por litro de extracto de yerba mate obtenido por la mateada.

L	Medida de volumen en Litros.
p	Valor p (o p-value), asociado a la significación de un test estadístico.
P_v	Presión de vapor de agua ejercida por el sólido.
P_w	Presión de vapor del agua pura a la temperatura del sólido.
R^2	Coefficiente de determinación estadístico (expresado en términos porcentuales).
t	Tiempo (días).
X	Contenido de humedad expresado en gramos de agua por gramos de sólido secos o base seca.
x	Contenido de humedad expresado en gramos de agua por cada gramo de sólido húmedo o en base húmeda.
$X\%$	Contenido de humedad en base seca por 100 gramos de sólido seco.
$x \%$	Contenido de humedad en base seca por 100 gramos de sólido húmedo.
X_m	Humedad de equilibrio de la monocapa.
α	Nivel de significación de un test estadístico.

Capítulo I. Introducción

I.A Introducción

Misiones ha sido y es un gran consumidor de recursos dendroenergéticos provisto por la aparente inagotable selva misionera; la que además de brindar demás bienes y servicios ambientales, ha provisto cifras siderales de madera para ser consumida como fuente de energía: leña y carbón vegetal.

La estructura de consumo industrial ha llegado, hoy día, a niveles críticos e insostenibles. La yerba mate (*Ilex paraguariensis* Saint Hilaire) es uno de los principales cultivos de la Provincia de Misiones. Su producción anual supera las 300.000 toneladas y en esta actividad participan alrededor de 20.000 productores agrícolas, procesándose la misma en unos 300 secaderos y 60 molinos. La mayoría de los secaderos son establecimientos que trabajan a pequeña escala de producción y utilizan leña y chip de madera como fuentes de combustible (Schmalko, 2005; Schmalko y col., 2016).

Su procesamiento comprende 5 etapas: el zapecado, el secado, la molienda gruesa o canchado, el estacionamiento y la molienda fina. Las tres primeras etapas se llevan a cabo en establecimientos denominados “secaderos” y las dos últimas en los denominados “molinos”. En la cosecha, las ramas son manualmente cortadas y transportadas en camiones hasta los establecimientos industriales. La longitud de las ramas varía entre 30 y 60 cm y los diámetros máximos de los palos entre 0,5 y 1 cm (Crotti y col. 2002).

El zapecado se realiza en un equipo tipo un tambor rotatorio con aspas internas (zapecador) en el que las ramas, tal como fueron cosechadas, se ponen en contacto con gases de combustión de leña o chip de madera en corriente paralela. El tiempo de residencia varía entre 2 y 4 minutos y en el mismo las hojas alcanzan temperaturas superiores a los 100°C, lo que produce la inactivación de las enzimas presentes en ellas, que podrían producir su pardeamiento en la etapa de secado. Las ramas son luego introducidas al secadero, generalmente de tipo cinta, que puede tener 1, 2 ó 3 etapas. Cada establecimiento industrial tiene diferentes combinaciones de secaderos. Algunos

utilizan secaderos rotatorios a altas temperaturas en una primera etapa (denominados “pre-secaderos”) y luego uno de cinta, el que generalmente tiene dos o tres etapas superpuestas. Otros establecimientos poseen dos secaderos de una cinta cada uno, colocados en serie, que trabajan a temperaturas diferentes.

En estudios previos se encontró que el contenido de humedad de las hojas alcanza el valor requerido en los primeros 45 minutos de secado, mientras que los palos requieren más de 3 horas (Schmalko y col., 1988). Esta diferencia del tiempo de secado para hojas y palos, hace que la eficiencia energética del procesamiento de la yerba mate sea muy baja. (Ramallo y col., 1996, Schmalko y col., 1996). En la primera etapa de secado, en la que el material está muy húmedo, este valor es un poco menor que el reportado en la bibliografía; mientras que en la segunda etapa de secado, donde se secan principalmente los palos más gruesos la eficiencia es menos que la mitad (20%) de las reportadas (55 %) (Mujundar, 2015; Schmalko y col. 1998; Schmalko y col., 2003; Holowaty y col., 2013).

Hasta hace aproximadamente 8 - 10 años, esta falta de eficiencia energética no fue considerada un problema importante debido al bajo costo de la leña. Sin embargo, la legislación vigente en la Provincia de Misiones, Ley XVI N° 106 (2007) dicta que a partir del año 2013 los establecimientos industriales dedicados a la producción de yerba mate, (y otras agroindustrias) debían reducir en un 50 % el consumo madera nativa, y a partir del año 2015, los secaderos deberán sustituir su consumo total por madera proveniente de bosque implantado (Renovables) o bien con otras fuentes de energía como biomasa.

Por otra parte, una modificación tecnológica por la que se redujo adicionalmente la eficiencia energética de los secaderos es que los mismos están reconvirtiendo su sistema de secado, pasando de utilizar los gases de combustión de la leña (contacto directo con el material) a aire caliente, debido a requerimientos del mercado. Muchos contaminantes químicos se forman durante la combustión de la materia orgánica utilizada como combustible, tanto en el procedimiento de ahumado como en el de secado directo de los alimentos. Entre los ejemplos se encuentran hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs), los cuales son indeseables ya que existen claras evidencias de su mutagenicidad / genotoxicidad en células somáticas de animales de

experimentación, por lo que deben ser considerados potencialmente genotóxicos y carcinogénicos para los humanos (Thea, 2016). Debido al contacto de la yerba mate con los gases de combustión se esperaría la presencia de HAPs en altas concentraciones en el alimento (Mastandrea y col., 2010; Stolyhwo y col., 2005; Pereira y col., 1999; Serpe y col., 2010;).

El paso a sistemas de calentamiento denominados indirectos, por otra parte, permitirá utilizar como combustible los desperdicios de aserraderos (costaneros de pino y eucaliptus en formas de chip, aserrín y viruta de madera), que anteriormente, como el sistema de secado ponía en contacto los gases de combustión con el producto, no podían ser utilizados debido a que se modificarían los parámetros de sabor y aroma deseados de la yerba mate. De esta manera se podría maximizar la utilización de recursos que actualmente se consideran residuos. Desde el punto de vista del proceso, el contenido de agua por unidad de masa del aire es mucho menor al valor encontrado en los gases de combustión, por lo que las condiciones de secado son modificadas al reemplazar los sistemas por secado con aire caliente, por ello se requiere la simulación para establecer cómo afectarán estas nuevas condiciones al producto obtenido, y cuál será la interacción con parámetros estudiados anteriormente.

Tanto la escasez de recursos, el contenido de compuestos HAPs y la Legislación vigente constituyen nuevos factores importantes de riesgo en el sector, llevando a la necesidad de rediseñar y optimizar varios aspectos del procesamiento primario de la yerba mate, acompañando la política de Estado que tiene como uno de sus temas prioritarios relacionado a la producción, la eficiencia energética de agroindustrias.

I.B Objetivos

El presente tema de investigación abordó la problemática de la baja eficiencia térmica en el procesamiento de la yerba mate y pretende buscar alternativas a los métodos actuales de secado, a partir de la utilización de madera proveniente de bosque renovable como combustible, y la búsqueda de un producto sin contacto con los gases de combustión. Es decir, el objetivo del presente trabajo es optimizar el procesamiento primario de la yerba mate desde el punto de vista de la eficiencia térmica en el secado. Como objetivos particulares se plantearon los siguientes:

1. Realizar determinaciones y comparaciones entre productos obtenidos con métodos alternativos de procesamiento, estableciendo posibles diferencias respecto al método tradicional.
2. Determinar las condiciones de secado y de variables de proceso en distintos establecimientos yerbateros de la provincia de Misiones.
3. Determinar la eficiencia de los equipos según el tipo de combustible, y según el sistema de calentamiento utilizado por cada establecimiento yerbatero.
4. Desarrollar un software que permita simular los procesos principales y determinar el óptimo de operación en las nuevas condiciones de trabajo.

I.C Justificación

El trabajo de investigación buscó caracterizar el producto obtenido de los procesos alternativos que la industria pretende utilizar. Seguidamente se determinaron las variables de trabajo “in-situ” de estos nuevos procesos, estudiando las diferentes condiciones de zapeado y secado. Por último se pretendió desarrollar la simulación a través de un software que permita predecir teóricamente el comportamiento de los sistemas de secado en relación al producto y las mejores condiciones de secado en establecimientos yerbateros cuyos sistemas de secado consten de secaderos tipo cinta con cintas superpuestas, y que utilizan aire caliente o gases de combustión de chip de madera en sus procesos. En trabajos anteriores se han determinado las condiciones óptimas, simulando los procesos en secaderos tradicionales con un zapeador que utilizaba leña y en un secadero tipo cinta (de una sola cinta, sin superposición dentro del secadero) con gases de combustión de propano (Peralta y Schmalko, 2007).

De esta manera, se buscó establecer posibles diferencias entre tipo de procesos, las mejores condiciones de operación mediante la simulación del secado y conclusiones acerca de la eficiencia térmica de cada sistema utilizado.

Para llevar adelante el estudio se han planteado cuatro objetivos específicos citados en el apartado anterior.

1. El contacto con gases de combustión resulta indeseado desde el punto de vista de la salud humana, sin embargo, la yerba mate es un producto tradicional argentino. En

ella, el consumidor emplea el término “mantener calidad” y lo asocia a la conservación del aroma característico considerando el ahumado, y es reactivo a cambios. El productor no desea cambiar para no perder lugar en un mercado saturado, sabiendo que el consumidor, ante la gran oferta, puede cambiar de marca si un producto no es de su agrado. La utilización de métodos alternativos de elaboración de yerba mate llevan asociados la posibilidad de cambios en la calidad química, física y sensorial del producto final. Por esta razón, realizar determinaciones y comparaciones entre productos obtenidos con métodos alternativos de procesamiento, estableciendo posibles diferencias respecto al método tradicional resultará fundamental en la factibilidad de los nuevos procesos.

2. La implementación de nuevos procesos, sean de zapecado o secado, requiere modificaciones operativas en los equipos, equipos nuevos o cambios sustanciales. Al determinar las condiciones de secado y de variables de proceso en distintos establecimientos yerbateros, se busca información que permita comparar con los nuevos procesos y cumplir los objetivos posteriores que se plantearon (balances de masa y energía, eficiencias térmicas de secado y valores para la simulación del secado). En trabajos previos se ha observado las elevadas temperaturas de las corrientes gaseosas de salida, que no son reutilizadas como alternativa de recuperación de energía.
3. El estudio de las modificaciones en la etapa de secado se justificará al determinar las condiciones actuales de operación de los equipos. Existen trabajos anteriores que muestran la falta de eficiencia en algunos equipos de secado por contacto directo, sin embargo, no se realizaron estudios de eficiencia energética en secaderos industriales de yerba mate que utilicen aire calentado con intercambiadores de calor (es decir, secado por calentamiento indirecto, sin contacto con gases de combustión). Los datos de eficiencia térmica (relación entre el calor requerido para evaporar agua de la yerba mate y el calor aportado al secadero), así como la distribución energética en las diferentes corrientes de salida, permitirán establecer comparaciones entre sistemas de secado directo e indirecto. También permitirán acotar variables y condiciones operativas para realizar la simulación en diferentes situaciones.

4. Los secaderos de yerba mate operan en general con capacidades entre 6000 y 8000 kg de ramas en su interior, (considerando 1000- 1500 kg/h de ramas secas). Por lo tanto, probar diferentes situaciones de secado resultaría riesgoso para el producto. Por otra parte, la etapa de secado es una operación rudimentaria en la mayoría de los establecimientos, ajustando variables por prueba y error, y en algunos casos no ajustándolas. Por lo tanto, simular los procesos principales resultará necesario y útil para determinar el óptimo de operación en nuevas condiciones de trabajo, reduciendo en forma apreciable sus costos. Necesario porque en la realidad no se pueden fijar variables que se estudiarían utilizando simulación, y útil porque mediante la validación se pueden establecer conclusiones acerca de la fidelidad del modelo utilizado, es decir, si se ajustan a los resultados reales del proceso.

Capítulo II. Antecedentes

II.A La yerba mate. Consideraciones generales

La yerba mate (*Ilex paraguariensis* Saint Hilaire) es originaria de la Selva Subtropical Paranaense, que se localiza en el corazón de la Cuenca del Plata. Se trata de una región de aproximadamente 540.000 km², que comprende parte de Brasil, Paraguay y Argentina. Su presencia en la selva costera es escasa y no se presenta en el litoral atlántico. Preferentemente vegeta a altitudes de 500 a 1500 m, pero es posible encontrarla a altitudes superiores o inferiores a dichos límites, en forma dispersa.

El clima en la zona núcleo se caracteriza por ser subtropical húmedo sin estación seca, con temperaturas medias de 22° C y precipitaciones anuales promedio de 1500 a 2000 mm.

La yerba mate es un árbol que pertenece a la familia de las Aquilofoláceas, de hojas persistentes, coriáceas, oblongas, crenado dentadas, inermes, de 5 a 7 cm de largo y pecioladas. Tiene flores pequeñas, tetrámeras, dioicas, blanquecinas y dispuestas en cimas. Su fruto es carnoso, globoso, de 5 - 7 mm de diámetro y morado oscuro. Florece en primavera y fructifica en verano y otoño (Figura II-1) (Schmalko y col., 2015).



Figura II-1. Árbol de yerba mate sin cosechar de la zona Sur de la Provincia de Misiones.

Los suelos, con mayor presencia de la especie están constituidos por formaciones a partir de basalto, denominados “latosoles”, medianamente profundos a profundos, ácidos, con bajos tenores de nutrientes. También es posible encontrarla en suelos poco profundos o superficiales acompañados de abundante materia orgánica en superficie.

La cosecha de la materia prima se lleva a cabo entre los meses de Marzo a Septiembre y en algunos casos de Diciembre y Enero. Para la producción de hojas y ramas verdes de yerba mate, la fase reproductiva es innecesaria por los recursos nutricionales que requiere y hasta inconveniente por la presencia en la yerba mate canchada de frutos y semillas, razón por la cual se evita cosechar en los meses de Octubre y Noviembre. El mantenimiento de la planta en su fase vegetativa, en las plantaciones tradicionales de baja y media densidad mediante las podas de formación, limpieza y producción, constituye la base fundamental de la cosecha tradicional o “tarefa”.

En términos generales se puede dividir la cosecha o poda de la yerba mate en tres tipos básicos; tradicional mejorada, semi-mecanizada y mecanizada integral. La primera consiste en un conjunto de técnicas de poda manual individualizada, efectuada en diferentes épocas y formas, donde el cosechero o tarefero es pieza fundamental. La segunda abarca la selección, corte de banderas (ramas más elevadas de la planta) y quiebra mecánica. La última consiste en establecer pautas fijas, en cuanto a nivel de corte y su posterior elevación/reducción, tareas que se efectúan en forma mecanizada. La materia prima cosechada se coloca en bolsas de arpilleras denominadas "ponchadas" donde el cosechador o "tarefero" arma los "raídos" o atados de yerba mate para colocarlos en el transporte. En los últimos 6 a 8 años, algunas empresas han implementado el transporte de hoja verde a granel, desde los yerbales al secadero, lo cual ha mejorado las condiciones de transporte de la materia prima (manipulación, disminución de hojas marchitas entre otras cuestiones) así como el tiempo de carga y descarga.

II.B Procesamiento tradicional de la yerba mate

Como se mencionó, el procesamiento puede dividirse en: el primario, realizado en los establecimientos denominados secaderos y que abarca las etapas de zapecado, secado, canchado o molienda gruesa y secundario, que abarca el estacionamiento y la molienda fina.

II.B.1 Recepción de la materia prima

Las ramas cosechadas son transportadas en camiones desde los yerbales hasta la playa de recepción del establecimiento, donde pueden permanecer hasta 12 horas antes de ser procesadas (Figura II-2).

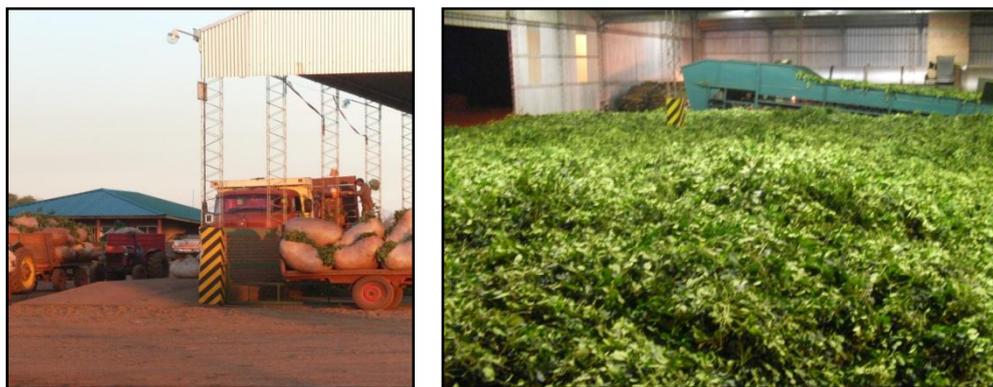


Figura II-2. Descarga de materia prima en la "planchada" o depósito en un establecimiento industrial de procesamiento primario (Secadero).

Las playas de recepción son espacios cubiertos para evitar efectos de agentes externos sobre la materia prima (sol, lluvia). Las ramas que llegan al establecimiento, a granel o en "raídos" (bolsas de aproximadamente 60 - 80 kg), son colocadas en la planchada y aireadas en forma manual o mecánica, con el fin de minimizar las reacciones de pardeamiento enzimático, favorecidas por el aumento de temperatura, originado por el metabolismo de las hojas. El material se introduce en el zapecador por medio de máquinas o de forma manual tal como se muestra en la Figura II-3.



Figura II-3. Alimentación mecánica a la cinta transportadora del zapecador.

II.B.2 Zapecado

En esta etapa, se logra un efecto similar al escaldado en otros vegetales. Tiene el objetivo de producir la inactivación enzimática, evitando la formación de productos de color pardo (en la industria el pardeamiento lo denominan "ardido" o "quemado", y representa la pérdida de la materia prima si llega a producirse en la planchada). Además, se produce una disminución importante de humedad en las ramas, que va desde un contenido medio (en las ramas) inicial de 62 % bh hasta un 32 a 34% bh al final del zapecado. La operación se lleva a cabo en equipos denominados zapecadores: un secadero rotatorio de 8 - 12 m de largo y 1,70 - 2,20 m de diámetro, que gira a bajas revoluciones, presenta una leve inclinación (Figura II-4 a), y en su interior posee aspas que permiten el transporte y remoción continua de las ramas (Figura II-4b).



(a)

(b)

Figura II-4. Tubo zapecador vista exterior (a) e interior (b) durante el funcionamiento.

Este equipo funciona en corrientes paralelas, donde las ramas ingresan por medio de un tornillo alimentador y se ponen en contacto con gases de combustión a elevada temperatura. Durante el movimiento son desplazadas hacia el otro extremo. El tiempo de residencia aproximado es de 2-4 minutos y la capacidad de procesamiento es variable según la industria (entre 1500 y 4500 kg de hoja verde/ hora). Las temperaturas de entrada de los gases oscilan entre 450 °C y 650 °C (Nuñez y Känzig, 1985) y 100 a 150 °C a la salida (Schmalko y Alzamora, 2001; Peralta y Schmalko, 2007). El control que se realiza en los zapecadores es deficiente y se basa en la experiencia de los operarios, variándose ya sea la alimentación del combustible o del material.

En los últimos años se han modificado los sistemas de combustión debido a los requerimientos legales y la escasez de recursos. Los establecimientos han sustituido el uso de leña de monte por sistemas de quemadores con chip de madera de bosque implantado o de restos de aserraderos. Estos novedosos sistemas han permitido mejorar la combustión y tener un mejor control sobre las fluctuaciones de temperatura. Los sistemas de quemado con chip consisten en un tornillo alimentador que lleva el combustible hacia la boca del horno del zapecador (o secadero). El chip cae sobre una corriente de aire producida por un ventilador y junto al tiraje de la chimenea permiten una combustión óptima, homogénea y con menor arrastre de partículas de cenizas (Holowaty y col., 2014). Desde el año 2012 se avanzó en la automatización de los sistemas de combustión y el control del zapecado, por lo que se implementaron termocuplas, sensores de humos y humedad en chimeneas y boquillas de quemadores de chip, mejorando notablemente la calidad de la yerba mate a la salida del zapecador.

En algunos establecimientos se mide la temperatura de salida de los gases; ésta variable 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 (tratamiento excesivo) ni tengan contenido de humedad elevado 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). No obstante, como se mencionó anteriormente, no es uniforme en el contenido de humedad de las hojas a la salida, encontrándose variaciones entre el 10 y el 30 % (bh).

II.B.3 Secado

El secado es una de las formas más antiguas de conservar los alimentos. Debido a esto, probablemente, se pueden encontrar numerosos tipos de equipos de secado. En general, el sólido a secar se pone en contacto con una fuente de calor y/o un gas seco. La fuente de calor puede ser: 1) aire caliente (el más utilizado) obtenido de diferentes formas, el calentamiento indirecto con vapor o gases o mezclando aire con gases a altas temperaturas; 2) radiación, ya sea la solar o generada; 3) por contacto con una superficie sólida caliente; 4) por calentamiento dieléctrico; 5) vapor sobrecalentado; etc.

En el procesamiento de yerba mate se utiliza generalmente la mezcla de gases de combustión de leña o chip con aire caliente. En los últimos años se estudió la posibilidad de implementar sistemas de secado con aire caliente mediante calentamiento indirecto, en el que el aire no está en contacto con los gases de combustión (Holowaty y col., 2015). Existen algunos secaderos de tipo cinta en la provincia de Misiones que lo han implementado en la zafra 2015 y 2016.

La etapa del secado tiene por objeto reducir el contenido de humedad de la yerba mate desde el 29-34% (base húmeda) hasta un 3 a 5 % (bh).

Se utilizan tres tipos de secado (Prat Kricun, 1994):

- 1) Secado de tiempos largos (entre 6 y 18 h): Se lleva a cabo en secaderos discontinuos con flujo a través del lecho, denominados “secaderos de catre” o barbacuá.
- 2) 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”.
- 3) 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 a través de tubos, ubicados en la parte inferior, distribuidos homogéneamente, a una distancia de 2 a 3 m por debajo de la cinta que contiene el material. El tiempo de secado puede variar entre 6 a 18 h.

Los secaderos de “cinta” son secaderos continuos construidos de mampostería, que pueden alcanzar hasta 30 m de longitud y 5 m de ancho (Figura II-5). Pueden existir secaderos de hasta 3 cintas superpuestas y en otros casos cintas consecutivas. El gas de secado se introduce en la parte inferior, pasa a través del lecho de ramas y sale por chimeneas ubicadas en el techo. El tiro puede ser natural, forzado o inducido, utilizándose en este último caso, ventiladores ubicados a la salida.

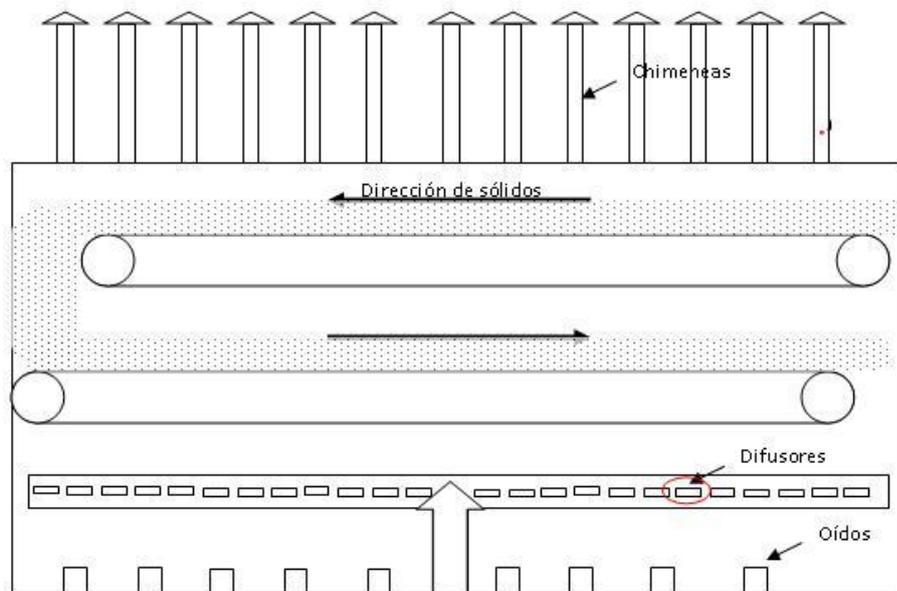


Figura II-5. Esquema de un secadero de yerba mate de tipo doble cinta superpuesta.

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. Un problema que tienen estos secaderos es el diferente contenido de humedad de las ramas en las diferentes alturas del lecho. Esto se debe a que las ramas que están en contacto con la cinta tienen contacto con gases de combustión que están a temperaturas elevadas (cerca de 100 °C); mientras que las que

se encuentran ubicadas en la parte superior del lecho, se exponen a gases de a bajas temperaturas (menores de 60 °C) y humedades relativas mayores. En un trabajo de simulación realizado por Schmalko y col. (2007) encontraron que los contenidos de humedad de los palos variaban entre un 3% y un 40 % (base seca), en los niveles inferior y superior del lecho.

En la industria, cuando se tienen 2 cintas superpuestas, se realiza cierta inversión de la ubicación de las ramas, es decir que las que estaban en la parte superior pasan a estar en la inferior. Si se tienen cintas consecutivas, se realiza un mezclado al pasar de una etapa a la siguiente.

Los secaderos rotatorios o “tubulares” son cilindros que giran, similares a los zapecadores, alimentándose las ramas y los gases de combustión en un extremo (corrientes paralelas). Se caracterizan por trabajar a altas temperaturas y cortos tiempos de residencia (menores a 1 h).

Las temperaturas de trabajo se encuentran en el rango de 80-120 °C en los secaderos de cinta, mientras que en los pre-secaderos y en los secaderos tubulares, las temperaturas son mayores a 200 °C. Los combustibles utilizados son similares a los utilizados en los zapecadores.

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 % en base húmeda (Nuñez y Känzig, 1985).

II.B.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 (Figura II-6).

También en esta etapa se realiza un tamizado (en tamices rotatorios) para eliminar los palos de gran tamaño (1 a 10% del material de entrada). La yerba mate canchada se coloca en bolsas de 40 a 50 kg y guardada en depósitos para su estacionamiento.



Figura II-6. yerba mate canchada luego del secado en bolsas de polietileno acondicionadas para el estacionamiento.

Los rendimientos que se pueden obtener dependen del contenido de humedad del material cosechado y del producto final (la yerba mate Canchada). A su vez, el contenido humedad de la materia prima depende de la época de cosecha y el porcentaje de palo que tiene el producto. Existen variaciones muy importantes del contenido de humedad de la materia prima a lo largo del año, que se detallará en el punto siguiente. El producto en general se comercializa con contenidos de humedad del 4 al 7 % en base húmeda.

De acuerdo a lo manifestado por De Bernardi y Prat Kricun (2001), el rendimiento en el periodo más adecuado para la cosecha (abril a septiembre) tiene valores entre el 34 y 38%; mientras que en periodo estival (diciembre a febrero) el mismo se reduce a valores del 29 al 32%.

II.B.5 Estacionamiento de la yerba mate

El estacionamiento es la etapa del proceso en la que se mantiene la yerba mate durante cierto tiempo para que adquiera las características de sabor y color requeridas por los consumidores. Puede ser natural, acelerado o mixto.

II.B.5.a El estacionamiento natural

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 cemento 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 y de la calidad deseada del producto.

II.B.5.b El estacionamiento acelerado

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 a 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 adecuadamente. La circulación del aire se realiza en forma forzada con ventiladores. En algunos establecimientos se añaden, en algunas ocasiones, otros compuestos (p.ej. anhídrido carbónico, etileno, etc.). Las construcciones son de mampostería o chapa, los pisos de cemento madera y el techo de chapa; éste último se aísla con pinturas especiales para evitar la condensación de humedad y posterior goteo del condensado sobre las bolsas. Para el calentamiento del aire (con intercambiadores) y la adición de vapor se utilizan calderas del tipo humo-tubular.

Un estudio sobre el procesamiento de la yerba mate que incluyó al estacionamiento acelerado fue llevado a cabo por Gómez Vara y col. (1979). 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 a 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 y el resto con estacionamiento natural, el producto se podía considerar aceptable.

Otro 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 y col., 1979) se estudiaron las variables: temperatura, humedad, cantidad de O₂ y CO₂. La humedad del sólido se mantuvo constante controlando la humedad relativa del ambiente 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% bs (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. A partir de estas investigaciones se desarrollaron las cámaras de estacionamiento acelerado de yerba mate.

II.B.5.c Estacionamiento mixto

Un sistema empleado en los últimos tiempos es el estacionamiento mixto, en el cual se controla únicamente la temperatura del depósito. Esta temperatura varía entre 40 y 45 °C. También se controla la temperatura de rocío del aire para evitar la formación de goteras en los depósitos. El tiempo de estacionamiento es menor al del estacionamiento natural, llevándose a cabo entre 6 y 8 meses.

El grado de estacionamiento del producto es controlado mediante análisis sensorial con catadores expertos quienes deciden cuando el producto está en condiciones de ser consumido.

II.B.6 Molienda

Se 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 distintos lugares presenta diferentes gustos, tipos de estacionamiento, sistemas de secado, contenidos de humedad, granulometrías y

tonalidades. 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 en un molino con rotor de cuchillas móviles con una criba de salida inferior con perforaciones del tamaño requerido por el industrial.

En este sistema es imposible controlar los porcentajes de polvo, hojas de distintos tamaños y palitos. Normalmente, debido a la fricción de las partes móviles del equipo con las hojas, se tiene una pulverización no deseada, que aumenta el porcentaje del polvo. Existe un número importante de molineros pequeños que aplican este sistema, aunque el porcentaje de yerba mate procesada en los mismos es bajo respecto del total (Kotik, 1994).

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

La yerba mate canchada llega al molino en bolsas de arpillera o polipropileno de unos 40 -50 kg. Las bolsas son seleccionadas de acuerdo a la mezcla que se quiere realizar. Una vez abiertas, se realiza una inspección visual de su estado y luego el producto se vuelca a una tolva de alimentación, donde se realiza la mezcla de las distintas partidas, las que son depositadas en una zaranda de limpieza. La zaranda es cilíndrica (de 0,60 a 1 m de diámetro) y tiene chapas perforadas de mallas 5x70 mm o mayores. Se utiliza para eliminar los elementos extraños que puedan estar presentes como ser papeles, hilos, alambres y palos con un diámetro excesivo. Luego de esta etapa, el material pasa por trampas magnéticas para retener los objetos metálicos que puedan estar presentes (tuercas, arandelas, pequeños trozos de hierro, etc.) y que puedan causar daños a los equipos de molienda.

En la etapa siguiente se realiza una trituración gruesa, con el fin de uniformar los distintos materiales mezclados en la primera etapa. Esta trituración es llevada a cabo por un tipo especial de molino de martillo, que en la industria se denomina “diabete”. La

separación de hojas y palos se realiza con zarandas rotatorias cilíndricas, que poseen chapas perforadas con aberturas de 3x70 mm.

Los palos son nuevamente separados en dos tamaños. Los de menor tamaño pasan a un molino cortador de engranajes que gira a baja velocidad para evitar una fricción excesiva y por lo tanto la pérdida de la corteza de los palos. A estos equipos se los denomina “molinos picapalos”. Los palos de mayor tamaño son molidos en molinos de estructura más robusta que tienen un rotor con brazos que poseen cuchillas con diferentes ángulos en los extremos. En la parte interior de la carcasa se encuentran cuchillas fijas y en la parte externa, a lo largo de toda la cara lateral del cilindro, se encuentra una chapa perforada con aberturas de aproximadamente 5 mm para controlar el tamaño del material de salida. El rotor gira a velocidades que varían entre 500 y 1000 rpm, generando energía por el corte y la fricción, lo que hace elevar la temperatura de los palitos, produciendo una deshidratación parcial del producto. Ambos materiales son almacenados en el “silo de palitos”.

La molienda de las hojas se realiza con un molino que tiene un rotor con peines o planchuelas y tamiz de salida con perforaciones de aproximadamente 4 mm de diámetro. Las hojas son molidas por la presión ejercida por el rotor sobre las paredes hasta atravesar el tamiz. Otro equipo que también se utiliza en la molienda de hojas, es el denominado “trapiche”, que consiste en un cilindro metálico de baja altura, en cuya base, sobre un lecho de hojas, giran rodillos de hierro cónico de forma troncocónica y de superficie estriada. Estos cilindros trituran por compresión, con poca fricción, lográndose una baja producción de polvo.

La hoja molida se separa en tres fracciones: polvo, hojas de tamaño pequeño y hojas de tamaño grande, las que son almacenadas en silos diferentes. Para la separación se utilizan cilindros rotatorios con dos tipos de tamices o zarandas planas con movimiento vibratorio producido con un eje excéntrico.

Los silos son generalmente cilíndricos con un cuerpo inferior cónico y tienen en su descarga un dosificador volumétrico, para regular la porción de las diferentes fracciones y así obtener la mezcla deseada de polvo, hojas pequeñas, hojas grandes y palos. Estas fracciones se vuelcan en un tornillo sinfin, donde son mezcladas, y luego elevadas hasta una tolva que alimenta la sección de envasado (Kotik, 1994).

II.C Aspectos fisicoquímicos y sensoriales

II.C.1 Polifenoles

Son un grupo de sustancias vegetales muy importantes, que provienen del metabolismo de los hidratos de carbono.

Poseen en su estructura un anillo aromático al que se une un grupo hidroxilo (o más). El grupo hidroxilo puede estar metilado o glicosilado formando un éter o un glicósido respectivamente. Los compuestos fenólicos presentes en la yerba mate son, en su mayoría, ésteres de los ácidos cinámicos (cáfcico y ferúlcico) y ácido quínico (Hess, D., 1980; Gros y col., 1985) (Figura II-7).

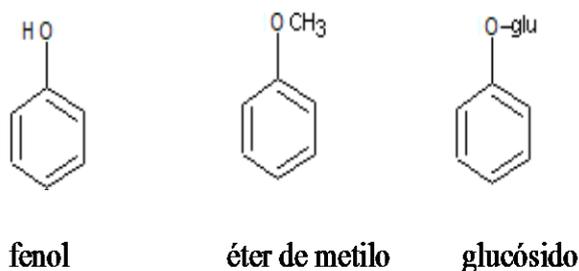


Figura II-7. Estructura de polifenoles presentes en yerba mate.

Todas las sustancias fenólicas (o polifenoles) tienen un creciente interés farmacológico por sus propiedades: como antioxidantes, hipoglucémicos, antivirales o hepatoprotectores (Farah y Donangelo, 2006).

Algunas de las propiedades farmacológicas de la yerba mate se han atribuido al elevado contenido en los derivados del ácido cafeico (ácidos clorogénicos), además de otros compuestos fenólicos (Anesini y col., 2012; Chandra y Mejía, 2004; Filip y col., 2000; Mukarami y col., 2011; Schinella y col., 2000; Zanoelo y col., 2009) (Figura II-8).

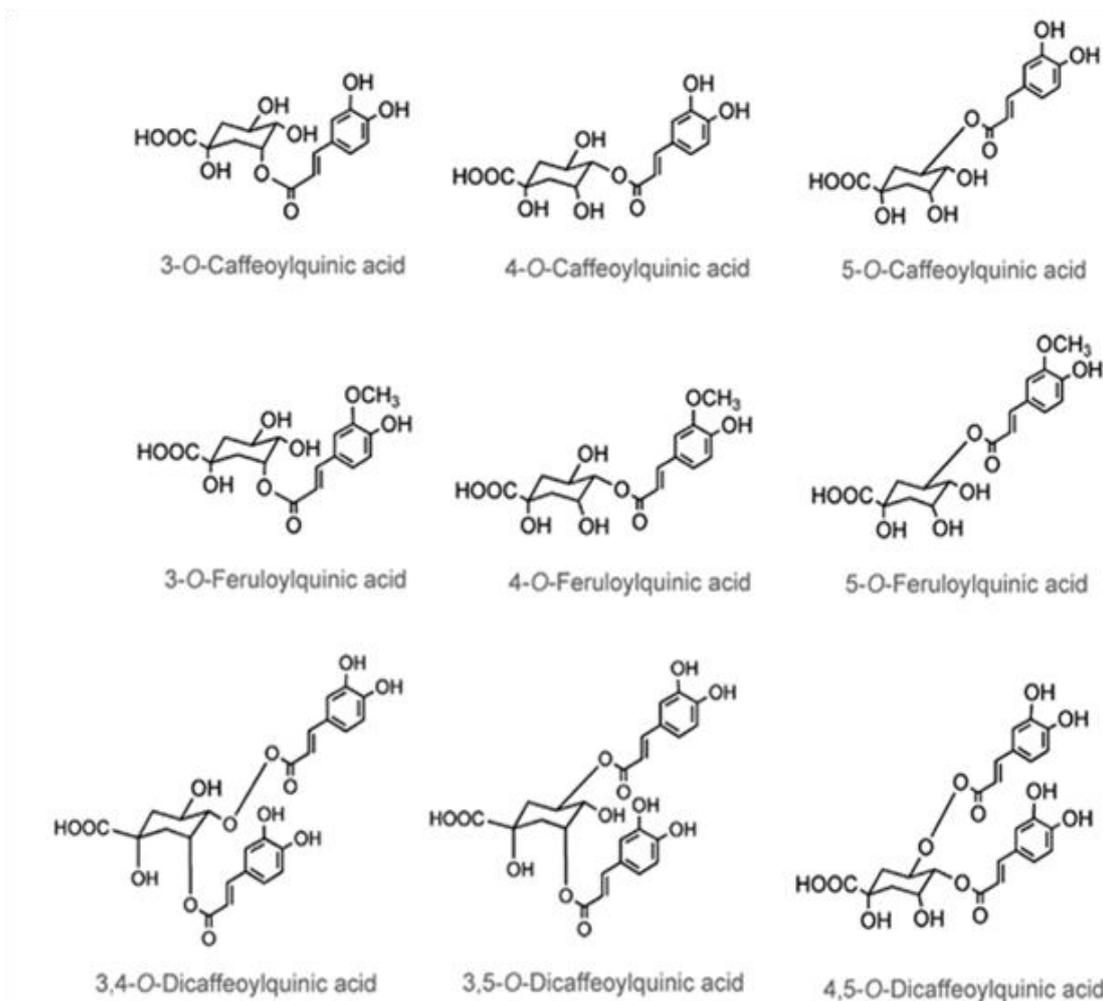


Figura II-8. Ácidos mono y di-cafeoil y feruloilquínicos obtenida de Stalmach y col, (2006).

Durante el procesamiento de la yerba se producen cambios en el contenido de los principios activos. Para los compuestos fenólicos se encontró un ligero aumento (Isolabella y col., 2010) adjudicado a la liberación de compuestos cafeoilquínicos enlazados a metilxantinas por efecto de la elevada temperatura.

Holovatty y col. (2006), han realizado un trabajo en el que estudiaron la variación de estos compuestos durante el procesamiento primario y el estacionamiento natural durante 9 meses en un establecimiento particular. Los resultados obtenidos indicaron que el contenido de polifenoles en las diferentes etapas del procesamiento primario (zapecado, presecado y secado en cinta), no difería en forma estadísticamente

significativa del hallado en el material antes de ser procesado. Tampoco se encontraron variaciones estadísticamente significativas en el contenido de polifenoles durante el estacionamiento natural. Los autores mencionaron que en el procesamiento del té verde, similar al de la yerba mate pero menos drástico, tampoco se encontraron variaciones importantes del contenido de polifenoles.

Escalada y col.(2011) ampliaron el estudio de la variación durante el procesamiento realizando la medición en 19 establecimientos, de 4 regiones y en dos épocas de zafra. Encontraron que las concentraciones de polifenoles y la capacidad antioxidante no dependían del tipo de procesamiento ni de la región, pero sí de la época de cosecha.

Algunos estudios reportan la influencia de los compuestos fenólicos en el sabor amargo(Robichaud y Noble, 1990) y otros asocian el sabor amargo y la astringencia con algunos tipos de compuestos fenólicos (Marquez y col., 2013).

II.C.2 Capacidad antioxidante

Se han encontrado evidencias del rol que desempeñan los radicales libres y otros agentes oxidantes como responsables de enfermedades degenerativas. Las especies reactivas de oxígeno (ROS) como el radical libre hidroxilo ($\bullet\text{OH}$), anión radical superóxido ($\text{O}_2\bullet$) – y el hidroperoxilo ($\text{ROO}\bullet$), causan daños al ADN y pueden oxidar lípidos y proteínas.

La concentración de radicales libres en el organismo es controlada naturalmente por antioxidantes, compuestos que pueden provenir de fuentes endógenas (como la enzima superóxidodismutasa) o incorporarse con la dieta (vitaminas E, C, carotenos y polifenoles, entre otros).

De todas las especies de *Ilex*, la *Ilex paraguariensis* es la que posee mayor capacidad antioxidante, que se correlaciona con la elevada concentración de derivados cafeoilquínicos (Schinella y col., 2000; Filip y col., 2000). El principal responsable de esta actividad es el ácido clorogénico (Anesini y col., 2006), potenciado con la

participación de los flavonoides (en menor concentración) principalmente rutina y cantidades menores de otros (Valerga y col., 2012).

La actividad antioxidante de muchas sustancias se fundamenta en la posibilidad estructural que ofrecen, ya que al reaccionar con radicales libres muy potentes, esas sustancias se transforman en nuevos radicales libres más débiles. De ese modo, los antioxidantes se interponen entre las ROS y las moléculas que son el objeto de su actividad dañina. El nuevo radical debe su poca reactividad a la estabilidad que le aportan los fenómenos de resonancia de los grupos fenólicos o los dobles enlaces conjugados.

Otro aspecto de la diversidad de datos sobre contenido de polifenoles y de capacidad antioxidante, es el uso de distintas sustancias fenólicas, de reconocida actividad, tomadas como referencia. Algunos de los más usados son el ácido clorogénico, ácido gálico, trolox (semejante a vitamina E), ácido ascórbico (vitamina C). La capacidad antioxidante es por lo tanto expresada como equivalentes de las referencias, en distintas unidades.

Bastos y col. (2007) compararon la actividad antioxidante de los extractos acuoso, etanólico y etéreo tanto de yerba mate verde y “tostada” como de té verde, concluyendo que los extractos etanólicos de yerba (verde y tostada), con baja concentración de polifenoles, ofrecen un alto poder antioxidante, igualando a los correspondientes extractos de té, que poseen casi cuatro veces esa concentración de polifenoles. Los polifenoles de las infusiones de yerba mate difieren significativamente de los del té verde debido a la alta concentración de ácido clorogénico y a la ausencia de catequinas (Chandra y Mejía, 2004). Si bien no existen antecedentes de que la capacidad antioxidante está relacionada al sabor de la yerba mate, se realiza el estudio de la variación durante el estacionamiento debido a la importancia que tiene esta propiedad actualmente.

II.C.3 Cafeína y otras metilxantinas o alcaloides purínicos metilados

Los alcaloides poseen estructuras moleculares complejas, con átomos de nitrógeno incluidos o no en anillos heterocíclicos, y propiedades farmacológicas importantes. Su

descripción es compleja ya que no todas las sustancias que comparten esta estructura son consideradas como alcaloides y muchos son descriptos como aminas. La cafeína, teobromina, teofilina son purinas (Gros y col., 1985) que se incluyen dentro del grupo de los alcaloides heterocíclicos (Hess, 1980) por sus propiedades farmacológicas.

Los anillos purínicos son las bases púricas de los ácidos nucleicos. Las metilxantinas (véase la Figura II-9) están presentes en café, té, yerba mate, cacao, guaraná, productos considerados estimulantes del sistema nervioso central. La cafeína y la teobromina son sustancias cuya presencia ha sido reconocida en la yerba mate desde el siglo XIX.

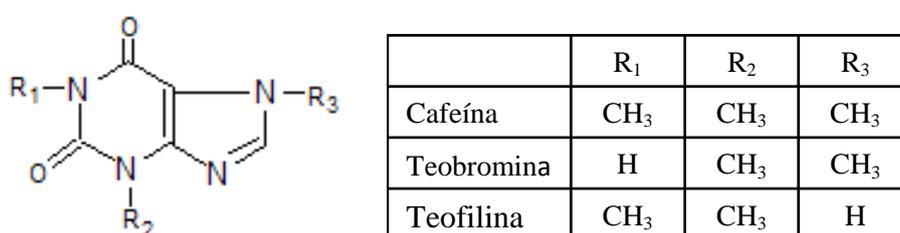


Figura II-9. Estructura de las metilxantinas.

La función natural de las metilxantinas en las plantas sería evitar que los insectos y herbívoros las utilicen como alimento. Se considera a la cafeína como un metabolito anti-alimentario para ciertos animales. Los ataques fúngicos en brotes de té (*camelia sinensis*) producen una acumulación de cafeína, y las plantas con alta concentración de esta sustancia son más resistentes al ataque por hongos. Las sustancias amargas, cumplen la misión de controlar la relación entre las plantas y los insectos, y la cafeína es la sustancia más amarga de las presentes en la yerba mate (Athayde y col., 2000).

Las concentraciones de metilxantinas en hoja de yerba, varían con respecto al suelo, clima, época del año, luminosidad, edad y genética de la planta (Schubert y col., 2006). Algunos autores han indicado una pérdida de hasta un 20% de cafeína durante el procesamiento industrial de la yerba mate, siendo el secado la etapa más influyente (Schmalko y Alzamora, 2001; Esmelindro y col., 2002). En otras investigaciones se halló un aumento en las concentraciones de metilxantinas y de cafeoil-derivados en yerba zapecada, respecto de Yerba verde (Anesini y col., 2012; López y col., 2006; Bastos y col., 2006). Una explicación de esto podría deberse al fenómeno observado por Ashihara y Takeo (2004), donde la cafeína se une al ácido clorogénico y que, debido a

las condiciones de humedad y temperatura del proceso, se podrían liberar diferentes concentraciones de ambos compuestos, o que la acción mecánica de este procesamiento provocaría la ruptura de las células vegetales favoreciendo el proceso extractivo en relación a la hoja verde. Isolabella y col.(2010), hallaron una disminución de las metilxantinas en la etapa de zapecado a secado.

Gomez Vara y col. (1979), realizaron uno de los primeros estudios sobre la variación de la concentración de cafeína durante el procesamiento. Los resultados informados de 10 muestras fueron los siguientes: hoja verde, 1,30%; zapecada, 1,15%; presecadas, 1,01% y canchada, 0,87%. Se tiene por lo tanto, en promedio, un 32% de pérdidas, distribuyéndose los mismos en forma proporcional en cada una de las etapas. Del estudio realizado en el estacionamiento natural (Holvatty y col., 2006), se concluyó que el contenido de cafeína no sufría variaciones detectables. Bertoni y col.(1992),encontraron que las hojas perdían un 30 % de la cafeína en el zapecado y un 15% adicional en el estacionamiento.

En un trabajo posterior llevado a cabo en un secadero de cinta, Schmalko y Alzamora (2001) realizaron mediciones durante 7 semanas. Encontraron un contenido medio inicial del 1,76% y que durante el procesamiento primario, las pérdidas alcanzaban un 30% (8% en el zapecado, 8% en la primera cinta y 14% en la segunda cinta). Resulta llamativo que se pierda más cafeína en la segunda cinta de secado, ya que los gases que ingresan a la misma tienen una temperatura menor. Al ser soluble en agua, probablemente, la cafeína retarda su evaporación siendo transportada hacia los tejidos externos de la hoja, donde se concentra y luego sublima. Este efecto podría acentuarse en la segunda cinta, donde es bajo el contenido de humedad. Esmelindro y col. (2002) encontraron pérdidas similares a las encontradas en la Argentina, aunque los procesos difieran en gran medida entre sí. En dos mediciones realizadas en procesos diferentes, encontraron en un caso un 20% de pérdidas y en el otro un 27%, produciéndose las mismas principalmente en la etapa de zapecado.

II.C.4 Color

El color es una función de la luz que incide sobre un objeto, la reflexión de cierta longitud de onda y la percepción visual de ella. Los colores que se perciben se deben a los pigmentos que se encuentren en el objeto (Kays, 1999).

Los pigmentos vegetales se pueden clasificar de acuerdo a su estructura química como: clorofilas, carotenoides, flavonoides y betalainas. Otros pigmentos son generados por reacciones de decoloración o como consecuencia de la acción enzimática luego de la ruptura de la organización celular, sobre algunos sustratos como los polifenoles (Badui Dergal, 2006; Kays, 1999).

La clorofila es el pigmento que da a las plantas (a algunas algas y a cianobacterias) su coloración verde. Es el pigmento más abundante en las plantas y la utilizan para atrapar la luz necesaria para su proceso de fotosíntesis. La estructura química consta de un ciclo porfirínico (cuatro unidades de pirrol) coordinados con un átomo de magnesio (zona hidrofílica) y una cadena hidrocarbonada de fitol (cadena hidrofóbica) con la que puede establecer relaciones con moléculas como carotenoides y lípidos de membrana. Como se puede ver, los dobles enlaces conjugados le permiten absorber la luz (Figura II - 10).

En las plantas existen la clorofila a y la b. La última difiere de la primera en que posee un grupo formilo (grupo funcional de aldehídos) en lugar del metilo en el carbono 3.

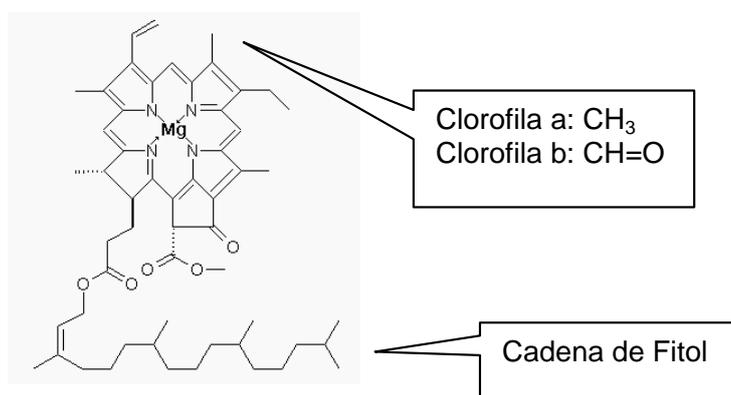


Figura II-10. Estructura de la clorofila

El procesamiento y almacenamiento de los alimentos ocasionan pérdidas de los pigmentos, por lo que su deterioro ha sido estudiado a los fines de preservar los colores como atributo de calidad. Las operaciones de deshidratación producen disrupción de las paredes celulares, cambios físicos y químicos (aumento de la concentración de solutos, pérdidas de color por degradación de pigmentos y actividad enzimática).

En la yerba mate, se ha estudiado la degradación de la clorofila durante el procesamiento y la influencia de la actividad del agua (Morawicki y col., 1999; Schmalko, 2005). Los cambios más importantes son químicos, ya que el zapecado inhibe la acción enzimática.

El color en los sólidos se mide en una escala numérica. En los alimentos se utilizan generalmente dos escalas, la HunterLab y la CIELab. Ambas utilizan las coordenadas L, a y b. La coordenada "L" o luminosidad representa la escala de grises y tiene el valor 0 para el negro y 100 para el blanco. La coordenada "a" tiene valores negativos para el verde y positivos para el rojo; mientras que la coordenada "b" tiene valores negativos para el azul y positivo para el amarillo. La diferencia entre ellos es que el sistema CIELab se expande hacia el amarillo y la HunterLab hacia el azul. Las mediciones se realizan en medidores de color de sólidos y se caracterizan por ser muy rápidas (menores a 5 minutos).

Si bien en la actualidad no se utiliza la medición del color como un parámetro de control rutinario en la industria de la yerba mate, éste representa un parámetro de calidad muy importante en el producto final. El concepto de calidad en el color difiere entre los consumidores argentinos y brasileros. Los primeros prefieren el color verde pálido, relacionado a un valores elevados de "a" (ceranos a cero o positivos), mientras que los brasileros prefieren un color verde intenso, relacionado a altos valores de "-a". El color verde está relacionado con la concentración de la clorofila y la degradación de este compuesto, junto con otras reacciones químicas para lograr el gusto argentino, se logra en el estacionamiento, etapa que no se utiliza en el procesamiento en las industrias brasileras (Känzig y col., 1995; Maccari Junior y col., 2005).

Las variaciones de color en el procesamiento se encuentran principalmente en el parámetro "a" y en menor escala en los parámetros "b" y "L". En estudios realizados en establecimientos argentinos, se encontró que el parámetro "a" varió desde -10 (escala

HunterLab) en la hoja sin procesar a -5 a la salida del zapecador (Schmalko y Alzamora, 2001; Brumovsky y col., 2005). Al medirse la concentración de clorofilas, se encontró que ellas se degradaban en un 90 % durante el procesamiento. La forma de procesar influye en gran medida en el grado de variación del parámetro “a”. Al diferir la misma en las industrias argentinas y brasileras, se encuentran valores de “-a” 3 veces superiores en el producto elaborado en la industria brasileras (escala CIELab). También en trabajos donde se estudiaban diferentes métodos de zapecado, a escala piloto, se encontraron valores muy diferentes de “a” cuando se trataba con agua a altas temperaturas, vapor o microondas (Galeano y col., 2006).

Se han encontrado diferencias importantes entre los valores del parámetro “L” en hojas ($L \approx 40$) y los palos ($L \approx 60$) en yerba mate procesada. Esta diferencia puede ser utilizada para estimar el porcentaje de palo en una muestra elaborada. De hecho, en mediciones realizadas en diferentes mezclas de hojas y palos, en muestras de diferentes procedencias, se encontraron relaciones lineales entre el porcentaje palo y el parámetro “L”, con bajos errores de estimación. Esto hace que en un establecimiento se pueda utilizar la medición del color para estimar el porcentaje de palo, debido a la rapidez y sencillez de su medición (Woniactzuk y Schmalko, 2005; Schmalko y col., 2005). En este trabajo, el material utilizado para su análisis se preparó con un % de palos constante para evitar que las diferentes mezclas sean una causa de variación del parámetro L.

II.C.5 Hidratos de carbono

Bajo esta denominación se agrupan los compuestos que en su forma más simple son moléculas de azúcares (fructosa, glucosa, sacarosa), polímeros con varias moléculas de azúcares simples y el almidón, que es un polímero de la glucosa. Esta definición difiere de la dada para el rotulado nutricional, ya que se calcula restando del contenido de sólidos totales, el contenido de proteínas, fibra cruda, cenizas, humedad y lípidos.

En los primeros trabajos llevados a cabo por Gomez Vara y col. (1979), se determinó la cantidad total de hidratos de carbono en las diferentes etapas del procesamiento. Estos investigadores hallaron una disminución en las etapas del procesamiento primario, 34 % (22% en el zapecado y 12 % en el secado) y no encontraron variaciones apreciables en el estacionamiento natural.

En trabajos posteriores llevados a cabo por Känzig y col.(1987a) y Paredes y col. (2000), se estudiaron las variaciones de la fructosa, glucosa, sacarosa y el almidón en las etapas del procesamiento primario. Encontraron que las hojas que llegaban al secadero, tenían una variabilidad muy importante del contenido de los azúcares, que dependía de la edad de la hoja y de la época de cosecha. También encontraron variaciones importantes de estos compuestos si la materia prima se mantenía en la zona de descarga (planchada) durante un tiempo prolongado previo al zapecado.

Sin embargo, Esmelindro y col. (2002), trabajando con yerba mate de origen brasilero, encontraron pocas variaciones de los contenidos de glucosa en las hojas, y una leve reducción del contenido de sacarosa en el procesamiento. Estos resultados difieren de los informados en los trabajos previamente citados, lo cual probablemente se deba a que trabajaron con yerba mate de origen brasilero utilizando la metodología de procesamiento local con tiempos de residencia menores que los utilizados en Argentina.

Estos autores, encontraron que en el zapecado, se tenía una disminución de los contenidos de fructosa y glucosa y un aumento de la sacarosa. Este comportamiento también fue corroborado con los resultados obtenidos en mediciones realizadas en un sistema de laboratorio que simulaba el zapecado. Estos cambios podrían deberse a algún proceso enzimático de conversión de fructosa y glucosa a sacarosa.

II.C.6 Minerales: calcio, hierro y magnesio¹

Los minerales son sustancias químicas inorgánicas presentes en plantas, animales, microorganismos, algas, hongos y rocas. Unos 25 elementos, de los 90 que existen en la tierra, participan en procesos esenciales para la vida. Los organismos vivos pueden acumular algunos que no son necesarios para su supervivencia (Fenema, 1996). Diversos factores controlan el contenido de minerales en los vegetales. Entre ellos la naturaleza y composición química del suelo, el factor genético y el estadio del vegetal. Los minerales se almacenan en diferentes órganos de la planta en función de las necesidades fisiológicas o como reserva. Las raíces pueden absorberlos en forma selectiva, permitiendo a la planta disponer de aquellos elementos esenciales aunque éstos se hallen en bajas concentraciones en el suelo.

¹Extraído de Schmalko y col., 2016. La yerba mate. Propiedades y Procesamiento. Capítulo 8.

Desde el punto de vista nutricional no se incluye en el término “mineral” al C, H, O y N. Estos elementos son el 99% de los átomos constituyentes de proteínas, azúcares, lípidos, vitaminas, ácidos nucleicos, pigmentos, etc. Los denominados minerales se clasifican en macronutrientes y micronutrientes o elementos trazas. Los de mayor concentración o macronutrientes incluyen al Ca, P, Mg, Na, K y Cl. Los elementos trazas abarcan al Fe, I, Zn, Se, Cr, Cu, F, Co, Mn, Mo, S y Sn. Los denominados ultratrazas incluyen al B, Si y As. Los minerales trazas son componentes esenciales de sistemas enzimáticos (Fenema, 1996; Soetan y col., 2010).

Las formas químicas en las cuales se hallan en los alimentos se denominan especies y varían desde complejos, quelatos o aniones que contienen oxígeno, hasta formas libres. Estas “especies” dependen de las propiedades químicas del elemento en cuestión. El Cl^- , F^- , Na^+ , y K^+ se hallan como formas libres muy solubles en agua. Elementos como el Fe^{+3} o el Ca^{+2} tienen gran afinidad por grupos donadores de electrones, que actúan como ligandos y con los que forman complejos que pueden o no ser solubles en agua. La asociación con ligandos donadores de electrones puede modificar la biodisponibilidad o accesibilidad de los minerales. Algunos quelatos del Fe no permiten su absorción, otros son absorbidos y eliminados por orina sin llegar a liberar el elemento para que pueda ser incorporado a las proteínas férricas del organismo (Fenema, 1996).

La cuantificación de los minerales permite conocer el estado nutricional de las plantas. La composición en minerales de los extractos de yerba mate depende de su concentración en hojas y ramas (Carneiro y col., 2006). En yerba mate elaborada se han hallado niveles de cenizas totales entre 5,70 y 6,84 g/100g (Ybarra y col., 2010).

En los vegetales, el magnesio (Mg) es un importante activador enzimático (Soetan y col., 2010) y está presente en la molécula de clorofila, donde se une a los nitrógenos de los pirroles a través de 4 de los 5 sitios de coordinación que posee. El quinto sitio lo utiliza para unirse a ligandos donadores de electrones, generando asociaciones entre las moléculas de clorofilas o uniéndose a compuestos como fitatos (Golan y col., 2011), oxalatos y fosfatos que pueden complejarlo modificando su absorción en el tracto digestivo de los animales o el hombre. Sin embargo éste mineral tiene menos afinidad que el Ca o Fe para formar estos complejos. Niveles elevados de N en la dieta de fuentes vegetales potencia la excreción de Mg. En algunas plantas la fertilización

conduce a niveles altos de nitrógeno y potasio reduciendo la absorción de Mg por la planta (Soetan y col., 2010). En el organismo humano regula numerosas reacciones enzimáticas, participando en la duplicación del ADN y ARN y en la transmisión del impulso nervioso (Neiverth y col., 2003).

En plantines de yerba mate fertilizados con N-amónico se ha observado un incremento en la absorción de este elemento, en un período comprendido entre los 10 y 25 días (Gaiad y col., 2006). En muestras comerciales el contenido de Mg puede variar desde 360 mg/100gss hasta 940 mg/100gss (Maiocchi y col., 2003; Malik y col., 2008; Carducci y col., 2000). La cantidad extraída en forma de mate caliente y en infusión asciende al 37% y 39% respectivamente, en tanto que para *Ilex dumosa* es de 48% y 52% respectivamente (Maiocchi y col., 2003)

En muestras de café, té y en *Ilex dumosa* las cantidades promedio de Mg son menores a las halladas en yerba mate y en cacao (Maiocchi y col., 2003; Malik y col., 2008).

En cuanto al Calcio (Ca) es esencial para la formación y estabilidad de la pared de las células vegetales. Contribuye a mantener la permeabilidad y la estructura de la membrana celular. Actúa como cofactor enzimático y regulador de la respuesta celular frente a estímulos. Las plantas lo capturan del suelo como catión Ca^{+2} . Se concentra en mayor proporción en el follaje, mientras que el P lo hace en las semillas (Fenema, 1996).

Las variables agronómicas pueden influir en el contenido de calcio durante el crecimiento de las plantas de yerba mate. Se ha observado mayor contenido de calcio en plantas cultivadas a la sombra. La fertilización con urea o cloruro de potasio incrementa los niveles de calcio en plantas jóvenes, siendo mayor el efecto en cultivos bajo sombra. Este efecto es menor cuando se utiliza una combinación de ambos fertilizantes (Jaques y col., 2007). Las diferentes fuentes de N provocan cambios en el contenido de Ca. El uso de nitratos es más efectivo que el uso de urea o amonio (Gaiad y col., 2006).

En el producto comercial el contenido de Ca varía en un rango amplio, desde 430 mg/100g hasta 1200 mg/100g (Heinrichs y Malavolta, 2001; Giulian y col., 2007; Maiocchi y col., 2003; Malik y col., 2008; Scipioni, 2007). La cantidad extraída en el mate caliente y en infusiones es bastante menor a la de otros minerales (Maiocchi y col., 2003; Ramallo y col., 1998).

El hierro (Fe) está comprendido en el grupo de los microelementos. Es uno de los minerales más importantes para humanos y animales. Su carencia ocasiona problemas de salud especialmente en niños y embarazadas, tales como disminución de la resistencia ante infecciones, problemas de aprendizaje y muerte en niños con anemia muy severa. En las plantas, el Fe interviene en la síntesis de la clorofila; en la cadena de transporte de electrones y en la fijación del N (Soetan y col., 2010; Neiverth y col., 2003).

En los alimentos, el hierro se halla asociado a una variedad importante de moléculas o iones de carga negativa, dado que posee 6 sitios de coordinación. Puede decirse que el hierro forma especies de tipo hémico y no hémico. La forma hémica está presente en la hemoglobina y mioglobina, proteínas encargadas del transporte y almacenamiento del O₂ respectivamente en el hombre y los animales. Esta forma es más biodisponible y el hierro es liberado luego de ser absorbido. La forma no hémica, donde el hierro se une a fenoles, citratos, fitatos, proteínas, etc., es la que se encuentra en los vegetales, siendo de baja disponibilidad. La estabilidad de estos complejos depende del pH del medio. Así un medio ácido favorece la reducción del Fe⁺³ a Fe⁺² por la acción de agentes reductores como la vitamina C. Esto explica que las dietas ricas en vitamina C mejoren la absorción del hierro, al tener el Fe⁺² menor tendencia a formar complejos de baja disponibilidad. Algunos elementos interfieren en la absorción del mineral. Esto ocurre cuando se ingieren grandes cantidades de Ca con la dieta. Concentraciones elevadas de P producen el mismo efecto por formación de fosfatos insolubles, al igual que la presencia de plomo (Fenema, 1996).

Las variables agronómicas influyen en el contenido de Fe de la yerba mate. En plantas jóvenes presenta mayor influencia el cultivo bajo sombra que la fertilización con fuentes de K, N o una combinación de ambas, si bien los fertilizantes mejoran la absorción del Fe (Jaques y col., 2006).

En yerba mate comercial las concentraciones de Fe reportadas oscilan desde 4 mg/100g a 28 mg/100gss (Heinrichs y Malavolta, 2001; Giulian y col., 2007; Maiocchi y col., 2003; Malik y col., 2008; Scipioni, 2007). La cantidad de Fe extraída en mate caliente y en infusiones, con respecto a la cantidad total presente en el producto elaborado, son

mayores a las extraídas para Ca pero menores a los de otros minerales (Maiocchi y col., 2003; Ramallo y col., 1998).

II.C.7 Atributos sensoriales. Preferencias globales.

El análisis sensorial es la disciplina científica utilizada para evocar, medir, analizar e interpretar las reacciones a aquellas características de un producto que son percibidas por los sentidos de la vista, olfato, gusto, tacto y oído. Esta definición implica que el análisis sensorial utiliza todos los sentidos y además abarca una variedad de disciplinas científicas como la estadística, la tecnología de alimentos así como la fisiología, psicología y sociología (Meilgaard y col., 1987).

Los tipos de pruebas realizadas se diferencian tanto por los objetivos que se persiguen como por el tipo de analistas a los que se recurre, en virtud de ello existen tres grandes grupos de pruebas sensoriales: las discriminativas, las de preferencia y las descriptivas.

La yerba mate es un producto con características de consumo propias que lo destacan dentro de las infusiones. El modo tradicional de consumo implica la utilización de un recipiente donde se deposita el producto sólido (yerba mate) junto con un elemento de succión (bombilla) del extracto generado por el agregado de agua caliente, sin permitir el paso del sólido, es decir mediante extracciones sólido - líquido.

La operación de extracción es realizada de manera reiterada y sucesiva hasta extraer el mayor porcentaje del extracto del sólido. Normalmente el tamaño del mate es tal que caben entre 40 y 50 gramos de yerba mate y las extracciones se realizan con un volumen de agua caliente de 500 ml aproximadamente, siendo su temperatura no superior a 85 °C. Estos aspectos pueden variar en función a la preferencia del consumidor. También es común el agregado de azúcar, para minimizar el sabor amargo y la astringencia de la yerba mate.

En la yerba mate molida el color puede arrojar información respecto a la maduración o proceso aplicado, un color verde puede denotar una yerba mate con estacionamiento incompleto, el color claro puede ser sinónimo de alto contenido de palo, (especialmente en el polvo). En los estudios de la variación de color en yerba mate realizados por Trela y col. (2013) y Holowaty (2017) determinaron variaciones desde el verde a un amarillo verdoso a lo largo del estacionamiento, el cual es un aspecto que los responsables del

control de calidad tienen en cuenta para que el producto sea adecuado para la comercialización.

Recientemente, Lasekan y col. (2012) han caracterizado algunos descriptores de olor en yerba mate y los han relacionado con componentes volátiles, las cuales aparecen en la Tabla II-1

Tabla II-1: Descriptores de olor en yerba mate referenciados a sustancias

	Descriptor de olor	Sustancia volátil
yerba mate verde	Dulce parecido al éter	2-butoxietanol, α -terpinol
	Dulce como las hojas	1-penten-3-ol
	Dulce como a cigarrillo	eugenol
	Madera	α -Ionona
yerba mate tostada	Humo	Compuestos del fenol
	Tostado	Pirazinas

Asimismo Santa Cruz y col. (2003, 2005) han utilizado otros recursos para la descripción de los olores y aromas en yerba mate, los cuales consisten en utilizar la yerba mate en distintas etapas de la producción o aplicando un mínimo procesamiento a fin de enfatizar el olor buscado.

En la evaluación sensorial de los alimentos se definen tres tipos de análisis según los objetivos y tipo de panel de evaluadores con el que se trabaje. Las pruebas son: las discriminativas, las descriptivas y las afectivas o de preferencia

Tienen como objetivo establecer si dos o más muestras son (o no) diferentes entre sí. Este tipo de pruebas pueden ser realizadas tanto por analistas con entrenamiento como por consumidores sin un entrenamiento previo, siendo, en el segundo caso, necesarios (preferentemente) 30 juicios o personas para que los resultados tengan un peso estadístico suficiente.

Si bien existen diferentes tipos de pruebas discriminativas, como ser: comparación por pares, dúo-trío, A no A, 2 de cinco etc., la más representativa es el test de triángulo, la cual presenta la ventaja de que el número de muestras analizado no es excesivo y asimismo la probabilidad de acertar por azar es del 33%. Dicho test ha sido utilizado con éxito en la selección de analistas para conformar paneles de análisis de yerba mate elaborada, así como también en estudios con consumidores habituales del producto, para buscar diferencias entre muestras con diferentes procesamientos. (Schmalko y col., 2016, Holowaty, 2017)

II.C.8 Otros antecedentes

Se realizaron dos estudios relacionados a las modificaciones que sufren otros componentes en el procesamiento de la yerba mate. Los mismos fueron realizados por Bertoni y col.(1992), quienes trabajaron con yerba mate de origen argentino y Esmelindro y col.(2002), que trabajaron con yerba mate de origen brasilero.

En el trabajo de Bertoni y col.(1992), se dividieron las determinaciones en las etapas de zapecado (donde se trabajó con hojas) y el estacionamiento (donde se trabajó con hojas y palos). En el zapecado, se hallaron variaciones pequeñas en el contenido de proteínas, cenizas solubles y lípidos, aunque hubo variaciones importantes en el perfil de los lípidos presentes. No se encontraron variaciones en el contenido de extracto acuoso. En el estacionamiento se hallaron variaciones importantes en el porcentaje de lípidos (como también en su composición) y escasas variaciones en el contenido de cenizas y proteínas. El extracto acuoso mostró un leve incremento durante el estacionamiento.

II.D Métodos alternativos de procesamiento

II.D.1 Zapecado

La contaminación con HAPs, como parte fundamental en la búsqueda de alternativas de procesamiento, motivó el desarrollo de modificaciones técnicas en los equipos de manufactura tradicional, como son los zapecadores de tambor rotatorio, a fin de evitar el contacto del producto con los gases de combustión.

Las modificaciones ensayadas comprenden el zapecado por inmersión en agua caliente (Xander y col., 2000; Galeano y col., 2006; Galeano, 2010), zapecado por aplicación de vapor de agua (Galeano y col., 2006; Galeano, 2010), zapecado utilizando ondas de alta frecuencia (Pasardi y col., 2006; Laube, 2008) y zapecado utilizando un horno eléctrico de cinta transportadora (Nabechima y col., 2014).

Los ensayos utilizando agua caliente para el zapecado de las ramas de yerba mate se llevaron a cabo tanto a escala de laboratorio (Xander y col., 2000; Galeano y col., 2006; Galeano, 2010), como a escala industrial, en un equipo desarrollado y patentado por el Ing. Víctor Hugo Lorenzo. En este método se requieren temperaturas relativamente bajas y tiempos cortos para la inactivación de las enzimas responsables del deterioro biológico de *Ilex paraguariensis*. Además de no entrar en contacto con humo, las ramas de yerba mate son sometidas a un proceso de limpieza simultáneo al zapecado. Otra ventaja de este método, es que se puede utilizar cualquier tipo de combustible para calentar el agua y que el proceso puede ser fácilmente estandarizado y controlado. A pesar de esto, zapecar la yerba mate con agua caliente también tiene sus desventajas, a saber: a) el exceso de humedad del material a la salida del proceso, lo que podría traer inconvenientes en la etapa de secado, y b) la pérdida de componentes hidrosolubles durante la inmersión en agua, específicamente compuestos los bioactivos de *Ilex paraguariensis* como polifenoles, metilxantinas, entre otros.

El zapecado por aplicación de vapor de agua tiene ventajas similares al método anterior, aunque posee un mayor consumo energético asociado. Un equipo que utiliza vapor de agua para zapecar yerba mate a escala piloto fue desarrollado por el Ing. Martín Barrionuevo durante la ejecución de un proyecto financiado por el Instituto Nacional de la yerba mate (INYM) (Barrionuevo, 2007).

Un tercer método, también desarrollado a escala piloto por el Sr. Norberto H. Laube y financiado por el INYM, consiste en utilizar ondas de alta frecuencia para zapecar y secar las ramas de yerba mate de manera simultánea (Laube, 2008). En este método se utilizan tiempos muy cortos de procesamiento, y sus principales desventajas es que se necesita un sistema de protección y que utiliza energía eléctrica, cuyo costo es muy variable en nuestro país.

Nabechima y col. (2014) diseñaron un horno eléctrico de cinta transportadora para zapecar ramas de yerba mate. Ellos reportan que tras un tratamiento térmico a 255 °C por unos 20-24 s se consiguió la inactivación de las enzimas foliares polifenoloxidasas y peroxisadas. Sin embargo, el tratamiento generó el ardido de algunas de las hojas, por lo que ciertos compuestos de pirólisis, específicamente HAPs podrían tener origen durante el proceso. Esto, sumado al alto costo energético asociado al consumo de electricidad, indica que se requieren más estudios para comprobar la efectividad de este método en el zapecado de la yerba mate.

II.D.2 Secado con aire caliente

En la etapa de zapecado resulta difícil alcanzar las altas temperaturas usualmente utilizadas en el proceso (400 °C – 500 °C) calentando aire en forma indirecta, no así en la etapa de secado, cuya temperatura de operación es cercana a los 100°C. Si se comparan con datos de la bibliografía, existen varios equipos capaces de realizar la operación de secado libre de humo (Mujumdar, 2007), sin embargo, estos implicarían cambios radicales de diseño de equipos y sistemas de calor, que los establecimientos no estarían dispuestos a afrontar, por lo tanto, se estudia solamente la implementación de intercambiadores de calor en la entrada de los edificios. El secado con aire caliente consiste en calentar aire con vapor mediante sistemas de intercambiadores aire –vapor. Existen antecedentes utilizados extensamente en el secado de té en hebras, mediante lecho fluidizado (Temple y Van Boxtel, 1999; Temple y Van Boxtel, 2000) y en otros productos vegetales en ramas como alfalfa (Arinze y col., 2003; Dimitriadis y Akritidis, 2004), en yerba mate existen algunas caracterizaciones de secado en capa fina y en lecho de cintas simples (Zanoelo y col., 2007; Tussolini y col., 2014). Se ha reportado un estudio sobre el tiempo de secado en lecho fluidizado de yerba mate a escala piloto (Zanoelo, 2007), sin embargo, solamente ha sido de caracterización para encontrar

parámetros de transferencia de calor y masa para determinados diámetros equivalentes de partículas.

II.E Aspectos energéticos del secado

El secado es una de las operaciones unitarias importantes en la fabricación de alimentos destinado a reducir la cantidad de humedad en los productos alimenticios a niveles que aseguren la conservación mediante la inhibición de la actividad microbiana y enzimática y el deterioro asociado de la calidad del producto. En términos básicos, el proceso de secado (o deshidratación) implica la eliminación del agua de una materia prima húmeda induciendo cambios de fase de agua de sólido o líquido a una fase de vapor mediante la aplicación de calor (excepto en el caso de deshidratación osmótica durante la cual el agua se elimina sin cambio de fase por la difusión de agua líquida de alimentos sólidos a la solución osmótica a través de una diferencia de presión osmótica). El secado normalmente consume grandes cantidades de energía e imparte alteraciones significativas en los atributos de calidad del producto debido a la exposición a tiempos más prolongados o temperaturas más altas. La creciente competencia de hoy debido a la globalización, junto con la creciente demanda de los consumidores por productos de mejor calidad, seguirá impulsando las innovaciones en el proceso de secado, lo que dará lugar a nuevos esfuerzos para mejorar el rendimiento de las tecnologías existentes y el desarrollo de nuevos conceptos de secado cruciales para la sostenibilidad futura de la industria alimentaria. Sigue siendo un reto importante eliminar el agua del material de la manera más eficiente, con un mejor control de la calidad del producto, un impacto mínimo sobre el medio ambiente, los menores costos de capital y de operación del proceso. Otro desafío surge del hecho de que muchos productos alimenticios con propiedades físicas o químicas muy diversas necesitan ser secados a diferentes escalas de producción y con especificaciones de calidad de producto muy diferentes (Mujumdar y Wu, 2010).

El proceso de secado de materiales alimenticios es extremadamente complejo, involucrando mecanismos transitorios acoplados de procesos de transferencia de calor, masa y movimiento acompañados de transformaciones físicas, químicas y de cambio de fase (Sabarez, 2012). En el secado de materiales alimenticios, se producen

simultáneamente dos mecanismos de transporte distintos, que comprenden la transferencia de calor desde el medio de secado (o fuente de calor) al material alimenticio y el transporte de agua desde el interior del producto sólido hasta su superficie.

Se requiere energía para generar un cambio de fase de agua de un líquido a un vapor (o sólido a vapor) y para activar el movimiento molecular. El aire caliente (el medio de secado más común) se emplea para suministrar calor (por convección) y como gas portador para quitar la humedad. El calor también puede suministrarse por conducción (es decir, a partir de superficies metálicas calentadas como fuente de calor) o radiación, o puede suministrarse volumétricamente colocando el material húmedo en un campo electromagnético de microondas o de radiofrecuencia. El secado es una operación unitaria de elevado consumo de energía debido al alto calor latente de vaporización del agua y la ineficiencia inherente de usar el aire caliente como el medio de secado (más común). Los tres mecanismos de transferencia de energía (convección, conducción y radiación) pueden utilizarse solos o en combinación para suministrar calor de la fuente de calor a los materiales alimenticios. Según Mujumdar y Devahastin (2008), más del 85% de los secadores industriales son del tipo convectivo con aire caliente o gases de combustión directa como medio de secado.

En el secado de yerba mate, desde hace unos 10 años, la eficiencia energética comenzó a ser considerada como parte fundamental en la matriz de costos de producción. Anteriormente esta falta de eficiencia energética no fue considerada un problema significativo debido al bajo costo del combustible, cuya fuente ha sido la selva misionera. Entre las cuestiones principales, las leyes vigentes en la Provincia de Misiones (Ley Prov N° 106/07) protegen al bosque nativo y promueven el uso de leña de monte implantado o el uso de otras fuentes de energía. Esto llevó a los establecimientos industriales a reconsiderar los sistemas de secado que desde inicios de la actividad yerbatera a escala industrial han sido ineficientes (Känzig y col., 1979, Schmalko y col., 2003, Schmalko y col., 2016, Holowaty y col., 2014).

Los primeros cambios implementados en los sistemas de secado fueron las modificaciones de los quemadores. Durante décadas se utilizó el quemado de leña en hornos para generar el calor requerido en el zapecado y el secado. La sustitución de hornos a leña por quemadores de chip permitió, a priori, desde el punto de vista técnico, lograr un mejor control del proceso, utilizar temperaturas menores de trabajo y evitar grandes oscilaciones térmicas e incompleta combustión que se producen generalmente en los sistemas anteriores de secado. (Schmalko y col. 2011).



Figura II-11. Comparativo de sistemas de quemadores utilizados (Izq.) Hornos a leña (Der.) Quemadores que utilizan chip de madera.

La implementación de chip de madera como combustible ha permitido el mejor control del proceso, así como la disminución de cenizas presentes producto de la mala combustión (Holowaty y col., 2014). Significó además mejor control de la humedad de la yerba mate durante todo el proceso, lo cual resulta un aspecto fundamental en la homogeneidad del producto y su estabilidad durante el estacionamiento. (Thea y col., 2011).

Otras cuestiones fundamentales y críticas en el secado son las diferencias físicas entre palos y hojas, las cuales tienen impacto significativo en el tiempo de secado, disminuyendo la eficiencia energética. En la etapa de secado a cinta, donde se secan principalmente los palos más gruesos la eficiencia es menos que la mitad (20%) de las reportadas en otros productos (cerca de 55 %) (Schmalko, 2005).

II.F Modelado y simulación aplicado a la eficiencia térmica del secado de yerba mate.

II.F.1 Modelos matemáticos en el secado de alimentos

La literatura presenta diferentes enfoques para el modelado de diversos procesos de secado. En general, los modelos para el secado de los materiales alimenticios pueden clasificarse en dos grandes grupos: (a) aquellos que implican ecuaciones empíricas y (b) aquellos basados en la física fundamental de los procesos de secado. El nivel de complejidad del modelo debe ser equilibrado con el tiempo y costo requerido para desarrollarlo e implementarlo, asegurando al mismo tiempo una exactitud adecuada. En algunos casos, los modelos son demasiado simplistas (es decir, se desvían significativamente de los procesos reales) o son demasiado complejos para tener alguna aplicación práctica. Por lo tanto, es esencial desarrollar un modelo que sea no sólo significativo y relativamente simple de usar, sino también suficientemente preciso para predecir los procesos (y que puede aplicarse en situaciones industriales más allá de aquellas en las que se realizaron experimentos) (Sabarez, 2015).

Los modelos empíricos (a veces denominados curvas características de la tasa de secado) son específicos del sistema y no pueden generalizarse, porque no implican ninguna base física. El modelo más común en esta categoría es el modelo Page. Los modelos empíricos, resultantes de la simple adaptación a las curvas de secado determinadas experimentalmente (Mujumdar, 2007; Togrul, 2005), están muy extendidos debido a su sencilla implementación y a una adecuada descripción de los procesos específicos de secado. Aunque los modelos empíricos producirían buenos resultados para las aplicaciones de ingeniería en la industria alimentaria, con frecuencia no permiten la simulación de experimentos realizados en condiciones diferentes a las utilizadas para identificar los parámetros del modelo (Ah-Hen y col., 2013). Estos modelos se basan generalmente en hipótesis simplificadoras que pueden no ser aplicables en algunas situaciones (por ejemplo, geometrías de alimentos complejas) y condiciones operativas cambiantes durante el proceso de secado (es decir, escala

industrial). Durante el proceso de secado, la variación del contenido de humedad y la temperatura en función del tiempo y del espacio existen dentro del material, pero esto no está incluido en los modelos empíricos, lo que puede limitar su aplicación práctica al secado. La dependencia de las propiedades termofísicas y de transporte con la temperatura del producto y el contenido de humedad no se tiene en cuenta. Además, los modelos consideran solamente la resistencia interna o externa a la transferencia de masa en un proceso isotérmico (es decir, el análisis de la transferencia de calor se descuida), y la contracción del producto no se considera. Singh y col. (2012), Menges y Ertiken (2006) y Yaldiz y col., 2001 presentaron una revisión exhaustiva de la aplicación de tales modelos en el secado de diversos materiales alimenticios.

El segundo enfoque se basa principalmente en modelos que utilizan las leyes fundamentales de conservación de la masa, el impulso y la energía. Estos modelos mecánicos (clásicos) unen las ecuaciones fundamentales de transporte con los flujos termodinámicamente interactivos y las expresiones de equilibrio de fase (Sabarez, 2015). El enfoque comprende la física involucrada en el proceso de secado, en gran parte representada por el acoplamiento de calor y ecuaciones de transferencia de masa. Para los procesos de secado a base de convección, las tasas externas de transferencia de calor y masa en la interfase aire-alimento podrían desempeñar un papel importante en el control del proceso de secado, dependiendo de las condiciones de secado, que a su vez dependen fuertemente de la velocidad del aire de secado (Sabarez, 2012). Por lo tanto, es importante tener en cuenta la dinámica de transporte momento para mejorar la precisión predictiva del modelo. Además, la incorporación de la dinámica de fluidos en el proceso de secado es importante para caracterizar el efecto del calor y la transferencia de masa del material al medio de secado (es decir, denominado como modelos de equipo) para diseñar un secador para una tarea particular. El modelo de equipo describe el proceso de transferencia en el sistema de secado y predice las condiciones de secado instantáneamente cambiantes del aire en cualquier lugar del sistema de secado (es decir, cámara de secado). Sin embargo, existen diferentes mecanismos que se proponen bajo los modelos mecánicos (por ejemplo, fases únicas o múltiples) y, en general, estos modelos implican una alta complejidad matemática y determinación de demasiados parámetros (Sabarez, 2015).

II.F.2 Estudio sobre la simulación de secaderos de yerba mate.

El estudio sobre el secado de yerba mate se ha enfocado básicamente en la influencia de este proceso sobre sus parámetros de calidad, desde los parámetros químicos hasta los físicos como se ha mencionado en apartados anteriores. Se ha estudiado mediante modelado matemático la degradación de componentes como clorofilas (Schmalko, 2005), y Vitamina C (Ramallo y col., 1998), así mismo se han estudiado con estas herramientas matemáticas diferentes parámetros físicos como coeficientes de difusión (Peralta y Schmalko, 2007; Schmalko y col., 1996; Zanoelo, 2006), los mecanismos de transferencia de calor y masa durante el secado en cinta (Faggion y col., 2016; Schmalko, 2005 entre los más destacados), y los perfiles de temperatura y humedad en el producto, a fin de predecir las condiciones de secado y las humedades finales en distintas condiciones de operación. En trabajos anteriores también se ha simulado la modificación del método de secado aplicando tiempos de reposo (Holowaty y col., 2012), con la perspectiva de mejorar el tiempo de secado a fin de mejorar la eficiencia. Holowaty y col. (2012) determinaron mediante simulación del secado de un lecho de yerba mate en un secadero tipo cinta, que aplicando tiempos de reposo, se podría mejorar hasta un 10 % el tiempo de secado, lo que se traduce en disminución del consumo de combustibles. Recientemente Koop y col. (2015) han simulado un modelo de secadero en lecho de yerba mate en flujo cruzado de una sola cinta, enfocando los resultados al ahorro energético y la estandarización del producto. La heterogeneidad del lecho de ramas agrega una complicación adicional al fenómeno de secado, ya que, como se mencionó anteriormente, las velocidades y mecanismos de secado en hojas y palos son totalmente diferentes, debiéndose considerar cada uno por separado desde el punto de vista fenomenológico y a su vez la interacción de los mismos en el proceso global de secado.

Capítulo III. Métodos alternativos de procesamiento de yerba mate: Aspectos fisicoquímicos y sensoriales.

III.A Introducción

En los últimos tiempos, se realizaron algunos estudios para modificar el método tradicional de procesamiento de la yerba mate. Dos fueron los motivos que llevaron a buscar procesos alternativos. En primer lugar, algunos mercados cuestionaron el consumo de yerba mate por el contacto directo de los gases de combustión de leña con el producto, detectándose niveles elevados de benzo(a)pirenos. En segundo lugar, la escasez de leña de monte nativo y la prohibición de su utilización a partir de 2015, llevó a que se busquen combustibles alternativos.

Respecto al primer problema (presencia de benzo(a)pirenos en el producto), se ensayaron algunas alternativas principalmente en la etapa de zapecado, ya que resulta difícil alcanzar las temperaturas utilizadas (400-500 °C) calentando aire en forma indirecta que sea económicamente aplicable. En la etapa de secado, que trabaja con temperaturas cercanas a los 100 °C, es posible utilizar aire con calentamiento indirecto. Se han realizado ensayos de zapecado utilizando diferentes métodos.

El primero de ellos consiste en utilizar agua caliente para inactivar las enzimas presentes y que podrían producir el pardeamiento en las etapas posteriores. Dicho ensayo se llevó a cabo tanto en el laboratorio como a escala industrial. Este método tiene la ventaja adicional (además de no tener contacto con gases de combustión) que utiliza cortos tiempos y relativamente bajas temperaturas, se puede utilizar cualquier tipo de combustible y permite simultáneamente el lavado del material. Su desventaja principal es que las hojas y los palos salen con mayor humedad y que se pueden perder algunos componentes por lixiviación. (Xander y col., 2000).

El segundo de ellos, utiliza vapor en la inactivación enzimática. Se cuenta con un equipo a escala piloto para realizar los ensayos. Tiene ventajas similares al caso anterior; pero se esperaría que se consuma más energía.

Un tercer método, también desarrollado a escala piloto, consiste en utilizar alta frecuencia para el zapecado y secado (en forma simultánea del material). Se utilizan tiempos muy cortos de procesamiento y sus principales desventajas son que se requiere un sistema de protección y que utiliza energía eléctrica, cuyo costo es muy variable en nuestro país (Pasardi et al, 2006).

Se pretende comparar el producto obtenido con los tres métodos (luego de ser secado y estacionado a escala piloto), y establecer conclusiones acerca de la factibilidad química física y sensorial de los métodos en cuestión.

III.B Materiales y métodos

III.B.1 Muestras de yerba mate

III.B.1.a Obtención de Muestras

Se tomaron tres grupos de muestras de yerba mate. (Figura III-1). Se muestrearon en dos días no consecutivos en un establecimiento industrial de la Provincia de Misiones. En todos los casos se tomaron 2 muestras de cada tipo de proceso por cada día de trabajo. El tamaño de cada muestra consistió en 4 a 6 kg de ramas verdes. El primer grupo procesado fue el método tradicional (MTZA) que serviría como referencia para comparar al zapecado con agua (ZA). Se tomaron ramas zapecadas por contacto directo, método que se describe en la sección anterior y ramas zapecadas con agua caliente (provenientes de un prototipo de la misma industria, que utiliza un intercambiador de calor para calentar agua entre 90 y 95 °C) provenientes del mismo lote. Para el segundo grupo de muestras, se tomaron ramas verdes que serían zapecadas con vapor (ZV) en planta piloto de la Facultad de Ciencias Exactas Químicas y Naturales (UNaM) y las del método tradicional (MTZV) que sirvieron de referencia a este tipo de procesamiento alternativo. El tercer grupo de muestras corresponde a procesamiento integral con microondas (SMO). Para ello se tomaron 4 muestras de ramas verdes del mismo volumen que en los casos anteriores. Con ellas se procedió al secado con microondas a escala laboratorio. Para comparar con el método de referencia, se tomaron del mismo lote de hoja verde destinado a secado con microondas, muestras que luego se zapecaron con chipen el establecimiento industrial, (MTMO) y se secó de manera similar a MTZV y MTZA. Se obtuvieron en total 4 muestras de yerba mate canchada de

aproximadamente 1,5 – 2 kg para cada tipo de procesamiento alternativo (ZA, ZV y SMO) y a su vez 4 muestras de procesamiento con chip como referencia para cada alternativa, (12 muestras procesadas con chip (MT), 4 por cada proceso alternativo). Ningún grupo de muestras tuvo contacto entre si luego de la toma en la planchada de hoja verde del establecimiento.

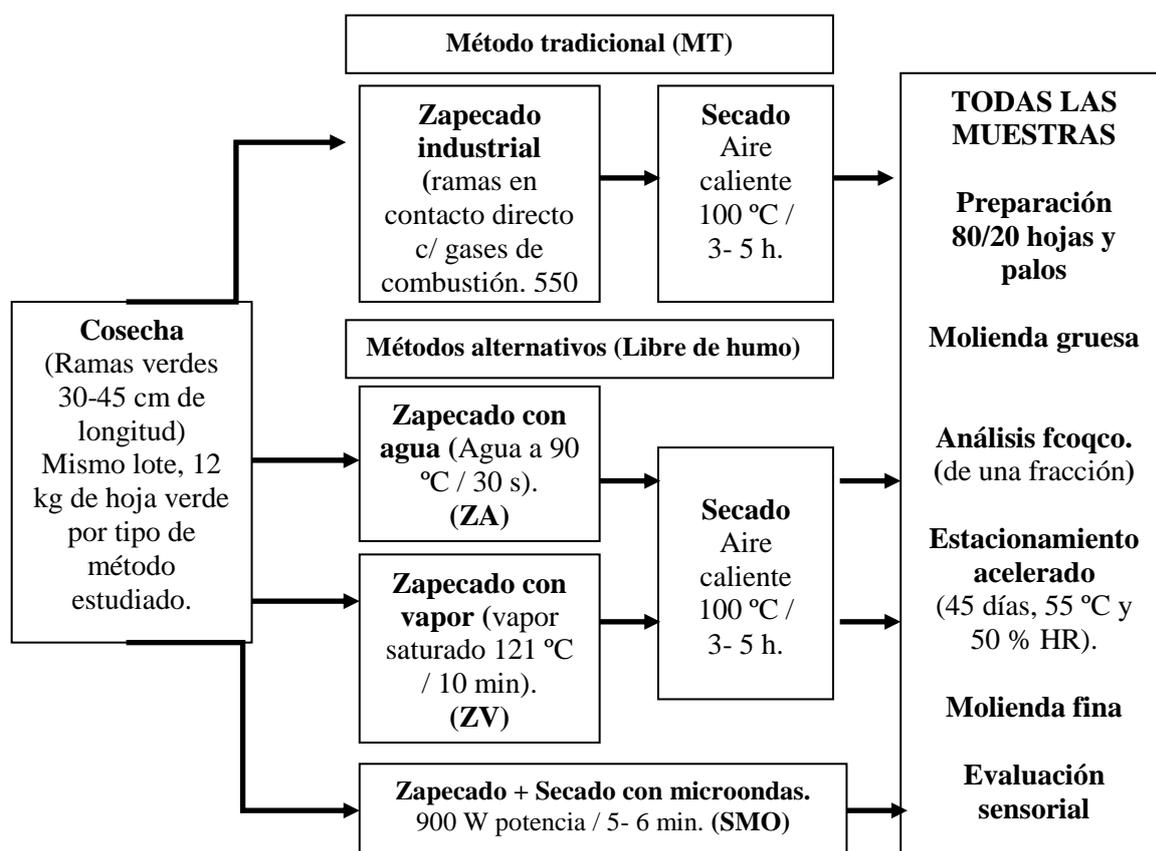


Figura III-1. Esquema de obtención de muestras por diferentes métodos.

III.B.1.b *Zapecado con chip*

El zapecado con chip se refiere al utilizado en el método tradicional. Las muestras se tomaron de una línea de proceso industrial luego del zapecado por contacto directo con gases de combustión generados con chip de madera. Éste fue el método de referencia para comparar los métodos alternativos. Se tomaron ramas en un período de 2 minutos hasta obtener 4 – 6 kg. Se repitió el procedimiento para obtener muestras por duplicado. Cada día de muestreo se obtuvieron 2 bolsas de ramas zapecadas que luego se trasladaron Planta piloto de la FCEQyN a fin de continuar el secado.

III.B.1.c Zapecado con agua

Las muestras zapecadas con agua se obtuvieron de un prototipo instalado en una empresa en la Ciudad de Dos de Mayo, Misiones. El equipo fue patentado por el Ing. Juan Carlos Lorenzo. Consta de una pileta metálica o tolva de 1,5 m de ancho por 4 m de largo y hasta 60 cm de profundidad de forma trapezoidal, con dos cintas de malla metálica tal como se muestra el esquema de la Figura III-2. El equipo se tiene en su interior alrededor de 2 m³ de agua calentada entre 90 y 95 °C mediante un sistema humotubular inferior. La energía térmica requerida se obtiene de quemadores con alimentación automática de chip de madera, que mantienen el agua de proceso en el rango mencionado. Las ramas frescas (hoja verde o recién cosechada) ingresan por un extremo, se sumergen entre 30-40 segundos, y se descargan por el otro extremo de la “pileta” metálica. La capacidad de procesamiento es de unos 4000 kg/h. Se tomaron 2 muestras de yerba mate por día de trabajo, luego del zapecado, en paralelo a las muestras procesadas con chip. Se obtuvieron 4- 6 kg de yerba mate zapecada con agua de cada muestra. Se obtuvieron dos muestras duplicadas. Inmediatamente se trasladaron a la planta piloto de la FCEQyN para continuar con la operación de secado hasta valores deseados de humedad.



Montaje de la zapecadora. Ing. V.H.Lorenzo

Figura III-2. Imagen del zapecador que utiliza agua caliente. Patente V.H. Lorenzo.

III.B.1.d Zapecado con vapor

El zapecado con vapor se realizó en la planta piloto de la FCEQyN. El procedimiento se realizó de acuerdo a lo sugerido por Galeano y col. (2006). Se trataron en pequeños lotes entre 400 y 600 g de ramas verdes en un recipiente dentro del cual se inyectó una

corriente de vapor saturado a 2 atm (121°C) durante 10 minutos. Luego de tratar cada muestra por completo, se procedió a la operación de secado.

III.B.1.e *Procesamiento con microondas*

De acuerdo al sistema reportado por Laube y col. (2008) se ha realizado el zapecado y secado combinado en un horno tipo microondas. Se trataban aproximadamente 100g de hojas y palos verdes en el microondas a potencia máxima (900 W) durante 5 minutos. Se obtuvieron 2 kg aproximadamente de yerba mate por cada muestra procesada con este método.

III.B.2 *Secado en planta piloto*

El elevado contenido de humedad de las muestras post-zapecado, no permite conservar el producto en condiciones estables desde el punto de vista fisicoquímico y microbiológico. Por otra parte, se requiere obtener yerba mate canchada en condiciones similares al proceso industrial. Para alcanzar estas condiciones, las muestras se secaron en una corriente de aire caliente a 100°C, utilizando un secadero de planta piloto (Figura III-3).

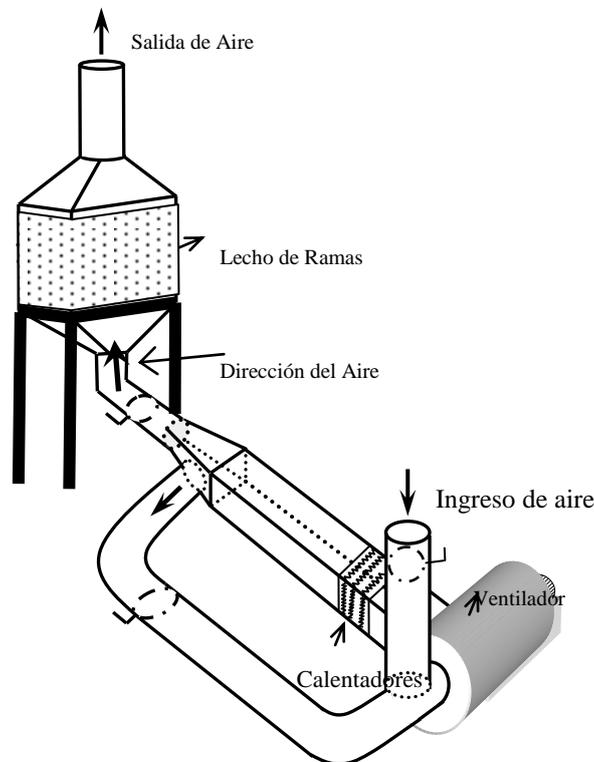


Figura III-3: Esquema del secadero de planta piloto utilizado en las experiencias de secado.

El mismo cuenta con un sistema de calentamiento con resistencias eléctricas y un ventilador que impulsa el aire a través de ellas. El flujo de aire caliente circula transversalmente dentro de una cabina de secado, donde se deposita un lecho de ramas (aproximadamente 4 kg de ramas zapecadas en canastas metálicas). Cada lote se secó entre 180 y 300 minutos. Se determinó la pérdida de peso del producto durante el secado a fin de poder obtener, conociendo los valores de humedad, la cinética de secado. Es decir, la pérdida de humedad en función del tiempo.

III.B.3 Preparación de las muestras

Luego del secado, se procedió a la molienda de las mismas a fin de obtener yerba mate canchada, se colocaron en bolsas herméticamente selladas a -20°C a fin de evitar modificaciones. La preparación para análisis concluyó con la separación de palos y hojas a fin de obtener muestras con 20% de palos.

III.B.4 Estacionamiento

El estacionamiento se realizó a fin de evaluar, mediante análisis sensorial, posibles diferencias entre todas las muestras procesadas y estacionadas. (Zapecado con Agua, Zapecado con Chip, Procesado con Microondas y Zapecado con Vapor).

Se ha implementado una cámara perfectamente aislada (Figura III-4) de dimensiones aproximadas 1,2 m de ancho x 0,60m alto x 0,60 m profundidad y con capacidad interna de 15 kg de yerba mate canchada junto a un sistema de control de humedad y temperatura (Figura III-4).

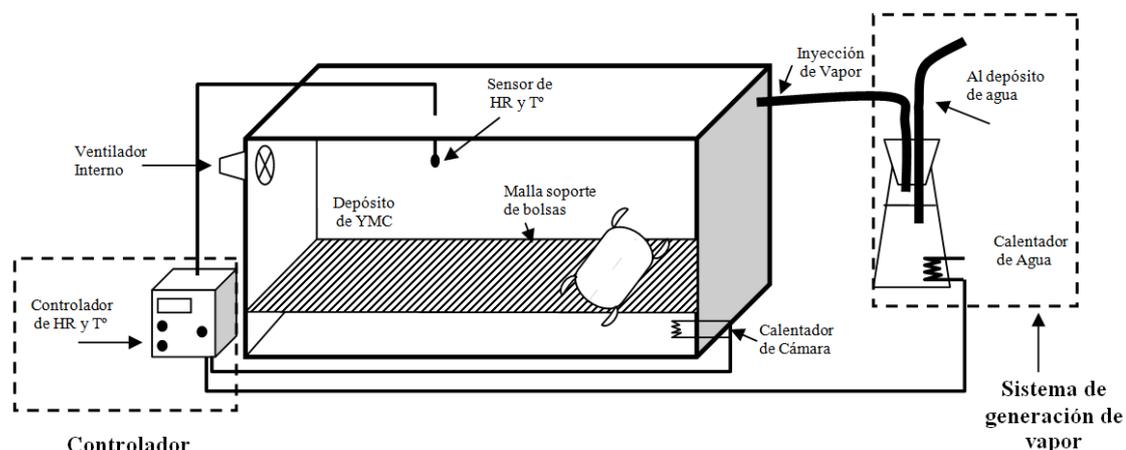


Figura III-4: Diagrama esquemático de la cámara de estacionamiento acelerado a escala laboratorio.



Figura III-5: Imagen del controlador de humedad y temperatura utilizado en la cámara de estacionamiento.



Figura III-6: Ventilador de flujo axial utilizado para la circulación del aire y vapor dentro de la cámara

El controlador envía una señal al sistema de encendido/apagado del calentador de la cámara, en caso que la temperatura supere o esté por debajo del rango de trabajo ($55^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$). Así mismo, el equipo envía otra señal al sistema de calentamiento de agua en el caso que los valores de humedad relativa (HR) salgan de los límites inferior o superior ($50\% \pm 5\%$ HR). Además se colocó un ventilador (Figura III-6) para circulación interna con el fin de uniformar en todos los puntos de la cámara los parámetros controlados, el cual está encendido en todo momento que dura el proceso.

Se colocaron bolsas de yerba mate canchada que ha sido previamente zapecada (ZA, ZV, MT) y luego secada en un secadero con aire caliente de planta piloto. Las bolsas son similares a las usadas en la industria pero con 1 kilogramo de capacidad aproximada. (Figura III-7). Se colocaron entre 12 a 15 bolsas dentro de la cámara (Figura III-8) y se las estacionó durante 45 días.

Se tomaron muestras cada 15 días para determinar humedad y color a fin de observar las condiciones de preservación de las muestras.



Figura III-7: Imagen del tipo de bolsa utilizada y la yerba mate canchada lista para su estacionamiento.



Figura III-8: Imagen del interior de la cámara de estacionamiento acelerado vacía y en proceso de carga de las muestras (12-15 bolsas de 1kg. aproximadamente).

Sobre la yerba mate estacionada se realizaron las siguientes determinaciones

III.B.5 Contenido de humedad

El contenido de humedad se determinó por diferencia de peso. La muestra se colocó en estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ hasta obtener peso constante (IRAM 20503 - 1995).

III.B.6 Parámetros de color

Se realizaron mediciones de los parámetros de color L (claro - oscuro), a (verde - rojo), b (azul - amarillo) (Sistema CIELAB) de muestras extraídas, molidas, a cada tiempo de acuerdo al tipo de estacionamiento, con un medidor de color Modelo MSEZ-4500L , MiniScan® EZ HunterLab (Hunter Associates Laboratory, Inc.).

III.B.7 Contenido de extracto acuoso

Se trasvasaron 2 g de yerba mate con 200 mL de agua destilada a un balón de vidrio, el cual se calentó a una temperatura de 100°C durante 1 h a reflujo. El extracto obtenido se filtró, y transfirió a un recipiente previamente tarado. A continuación se colocó en estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ hasta peso constante (IRAM 20510 1995).

III.B.8 Contenido de cafeína

La extracción se realizó en medio acuosa por tratamiento con MgO (IRAM 20512 - 2000). En una alícuota del filtrado se cuantificó por HPLC con columna C18 y fase móvil acetonitrilo-agua en proporción 20:80 (Merck, Darmstadt, Germany). Se utilizó estándar de cafeína (Biopack, Buenos Aires, Argentina). La columna utilizada fue de Zorbax ODS.

III.B.9 Contenido de polifenoles totales (CPT)

Para la determinación del contenido de polifenoles totales (CPT), se utilizó reactivo de Folin-Ciocalteu (Fluka, Argentina), ácido gálico (MP Biomedicals, Argentina), metanol (Merck, Argentina) y carbonato de sodio anhidro (Anedra, Argentina).

La extracción se realizó de acuerdo al método descrito en la norma ISO 14502-1 (E) (2004). Una porción de 0,2 g de yerba mate se trasvasó a un tubo de extracción y se adicionó 5 mL de una solución al 70% de metanol. El extracto obtenido se mezcló y se calentó a 70°C durante 10 min. Luego, el extracto fue centrifugado durante 10 min a

2052 g. El sobrenadante se guardó en un tubo graduado. La extracción se realizó dos veces. Los sobrenadantes se combinaron y fueron ajustados a un volumen fijo (10 mL) con solución de metanol al 70%. Se diluyó un mililitro del extracto con agua hasta 100 mL.

El CPT se determinó por espectrofotometría, utilizando reactivo de Folin-Ciocalteu y los resultados se expresaron como equivalentes de ácido gálico en porcentaje de masa seca (g EAG % bs), de acuerdo al método descrito en la norma internacional ISO 14502-1 (E) (2004). Un mililitro de la muestra del extracto diluido fue transvasado por duplicado a tubos separados conteniendo 5 mL del reactivo de Folin-Ciocalteu diluido (10 % v/v). Luego se agregaron 4 mL de una solución de carbonato de sodio (7,5 % p/v). Los tubos se mantuvieron protegidos de la luz a temperatura ambiente durante 60 min para luego determinar la absorbancia a 765 nm frente a un blanco obtenido al reemplazar el extracto por agua destilada en espectrofotómetro UV/Vis (Spectrum SP-2102). La concentración de polifenoles totales se obtuvo de una curva de calibración de ácido gálico en el rango de concentraciones de 0 a 50 µg/mL.

III.B.10 Capacidad antioxidante (CAO)

La capacidad antioxidante (CAO) se determinó por el método que usa el radical libre 1, 1-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH•). Se utilizó ácido ascórbico como patrón para expresar los resultados obtenidos en equivalentes de ácido ascórbico (EAA) por 100 g de sólido seco (g EAA% bs) (Hartwig y col., 2011). Las determinaciones de polifenoles totales y capacidad antioxidante se realizaron por separado.

III.B.11 Cenizas totales e insolubles.

Las determinaciones de las cenizas totales e insolubles se realizaron de acuerdo a las Normas IRAM 20505 y 20507 respectivamente. Se calcinaron 2 g de la muestra en una cápsula de porcelana y se llevó a una mufla a 550°C durante 5 horas. De esta forma se determinaron las cenizas totales. Este material se disolvió en una solución de HCl al 1,5 %, y se llevó a ebullición durante 1 hora. Se filtró con un papel libre de cenizas, se colocó en una cápsula de porcelana y se calentó en una mufla a 550°C durante 5 horas.

III.B.12 **Minerales (calcio, hierro y magnesio)**

Para el análisis de los minerales se calcinaron 2 g de material en una mufla a 550°C. Luego se realizó la dilución en 100 ml de ácido clorhídrico al 10%, y posterior filtración de una alícuota de 10 ml y se hizo una dilución de 1/10. Se utilizó espectrofotometría de absorción atómica con llama aire/acetileno, con un equipo modelo Perkin Elmer A Analyst 700 (Aire- Acetileno), y lámparas de cátodo Hueco. La metodología de determinación de minerales se realizó según Norma EPA 600/R-94/111 Método 200.2.

III.B.13 **Evaluación sensorial.**

Molienda fina: Para realizar las pruebas sensoriales, las bolsas de cada lote fueron mezcladas y luego se separó una porción utilizando un método de cuarteo. Luego, se realizó la molienda en un molino de cuchillas con malla de salida N° 40. Este material se utilizó en las pruebas sensoriales.

Las pruebas sensoriales se realizaron sobre el extracto obtenido en forma de mateada, tal como se muestra en la Figura III-9.



Figura III-9: Obtención del extracto simulando un mate cebado.

Dos horas antes de las pruebas sensoriales, se utilizó un mate con yerba, se agregó agua y mediante vacío se extrajo el líquido, el que se depositó en un kitasato. Cada extracción se realizó con 50 gramos de yerba mate molida y 500 ml de agua caliente a 70 °C. Para cada tipo de muestra se obtuvieron 4 litros de extracto que se conservaron en dos erlenmeyers de 2000 ml entre 58°C y 60°C durante un máximo de 2 horas hasta el momento de la prueba. El mate simulado para la obtención de extractos se utilizó por

otros autores (Scipioni y col., 2010) para caracterizar la concentración de solubles y parámetros fisicoquímicos, así también, en pruebas sensoriales para caracterizar el grado de estacionamiento y atributos de sabor (acidez, amargo, astringencia, etc.), (Surkan y col., 2012 y Holowaty y col., 2014c). El efecto del “primer mate” puede sobrepasar el umbral superior de los sabores, lo cual podría interferir en la decisión del panelista. El uso de extractos permitió analizar concentraciones medias del mismo, y uniformizar las muestras entre catadores. De esta manera se pretendió eliminar el efecto del tipo de cebado, volumen de agua utilizado en cada cebada, temperatura no uniforme, tiempo entre mateadas, etc.

Las pruebas se realizaron mediante test del triángulo, el cual consiste en presentar al panelista o catador tres muestras incógnitas, una de las cuales es diferente (Figura III-10). Se compararon los pares de muestras MTZA – ZA, MTZV – ZV y MTMO – SMO. Las pruebas se realizaron en tres módulos en tres días diferentes, en cada módulo se evaluó un par de muestras. De las pruebas participaron 40 consumidores habituales de mate, todos pertenecientes a la Universidad Nacional de Misiones entre 22 y 60 años. A cada panelista se le presentó una bandeja con 3 vasos codificados en forma aleatoria que contenían aproximadamente 150 ml del extracto a $53 \pm 2^\circ\text{C}$, como se muestra en la Figura III-10. También se le dio la posibilidad de repetir la prueba (con una nueva distribución de muestras).



Figura III-10: Presentación de la prueba sensorial para cada participante.

Luego de probar las mismas en forma consecutiva debía indicar cual resultó diferente. Además, se dio la posibilidad de comentar en que aspectos consideraba las diferencias (amargo, sabor residual, etc.) (Figura III-11). Cada prueba duró aproximadamente 5 minutos. Del primer módulo MTZA – ZA se obtuvieron 42 pruebas. En el segundo módulo se comparó entre muestras zapecadas con vapor y zapecadas con chip, se obtuvieron 54 pruebas. Por último, se realizaron las comparaciones entre muestras procesadas con microondas y procesadas con chip de las cuales se obtuvieron 66 pruebas voluntarias.

<p>Nombre: _____ Edad: _____ Fecha: _____</p> <p>Las muestras que probará son extractos de yerba mate similares a mate cocido.</p> <p>Pruebe cada muestra sucesivamente, de izquierda a derecha. Antes de cada muestra enjuague la boca con agua 1 ó 2 veces. Luego indique que muestra es diferente marcando con una X.</p> <p>Bandeja N° _____:</p> <p>Muestras: </p> <p>(Indique el número)</p> <p>Comentarios y observaciones: (Si quiere puede comentar acerca de si le resultaron agradables, o desagradables las muestras y porqué)</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>Muchas Gracias por su Tiempo.</p>
--

Figura III-11: Plantilla modelo de test del triángulo utilizada en la prueba sensorial.

III.B.14 Análisis estadísticos

Se utilizó análisis de varianza con un nivel de significación de $\alpha=0,05$ para comparar las propiedades de la yerba mate obtenida por los diferentes métodos de procesamiento. El paquete estadístico utilizado para el procesamiento de los datos fue el StatGraphics Centurion XV (2009).

III.C Resultados y discusión

III.C.1 Parámetros fisicoquímicos.

III.C.1.a Color

Las comparaciones de color se realizaron entre pares, comparándose cada método alternativo con el método tradicional. El parámetro de color L post zapecado y secado en las muestras zapecadas con agua (ZA) fue de 34,27 en promedio, resultó 9,4 % menor que en muestras del método tradicional (MTZA) que fue de 37,82 y se encontraron diferencias estadísticas significativas entre ellas (Figura III-12a). La comparación también resultó significativa en el par ZV-MTZV (Figura III-12b), cuyas diferencias fueron de 7,3 % menor en ZV. Es decir 35,42 para ZV y 38,21 para MTZV. El método por microondas no mostró diferencias estadísticas respecto al MTMO (Figura III-12c) (ver el resumen en la Tabla III-1).

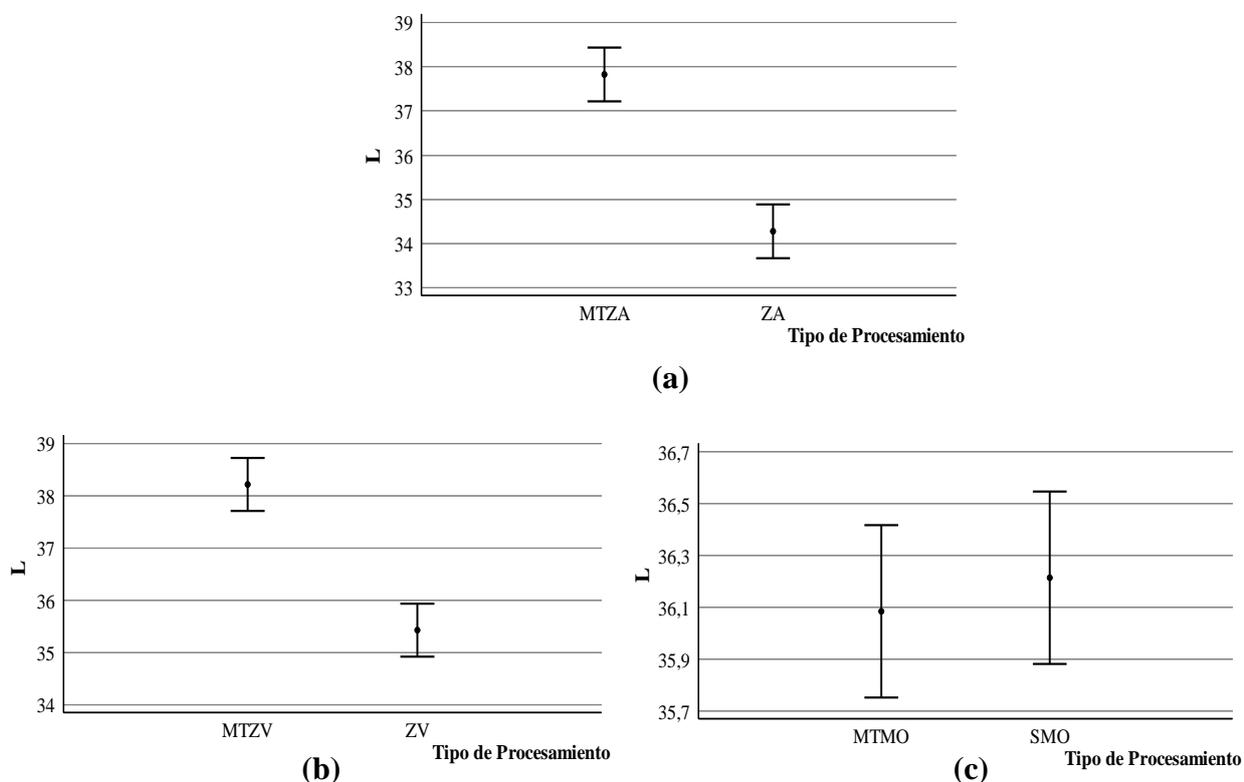


Figura III-12. Tabla de medias del parámetro de color L según el tipo de procesamiento: a) MTZA-ZA; b) MTZV-ZV y c) MTMO-SMO.

Las variaciones del parámetro de color “a” se observa en la Figura III-13b, donde las diferencias resultan significativas entre ZV-MTZV. En ZV el valor es considerablemente mayor que en las muestras restantes, con valor medio de -0,17 se considera que sufre la mayor degradación del color asociado al verde en comparación a su método de referencia MTZV que muestra un valor medio de 38,21, juntamente al parámetro indicador de los demás métodos estudiados. Además se encontraron diferencias significativas en el par MTMO –SMO (Figura III-13c), siendo el MTMO quien sufre menor degradación de color. La comparación MTZA-ZA (Figura III-13a) no muestra diferencias estadísticamente significativas (ver el resumen en la Tabla III-1).

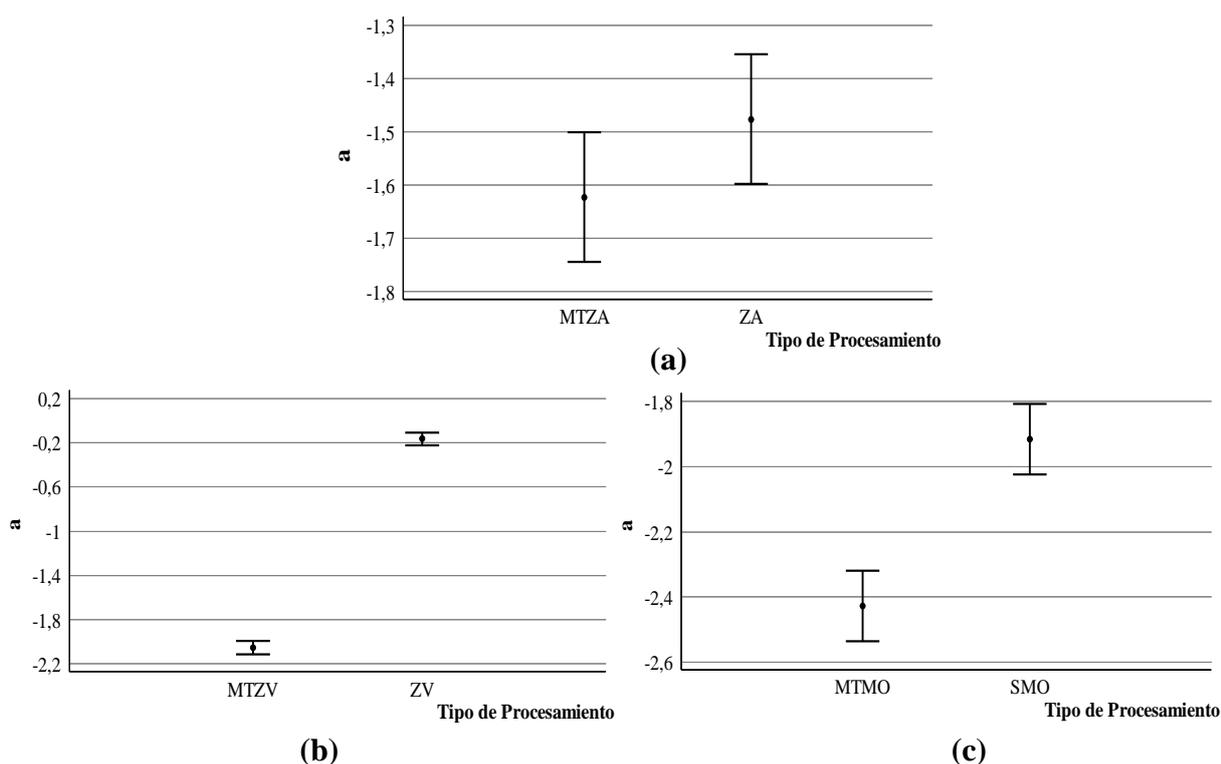


Figura III-13. Tabla de medias del parámetro de color a según el tipo de procesamiento: a) MTZA-ZA; b) MTZV-ZV y c) MTMO-SMO.

El parámetro de color “b” indica tonos azul-amarillo, combinados puede asociarse al amarillo oscuro, es decir al deterioro por pardeamiento. Cuanto más oscura la intensidad

del color amarillo podría asociarse a un tratamiento deficiente para evitar el pardeamiento. En los casos MTZA- ZA y MTZV-ZV, los valores de ZA y ZV resultan significativamente menores que sus respectivos métodos de referencia (véase la a Tabla III-1). Por el contrario, el valor SMO resulta significativamente mayor que las muestras de referencia MTMO.

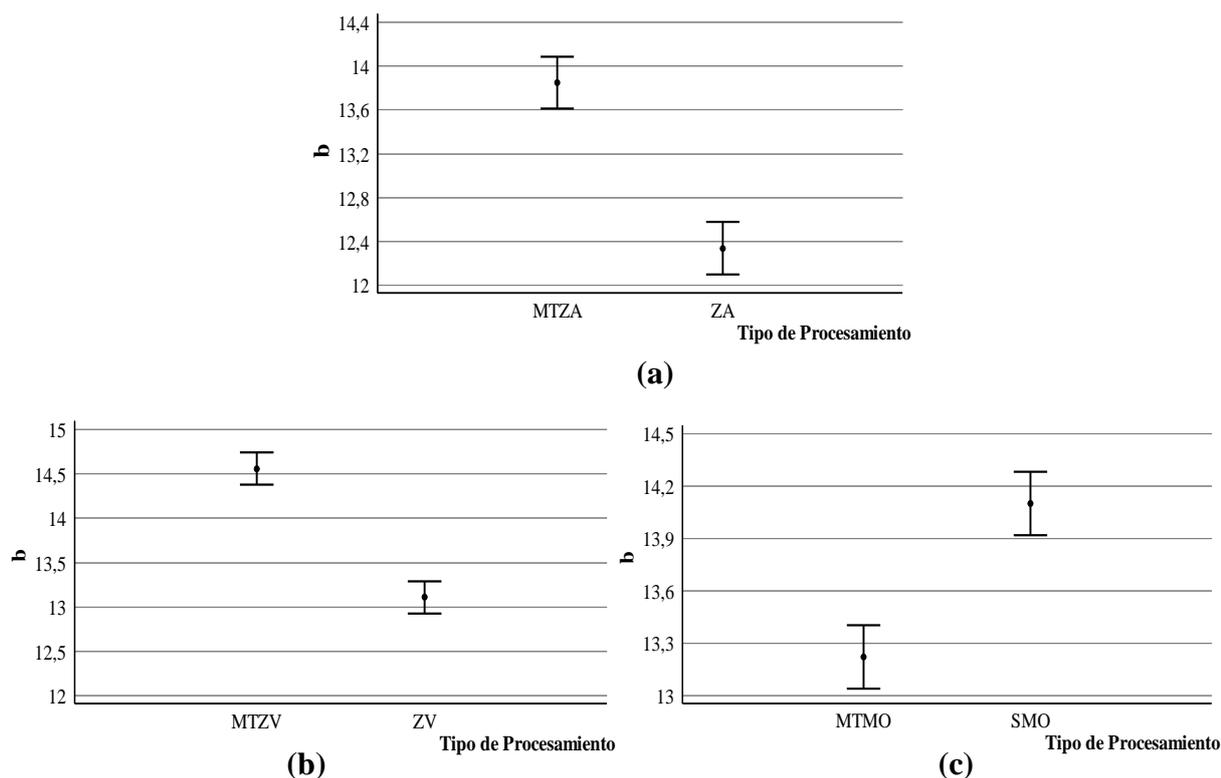
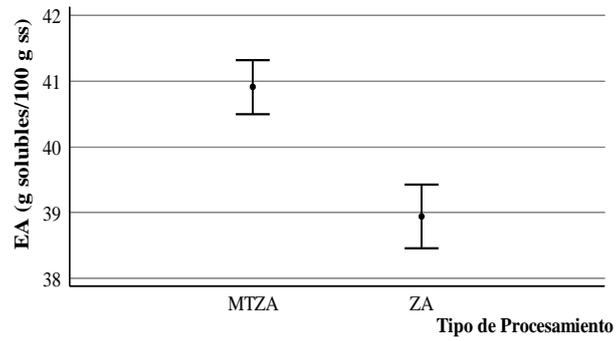


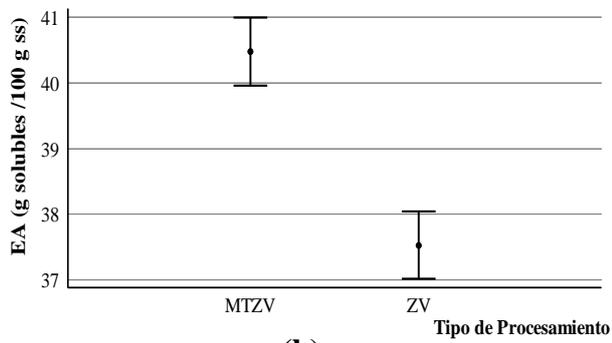
Figura III-14. Tabla de medias del parámetro de color b según el tipo de procesamiento: a) MTZA-ZA; b) MTZV-ZV y c) MTMO-SMO.

III.C.1.b Extracto acuoso (EA)

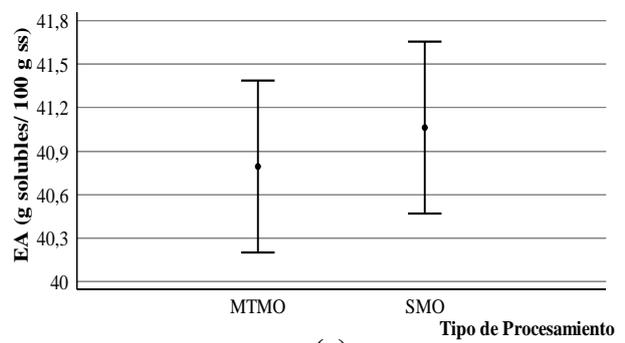
Las Figura III-15 a, b y c muestran los valores medios y los intervalos de confianza del extracto acuoso. No existen diferencias significativas entre el método tradicional MTMO, respecto a SMO. Sin embargo los valores medios de extracto acuoso en muestras zapecadas con agua, fueron de 38,93 g solubles/ 100 g sólidos secos, y representan un 6,3 % menos que en el método tradicional. En el zapecado con vapor la media fue de 37,52 g solubles/ 100 g sólidos secos y representó el 7,3 % respecto a la media en MTZV (véase la Tabla III-1)



(a)



(b)



(c)

Figura III-15. Tabla de medias del extracto acuoso según el tipo de procesamiento: a) MTZA-ZA; b) MTZV-ZV y c) MTMO-SMO.

Tabla III-1. Tabla comparativa de parámetros fisicoquímicos determinados en yerba mate para cada tipo de procesamiento y su referencia con el método tradicional. Gramos (g) expresados cada 100 g de sólidos secos (bs) (*Indica diferencias estadísticas significativas)

Proceso/ Parámetro		MTZA	ZA	MTZV	ZV	MTMO	SMO
Color	L	37,82 ± 1,85	34,27 ± 1,98*	38,21 ± 0,95	35,42 ± 1,67*	36,08 ± 1,18	36,21 ± 0,87
	a	-1,62 ± 0,34	-1,47 ± 0,41	-2,06 ± 0,19	-0,17 ± 0,11*	-2,43 ± 0,28	-1,92 ± 0,39*
	b	13,84 ± 0,71	12,33 ± 0,77*	14,55 ± 0,33	13,06 ± 0,60*	13,21 ± 0,70	14,10 ± 0,40*
Extracto Acuoso (g solubles)		40,90 ± 0,97	38,93 ± 1,34*	40,47 ± 0,47	37,52 ± 1,66*	40,78 ± 1,49	41,06 ± 1,79
Cafeína (g)		0,90 ± 0,04	0,90 ± 0,04	0,93 ± 0,06	1,15 ± 0,04*	0,96 ± 0,05	1,25 ± 0,14*
CPT (g GAE)		10,14 ± 0,42	8,78 ± 0,48*	10,05 ± 1,45	7,75 ± 0,88*	8,25 ± 0,64	8,33 ± 1,40
CAO (g AAE)		17,20 ± 1,23	18,74 ± 0,74*	19,91 ± 1,41	20,31 ± 1,22	18,99 ± 1,48	20,06 ± 1,19*

Tabla III-2 (continuación). Tabla comparativa de parámetros fisicoquímicos determinados en yerba mate para cada tipo de procesamiento y su referencia con el método tradicional. (*Indica diferencias estadísticas significativas)

Proceso/ Parámetro	MTZA	ZA	MTZV	ZV	MTMO	SMO
Cenizas Totales (g)	6,48 ± 0,26	6,27 ± 0,26	5,7 ± 0,21	5,81 ± 0,17	5,96 ± 0,13	5,75 ± 0,18*
Cenizas Insolubles(g)	0,42 ± 0,08	0,46 ± 0,07	0,38 ± 0,07	0,34 ± 0,05	0,35 ± 0,05	0,42 ± 0,08*
Ca (mg)	549,68 ± 49,3	493,6 ± 60,9	195,5 ± 15,5	195,4 ± 20,5	562,2 ± 61,3	819,1 ± 76,3*
Mg (mg)	235,1 ± 93,8	159,4 ± 34,6	205,2 ± 14,1	185,2 ± 9,8	295,3 ± 88,3	674,5 ± 115,4*
Fe (mg)	6,41 ± 1,8	10,9 ± 1,6*	22,2 ± 1,9	15,9 ± 1,7*	7,5 ± 1,5	12,7 ± 1,8*

III.C.1.c *Cafeína*

En la concentración de cafeína determinada en los métodos ZA y MTZA no se encontraron diferencias significativas y marcaron valores medios de 0,90 g/100 gss (Figura III-16a). En el método con microondas respecto al tradicional (Figura III-16c) los valores de cafeína resultaron significativamente mayores. Los valores medios fueron de 0,96g/100 gss para MTMO y 1,25 g/100 gss para SMO. Un comportamiento similar se observó al comparar MTZV cuyo valor medio fue de 0,93 g/100 gss contra 1,15 g/100 gss en el ZV (Figura III-16b).

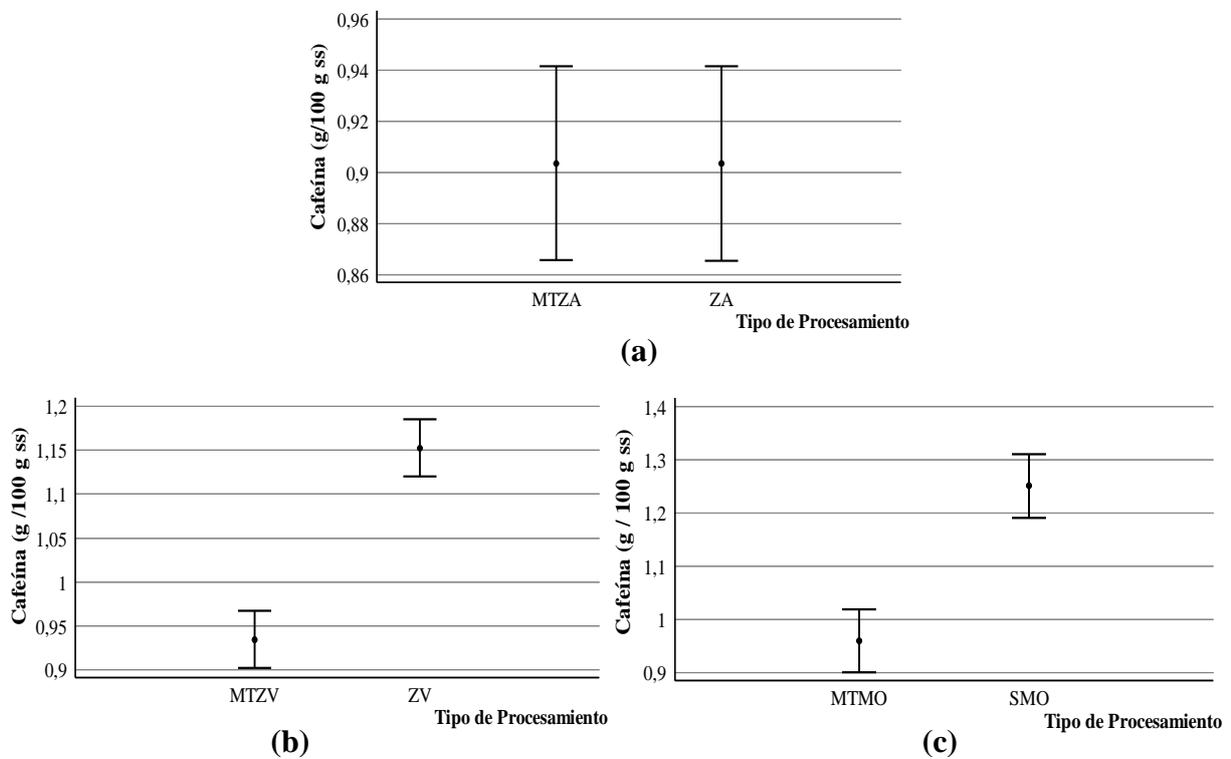


Figura III-16. Tabla de medias de la Cafeína según el tipo de procesamiento: a) MTZA-ZA; b) MTZV-ZV y c) MTMO-SMO.

III.C.1.d *Contenido de polifenoles totales (CPT)*

El contenido de polifenoles totales no mostró diferencias entre el MTMO y SMO, los valores medios determinados fueron de 8,25 y 8,33 g EAG/ 100 gss. La Tabla III-1 muestra los resultados entre los pares comparados. La Figura III-17 muestra los valores de medias de CPT para cada método estudiado junto a sus intervalos de confianza. Las

diferencias resultaron significativas entre MTZA y ZA. Estas últimas resultaron 13,90 % menores que el MTZA. El valor medio de ZA fue 8,78 g EAG/100 gss y para MTZA 10,14 g EAG/100 gss. El zapecado con vapor también resultó menor que su método de referencia MTZV. La diferencia fue de 22,70 %, con valores de 7,75 g EAG/100 gss para ZV y 10,05 g EAG/100 gss para MTZV.

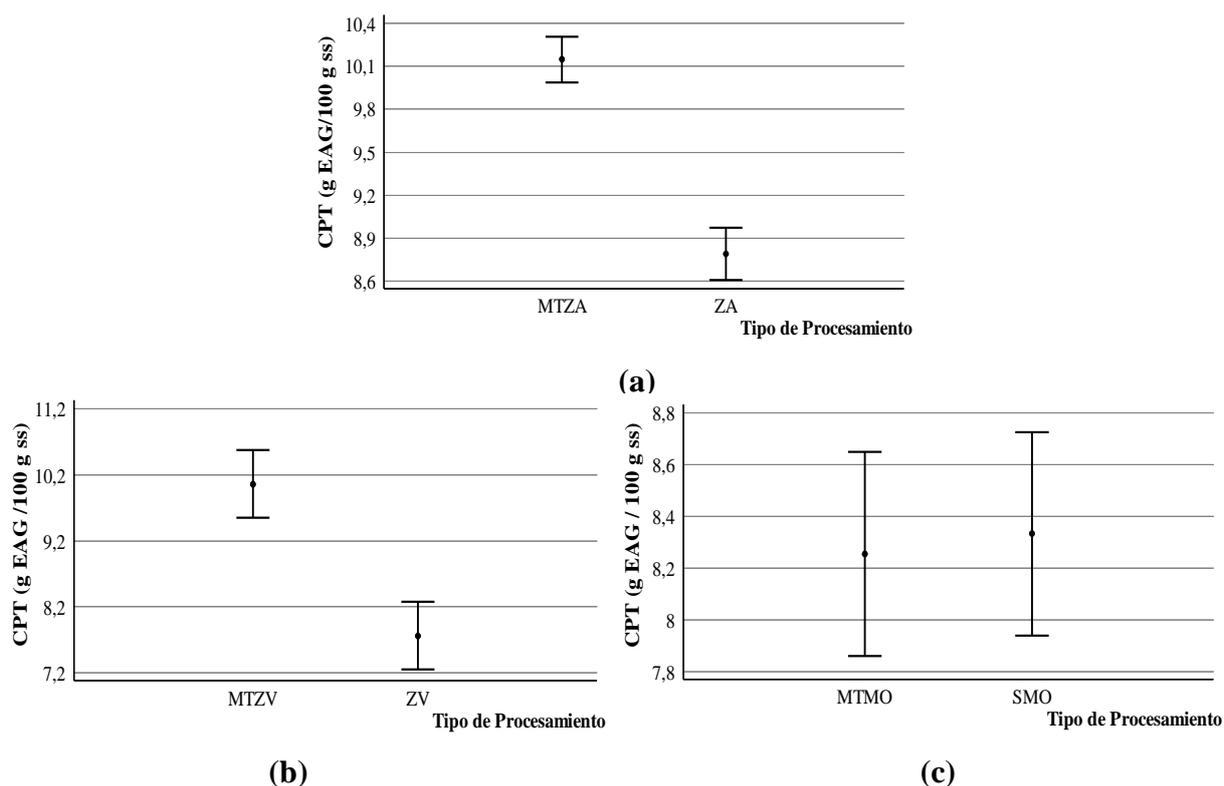


Figura III-17. Tabla de medias del contenido de polifenoles totales según el tipo de procesamiento: a) MTZA-ZA; b) MTZV-ZV y c) MTMO-SMO.

III.C.1.e Capacidad antioxidante (CAO)

La capacidad antioxidante no mostró diferencias significativas entre ZV y MTZV, y resultó significativamente mayor que en el método ZA. El valor medio para ZV fue de 20,31 g EAA/100 gss, y para MTZV 19,91 g EAA/100 gss. Las diferencias entre MTMO y SMO resultaron significativas y fue de 6,70%. Siendo 20,06g EAA/100 gss para SMO y 18,99 g EAA/100 gss para MTMO. La diferencia mayor se dio entre MTZA y ZA que llamativamente fue mayor en el método alternativo un 13,10 %, con valor medio de 18,74 contra 17,20 g EAA/100 gss en MTZA.

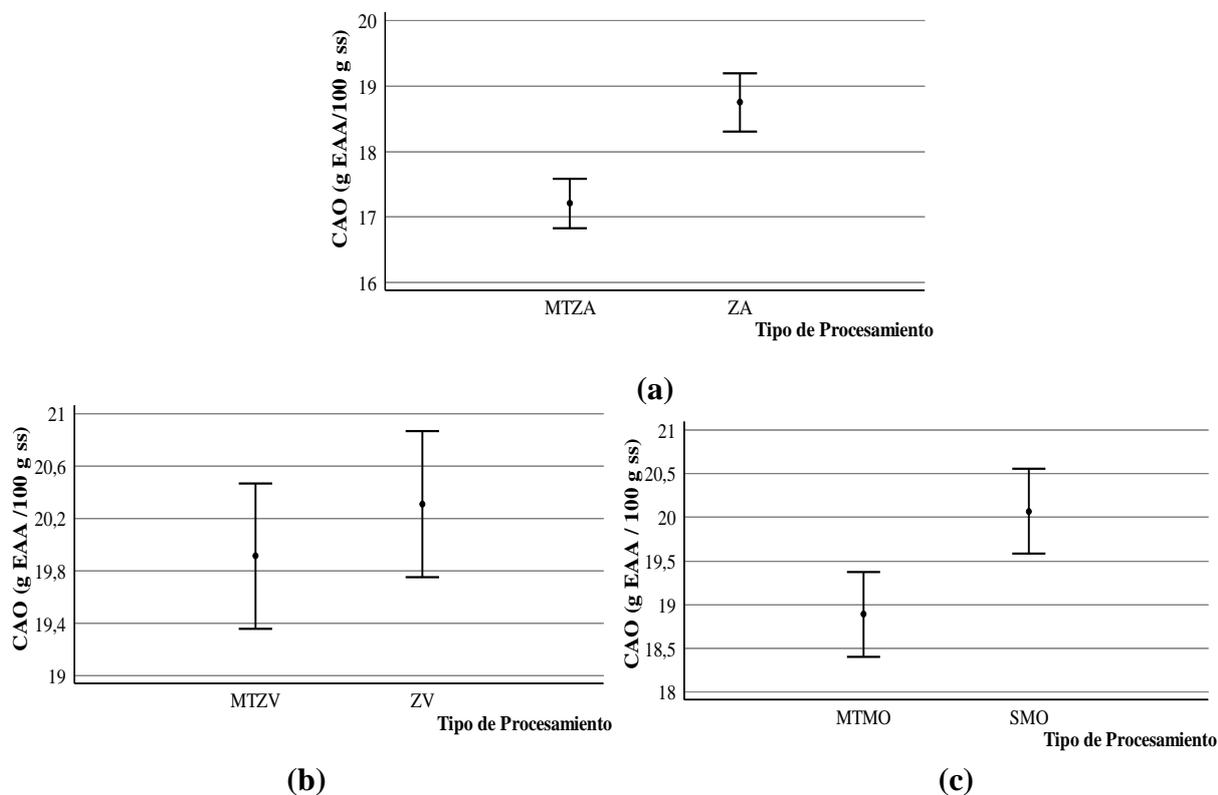


Figura III-18. Tabla de medias de la capacidad antioxidante según el tipo de procesamiento: a) MTZA-ZA; b) MTZV-ZV y c) MTMO-SMO.

III.C.1.f Cenizas totales e insolubles

El contenido de Cenizas puede verse afectado por la presencia de partículas resultantes de la mala combustión de la madera, sin embargo esta hipótesis no se comprueba en los pares MTZV-ZV, y MTZA -ZA, (Figura III-19) ya que no existen diferencias significativas entre ellas. Sin embargo las muestras SMO fueron significativamente menores que su referencia tradicional en un 4,80 %. Las cenizas insolubles mostraron diferencias significativas en el par MTMO – SMO, fueron mayores en el secado con microondas respecto al método tradicional.

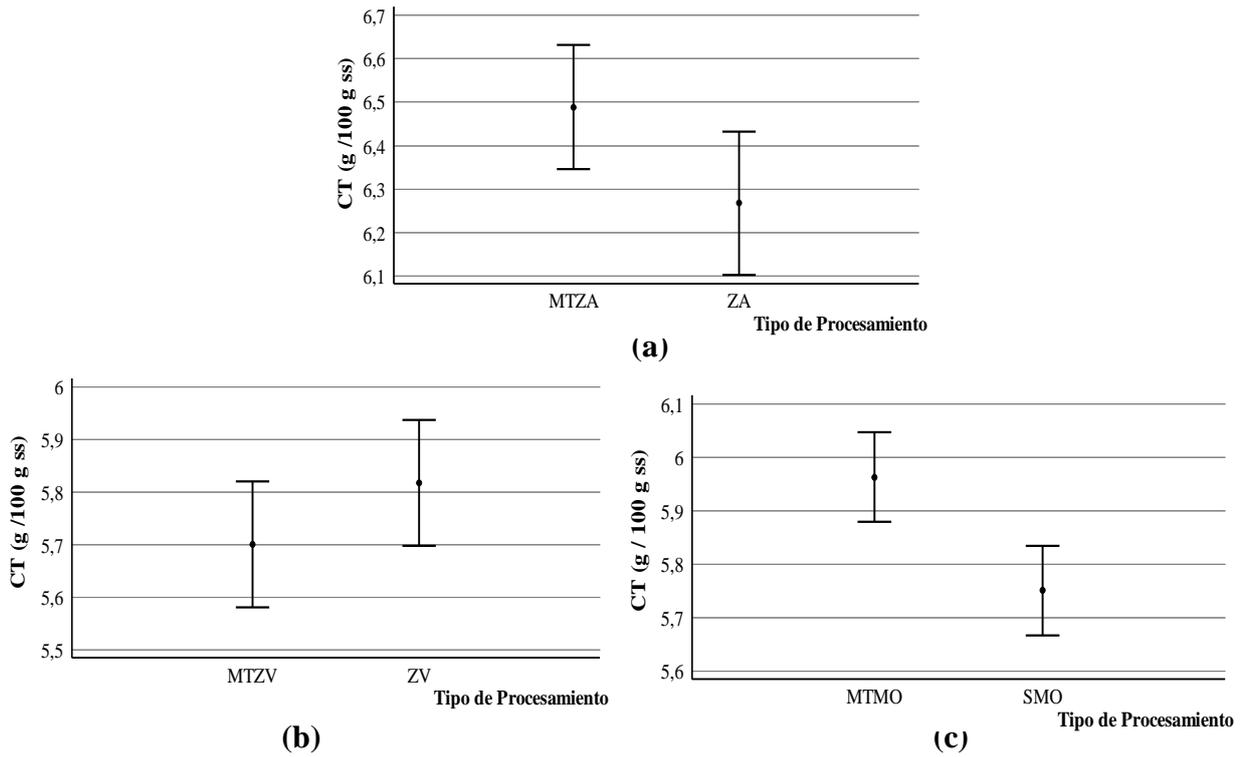


Figura III-19. Tabla de medias del contenido de cenizas totales según el tipo de procesamiento.: a) MTZA-ZA; b) MTZV-ZV y c) MTMO-SMO.

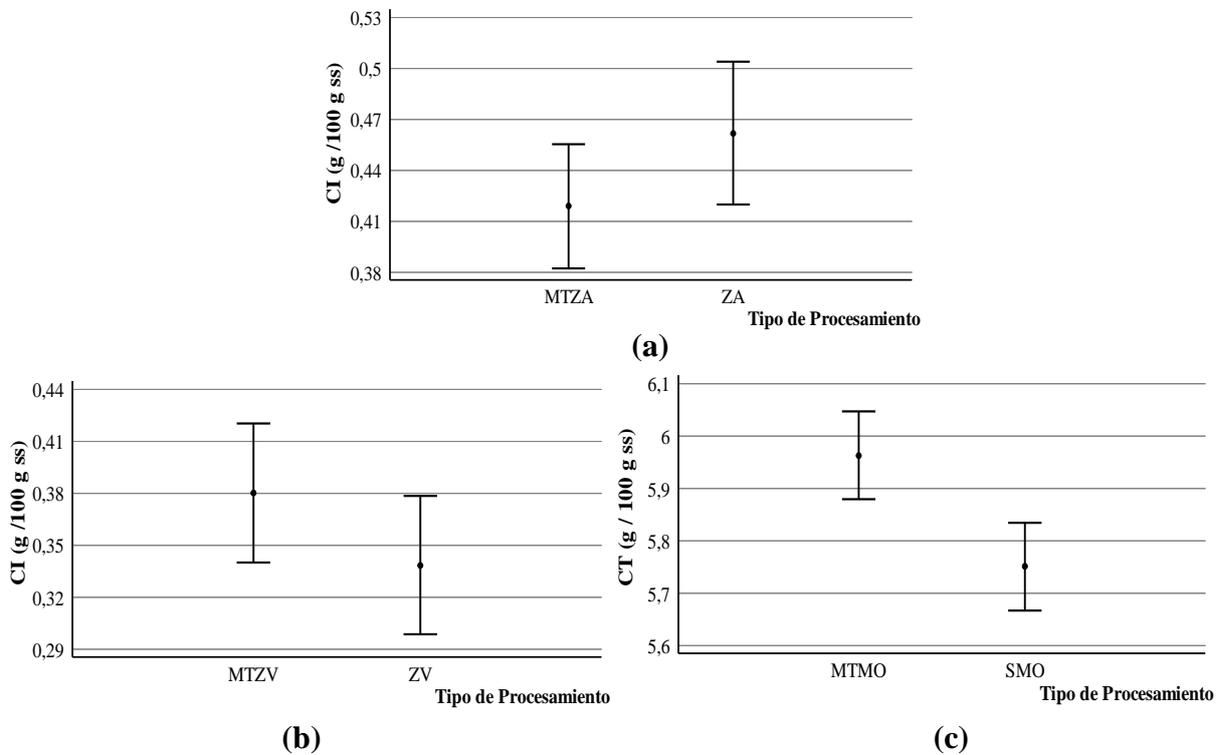


Figura III-20. Tabla de medias del contenido de cenizas insolubles en ácido según el tipo de procesamiento: a) MTZA-ZA; b) MTZV-ZV y c) MTMO-SMO.

III.C.1.g Minerales. Calcio, magnesio y hierro.

En el caso de los minerales, el calcio no mostró diferencias estadísticamente significativas entre MTZA-ZA y MTZV-ZV, pero en la comparación MTMO – SMO, el método con microondas resultó 49,10 % mayor que el método tradicional, Es decir, su valores medios fueron de 562,20 mg/100 gss para MTMO y 819,10 mg/100 gss para SMO.

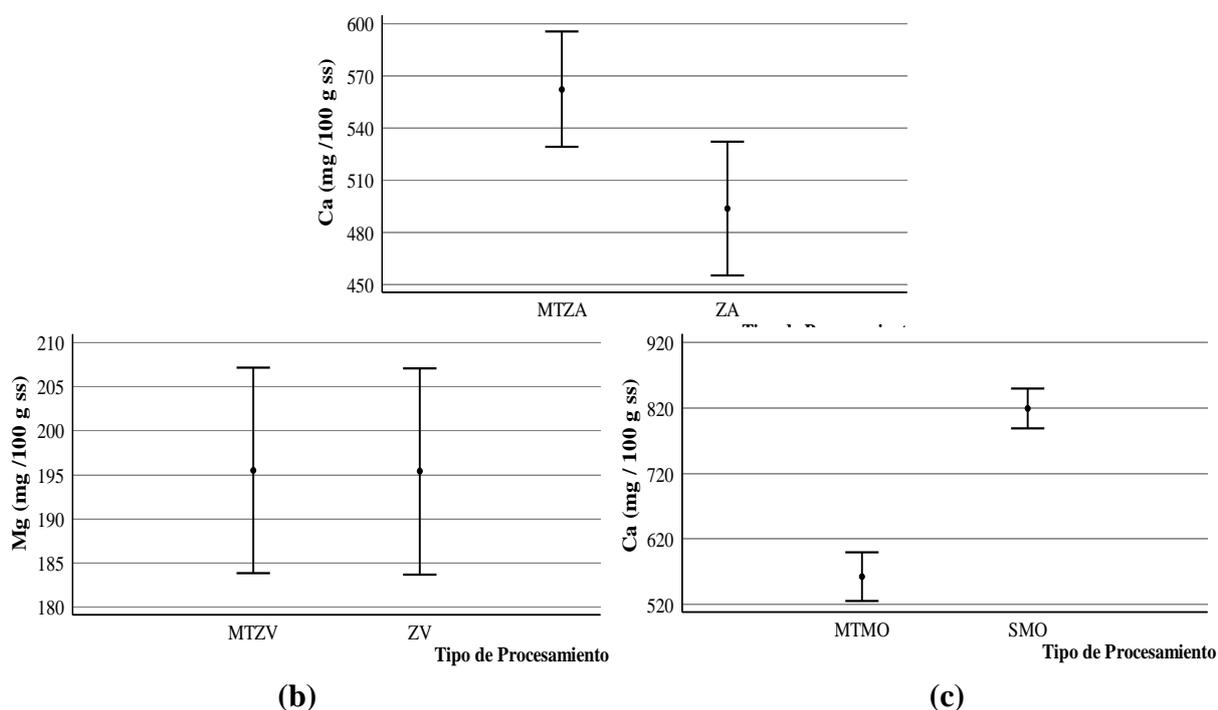


Figura III-21. Tabla de medias del contenido de Calcio según el tipo de procesamiento: a) MTZA-ZA; b) MTZV-ZV y c) MTMO-SMO.

El magnesio no presentó diferencias significativas al comparar los pares zapecados con vapor y su tradicional, al igual que el par de medias del método zapecado con agua y zapecado tradicional (Figura III-22). El mayor valor se dio en SMO y fue de 674,50 mg/100 g ss, y además resultó valores que representan más del doble que en MTMO que tuvo valores similares a los otros métodos estudiados, de 295,30 mg/100 g ss.

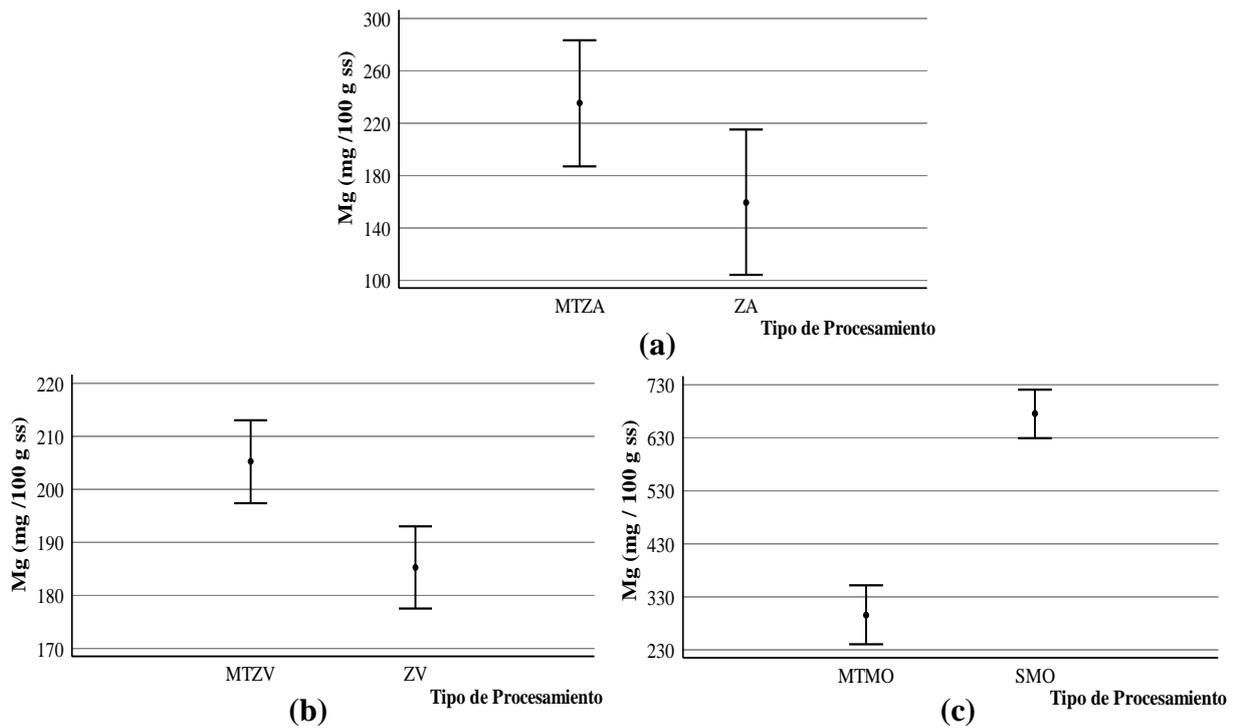


Figura III-22. Tabla de medias del contenido de Magnesio según el tipo de procesamiento: a) MTZA-ZA; b) MTZV-ZV y c) MTMO-SMO.

Por último, el hierro (Figura III-23) tuvo un comportamiento errático en los tres métodos, y en todos los casos, las diferencias resultaron estadísticamente significativas entre los pares MTMO-SMO, MTZA-ZA y MTZV-ZV.

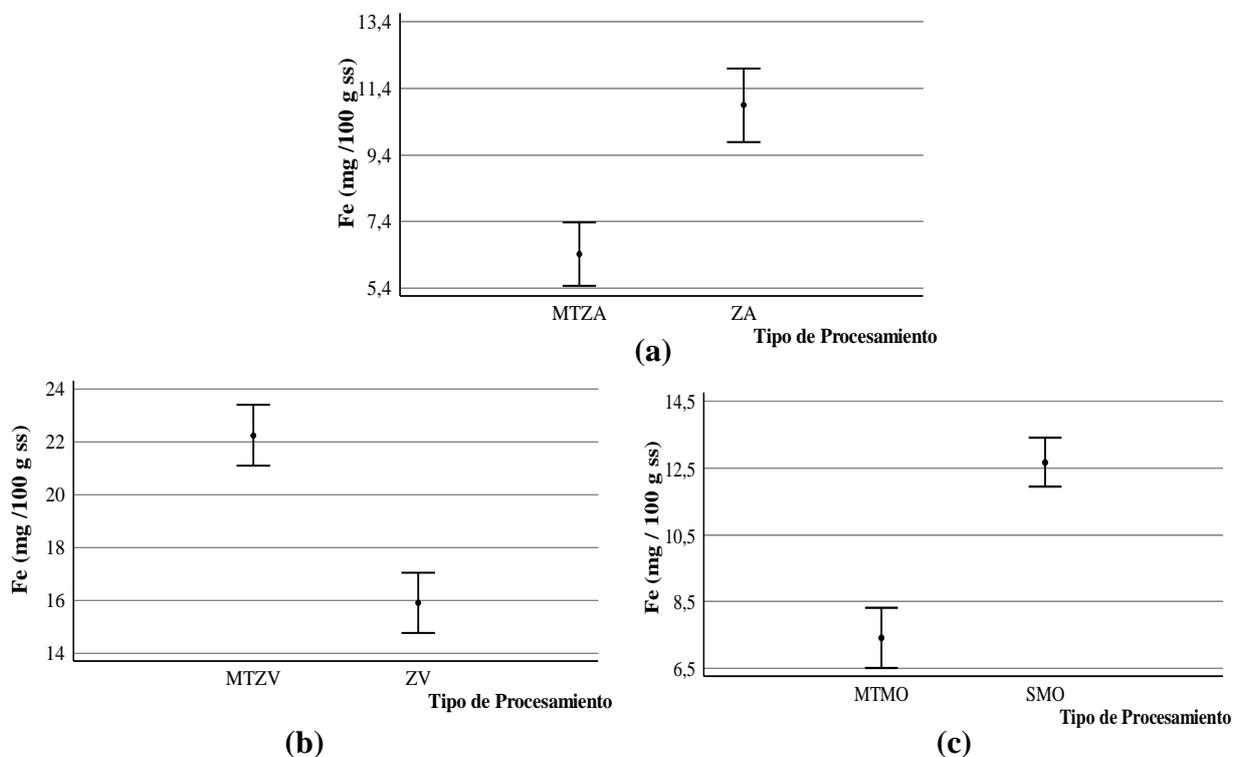


Figura III-23. Tabla de medias del contenido de Fe según el tipo de procesamiento.

III.C.2 Yerba mate estacionada destinada a pruebas sensoriales.

Un aspecto fundamental y preponderante en la calidad de la yerba mate es la aceptación sensorial de los consumidores (Surkan y col., 2009; de Godoy y col., 2013; Orjuela-Palacio, 2014). La implementación de métodos alternativos en el procesamiento de yerba mate puede influir en las propiedades organolépticas, comenzando por la ausencia de humos en el proceso (Thea, 2016), así como la conservación de algunas propiedades funcionales o compuestos.

Las Figura III-24 a 26 muestran las comparaciones entre muestras obtenidas en planta piloto por los diferentes métodos alternativos y su comparación con las zapecadas o procesadas con chip, luego del estacionamiento. En todos los casos las muestras obtenidas por procesos alternativos, resultaron levemente más oscuras que las muestras zapecadas con chip.



Figura III-24. Diferencias de color entre muestras estacionadas zapecadas con chip y zapecadas con agua.



Figura III-25. Diferencias de color entre muestras estacionadas zapecadas con chip y zapecadas con vapor.



Figura III-26. Diferencias de color entre muestras estacionadas zapecadas con chip y procesadas microondas.

Las Figura III-27 y 28 muestran gráficos de medias para los pares Agua- Chip y Vapor -Chip respectivamente, en el análisis del parámetro “a”, y Hue. La Tabla III-3 (pág. 72) presenta un resumen de los valores medios de todos los parámetros medidos y estimados de cada par estudiado.

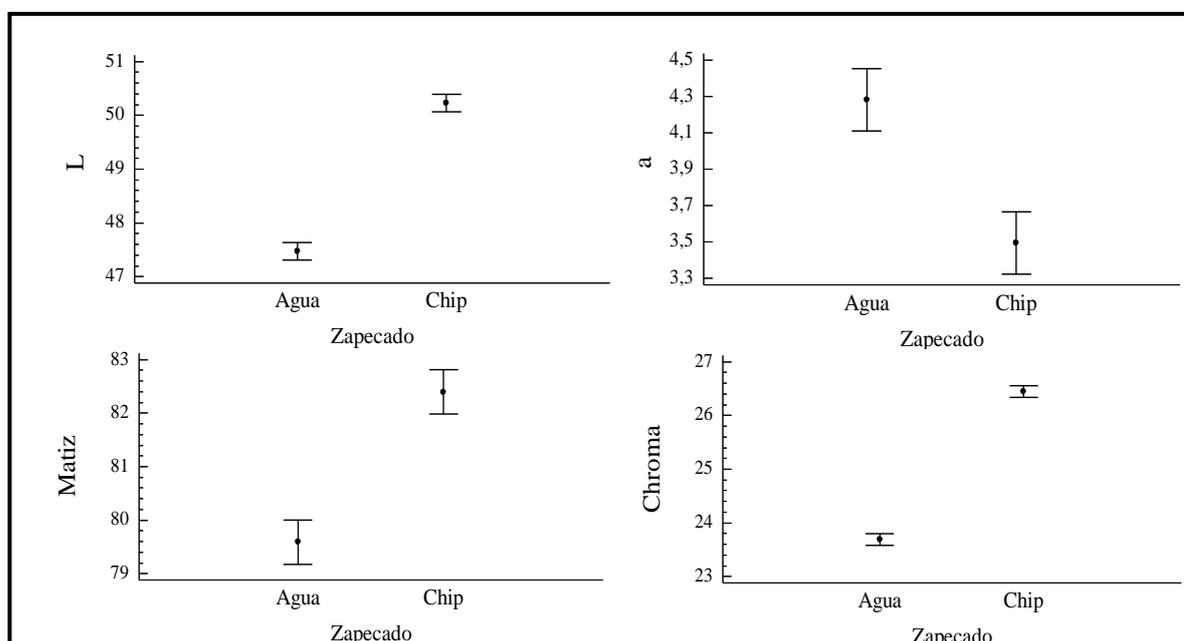


Figura III-27. Parámetros de color con intervalos de confianza en muestras zapecadas con agua y con el método tradicional.

En el análisis de varianza del color entre pares de muestras estudiadas se observó que en el zapecado con agua y con vapor, resultaron menos verdes, pero más pardas. Esto se

observó al encontrar mayores valores medios en el parámetro de color “a”, menor color verde, menor luminosidad o tonos más amarillentos, indicados por valores menores de Hue. Los valores de croma indicaron además, muestras más pardas.

En el caso de SMO, el comportamiento de la yerba mate estacionada fue diferente a las muestras procesadas con chip, ya que las primeras mostraron tonos significativamente mayores y se conservaron mejor los tonos verdes (menor valor de “a”), esto puede marcar que probablemente las degradaciones de clorofilas y compuestos bioactivos asociados fueron menores que en el procesamiento con chip. Sin embargo las muestras resultaron algo pardas respecto a los valores de referencia con chip.

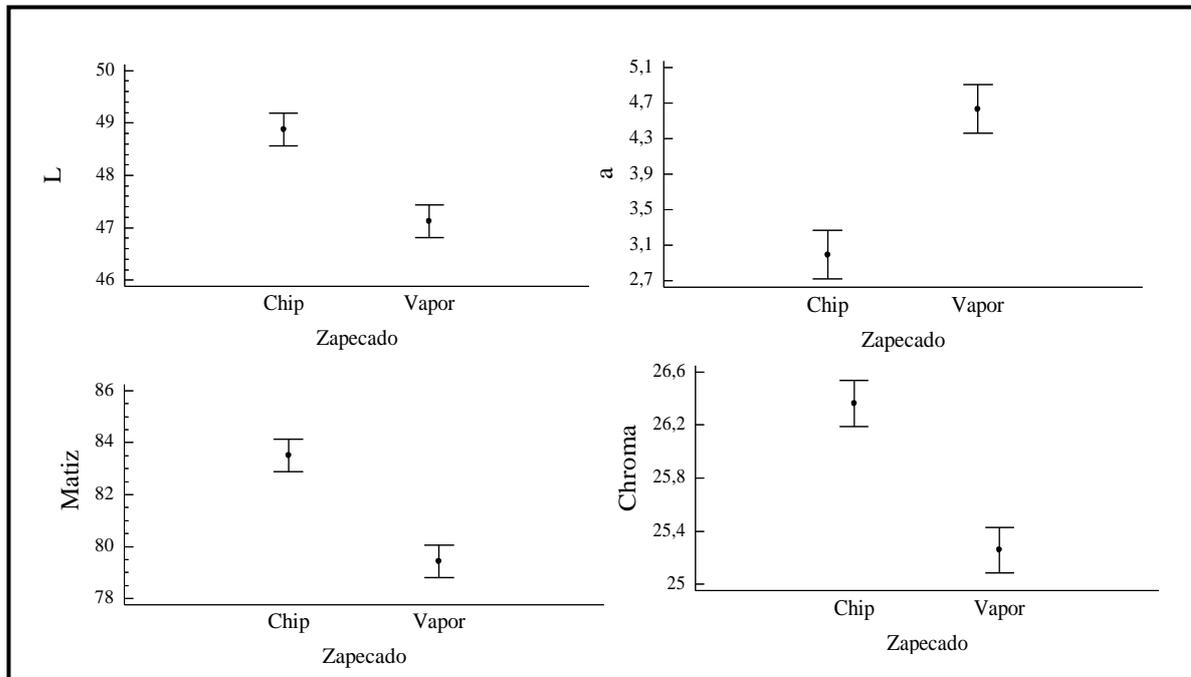


Figura III-28. Parámetros de color enyerba mate estacionada con intervalos de confianza en muestras zapecadas con vapor y con por el método tradicional.

Es interesante que, de los valores de intensidad de color o matiz, las muestras procesadas con microondas presentaron valores más elevados de Hue, que en el rango de color, indicaría muestras con tonos verdes más intensos, teniendo en cuenta los trabajos anteriores, fue la que menor degradación de color ha tenido, aunque puede resultar indeseable tonos verdes más intensos en la yerba para consumo, preservando mejor los atributos de color asociados a la calidad desde el punto de vista fisicoquímico

del producto. Solamente el parámetro de color “b” en el par Chip – Microondas no mostró diferencias significativas, los demás parámetros difieren significativamente entre sí.

Tabla III-3. Valores medios con desviaciones típicas de los parámetros de color en los pares estudiados.

Proceso / Parámetro	Chip		Agua		Chip		Vapor		Chip		Microondas	
	X medio	DS	X medio	DS								
L	50,22	0,37	47,46	0,30	48,87	0,55	47,12	0,69	48,83	0,21	47,45	0,39
a	3,49	0,33	4,28	0,36	2,99	0,50	4,63	0,59	2,16	0,44	0,92	0,45
b	26,20	0,32	23,29	0,13	26,19	0,28	24,82	0,43	*25,34	0,15	*25,21	0,13
Hue	82,39	0,77	79,58	0,86	83,49	1,03	79,42	1,44	85,12	0,98	87,89	1,04
Chroma	26,43	0,28	23,68	0,13	26,36	0,32	25,25	0,37	25,44	0,17	25,23	0,12

* Indica que no existen diferencias significativas entre muestras.

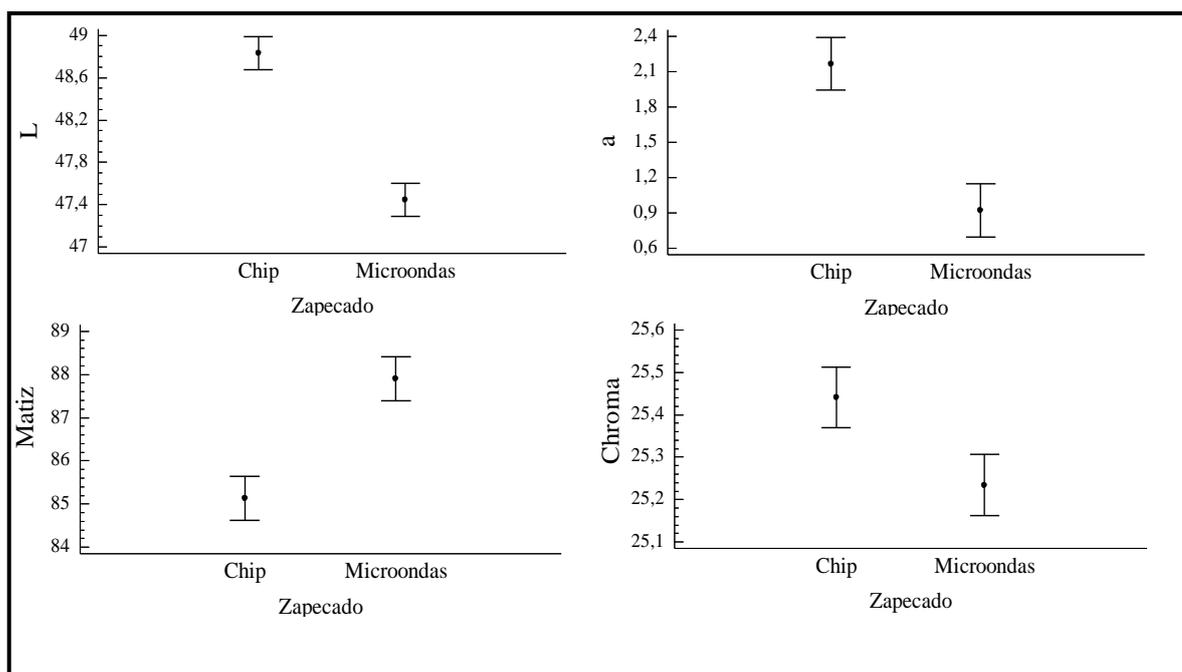


Figura 14. Parámetros de color con intervalos de confianza en muestras procesadas con microondas y con el método tradicional.

III.C.3 Evaluación sensorial de yerba mate estacionada

La Tabla III-4 muestra los aciertos, la proporción y el valor p, en relación al Z encontrado por tabla para la comparación de cada par. Se determinó que existen diferencias significativas entre las muestras ZA y MTZA. Se realizaron en este caso, 42 pruebas, de los cuales 25 resultaron correctas, es decir, que notaron diferencias entre el método de procesamiento con agua y procesamiento con el método tradicional, esto representa el 59,5 % de los casos, con un p valor menor a 0,0001. Los panelistas comentaron que algunos extractos resultaron más “fuertes” es decir, más amargos, y en otros casos notaron que todavía faltaba maduración, para el caso de yerba zapecado con agua, esto puede ser posible ya que 40 días de estacionamiento son el límite inferior para la maduración de las muestras. Los catadores no encontraron desagradables las muestras zapecadas con agua, y en algunos casos hicieron notar que resultaba con mejor sabor que las muestras zapecadas con chip.

En la comparación ZV versus MTZV, se acepta que las muestras no tienen diferencias estadísticas entre sí, y que de 54 pruebas solamente 24 resultaron aciertos, es decir el 44,4 % notó diferencias, el p-valor resultó cercano al límite de confianza utilizado de 0,05.

Tabla III-4. Resultados del análisis comparativo estadístico con la prueba Z.

Comparación	Aciertos	Totales	Proporción (A/T)	Proporción Teórica	p
ZA - MTZA	25	42	0,595	0,333	0,0001
MV -MTZV	24	54	0,444	0,333	0,0700
SMO - MTMO	25	66	0,379	0,333	0,4010

Por último, las comparaciones del par SMO – MTMO fue la que mostró menor diferencia estadística, de 66 pruebas, 25 fueron aciertos, representando el 37,9 %.

Si bien existen pocos antecedentes sobre aceptabilidad sensorial de yerba mate como infusión ya sea por el agregado de hierbas u otras sustancias (como minerales) en relación al consumo tradicional, algunos estudios mencionan la posibilidad de la saturación de zonas gustativas a elevadas concentraciones de sólidos solubles (Scipioni

y col., 2010). Orjuela-Palacio y col. (2014) realizaron pruebas para evaluar la aceptabilidad de bebidas a base de yerba mate con alto contenido de polifenoles, en las cuales consideraron la posibilidad de que en el test de triangulo no se aprecien diferencias entre muestras por el efecto de la saturación en las zonas gustativas del sabor amargo. Deladino y col. (2013) analizaron el efecto del atributo amargo y la acidez en sopas enriquecidas con extractos de yerba mate, sin embargo, utilizaron bajas concentraciones de extracto, con lo cual las notas de amargo y flavor característico de la yerba mate no fueron significativos.

III.C.4 Aspectos energéticos del secado post- zapecado.

En la actualidad existe una tendencia a combinar diferentes procesos de secado con el propósito de minimizar el consumo energético, siempre que las características del producto lo permitan. Como se mencionó anteriormente el secado industrial se realiza en secaderos de cinta con flujo de aire transversal. Este proceso, a temperaturas que varían de 90°C a 120 °C, tiene una duración de 4 a 6 h. En la búsqueda de alternativas a fin de evitar el contacto directo de gases de combustión con el producto y reducir el consumo energético, se realizó el estudio de la influencia de distintos pre-tratamientos (zapecado) en la velocidad de secado de la yerba mate cuando esta se secó a escala piloto.

Se determinó que el contenido de humedad de las muestras post- zapecado presentó diferencias significativas entre las zapecadas con agua (176 g agua /100 g de sólido seco, o %bs) y vapor (157 %bs) respecto a las zapecadas con chip (56 %bs). En cuanto al procesamiento con microondas, el valor inicial de humedad promedio correspondió al de la hoja verde sin procesar (140 g agua/100 g ss).

Se midió la pérdida de peso en función del tiempo y se determinó la cinética de secado (Figura III-29). Luego de 180 minutos de secado, se encontró que la humedad en las muestras zapecadas con agua varió entre 7,80 %bs y 9,70 %bs mientras que para las muestras zapecadas con vapor entre 5,80 %bs y 6,20 %bs y las muestras zapecadas con chip alcanzaron entre 4,20 %bs y 5,90 %bs.

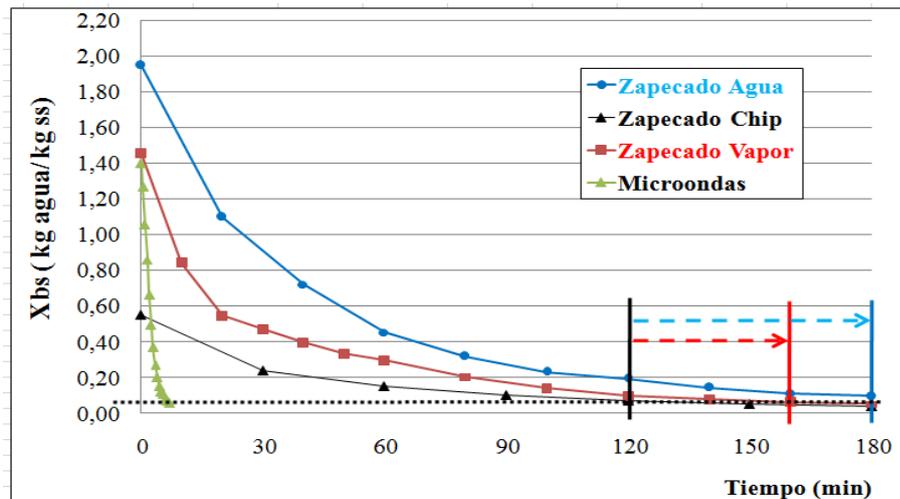


Figura III-29. Cinética de secado según el tipo de zapecado previo

Se determinó que, en promedio, se necesitan 40 a 60 minutos adicionales de secado en muestras zapecadas con agua o vapor para alcanzar el mismo contenido de humedad de muestras zapecadas con chip y secadas con aire caliente.

El caso del secado con microondas tiene un método combinado zapecado-secado, sin embargo, se ha encontrado que los tiempos de secado son extremadamente cortos en comparación al secado convectivo. En este trabajo no se determinó el costo energético equivalente por kg de hoja verde procesada que se requeriría para operar dicho secadero por microondas.

III.D Conclusiones

Los métodos alternativos de procesamiento de yerba mate se estudiaron desde el punto de vista fisicoquímico, sensorial y energético a fin de evaluar la factibilidad de los mismos en la implementación a escala industrial, y determinar que parámetros de calidad resultarían alterados o modificados cuando la yerba mate se procesaba con algún método de zapecado y secado particular.

La modificación del proceso de zapecado ha influenciado significativamente en la mayoría de los parámetros de calidad, en algunos casos se han encontrado una conservación de atributos y en otros casos consecuencias indeseables para la calidad.

En el caso del color, los mejores resultados se han obtenido con el método de microondas para el parámetro de color L, aunque el indicador “a” asociado al verde se conserva mejor en el método zapecado con agua, sin diferencia con su método de referencia.

Los solubles obtenidos por extracto acuoso resultaron significativamente menores en el zapecado con vapor y zapecado con agua, una pérdida en torno a 3 % de solubles cada 100 g de sólidos secos resultaría significativo desde el punto de vista económico.

Los polifenoles resultaron significativamente menores en las muestras zapecadas con agua y zapecadas con vapor. No se encontraron diferencias entre muestras procesadas con microondas y su método de referencia. La capacidad antioxidante fue menor en el zapecado con agua y mayor en el secado con microondas, pero no se encontraron diferencias respecto al método tradicional en el zapecado con vapor.

Las cenizas totales fueron significativamente menores en el secado con microondas. Los minerales Ca y Mg, mostraron valores considerablemente mayores en el secado con microondas, y no se encontraron diferencias en los métodos de zapecado con vapor y con agua. El Fe mostró un comportamiento errático en la comparación de valores medios entre métodos

Al comparar sensorialmente yerba mate obtenida con el procesamiento tradicional y otros métodos alternativos nuevos de procesamiento (zapecado con agua caliente o vapor y secado y procesamiento con microondas) utilizando el método del triángulo, se encontró que los consumidores detectaron diferencias en solo un caso, el procesamiento con agua versus el tradicional. En ninguna de las comparaciones los consumidores manifestaron encontrar sabores desagradables. De esta forma, el procesamiento tradicional, que pone en contacto al producto con gases de combustión que pueden resultar contaminantes, se puede reemplazar por otros métodos en los que el producto no tiene contacto con humos. Estos resultados se pueden considerar importantes debido a que la yerba mate es un producto en el que el consumidor es poco proclive a aceptar cambios en el sabor.

Al determinar la humedad de la yerba mate inmediatamente post-zapecado y comparar con la hoja verde, se encontró que la yerba mate zapecada con agua tuvo una ganancia como resultado de la adsorción de agua sobre las ramas. Esto tuvo influencia sobre la

cinética de secado (tiempo de secado) en planta piloto donde, para alcanzar valores cercanos a 5 % bh de humedad fueron necesarios entre 40 y 60 minutos adicionales de secado sobre las muestras zapecadas con vapor y con agua respecto al tiempo de secado requerido para ramas zapecadas por métodos tradicionales.

Capítulo IV. Aspectos energéticos del secado de yerba mate. Eficiencia

IV.A Introducción

Los requerimientos energéticos más importantes en el procesamiento se tienen en las etapas de zapeado y secado.

Al igual que otros bienes producidos en la provincia de Misiones, la elaboración de yerba mate requiere grandes cantidades de energía calorífica, a partir de la combustión de leña. Este requerimiento energético no ha sido considerado como un punto influyente en la economicidad del proceso por décadas debido al bajo costo del combustible y la abundancia de recursos naturales. Sin embargo, en los últimos años la normativa vigente, ha dictaminado que las industrias de la provincia deben sustituir paulatinamente el combustible proveniente de leña de monte por madera de bosque implantado (renovable) y/u otros combustibles. Por esta razón y debido a la escasez de recursos forestales renovables, la influencia del costo del mismo en el proceso global ha pasado de ser menor al 5% a valores cercanos al 15 %. Por otra parte, el estudio de la eficiencia térmica de un equipo junto a la distribución energética en el mismo resulta muy importante para estimar los costos operativos y los puntos críticos requeridos para mejorar esos costos.

La industria manufacturera de yerba mate ha sido desprolija desde el punto de vista energético, y son pocos los antecedentes que caractericen el funcionamiento de los secaderos en estas industrias, ya que son equipos en algunos casos rudimentarios, que son replicados en otras industrias de acuerdo al fabricante. Se han observado en secaderos de leña eficiencias menores al 10 %, lo que resulta inverosímil desde una óptica lejana, pero real si se hace un estudio detallado de la misma y la distribución energética en estos secaderos (Kanzig y col., 1987; Zanoelo, 2007; Schmalko, 2005, Holowaty y col., 2013).

Un problema adicional trajo la necesidad de obtener productos libres de humo, por la presencia de hidrocarburos aromáticos policíclicos, productos de la mala combustión de la leña (Thea, 2016). Por lo tanto, a los problemas de eficiencia se sumaron

modificaciones necesarias como los intercambiadores de calor. El presente capítulo realiza un diagnóstico de la eficiencia y distribución energética de varios secaderos de yerba mate que operan de manera similar, situados en la provincia de Misiones, cuyos resultados fueron útiles para tomar decisiones en el paso siguiente que es la simulación y predicción de mejores condiciones operativas de estos secaderos a fin de reducir el consumo de combustibles o bien mejorar el rendimiento de producción.

IV.B Materiales y Métodos

IV.B.1 Establecimientos industriales

El trabajo se realizó en 6 establecimientos de procesamiento primario de la provincia de Misiones y Norte de Corrientes.

Los zapecadores de los establecimientos tenían dimensiones similares de aproximadamente 9,5 m de longitud y 2 m de diámetro.

Las cintas de secado fueron similares en todos los casos. Tenían una longitud de 30 m y un ancho de 4 m. Cada secadero estaba construido de mampostería y techo de chapa, donde se ubicaban las chimeneas de salida de los gases. Las ramas formaban un lecho de 1 m de altura sobre cada cinta. Los gases de combustión eran introducidos por medio de boquillas localizadas en la parte inferior de la cinta de secado.

El establecimiento A perteneciente a la zona Norte Misiones utiliza chip de madera como combustible. Es un secadero continuo de producción aproximada de 6500 kg de hoja verde por hora.

El establecimiento B es un secadero similar al anterior, que utiliza chip de madera en el Norte de Corrientes, con una capacidad de procesamiento de 3500 kg/h de hoja verde.

El establecimiento C procesa su materia prima en un secadero de cinta con capacidad de producción de 2800 kg de hoja verde por hora. El proceso de zapecado y secado utiliza chip de madera como combustible.

En el establecimiento D utiliza chip de madera. Este establecimiento procesa unos 4500 kg de hoja verde por hora y pertenece a la zona Sur de la provincia de Misiones.

En el establecimiento E utiliza chip de madera en el zapecado y utiliza calentamiento indirecto en la cinta de secado. Este establecimiento procesa unos 3500 kg de hoja verde por hora y pertenece a la zona Centro de la provincia de Misiones.

El establecimiento F es de funcionamiento similar al E, con zapecado utilizando chip de madera, e intercambiadores de calor gas-gas en las cintas de secado. El volumen procesado es aproximadamente de 3000 kg/h de hoja verde.

IV.B.2 Mediciones en la línea de producción

Las mediciones se realizaron por duplicado en dos días diferentes en cada secadero. En el zapecador se midieron las temperaturas y se determinaron los contenidos de humedad del sólido a la entrada y salida. Se obtuvo el flujo de gases (velocidad a través de la chimenea), la humedad y la temperatura. La Figura IV-1 muestra el esquema de un zapecador. Con verde se indican puntos de medición de propiedades del sólido y con rojo, la medición de propiedades de gases.

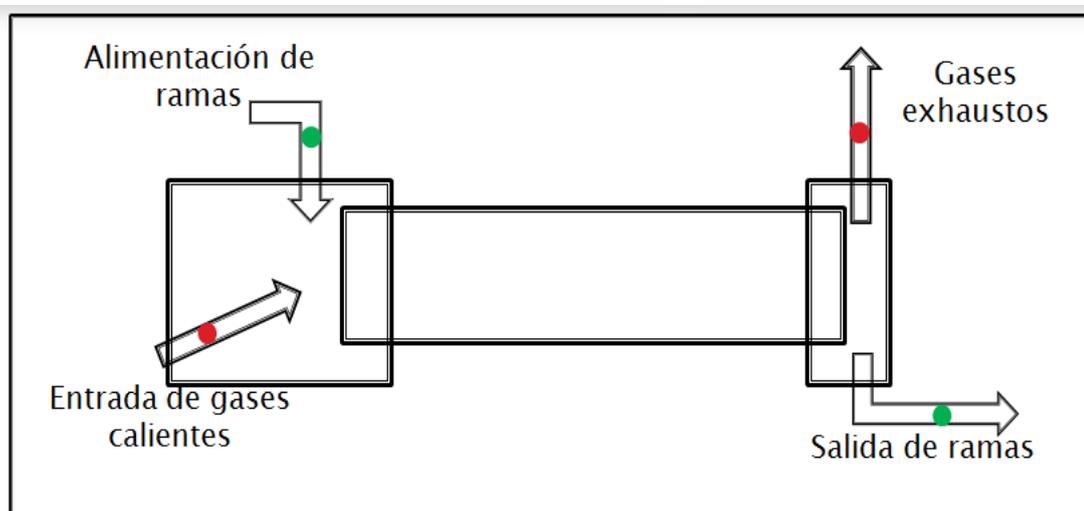


Figura IV-1. Esquema de un zapecador y puntos de medición.

En las cintas de secado se midieron la temperatura, contenido de humedad del sólido a la entrada y salida, y la temperatura del gas a la salida, de la misma manera que en el zapecador.

Se determinaron las propiedades de los gases de salida del secadero de cintas midienddo temperatura, humedad y velocidad.

La Figura IV-2 muestra el esquema de un secadero de cintas dobles superpuestas, los puntos verdes indican puntos de medición de propiedades del sólido, y los puntos rojos, medición de propiedades de gases.

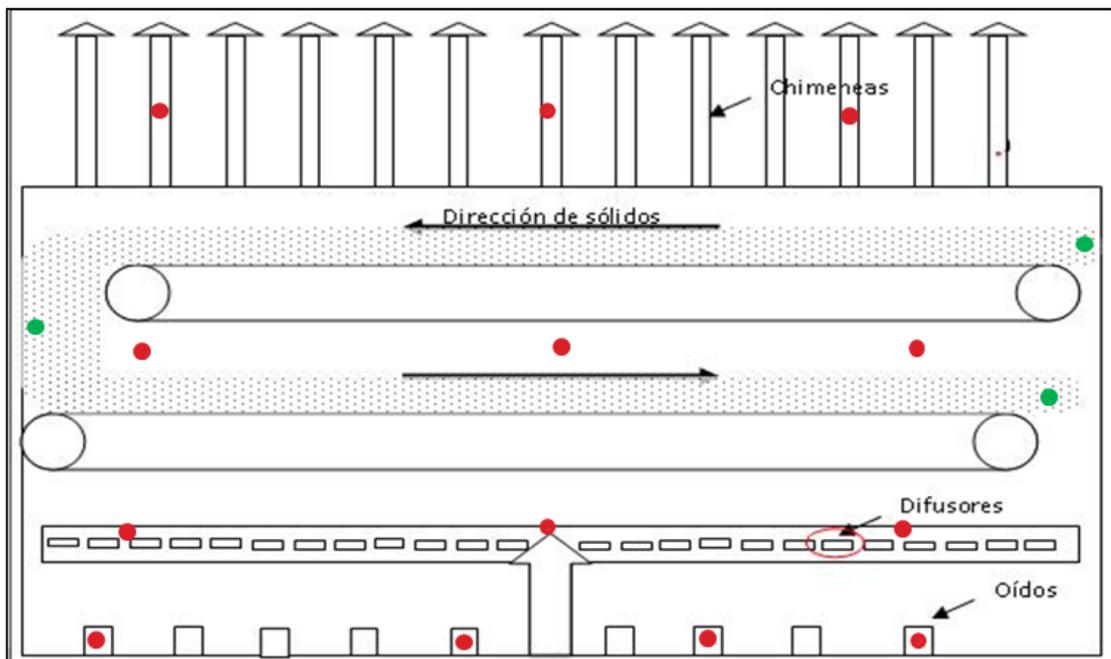


Figura IV-2. Esquema de un secadero tipo doble cinta superpuesta y puntos de medición.

El flujo de las ramas fue calculado considerando la producción de los 7 días y el tiempo de trabajo; mientras que el flujo de combustible en cada etapa fue calculado considerando el consumo y el tiempo de trabajo (Schmalko y col., 2003).

Se determinó la humedad de las muestras utilizando un medidor de humedad Ohaus – MB200 que indica la humedad en base húmeda de la muestra con relación a su pérdida de peso.

La temperatura del aire se midió utilizando termómetros de mercurio (con una precisión de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$) y en algunas determinaciones se utilizó un tubo Pitot multifunción (que indicaba temperatura, y velocidad del aire/gas) marca Testo 510 factor Pitot 1.

Según la temperatura del gas se utilizó un anemómetro digital Prova AVM 03 para medir la velocidad de los gases y en algunas determinaciones un medidor tipo ventilador con cuentavueeltas, marca Wilh Lampracht KG, modelo 1400/351028, de origen alemán (con una precisión de ± 1 m/min).

IV.B.3 Determinación de la eficiencia energética

Una de las formas más usuales de definir la eficiencia energética de un secadero es la relación de energía utilizada para evaporar agua y la energía total generada (Kudra, 2004).

Para calcular la energía utilizada para evaporar el agua, se necesita conocer en primer lugar, la cantidad de agua evaporada y el calor latente de evaporación. La cantidad de agua evaporada se obtiene con un balance de masa, mientras que el calor latente de evaporación se obtiene de tablas. Este valor depende de la temperatura (540 kcal/kg de agua evaporada a 100 °C) y del contenido de humedad. Cuando el contenido de humedad es bajo (por debajo de 20 %, bs), se debe considerar un calor adicional de adsorción (en el orden del 10 %) (Ver el Anexo 2) (Schmalko y Alzamora, 2005).

Para determinar la energía generada es necesario conocer la cantidad de combustible utilizado y su calor de combustión. Cuando se utiliza leña, el calor de combustión depende en gran medida del contenido de humedad, por lo que se pueden tener grandes variaciones. Los valores usuales de poder calorífico inferior de eucalipto seco están entre 4.500 y 4.900 kcal/kg; mientras que el material húmedo puede tener valores de 2.400 kcal/kg. (Perry y Green, 1997).

Los valores de eficiencia energética dependen del tipo de material que se seca y del tipo de equipo utilizado. En la bibliografía se encuentran valores de eficiencias energéticas para equipos similares al zapecador (secadero rotatorios) y a los secaderos de cinta. (Mujundar, 2007; Perry y Green, 1997).

IV.B.4 Ecuaciones de balances en el zapecador y el secadero.

Cálculo de flujos de sólidos

Entrada y salida de sólidos

Contenido de humedad x1(bh)

Contenido de humedad X1(bs)

Calor específico en el producto

$$C_{sh} = 0,428 + 0,564 * x \quad \text{Ec. IV-1}$$

$$C_{ss} = C_{sh}/(1-x) \quad \text{Ec. IV-2}$$

Entalpía del sólido

$$H_s' = C_{ss} * (T_s - T_o) \quad \text{Ec. IV-3}$$

Cálculo de Flujos de Aire

Salida de gases de combustión (chimeneas)

Volumen húmedo de Anexo 1: Diagrama psicrométrico

$$v_{h_2} = (0,00283 + 0,00456 * Y_2') * (T_{g_2} + 273) \quad \text{Ec. IV-4}$$

Flujo volumétrico V_2 medido en planta

Flujo másico de aire seco

$$G_s' = V_2 / v_{h_2} \quad \text{Ec. IV-5}$$

Capacidad calorífica del aire de Anexo 1: Diagrama psicrométrico

$$C_{as_2} = 0,24 + 0,46 * Y_2' \quad \text{Ec. IV-6}$$

Entalpía del aire

$$H_{G_2}' = C_{as_2} * (T_{g_2} - T_o) + Y_2' * \lambda_o \quad \text{Ec. IV-7}$$

Entrada de aire por oídos

Volumen húmedo del aire a temperatura ambiente (20°C)

$$v_{h_1} = (0,00283 + 0,00456 * Y_{oídos}') * (T_{g_{1o}} + 273) \quad \text{Ec. IV-8}$$

Flujo másico de aire seco de oídos (Gs oídos)

$$G_s' \text{ oído Ext.} = V_{IEXT} / v_{h_{oídos}}$$

$$G_s' \text{ oído int.} = V_{IINT} / v_{h_{oídos}}$$

Capacidad calorífica del aire del Anexo 1: Diagrama psicrométrico

$$C_{as_{1oídos}} = 0,24 + 0,46 * Y_{oídos}' \quad \text{Ec. IV-9}$$

Entalpía del aire

$$H_{G_{oídos}}' = C_{as_{oídos}} * (T_{g_{oídos}} - T_o) + Y_{oídos}' * \lambda_o \quad \text{Ec. IV-10}$$

Entrada de gases de combustión (ventilador –difusores)

Flujo volumétrico

Flujo másico

$$G_{s1}' = G_{s'} - G_{oidos}'$$

$$G_{s1}' * Y_1' + Ss' * X_1' + G'_{oidos} * Y_{oidos}' = G_{s'} * Y_2' + Ss' * X_2' \quad \text{Ec. IV-11}$$

$$Y_1' = (G_{s'} * Y_2' + Ss' * (X_2' - X_1') - G'_{oidos} * Y_{oidos}') / G_{s1}' \quad \text{Ec. IV-12}$$

Calor específico del aire

$$C_{as1} = 0,24 + 0,46 * Y_1' \quad \text{Ec. IV-13}$$

Entalpía de gases de combustión

$$H_{G1}' = C_{as1} * (T_{G1} - T_0) + Y_1' * \lambda_0 \quad \text{Ec. IV-14}$$

Cálculo de calores

Calor de pérdidas

$$Q_{p1} = Ss' * (H_{S1}' - H_{S2}') + G_{s1}' * H_{G1}' + G_{s'_{oidos}} * H_{G_{oidos}'} - G_{s'} * H_{G2}' \quad \text{Ec. IV-15}$$

Cantidad de agua evaporada sin influencia significativa del calor de sorción

$$M_{agua} = Ss'(X_1' - X_{2B}') \quad \text{Ec. IV-16}$$

Sacando los datos de calor de sorción para el xilema (Anexo 2)

Cantidad de agua evaporada con influencia del calor adicional de sorción

Para distribución y eficiencia

Cantidad de agua evaporada

$$Ss'(X_1' - X_2') \quad \text{Ec. IV-17}$$

Calor necesario para evaporación = Q_{evap} = Agua evaporada * Calor de evaporación

Calor de pérdidas = Q_{p1}

Calor perdido en la chimenea (consideramos al aire como un receptor de calor infinito. (no se calienta)

$$Q_{salida} = G_{s'} * C_{asprom} * (T_{G2} - T_a) \quad \text{Ec. IV-18}$$

Calor de calentamiento del sólido =

$$Q_{calent} = Ss' * C_{ss(prom)} * (T_{s2} - T_{s1}) \quad \text{Ec. IV-19}$$

Salida con el producto

$$Q_{prod} = Ss' * C_{ss2} * (T_{s2} - T_0) \quad \text{Ec. IV-20}$$

IV.C Resultados y discusión

IV.C.1 Zapecadores tradicionales.

En la Tabla IV-2 se presentan los porcentajes de la distribución de energía en el zapecador. Estos datos se compararon con los de consumo energético en secaderos rotatorios obtenidos de la bibliografía (Menshutina y col., 2004; Mujundar, 2007; Perry y Green, 1997). Se puede observar que existen diferencias apreciables entre las eficiencias del equipo y el valor de la bibliografía.

Las principales pérdidas de energía son en forma de calor, ya que los equipos en general son tambores de metal sin aislación. La energía expresada como salida de gases no puede ser utilizada como recirculación por su elevado contenido de humedad. Esto haría solamente disminuir aún más la eficiencia.

Tabla IV-1. Datos requeridos para los balances medidos en los zapecadores.

Equipo	Sitios	Propiedades de gases/Aire				Condiciones de yerba mate	
		Ta (°C)	Tw (°C)	Y'(kg v/kg as)	V (m ³ /h)	x (bh)	T (°C)
Zapecador A	Entrada	-	-	-	-	0,635	18
	Salida	125	62	0,075	44.640	0,435	74
Zapecador B	Entrada	-	-	-	-	0,64	23
	Salida	110	51	0,055	49.650	0,41	76
Zapecador C	Entrada	-	-	-	-	0,62	21
	Salida	118	62	0,08	45.210	0,39	79
Zapecador D	Entrada	-	-	-	-	0,62	16
	Salida	112	57	0,065	43.545	0,33	68

Tabla IV-2: Distribución y eficiencia energética en zapecadores industriales que utilizan chip de madera como combustibles comparados con la bibliografía.

Distribución	Zapecador A		Zapecador B		Zapecador C		Zapecador D		Bibliografía
	E(kcal/h)	η	E(kcal/h)	η	E(kcal/h)	η	E(kcal/h)	η	%
Calor generado	2744477		2863944		2936055		3258299		
Secado (Eficiencia)	770195	28,1%	786840	27,5%	986831	33,6%	1186513	36,4%	45-80
Calentamiento sólido	118237	4,3%	128000	4,5%	139304	4,7%	97380	3,0%	10
Salida del producto	83666	3,0%	125048	4,4%	190217	6,5%	221195	6,8%	3
Salida de gases	1002949	36,5%	1100183	38,4%	940115	32,0%	989640	30,4%	20
Pérdidas	768196	28,0%	723071	25,2%	679647	23,1%	763740	23,4%	2

IV.C.2 Secaderos tipo cinta doble superpuesta con secado directo e indirecto

La etapa siguiente consistió en determinar la eficiencia de secado a partir de las variables medidas “in situ” de los secaderos. Se estudiaron 4 (cuatro) secaderos tipo cinta con secado directo, es decir que utilizaban gases de combustión para secar (Secaderos A, B, C y D) y dos secaderos de similares características a los anteriores pero el secado se realizaba con aire caliente proveniente de intercambiadores gas-gas. La Tabla IV-3 presenta las variables medidas en cada secadero, requerida para efectuar los balances de masa y energía, así como los datos que luego se utilizarán en el Capítulo V (Sobre simulación y optimización del secado).

Tabla IV-3. Datos medidos en los secaderos de cinta requeridos para los balances

Equipo	Sitios	Propiedades de Gases/Aire				Condiciones de yerba mate	
		Ta (°C)	Tw (°C)	Y'(kg v/kg as)	V (m ³ /h)	Xm (bs)	T (°C)
Secadero A	Entrada	340	-	-	-	0,396	55
	Oídos	16		0,0110	23540		
	Salida	56	38	0,0364	47126	0,047	65
Secadero B	Entrada	295	-	-	-	0,358	68
	Oídos	20	19	0,0110	21654		
	Salida	74	41	0,0620	39894	0,027	67
Secadero C	Entrada	380	-	-	-	0,325	59
	Oídos	14		0,0110	18707		
	Salida	56	38	0,0570	45545	0,026	75
Secadero D	Entrada	375	-	-	-	0,286	64
	Oídos	26	19	0,0120	22279		
	Salida	72	39	0,0260	51458	0,023	69
Secadero E (Indirecto)	Entrada	210	-	0,0110		0,525	69
	Oídos	No Posee					
	Salida	51	38	0,0364	41024	0,022	73
Secadero F (Indirecto)	Entrada	235	-	0,0120	-	0,384	53
	Oídos	No Posee				-	-
	Salida	56	36	0,0260	45541	0,035	71

En general las condiciones de salida de humedad de producto son las variables fijadas o deseadas en el proceso. Sin embargo, cuando el contenido de humedad de la yerba mate se hace menor al 20 % (bs), se debe tener en cuenta el calor de sorción, el cual resulta significativo a medida que la humedad se hace menor. Este representa el calor adicional para eliminar el agua del producto mediante el secado y puede representar hasta el 20 % del consumo energético. Este aspecto es importante, a pesar que sería suficiente el secado hasta valores en torno al 5 % (bs) la mayoría de las industria decide secar el producto hasta valores cercanos al 2% (bs), lo cual podría representar un costo significativo adicional. En todos los casos estudiados, las humedades promedio al final de la 2° cinta (en la descarga del secadero) ha sido menor al 4 % (bs).

Los secaderos A, B, C y D constan de las aperturas laterales llamadas oídos que se describieron anteriormente. En algunos casos representa hasta el 35 % del caudal total ingresado. La mezcla de aire fresco que ingresa por los mismos con las corrientes provenientes de la combustión a temperaturas elevadas, por un lado equilibran la temperatura de trabajo para operar entre 100 y 125 °C debajo de la cinta inferior, por otro lado permiten disminuir el contenido de humedad de la mezcla gaseosa, ya que ingresa con un mínimo contenido de agua, cuando en la combustión se aporta además del producto de la misma, la humedad contenida en la madera.

En días de baja temperatura el aire frío que ingresa por los oídos disminuye significativamente la temperatura de mezcla y por lo tanto, esos oídos deben ser tapados parcialmente para mantener la temperatura operativa del secadero.

Los secaderos E y F, no tienen oídos ya que todo el aire caliente que ingresa es proveniente de los intercambiadores (que a su vez proviene de la atmósfera, por lo tanto es aire libre de gases) y basta con regular la velocidad de alimentación para obtener las condiciones de trabajo deseadas, sin necesidad de mezclar corrientes que vayan en detrimento de la eficiencia. Sin embargo, existe un costo adicional que no será considerado en este trabajo, que es producto del ineficiente intercambio de calor gas – gas.

En la Tabla IV-4 se presentan los resultados de eficiencias en secaderos con sistemas de secado por contacto directo con los gases de combustión. Los valores de eficiencia propiamente dicha se comprenden entre 27,1% para el secadero A hasta el 12 % de en el

secadero D, los cuales se comparan con los citados en la bibliografía (Mujundar, 2007). Llamativamente este último representa valores bajos en concordancia con trabajos anteriores, en secaderos industriales que ocupaban combustible en forma de leña, donde se reportaron eficiencias en torno al 7 % (Holowaty y col., 2013). Es decir, solamente el 12 % de la energía aportada al secadero se utiliza para evaporar agua. La distribución energética muestra un porcentaje significativo se utiliza en el calentamiento del aire proveniente de los oídos (ítem “calentamiento de aire”), cuyo fin se ha explicado anteriormente. Así mismo el porcentaje de aire caliente que sale por las chimeneas resulta elevado en el caso D, con temperaturas promedio de 72 °C de acuerdo a la Tabla IV-3, esto tiene impacto directamente sobre el porcentaje de calor que es eliminado del secadero con la corriente de gas que no se recupera ni se aprovecha en la actualidad. En estudios previos se han encontrado temperaturas en las chimeneas de hasta 88 °C (Holowaty y col. 2013).

La Tabla IV-5 presenta los resultados de distribución energética en secaderos indirectos. Se comprobó un aumento sustancial en la eficiencia térmica de secado hasta valores cercanos al 40 %. Por otra parte la ausencia de oídos permite que todo el aire que ingresa sea calentado previamente. La salida con el aire se mantiene en valores similares a los hallados en secaderos directos.

Un apartado especial representa el término pérdidas. Esta es la variable de ajuste en el balance de masa y energía, y no puede ser cuantificable por sí misma. La disparidad entre los secaderos es atribuible a los problemas de diseño y fugas en los edificios que en algunos casos pueden ser significativos por la falta de mantenimiento adecuado o las sucesivas modificaciones sin estudios de ingeniería adecuados que permitan optimizar las corrientes de producto y de gases, minimizando el consumo energético o bien mejorando la eficiencia de secado.

Tabla IV-4. Distribución y eficiencia energética en secaderos industriales tipo cinta dobles superpuestas que utilizan chip de madera como combustibles comparados con la bibliografía. (SECADO DIRECTO)

Distribución	Secadero cinta A		Secadero cinta B		Secadero cinta C		Secadero cinta D		Bibliografía
	E(kcal/h)	η	E(kcal/h)	η	E(kcal/h)	η	E(kcal/h)	η	%
Calor generado	1575195		1180712		1258450		1427000		
Secado (Eficiencia)	426874	27,1%	290000	24,6%	285380	22,7%	172780	12,1%	55
Calentamiento sólido	56436	3,6%	45000	3,8%	18870	1,5%	12560	0,9%	12
Salida del producto	39954	2,5%	67000	5,7%	57246	4,5%	40038	2,8%	3
Salida de gases	550601	35,0% [#]	300066	25,4%	310880	24,7%	564825	39,6% [#]	25
Calentamiento aire	390419	24,8%	257745	21,8%	470350	37,4%*	426541	29,9%*	sin datos
Pérdidas	110949	7,0%	220636	18,7%	115600	9,2%	208670	14,6%	2

Tabla IV-5. Distribución y eficiencia energética en secaderos industriales tipo cinta dobles superpuestas comparados con la bibliografía.
(SECADO INDIRECTO)

Distribución	Secadero cinta E (I)		Secadero cinta F (I)		Bibliografía
	E (kcal/h)	η	E(kcal/h)	η	%
Calor generado	1223774		1310536		
Secado (Eficiencia)	484353	39,6 %	532788	40,6 %	55
Calentamiento sólido	38668	3,2 %	19042	1,5 %	12
Salida del producto	39531	3,2 %	29827	2,3 %	3
Salida de gases #	376700	30,8 %	353888	27,0 %	28
Pérdidas	284510	23,2%	374978	28,6 %	2

IV.D Conclusiones sobre eficiencia energética.

Se encontraron valores bajos de eficiencia de secado en los cuatro establecimientos de procesamiento primario que utilizan secado directo. Los valores de pérdidas en los secaderos rotatorios (zapecado) fueron elevados, y disminuyen considerablemente la eficiencia con un desperdicio innecesario de energía por las paredes de los mismos ya que no poseen sistemas aislantes. Con sistemas adecuados de aislación sobre los equipos se obtendrían mejoras inmediatas.

En los secaderos de cinta directo, en general, las eficiencias de secado variaron entre 24,6% y 27,1 %. Se debe prestar especial interés a los ítems de salidas por las chimeneas y el precalentamiento de aire o introducción de aire fresco a temperatura ambiente por los oídos que representa un porcentaje importante en el calor requerido para el secado. Si bien, se alcanzaron valores mínimos de contenido de humedad en todos los casos, se utiliza una elevada carga térmica para el calentamiento de aire fresco.

Los sistemas de calentamiento directo mejoraron la eficiencia de secado, no por el proceso en sí, sino por la eliminación de los sistemas de oídos. Además puede considerarse la reutilización de las corrientes de salida.

La implementación de mejoras tecnológicas en estos puntos críticos permitiría a priori, una reducción adicional del calor generado y una mejora considerable de la eficiencia energética.

Capítulo V. Simulación del secado de yerba mate en secaderos de cintas superpuestas²

V.A Introducción

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 a una cámara localizados en la parte inferior de la cinta. El aire es forzado a pasar inducido por el tiraje de chimeneas 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, del flujo de material, la altura y porosidad del lecho y del tipo de material (Khandari y Patankar, 1999; Sturgeon, 1996, Giner y col., 1996; Schmalko, 2005; Zanoelo, 2007; Faggion, 2016; Koop, 2015; Sabarez, 2015; Mujumdar, 2007).

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. Esto se debe a 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, temperatura y la composición (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).(Figura V.1)

² Este capítulo se basó en resultados obtenidos para simulación del secado en una sola cinta de la Tesis de Doctorado del Dr. M.E. Schmalko (2005).

Las ecuaciones utilizadas y metodología de modelado matemático se ha tomado como referencia junto al trabajo de investigación “Utilización de Gas Licuado Propano en el Procesamiento de la Yerba Mate: Modelado y Optimización de la Etapa de Zapecado”.

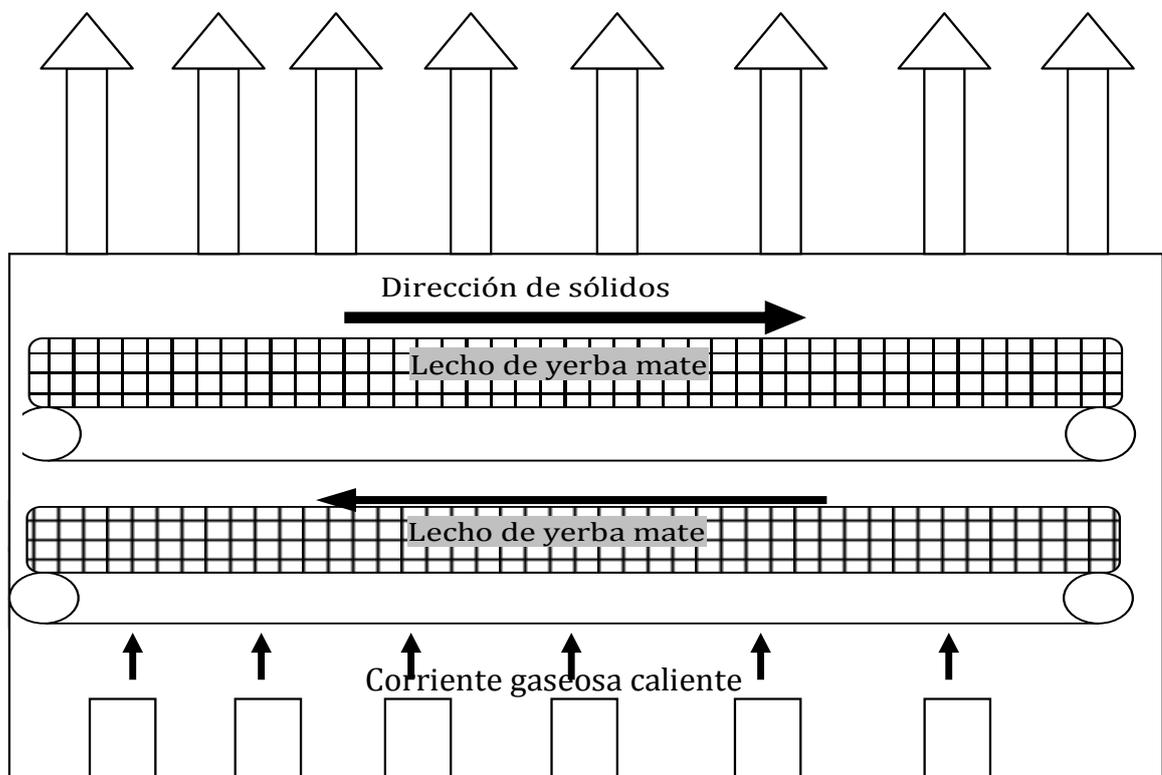


Figura V-1. Esquema del secadero de cintas tipo que se va a simular.

El modelado matemático es una herramienta útil para simular y probar el desempeño del proceso de secado, lo que permite generar resultados tangibles para una amplia gama de escenarios a través de un laboratorio virtual que sería demasiado costoso o requiere mucho tiempo para realizar en la etapa industrial. También permite al modelador predecir los resultados para la optimización y ampliación de los diseños de procesos mejorados y nuevos o no probados, acelerando la comprensión y disminuyendo los costes de desarrollo del proceso, sin necesidad excesiva de experimentación de ensayo y error de mano de obra. Sin embargo, los materiales alimenticios son extremadamente complejos en su estructura y composición, por lo que no existe una manera universalmente aceptable de modelar su comportamiento de secado, tal como lo ejemplifica el gran volumen de literatura publicada en varios enfoques de modelado (Kostoglou y col., 2013). Esto también refleja la extrema diversidad de los mecanismos de secado en los sistemas alimentarios. Mujumdar y Huang (2007) afirmaron que la mayoría de los modelos son aplicables para combinaciones específicas de productos y equipos y que el desarrollo de modelos de secado, por lo tanto, seguirá mejorando los intentos para hacer frente a estos desafíos.

El modelo matemático de un secadero permite conocer la evolución de la temperatura y contenido de humedad del sólido en las diferentes posiciones del lecho. Este método es 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. Uno de los métodos utilizados es el de las diferencias finitas. En este método, el nodo se selecciona de un tamaño tan pequeño como sea posible, de tal forma que las propiedades del aire y el material se pueden considerar constantes en el mismo (Schmalko, 2005).

En trabajos anteriores se estudió la influencia de la aplicación de tiempos de reposo durante el secado sobre el contenido de humedad (Holowaty y col., 2012) con resultados favorables desde el punto de vista de disminución del tiempo de secado en la búsqueda de mejorar la eficiencia energética.

En un trabajo preliminar reciente (Holowaty y Schmalko, 2017) se determinó que la utilización de sistemas indirectos, permitiría alcanzar valores medios de humedad de yerba mate 13,6 a 10,0% menores en el mismo tiempo de secado y en las mismas condiciones de temperatura de entrada y caudal volumétrico de aire/gases que si se utilizaban gases de combustión. Se utilizaron dos temperaturas extremas de secado que generalmente se utilizan 90 °C y 120 °C.

Durante los estudios de eficiencia en el Capítulo IV se observó que las mayores pérdidas se daban en las salidas por las chimeneas y, que cuando se utilizaba aire caliente libre de humo, esas pérdidas resultan significativas por el bajo contenido de humedad y elevada temperatura. Es por ello que se estudiaron diversas posibilidades dentro de los parámetros normales, observando el efecto en la salida de gases y buscando mantener la producción de yerba mate y humedad final en las mismas condiciones reales a fin de minimizar el consumo energético o bien, mantener las condiciones operativas pero aumentando la producción de la yerba mate.

El objetivo del presente capítulo es simular mediante un software el secado en doble cinta superpuestas y determinar el óptimo de operación en las nuevas condiciones de trabajo.

V.B Materiales y métodos

V.B.1 Modelado matemático

Se estudió el comportamiento de un secadero real de yerba mate durante el proceso en estado estacionario. El secadero denominado tipo cinta, con flujo cruzado, posee dos cintas superpuestas sobre las cuales se transporta un lecho de ramas de yerba mate de aproximadamente 1 metro. En condiciones normales el secadero opera entre 90 y 120 °C con un tiempo de residencia de 1,5 horas en cada cinta (Figura V.1)

V.B.2 Suposiciones

Se utilizaron ramas de yerba mate en la etapa de secado en cinta. El secadero en todos los casos (a menos que se aclare lo contrario) tenía una capacidad de producción de 4000 kg de hoja verde por hora, o bien 1440 kg de sólidos secos (ss) por hora. El contenido de humedad del sólido a la entrada se determinó utilizando Norma IRAM 20503 (año), pérdida de masa a 103 ± 2 °C, hasta peso seco. Los valores se expresan en base seca. Se tomó un valor medio de humedad de 10 muestras de yerba mate de diferentes días en un secadero de la provincia de Misiones (Holowaty y col., 2014c). Las características físicas de las ramas son las siguientes (Coelho y col., 2002; Crotti y col., 2002; Pilatti y col., 2015).

- Tipos: ramificadas y sin ramificar.
- Peso medio: 10,97 g (Valores extremos: 2,50 g y 30,00 g).
- Diámetro medio ponderado de los palos: 0,0034 m.
- Espesor medio ponderado de las hojas: 0,00036 m.

El secadero utilizado es de tipo cinta, con paredes de mampostería. Sus dimensiones: 30 m de largo por 4 m de ancho y 7 m de altura. La alimentación se realizaba en un extremo del secadero por medio de una cinta transportadora que permite formar un lecho de ramas de 1 m de altura (aproximadamente). Para los sistemas de aire caliente, el mismo se obtenía de un intercambiador de calor de tubos aleteados, introduciéndose por debajo de la cinta por medio de tubos con 5 bocas de salida en cada sección. Para el

caso de contacto directo, se utilizaron gases de combustión de chips de madera mezclados con aire, que ingresaban con el mismo sistema al secadero. Las corrientes gaseosas de salida se expulsaban al exterior por medio de 7 chimeneas ubicadas en el techo del secadero.

Las condiciones operativas como caudales, velocidades de flujo, rango de temperaturas se tomaron de trabajos anteriores sobre eficiencia térmica en secaderos de yerba mate (Holowaty y col., 2014b) y los datos obtenidos en el presente trabajo de investigación.

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.

V.B.3 Ecuaciones generales básicas, condiciones iniciales.

Transferencia de calor

$$\frac{\partial T_{\text{sólido}}}{\partial y(x=0)} = 0 \wedge T_{\text{sólido}} = cte$$

Ec. V-1

La temperatura del sólido a la entrada de la cinta (L=0) es la misma a toda la altura del lecho y se mantiene constante con el tiempo.

$$\frac{\partial T_{\text{aire}}}{\partial x(y=0)} = 0 \wedge T_{\text{aire}} = cte$$

Ec. V-2

La temperatura del aire a la entrada de la cinta (y=0) es la misma a toda la base de la cinta y se mantiene constante con el tiempo en las dos cintas. Se considera mezcla homogénea de los gases.

$$\frac{\partial Q_{aire}}{\partial x(y = o)} = 0 \wedge Q_{aire} = cte$$

Ec. V-3

El calor aportado que ingresa a cada cinta es constante a lo largo de la misma.

$$\frac{\partial Q_{hojas}}{\partial y(x = o)} = 0 \wedge Q_{hojas} = cte$$

Ec. V-4

El calor que ingresa al sistema aportado por las hojas es constante en toda la altura del lecho al ingreso de la cinta.

$$\frac{\partial Q_{palos}}{\partial y(x = o)} = 0 \wedge Q_{palos} = cte$$

Ec. V-5

El calor que ingresa al sistema aportado por los palos es constante en toda la altura del lecho al ingreso de la cinta.

La masa seca del sólido (hojas y palos) se mantiene invariable con el tiempo, al igual que la masa de aire seco (Gs) en condiciones normales de operación.

Las ecuaciones diferenciales que describen la variación de la temperatura en función del tiempo para los sólidos y los gases (mezcla entre el aire húmedo de entrada, productos de combustión y agua que se evapora de los sólidos) son las siguientes:

Hojas:

$$\frac{dT_h}{dt} = \frac{1}{M_{sh}(1 + X_h)Cp_h} [A_h h_h (T_g - T_h) - \gamma \lambda E_h] \quad \text{Ec. V-6}$$

Palos:

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{1}{M_{sp}(1 + X_p)Cp_p} [A_p h_p (T_g - T_p) - \lambda E_p] \quad \text{Ec. V-7}$$

Aire:

$$\frac{dT_g}{dt} = \frac{-1}{M_g(1 + Y_g)Cp_g} [A_h h_h (T_g - T_h) + A_p h_p (T_g - T_p) + E_h Cp_h (T_h - T_g) + E Cp_p (T_p - T_g)] \quad \text{Ec. V-8}$$

V.B.4 Transferencia de masa

Las pérdidas de humedad se calcularon utilizando las ecuaciones integradas de la 2° ley de Fick, considerándose la resistencia externa debido a la baja velocidad del aire.

Condiciones iniciales

$$\frac{\partial X_{hojas}}{\partial y(x=o)} = 0 \wedge X_{h_{y,L=0}} = cte$$

Ec. V-9

Humedad de las hojas en **la entrada** a cada cinta es un valor medio constante y no es función de la altura del lecho.

$$\frac{\partial X_{palos}}{\partial y(x=o)} = 0 \wedge X_{p_{y,L=0}} = cte$$

Ec. V-10

Humedad de los palos **en la entrada** a cada cinta es un valor medio constante y no es función de la altura del lecho.

$$\frac{\partial Y_{aire}}{\partial x(y=o)} = 0 \wedge Y_o = cte$$

Ec. V-11

Humedad del aire de entrada a cada dominio es Constante y No se modifica con la longitud x.

- En los palos se plantea la solución considerando un cilindro infinito con transferencia de masa en forma radial):

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\mu_n^2} e^{\left[\frac{-\mu_n^2 D_p t}{R_0^2} \right]} \quad \text{Ec. V-12}$$

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:

$$\frac{X_i - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} e^{\left[\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_h t}{L^2} \right]} \quad \text{Ec. V-13}$$

V.B.5 Método de resolución

Para la resolución de estas ecuaciones, se utilizó el método de las diferencias finitas hacia delante y un software Matlab 7.1 R2007a (Mathworks Inc., 2007). El secadero fue dividido en 1080 nodos: 120 en forma longitudinal y 9 de alto.

Se discretizó la cámara de secado como dos dominios independientes, uno inferior y otro superior con una distribución típica de nodos como la que se muestra en la Figura V-2.

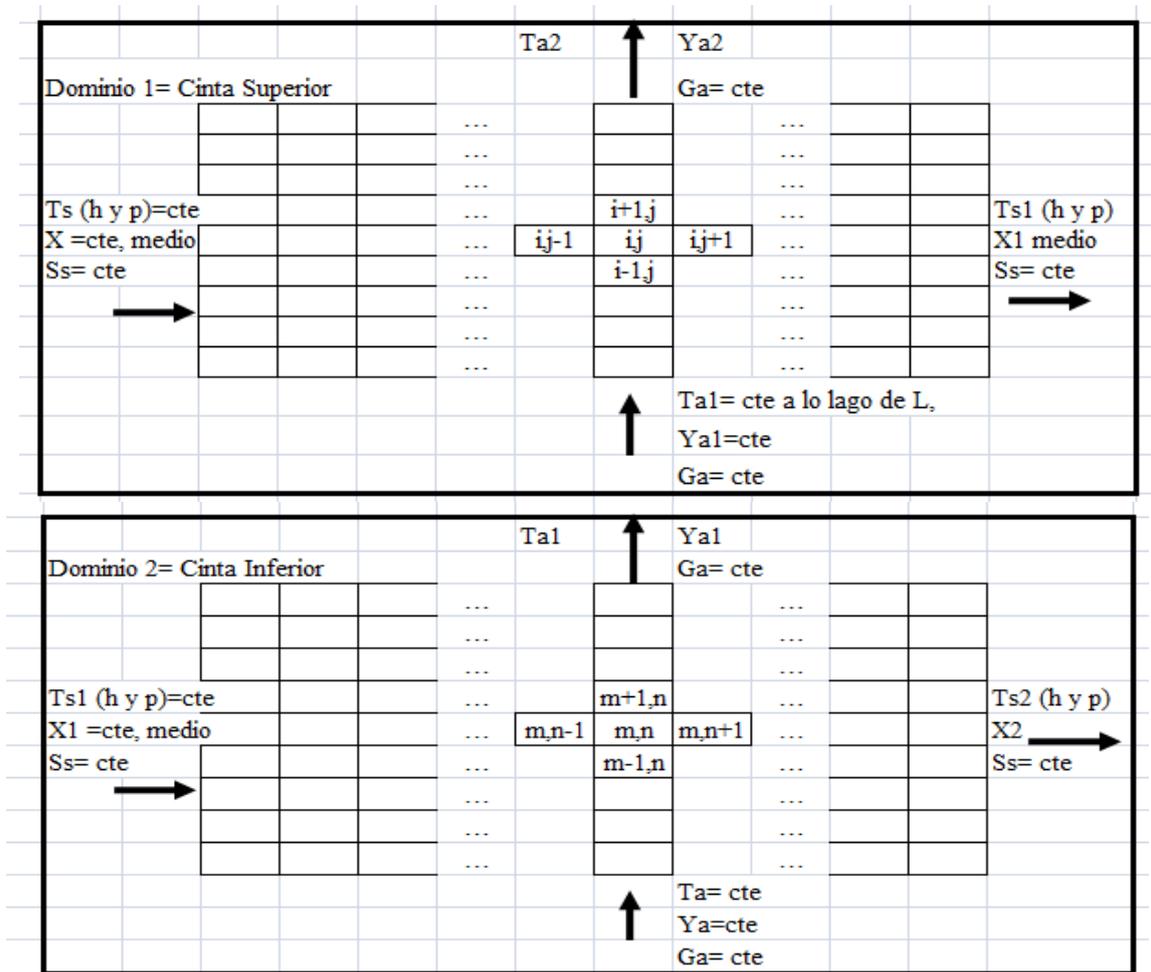


Figura V-2. Discretización del secadero como dominios independientes (cada cinta por separado).

Luego, las ecuaciones de balances generales quedarían para el nodo i+1:

$$Tp_{i+1} = Tpi + \frac{[Qconvp_i - Qevp_i]}{ms_p(1 + X_p)Cp_p} \cdot \Delta t \quad \text{Ec. V-14}$$

Temperatura de los palos

$$Th_{i+1} = Thi + \frac{[Qconvh_i - Qevh_i]}{ms_h(1 + Xh) * Cph} \cdot \Delta t \quad \text{Ec. V-15}$$

Temperatura de las hojas

$$Xp_{i+1} = Xpi + FUNCION * \Delta t \quad \text{Ec. V-16}$$

Humedad de los palos

$$Xh_{i+1} = Xeq + (Xhi - Xe) * e^{(-Deff * (\pi / \text{espesor})^2 \cdot \Delta t)} \quad \text{Ec. V-17}$$

Humedad de las hojas

Temperatura del Aire

$$Taire_{i+1} = Tai + \frac{[Qconvp_i + Qconvh + Qevp + Qevh + Qrp + Qrh + C]_i}{Gs(0.24 + 0.46Yai)Cpaire} \cdot \Delta t \quad \text{Ec. V-18}$$

Humedad del Aire

$$Yaire_{i+1} = Yai + \frac{[msh * (Xh(i) - Xh(i + 1)) + msp * (Xp(i) - Xp(i + 1))]}{Gsi(CTE)} \cdot \Delta t \quad \text{Ec. V-19}$$

V.B.6 Propiedades

Las propiedades y coeficientes de la fase gaseosa se obtuvieron de Perry y Green (1997) y Kreith & Bohn (1997). Las propiedades del sólido (densidad, conductividad térmica, calor específico, calor latente e índice de contracción) se obtuvieron de trabajos previos realizados (Schmalko y col., 1996; Schmalko y col., 1997). Las ecuaciones presentadas para determinar el coeficiente de difusión del agua en las hojas fueron estimadas a partir de datos experimentales obtenidos entre 70 y 120 °C (Schmalko y col., 1997; Ramallo y col., 2001), mientras que en los palos se trabajó con valores experimentales obtenidos entre 70 y 100 °C (Schmalko y Alzamora, 2001b; Schmalko y col., 2011).

Tabla V-1. 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 and 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 and Green , 1997, (p. 2.363)
$Cp_g = \sum y Cp_i$	Perry and Green , 1997, (p. 2.347)
$h_h = 0.648 \left(\frac{k_g}{L_h} \right) Re_L^{0.5} Pr^{1/3}$ <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> <p>Perry and Green , 1997, (p. 5.15-5.16)</p>
$h_p = 0.51 \left(\frac{k_g}{d_p} \right) Re_d^{0.5} Pr^{0.37}$	Kreith and Bohn, 1997, (p. 455)
$k_G = 0.74 \frac{D_g \rho_g}{d} \left(\frac{vd}{\nu} \right)^{0.5} \left(\frac{\nu}{D_g} \right)^{1/3}$ <p>(Palos)</p>	Perry and Green, 1997, (p. 5.65)
$k_G = 0.0365 \frac{D_g \rho_g}{L} \left(\frac{\nu L}{\nu} \right)^{0.8}$ <p>(Hojas)</p>	Perry and Green, 1997, (p. 5.60)

Tabla V-2. Propiedades y coeficientes del sólido utilizados en la aplicación del modelo y su fuente.

Parámetros	Referencias
$Cp_h = 1.539 \cdot 10^3 + 2,72 \cdot 10^3 \frac{X_h}{(1 + X_h)}$	Schmalko y col., 1997
$Cp_p = 1,79 \cdot 10^3 + 2,36 \cdot 10^3 \frac{X_p}{(1 + X_p)}$	Schmalko y col., 1997
$k_h = 0,142 + 0,0051 \frac{X_h}{(1 + X_h)}$	Schmalko y col., 1997
$\lambda = 7020 - 803 \ln(T)$	Schmalko y col., 1998
$\rho_h = 560 + 187X_h$ $\rho_p = 701 + 730X_p$	Ramallo y col., 2001
	Cap. 6; ec.13
$L_h = 2,6 \cdot 10^{-4} + 6,34 \cdot 10^{-5} X_h$	Ramallo y col., 2001
$s_p = \frac{0,613 + 0,192X_p}{0,613 + 0,192X_{p0}}$	Cap. 6; ec.11
$D_h = 6,64 \cdot 10^{-6} (1 + X_h) e^{\left[\frac{-3733}{T_h} \right]}$	Ramallo y col., 2001
$D_{pX} = 1,24 \cdot 10^{-7} (1 + 0,75X_p) e^{\frac{-2270}{T_p}} e^{412R_i}$ $D_{pB} = 9,95 \cdot 10^{-5} (1 + 0,28X_p) e^{\frac{-5968}{T_p}} e^{936R_0}$ $D_{ef} = \frac{1}{\frac{(d_B - d_x)}{d_B} \frac{1}{D_{pB}} + \frac{1}{mD_{p_x}}}$ m= pendiente de la línea de equilibrio corteza-xilema=1,61	Schmalko 2005

V.C Resultados y discusión

V.C.1 Estudios preliminares de condiciones de secado directo e indirecto con una sola cinta.

La hipótesis del trabajo preliminar consideró la posibilidad de secar con aire caliente generado por contacto indirecto a menor temperatura que el secado con gases de combustión, ya que el contenido de agua de los gases de combustión medio determinado en planta fue de 0,034 kg agua/ kg aire seco para el secadero de una sola cinta, cerca de tres veces mayor al contenido de agua del aire ambiente. Con ello se permitiría un menor valor de temperatura de aire para lograr valores similares de contenido de humedad en las hojas al final de la primera etapa de secado. Se ha considerado solamente el efecto del aumento de temperatura y el tipo de secado (indirecto o directo) para este trabajo.

Se simularon dos condiciones de trabajo para cada temperatura. La Tabla V-3 presenta las condiciones operativas y los contenidos de humedad promedio a partir del aporte de palos y hojas que tendría el sistema al final del secado en el secado de una sola cinta.

Tabla V-3: Condiciones de secado utilizadas para modelar el contenido de humedad de la yerba mate en el secadero tipo cinta.

T (°C)		Aire ambiental		Mezcla gases	
90		Y'a (kg agua/kgas)	0,011	Y'g (kg agua/kgas)	0,034
		vh (m ³ /kg)	1,04	vh (m ³ /kg)	1,08
		G's (kgas/s)	10,68	G's (kgas/s)	10,29
		X (kg agua/ kg ss)	Xmed	X (kg agua/ kg ss)	Xmed
	Palos	0,251	0,102	0,262	0,113
Hojas	0,022	0,032			
120		Y'a (kg agua/kgas)	0,011	Y'g (kg agua/kgas)	0,034
		vh (m ³ /kg)	1,132	vh (m ³ /kg)	1,182
		G's (kgas/s)	9,82	G's (kgas/s)	9,40
		X (kg agua/ kg ss)	Xmed	X (kg agua/ kg ss)	Xmed
	Palos	0,076	0,028	0,085	0,032
Hojas	0,002	0,003			

Se determinó que a la temperatura de 90 °C, utilizando aire caliente, se alcanzó un contenido de humedad promedio de 0,102 kg agua/kg de sólido seco (ss), el cual fue 10,13 % más bajo que al utilizar gases de combustión (0,113 kg agua/kg ss).

Al modelar el secado a la temperatura de 120 °C, el contenido de humedad de las ramas fue de 0,028 kg agua/kg ss cuando se utilizaron condiciones de aire caliente y 0,032 kg agua/kg ss cuando se utilizó el secado con gases de combustión, es decir, la utilización de aire caliente redujo un 13,6 % el contenido de humedad medio en las ramas.

V.C.2 Comparación de sistemas de secado directo con indirecto en doble cintas.

La Tabla V-4 muestra las condiciones iniciales para el secado directo. Los ítems con (*) indican valores fijados y determinados a partir de promedios obtenidos en el Capítulo IV, sobre eficiencia y distribución energética. Los ítems restantes son resultados de balances e iteraciones hechos en el programa. Se fijó la temperatura de secado en 100 °C como punto de referencia y en base a los resultados obtenidos en experiencias anteriores (Holowaty y Schmalko, 2017).

Tabla V-4. Condiciones iniciales del Secadero en las dos cintas para la simulación utilizando gases de combustión y aire caliente.

Datos Iniciales.	Condición 1 - $T_{ao}= 100^{\circ}\text{C}$ Gases de Combustión		Condición 2 - $T_{ao}= 100^{\circ}\text{C}$ Aire Caliente	
	Dominio 1	Dominio 2	Dominio 1	Dominio 2
Th (°C)	50*	78	50*	77
Tp (°C)	50*	61	50*	60
Xh (g/g bh)	0,300*	0,080	0,300*	0,060
Xp (g/g bh)	0,535*	0,260	0,535*	0,250
Ss (kgss/h)	1440*	1440*	1440*	1440*
Ya (gagua/ gas)	0,0330	0,0250*	0,0205	0,0110*
Ta1 (°C)	85	100*	88	100*
Gs (kgas/s)	9,40*	9,40*	9,40*	9,40*

Las Figuras V-3 y 4 muestran las diferencias en las humedades promedio de la yerba mate a diferentes alturas de lecho en función de la longitud de cada cinta. En realidad los perfiles se cruzan ya que la menor humedad del lecho inferior corresponde a la descarga en el punto 0 (cero), pero para realizar mejor la comprensión matemática se ha descripto de esta manera. Gráficamente no se puede encontrar diferencias apreciables entre las dos figuras. Aunque la humedad promedio al final de cada cinta resulta menor al utilizar el secado indirecto, tal como se muestra en la Tabla V-5.

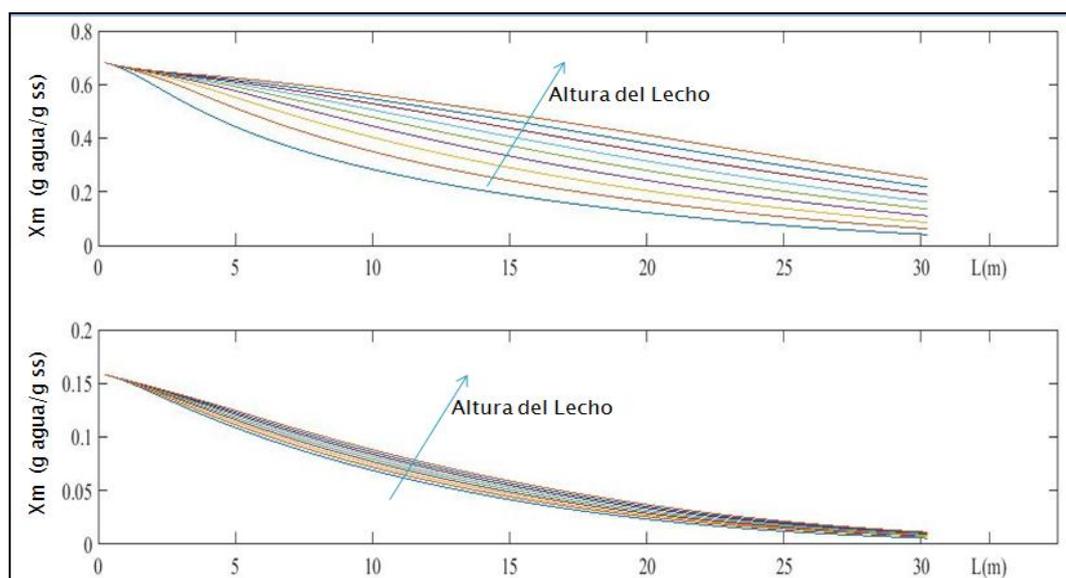


Figura V-3. Perfil de humedad promedio en la yerba mate en la cinta superior e inferior utilizando el secado directo (gases de combustión).

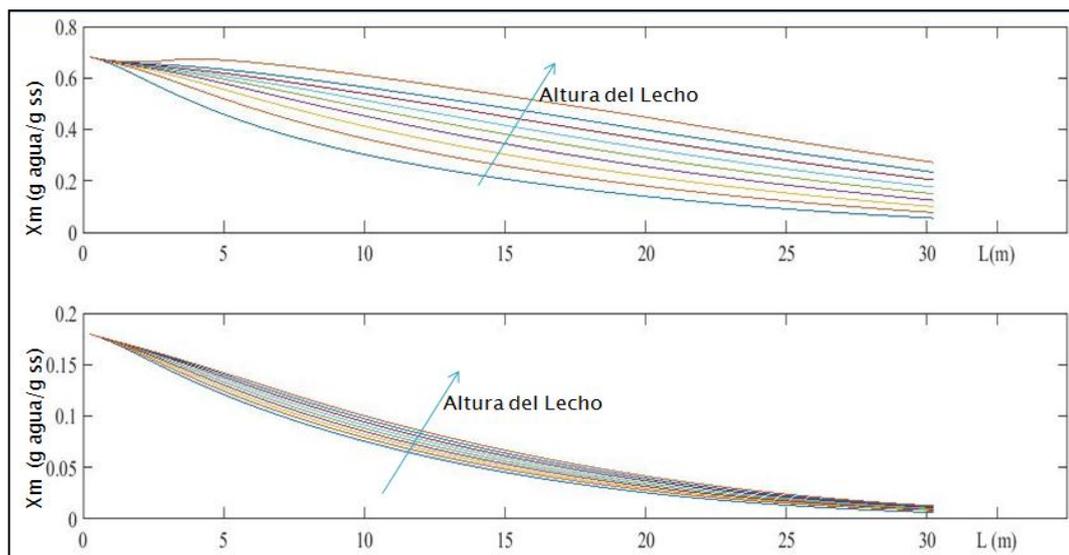


Figura V-4. Perfil de humedad promedio en la yerba mate en la cinta superior e inferior utilizando secado indirecto (aire caliente).

Las Figuras V-5 y 6 muestran la variación de la temperatura del aire a lo largo de cada cinta, para diferentes alturas de lecho. La cinta inferior tiene un ingreso de $T_a = 100\text{ }^\circ\text{C}$ en los dos tipos de corrientes (gases de combustión y aire caliente). La temperatura en la cinta intermedia es de $85\text{ }^\circ\text{C}$ cuando se utilizan gases de combustión y $88\text{ }^\circ\text{C}$ con aire caliente. Es decir, el aire se enfría $3\text{ }^\circ\text{C}$ menos en el segundo caso. No existen diferencias en la temperatura promedio de salida de la cinta superior entre uno y otro método de secado.

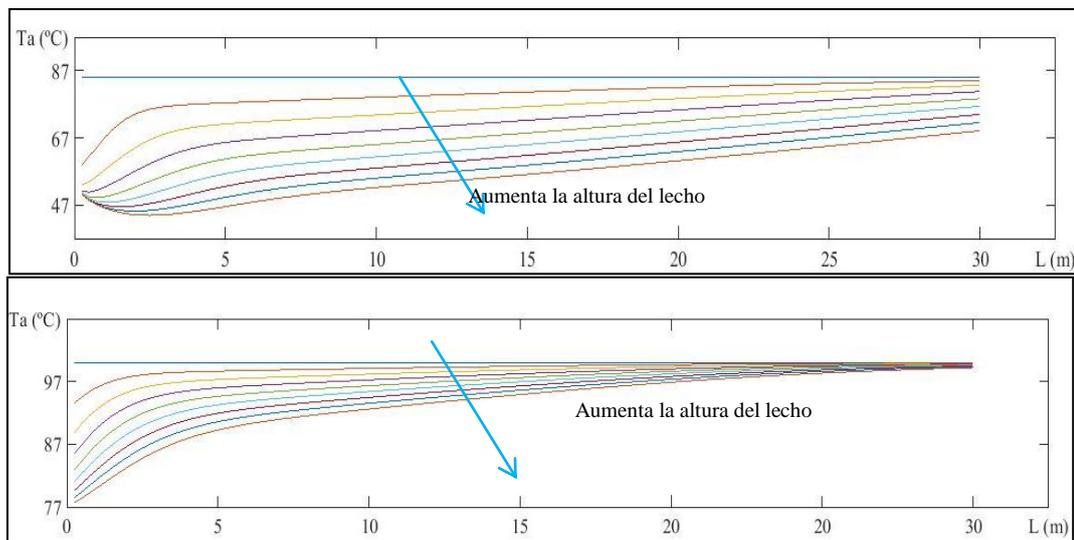


Figura V-5. Perfil de Temperatura del aire en la cinta superior e inferior utilizando secado directo (gases de combustión).

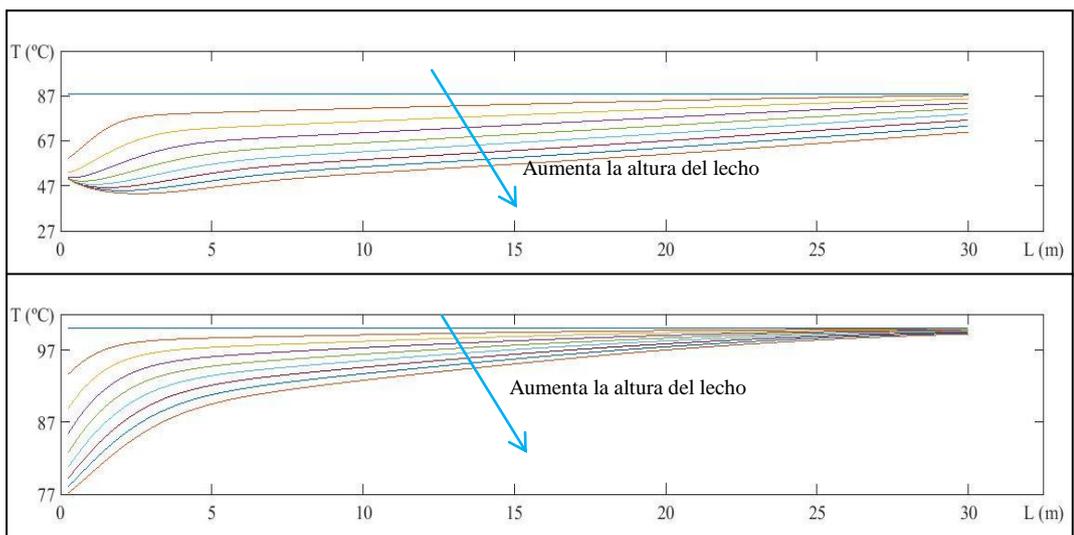


Figura V-6. Perfil de Temperatura del aire en la cinta superior e inferior utilizando secado indirecto (aire caliente).

Para la simulación del secado con gases de combustión en doble cinta superpuesta los resultados se muestran en la Tabla V-5 para la Condición 1 (C1). En la misma se observa que la humedad al final de la primera cinta es de 0,1377 kg agua/kg ss y al final de la segunda cinta es de 0,01 kg agua/kg ss, es decir, 1 % (bs). En cuanto a la corriente gaseosa, el promedio inicial es de 0,025 kg agua/ kg as, la temperatura intermedia es promedio de 85 °C. A la salida la temperatura resulta inferior a 60 °C y con la mayor en humedad, lo cual desde el punto de vista operativo, no sería reutilizable para recircular.

La humedad promedio de la yerba mate al final de la primera cinta en la Condición 2 (C2) es de 0,1180 kg agua/kg ss, resultando marcadamente menor que en la C1, las diferencias se hacen menores en la humedad de salida, ya que probablemente se acerquen a la humedad de equilibrio. Se supone que existe un exceso en el tiempo de secado, y en algún momento la humedad de C1 alcanzará la humedad de C2 si se mantiene el flujo de aire.

Tabla V-5: Resultados principales de la simulación en las diferentes condiciones operativas.

Resultados de interés				
	C 1	C 2	C 3	C 4
	GC	Aire	Aire +15% Ss	Aire -8%Ta
$x_{m\ inter}$ (g/g bh)	0,1377	0,118	0,1363	0,132
x_{hf} (g/g bh)	0,0023	0,002	0,0024	0,026
x_{pf} (g/g bh)	0,024	0,0207	0,025	0,0058
x_{mf} (g/g bh)	0,01	0,0089	0,0106	0,0107
Tao (°C)	100	100	100	92
Yao (gagua/ gas)	0,025	0,011	0,011	0,011
Ta1 (°C)	85	88	85	83
Yal (gagua/ gas)	0,033	0,0183	0,0196	0,02
Ta2 (°C)	56	57	53	54
Ya2 (gagua/ gas)	0,058	0,039	0,0447	0,041

La Condición 2 (C2) muestra que la temperatura de salida de aire tiene valores similares de 57°C respecto a gases de combustión, pero su contenido de agua es marcadamente menor que en el caso C1. Lo cual podría dar entre 5 y 7 °C adicionales de enfriamiento (o de secado) antes de saturarse, este dato sale del diagrama psicrométrico en el Anexo I. donde la Tw para Ta₂ en la Condición 1 sería 43 °C, y en el caso de C2 la temperatura del secado sería útil hasta los 37 °C.

V.C.3 Secado indirecto: Optimización del proceso

Los resultados de las comparaciones entre C1 y C2 sirvieron buscar condiciones operativas del secadero a fin de optimizar el mismo. Tanto en el secado de una o de dos cintas superpuestas, se observó una mejora del proceso al utilizar aire caliente. Cabe aclarar que en ningún caso se considera en este trabajo de investigación la etapa de intercambio (o calentamiento del aire que podría significar una disminución o no de la eficiencia global del secado, tal como se discutió en el capítulo IV)

La Tabla V-6 muestra las mejores condiciones encontradas para la optimización del secadero, a fin de mantener la humedad final del producto aumentando la capacidad de procesamiento del secadero, o bien, disminuyendo la temperatura del aire de entrada.

Tabla V-6. Condiciones iniciales del secadero en las dos cintas para la simulación para el mejoramiento en el procesamiento.

Datos Iniciales.	Condición 3 - Tao= 100°C Aire caliente 15 % sólidos		Condición 4 - Tao= -8% Aire Caliente 92 °C	
	Dominio 1	Dominio 2	Dominio 1	Dominio 2
Th (°C)	50*	77	50*	74
Tp (°C)	50*	59	50*	57
xh (g/g bh)	0,300*	0,075	0,300*	0,071
xp (g/g bh)	0,535*	0,260	0,535*	0,270
Ss (kg ss/h)	1650*	1650*	1440*	1440*
Ya (g agua/ gas)	0,019	0,011*	0,018	0,011*
Ta1 (°C)	85	100*	83	92*
Gs (kg as/s)	9,40*	9,40*	9,40*	9,40*

La Condición 3 (C3) corresponde a un aumento en el flujo de sólidos, un 15 %. Es decir, se estudia la posibilidad en base a los resultados anteriores de utilizar aire caliente en las mismas condiciones que C2, a fin de estudiar hasta qué punto se podría operar para alcanzar valores de humedad en el sólido similares a los que actualmente se alcanzan con gases de combustión, se determinó que si se aumenta la producción a 4600 kg/h de hoja verde procesada o su equivalente de 1650 kg ss/h, en la primera cinta los valores de humedad del producto son similares a C1 y a su vez, al final del secado no existen diferencias significativas. También es importante resaltar que la temperatura de salida es similar a las condiciones de C1 y C2, y con valores de humedad intermedios (Ver la Tabla V-5).

Se estudió una segunda posibilidad de optimización (Condición 4 o C4) y es reducir el la temperatura de procesamiento con aire caliente hasta obtener condiciones similares a C1. Se encontró que a 92 °C la humedad de salida en la primera y la segunda cinta son similares a C1, y esto representa una reducción del 8 % en la temperatura de operación (véase la Tabla V-5). Desde el punto de vista operativo y de calidad del producto es una ventaja del secado indirecto, ya que las ramas de yerba mate son tratadas a menor temperatura, y aunque el tiempo sea el mismo, significaría menor degradación de nutrientes. Además, el consumo energético sería menor si el equipo opera a menores temperaturas.

V.C.4 Sistemas de secado indirecto con recirculación.

Las temperaturas de salida son cercanas a 60 °C. Se estudió una segunda posibilidad que permita recircular el aire caliente estudiado en la Condición 2. Existen trabajos de investigación anteriores donde se encontraron temperaturas de operación mayores a 80 °C, si bien la temperatura de entrada era extrema y oscilaba los 125 – 128 °C (Holowaty y col., 2014).

La Tabla V-7 muestra nuevas condiciones operativas utilizadas para la simulación en el supuesto que se recirculen 3 porcentajes diferentes del aire de salida estudiado en C2. En la provincia de Misiones existen pocos secaderos que utilicen recirculación en sus equipos, y no existió la posibilidad de acceso a los mismos para obtener datos que permitan la validación del modelo así como obtener condiciones operativas similares para valores iniciales del estudio en este supuesto.

Tabla V-7: Condiciones iniciales para los sistemas con recirculación de aire caliente

Datos Iniciales.	Condición 5 – Tao= mezcla Aire caliente con 10% recirculación		Condición 6 – Tao= mezcla Aire caliente con 15% recirculación		Condición 7- Tao= mezcla Aire caliente con 20% recirculación	
	Dominio 1	Dominio 2	Dominio 1	Dominio 2	Dominio 1	Dominio 2
Th (°C)	50*	74	50*	74	50*	72
Tp (°C)	50*	58	50*	58	50*	55
xh (g/g bh)	0,300*	0,060	0,300*	0,065	0,300*	0,080
xp (g/g bh)	0,535*	0,260	0,535*	0,270	0,535*	0,280
Ss (kgss/h)	1440*	1440*	1440*	1440*	1440*	1440*
Ya med (g agua/ gas)	0,0190	0,0140 #	0,0210	0,0152 #	0,0232	0,0170 #
Ta med (°C)	84	95 #	82	93 #	80	91 #
Gs (kgas/s)	9,40*	9,40*	9,40*	9,40*	9,40*	9,40*

La Tabla V-8 muestra los resultados considerados más importantes acerca de las condiciones de salida de la simulación en los tres casos estudiados. Es interesante observar el comportamiento en las primeras cintas, recirculando hasta el 15 % del aire de salida, se alcanzan humedades iguales o menores que las estudiadas en C1. Sin embargo, la humedad final de la yerba mate llega al 1,5% y 1,9% si se utiliza 10 y 15 % de recirculación del aire de salida. Es interesante observar que, aun con valores mayores a las encontradas en C1, cuando se utilizaba gases de combustión, hablar de humedades menores al 2% es más que suficiente para asegurar la estabilidad del producto y el punto final del secado.

En el transcurso del presente estudio, algunas industrias yerbateras han puesto en funcionamiento sistemas de calentamiento indirecto, y sobre el final de este trabajo de investigación, expertos técnicos de un secadero han informado la reducción del tiempo de secado en un 40 % respecto al uso de gases de combustión, en secado semi-continuo, similar al que antes era secado en “Barbacuá”. Además informan la posibilidad de trabajar a temperaturas inferiores a los 100 °C

Tabla V-8: Resultados principales de la simulación en las diferentes condiciones operativas del secado indirecto con recirculación.

Secado con Recirculación de Aire			
Con Recirc.	Condicion 5	Condicion 6	Condicion 7
	10%	15%	20%
xm inter (g/g bh)	0,128	0,132	0,185
xhf (g/g bh)	0,0038	0,005	0,008
xpf (g/g bh)	0,04	0,046	0,057
xmf (g/g bh)	0,015	0,019	0,0245
Tao (°C)	95	93,5	91
Yao (gagua/gas)	0,014	0,0152	0,017
Ta1 (°C)	84	82	80
Ya1 (gagua/gas)	0,019	0,0211	0,0232
Ta2 (°C)	55	55	53
Ya2 (gagua/gas)	0,041	0,042	0,043

V.D Conclusiones

El modelado del secadero de cinta permite caracterizar la evolución de la temperatura y humedad de los sólidos y las corrientes gaseosas. Se obtuvieron conclusiones importantes respecto a los sistemas de secado directo e indirecto. Se determinó que el secado indirecto en la primera cinta alcanzó valores de humedad promedio en las ramas 14,6 % menor que en el secado directo. La segunda cinta de secado o cinta inferior resulta innecesaria para el secado de las hojas. Las humedades al final del secado resultaron menores al 1,0 % (bh), aunque en la simulación, con aire caliente se alcanzaron un contenido de humedad 8,0 % menor que por el método directo.

A partir de estas conclusiones se simularon condiciones de secado diferentes utilizando aire caliente, el aumento del 15,0 % de sólidos permitió alcanzar humedades finales

similares al secado con gases de combustión. Por otra parte, si se decide disminuir la temperatura del aire de entrada en un 8,0 %, se encontró que los valores de humedad también resultaron similares a las humedades alcanzadas con sistemas de secado directo.

En cuanto a las corrientes gaseosas, no se encontraron diferencias significativas en las temperaturas de salida de chimeneas, sin embargo, se observó que el secado con aire caliente contiene 22,8 % a 31,5% menos de humedad. Las temperaturas cercanas a 60 °C y los bajos contenidos de humedad permitieron estudiar la factibilidad de recirculación en diferentes porcentajes.

Se determinó el secado utilizando 3 porcentajes arbitrarios de recirculación. Se encontró que utilizar un 15 % de recirculación del aire que sale de las chimeneas a 55 °C podrían alcanzarse los valores de humedad final suficientes para la estabilidad del producto. Esto podría trasladarse a una reducción significativa del calor que actualmente se entrega al secadero.

Conclusiones generales

El presente trabajo de investigación abordó la problemática de la baja eficiencia térmica en el procesamiento de la yerba mate y pretendió caracterizar las alternativas a los métodos actuales de secado, a partir de la utilización de madera proveniente de bosque renovable como combustible, y la búsqueda de un producto sin contacto con los gases de combustión.

La caracterización fisicoquímica de la yerba mate obtenida por métodos alternativos mostró cualidades de la yerba mate elaborada de manera tradicional. Sin embargo, desde este punto de vista (fisicoquímico) se pudieron establecer diferencias marcadas entre productos obtenidos por los diferentes métodos. El color luego del zapecado y secado, así como los sólidos solubles determinados en el extracto acuoso y contenido de polifenoles totales, mostraron una merma de calidad en el zapecado con agua y el zapecado con vapor, respecto al método tradicional. Por otra parte, se observó de manera favorable que la cafeína se conservó mejor en el zapecado con vapor y no tuvo diferencias en el zapecado con agua. El método combinado de zapecado y secado con microondas conserva mejor los atributos de color, cafeína, extracto acuoso que el método tradicional y no muestra diferencias significativas en los polifenoles. En cuanto a minerales estudiados, solamente el Fe mostró diferencias entre el zapecado tradicional de referencia y los métodos alternativos de zapecado y secado.

Las pruebas sensoriales realizadas post estacionamiento a escala piloto demostraron que el panel sensorial (ocasional) no detectó diferencias significativas en la comparación Microondas – Proceso tradicional. En la comparación Zapecado con Agua – Tradicional y Zapecado con Vapor – Tradicional las diferencias fueron detectadas por el panel sensorial.

El segundo objetivo particular fue estudiar luego de los métodos de zapecado, la implementación del secado indirecto, a escala industrial. Se determinó la eficiencia térmica de secado en seis secaderos industriales de doble cinta superpuestas. Cuatro de ellos secaban con gases de combustión y los restantes mediante aire caliente (libre de humo). Se estudió la distribución energética en cada uno de ellos. Se encontraron mayores eficiencias al utilizar el secado indirecto. Aunque no se han estudiado las

pérdidas o la disminución de dicha eficiencia al implementar sistemas de intercambiadores de calor en los secaderos indirectos.

Se observaron elevadas pérdidas de calor en los gases de salida de las chimeneas y debido a la ausencia de precalentamiento de aire (por las aperturas laterales de los secaderos directos).

Por último, a partir de las conclusiones obtenidas sobre eficiencia térmica y observar los puntos críticos de mayores pérdidas de calor en secaderos industriales, se realizó el modelado matemático y la simulación del secado, a partir de los datos medidos en los establecimientos industriales, utilizando un software que permitió estudiar en una situación controlada los cambios posibles que se darían en un secadero que utilizaba gases de combustión y su paso a sistemas de secado indirecto. Se concluyó que en las mismas condiciones operativas de producción, el secadero podría procesar hasta un 15% más de materia prima o bien disminuir hasta el 8% la temperatura debajo de la primera cinta utilizando solamente aire caliente.

De las conclusiones de eficiencia también se utilizó para simular situaciones de recirculación de aire caliente tomados a la salida de la chimenea. Se encontró que en condiciones operativas similares al secado directo, podrían recircularse hasta un 15 % de las corrientes gaseosas obteniendo humedades del producto final similares a los que se obtendrían en un secadero directo sin recirculación.

Por lo tanto la implementación de métodos alternativos de zapeado a escala industrial en conjunto con secaderos de cintas que utilicen aire caliente proveniente de intercambiadores de calor, sería una alternativa favorable a la obtención de un producto libre de humo, con un ahorro energético significativo en la etapa de secado.

Referencias bibliográficas

- Ah-Hen, K.; Zambra, C.E.; Agüero, J.E.; Vega-Galvez, A.; Lemus-Mondaca, R. (2013). Moisture diffusivity coefficient and convective drying modeling of murta (*Ugni Molina e Turcz*): influence of temperature and vacuum on drying kinetics. *Food Bioprocess Tech.*6, 919–930.
- Ahmad-Qasem, M.H.; Barrajió-Catalan, E.; Micol, V.; Cárcel, J.A. y Garcia-Perez, J.V. (2013). Influence of air temperature on drying kinetics and antioxidant potential of olive pomace. *J. Food Eng.* 119, p. 516–524.
- Ahmed, J., Al-Salman, F., Almusallam, A.S., (2013).Effect of blanching on thermal color degradation kinetics and rheological behaviour of rocket (*Eruca sativa*) puree.*Journal of Food Engineering* 119,p. 660-667.
- Anesini, C.; Ferraro, G. y Filip, R. (2006). Peroxidase-like activity of *Ilex paraguariensis*.*Food Chemistry* 97, p. 459–464.
- Anesini, C.; Turner, S.; Cogoi, L.; Filip, R. (2012). Study of the participation of caffeine and polyphenols on the overall antioxidant activity of mate (*Ilex paraguariensis*). *Lwt - Food science and technology* 45 (2), p. 299-304.
- AOAC. (1990). OFFICIAL METHODS OF ANALYSIS, Association of Official Analytical Chemists, Washington, D.C. USA.,p. 62.
- Arinze E. A., Schoenau G.J., Sokhansanj S. and Adapa P. (2003). Aerodynamic separation and fractional drying of alfalfa leaves and stems – A review and new concept. *Drying Technology*. Vol 21, Nº 9, p 1669-1698.
- Ashihara, H. y Takeo, S. (2004).Distribution and biosynthesis of caffeine in plants.*Frontiers in Bioscience* 9, p. 1864–1876.
- Athayde, M.L.; Coelho, G. C. y Schenkel, E. P. (2000).Caffeine and theobromine in epicuticular wax of *Ilex paraguariensis* A. St.-Hil. *Phytochemistry* 55, p. 853-857.
- Azlim Almey, A. A.; Ahmed Jalal Khan, C.; Syed Zahir, I.; Mustapha Zuleiman, K.; Aisyah, M. R. y Kamarul Rahim, K. (2010). Total phenolic content and primary

antioxidant activity of methanolic and ethanolic extracts of aromatic plants' leaves. *International Food Research Journal* 17, p. 1077-1084.

Badui Dergal, S. (2006). *Química de los Alimentos*. Editorial: Pearson-Addison Wesley. México. Cap 2, p. 29; cap. 7, p. 40.

Bastos, D. H. M.; Fornari, A. C.; Queiroz, Y. S. y Torres, E. A. F. S. (2006). Bioactive compounds content of Chimarrao infusions related to the moisture of yerba mate (*Ilex paraguariensis*) leaves. *Brazilian Archives of Biology and Technology* 49, p. 399–404.

Bastos, D. H. M.; Saldanha, L. A.; Catharino, R. R.; Sawaya, A. C. H. F.; Cunha, I. B. S.; Carvalho, P. O. y Eberlin, M. N. (2007). Phenolic antioxidants identified by ESI-MS from YerbaMate (*Ilex paraguariensis*) and green tea (*Camelia sinensis*) extracts. *Molecules* 12, p. 423–32.

Bertoni, M. H.; Prat Krikum, S. D.; Känzig, R. G. y Cataneo, P. (1992). 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 Asoc. Química Argentina* 80, p. 403-501.

Bilusic Vundac, V.; Brantner, A. H. y Plazibat, M. (2007). Content of polyphenolic constituents and antioxidant activity of some *Stachys* taxa. *Food Chemistry* 104, p. 1277-1281.

Brumovsky, L.A.; Fretes, M.R.; Alterach, M.A. y Dimich, M. (2005). Estudio de las variaciones del color, extracto acuoso y humedad durante el procesamiento primario de la yerba mate. X Congreso CYTAL. Mar del Plata, Argentina, p. 560-565.

Burdurlu, H.; Kukay, N.; Karadeniz, F. (2006). Degradation of vitamin C in citrus juice concentrates during storage. *Journal of Food Engineering* 74, p. 211-216.

Carducci, C.N.; Dabas, P.C. y Muse, J.O. (2000). Determination of inorganic cations by capillary ion electrophoresis in *Ilex paraguariensis* (St. H.), a plant used to prepare tea in South America. *Journal of AOAC International* 8(5), p. 1167-1172.

Carneiro, C.; Reissmann, C.B. y Marques, R. (2006). Comparison of Methods for Chemical Analysis of K, Ca, Mg e Al in Maté Tea Tree (*Ilex paraguariensis* St. Hil.). *Cerne, Lavras* 12, p. 113-122.

Chandra S. y Mejía, E. G. (2004). Polyphenolic Compounds, Antioxidant Capacity, and Quinone Reductase Activity of an Aqueous Extract of *Ardisia compressa* in Comparison to Mate (*Ilex paraguariensis*) and Green (*Camellia sinensis*) Teas. *Journal of Agriculture and Food Chemistry* 52 (11), p. 3583–3589.

Chirife, J. e Iglesias, H.A. (1978). Equations for fitting water sorption isotherms of foods: part 1.A review.*Journal of food technology* 13: p. 159-174.

Coelho, G. C.; Rachwal, M. F. G.; Dedecek, R. A.; Curcio, G. R.; Nietsche, K.; Schenke L, E.(2007). Effect of light intensity on methylxanthine contents of *Ilex paraguariensis* St. Hil. P. *Biochemical systematics and ecology*, 35 (2): p. 75-80.

Crotti, L.O.; Schmalko, M. E. y Surkan, S. (2002).Influencia de las características físicas de las ramas en el tiempo de residencia en secaderos rotatorios. Presentado en el IX Congreso Argentino de Ciencia y Tecnología de Alimentos; Buenos Aires.

De Bernardi, L. y Prat Krikum, S.D. (2001). Cadena alimentaria de la yerba mate- *Ilex paraguariensis*. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación. www.inta.gov.ar/unidades/421000/. Acceso: 03/05/2013.

Deladino, L.; Navarro, A.S.; Martino, M.N. (2013).Carrier systems for yerba mate extract (*Ilex paraguariensis*) to enrich instant soups. Release mechanisms under different pH conditions.*LWT - Food Science and Technology*. Vol. 53. Issue 1, p 163-169.

Dimitriadis, A. N., & Akritidis, C. B. (2004). A model to simulate chopped alfalfa drying in a fixed deep bed. *Drying Technology*, 22(3), 479-490.doi:10.1081/DRT-120029994.

Escalada, G.; Brumovsky, L.A.; Hartwig, V.G. y Fretes, R.M. (2011). Influencia del origen y del procesamiento de la yerba mate sobre el contenido de polifenoles totales y capacidad antioxidante. Actas del 5° Congreso Sudamericano de la yerba mate, Posadas, 5-6 de mayo, Posadas, Argentina, p. 195-200.

Esmelindro, M. C.; Toniazzo, G.; Waczuk, A.; Dariva, C. y de Oliveira, D. (2002). Caracterização físico-química da erva-mate: Influência das etapas do processamento industrial. *Ciência e Tecnologia de Alimentos* 22(2), p. 199–204.

- Faggion, H., Tussolini, L., Freire, F. B., Freire, J. T., & Zanoelo, E. F. (2016). Mechanisms of heat and mass transfer during drying of mate (*Ilex paraguariensis*) twigs. *Drying Technology*, 34(4), 474-482. doi:10.1080/07373937.2015.1060498.
- Farah, A. y Donangelo, C. M. (2006). Phenolic compounds in coffee. *Brazilian Journal of Plant Physiology* 18, p. 23–36.
- Fenema, O.R. (1996). *Food Chemistry*. 3th Edition. Minerals, Dennis D. Miller (9), p. 617-650.
- Filip, R.; Lotito, S.; Ferraro, G.; Fraga, C. G. (2000). Antioxidant activity of *Ilex paraguariensis* and related species. *Nutrition Research* 20(10), p. 1437–1446.
- Gaiad, S.; Rakocevic, M. y Reissmann, C.B. (2006). Sources Affect Growth, Nutrient Content and Net Photosynthesis in Maté (*Ilex paraguariensis* St. Hil.). *Brazilian Archives of Biology and Technology* 49(5), p. 689-697.
- Galeano, C.; Barrionuevo, M.R.E. y Argüello, B. (2006). Métodos alternativos de procesamiento para sapear hojas de yerba mate, tendiente a mantener el color y las clorofilas. 4º Congreso Sudamericano de la yerba mate. Posadas, Argentina, p. 353-360.
- Giulian, R.; Dos Santos, C.E.I.; Shubeita, S.; Da Silva, L.M.; Dias, J.F. y Yoneama, M.L. (2007). Elemental Characterization of Commercial Mate Tea Leaves (*Ilex paraguariensis* A. St. Hil.) before and after Hot Water Infusion Using Ion Beam Techniques. *Journal of Agriculture and Food chemistry* 55, p. 741-746.
- Golan Masum Akond, A.S.M.; Crawford, H.; Berthold, J.; Talukder, Z.I. y Hossain, K. (2011). Minerals (Zn, Fe, Ca and Mg) and Antinutrient (Phytic Acid) Constituents in Common Bean. *American Journal of Food Technology* 6(3), p. 235-243.
- Gomez Vara, M.E.; Brioux, J.A. y Avanza, J.R. (1979). Investigaciones sobre la tecnología de la yerba mate- Informe APRYMA, p.1-226.
- Greenspan, L. (1977). *Journal of research of the national bureau of standards. A. Physics and chemistry* 81, p. 89–96.
- Gros, E.; Pomilio, A.; Seldes, A. M. y Burton, G. (1985). Introducción al estudio de los productos naturales. Monografía N° 30 Serie Química. Cap. “fenilpropanos”; Cap.

“Alcaloides”. Secretaría General de la OEA, Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico. p. 47

Arndt, G. M.; Ricci, M. F.; Tetzlaff, J.G.; Holowaty, S. A. (2017). Estudio de la eficiencia térmica en tres tipos de secaderos de yerba mate. Anais do VII Congresso Sul-Americano da Erva-Mate. Erechim, RS, Brasil. ISBN 978-85-7892-121-7.

Hartwig, V. G.; Brumovsky, L. A.; Fretes, M.R. (2012). Total polyphenol content of mate (*Ilex paraguariensis*) and other plants-derived beverages. Journal of food research 1 (3), p. 58-67.

Hartwig, V.G.; Brumovsky, L.A.; Fretes, R.M. y Sánchez Boado, L. (2011). A novel procedure to measure the antioxidant capacity of yerba maté extracts. Ciencia e Tecnología de Alimentos, 32 (1), p. 126-133.

Heinrichs, R. y Malavolta, E. (2001). Mineral Composition of a Commercial Product from Mate-Herb. Ciencia Rural 31(5), p. 781-785.

Hess, D. (1980). Fisiología Vegetal: fundamentos moleculares y bioquímicos-fisiológicos del metabolismo y el desarrollo. Ediciones Omega S.A., Barcelona. Cap. “fenoles”, p. 143; Cap. “terpenoides”, p. 123; Cap. “alcaloides”, p. 173.

Holovatty, S.; Arguello, B. y Malec L. (2006). Variación del contenido de polifenoles durante el procesamiento de la yerba mate (*Ilex paraguariensis*), Libro de actas del 4º congreso sudamericano de yerba mate.p.127-131.

Holowaty, S.A.; Aguerre, Y.S.; Schmalko, M.E. (2013). Eficiencia térmica en secaderos de yerba mate. XVI Congreso Argentino Ciencia y Tecnología de los Alimentos. Libro de RESÚMENES (EN CD).AATA. Rosario, Argentina. 23 -25 de Octubre de 2013.ISBN: 978-987-22165-5-9.

Holowaty, S.A.; Alegre, A.C.; Schmalko M.E. (2017). Aspectos sensoriales de yerba mate elaborada por métodos alternativos. Anais do VII Congresso Sul-Americano da Erva-Mate. Erechim, RS, Brasil. 16-18 de mayo de 2017. ISBN 978-85-7892-121-7.

Holowaty, S.A.; Schmalko, M.E. (2017). Simulación de sistemas de secado en contacto directo e indirecto. Anais do VII Congresso Sul-Americano da Erva-Mate. Erechim, RS, Brasil. 16-18 de mayo de 2017. ISBN 978-85-7892-121-7.

Holowaty, S. A.; Ramallo, L. A., Schmalko, M. E.(2011).Aplicación del secado intermitente de la yerba mate. Actas del 5° Congreso Sudamericano de la yerba mate.. Posadas Argentina. p 239 a 244. 5 y 6/ 05 /2011. ISBN 978-087-26787-0-8.

Holowaty, S. A.; Byczko, G. D.; Trela, V. D.; Schmalko, M. E. (2011).Estacionamiento acelerado de la yerba mate. Variaciones de los parámetros fisicoquímicos. Libro de resúmenes VIII jornadas científico tecnológicas fceqyn.qmf.04.p.174.

Holowaty, S. A.; Thea, A. E.; Bohazcenko, E. A.; Schmalko, M.E. (2014). Efecto del combustible empleado en el procesamiento de la yerba mate sobre la calidad. Libro de resúmenes del V Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos, Córdoba, Argentina. 17-19/11/2014. CP:71. ISBN: 978-987-45738-5-8.

Holowaty, S.A.; Surkan, S.A.; Trela, V.D.; Byczko, G. D. y Schmalko, M. E.(2014).Variation of Physicochemical and Sensory Properties during the Aging of yerba mate.International Journal of Food Studies, Vol. 3, p. 228-238.

Holowaty, S.A; Trela, V. D.; Thea, A. E.; Scipioni, G. P. y Schmalko, M. E. (2015). Yerba maté (*Ilex paraguariensis* St. Hil): Chemical and Physical changes under different aging conditions. Journal of Food Process Engineering.DOI: 10.1111/jfpe.12195.

Holowaty, S.A.; Ramallo L.A. y Schmalko, M. E. (2012). Intermittent Drying Simulation in a Deep Bed Dryer of Yerba Maté Journal of Food Engineering 111 pp 110-114. 2012. ISSN: 0260-8774.

Holowaty, S. A. (2017). Modificaciones Fisicoquímicas en la yerba mate utilizando diferentes tipos de estacionamiento. Tesis de la Maestría en Tecnología de los Alimentos. Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales. Universidad Nacional de Misiones.

Ioannou, I.; Hafsa, I.; Hamdi, S.; Charbonnel, C.; Ghoul, M.(2012). Review of the effects of food processing and formulation on flavonol and anthocyanin behaviour. Journal of Food Engineering 111, p. 208-217

IRAM 20503. (1995). INSTITUTO DE RACIONALIZACIÓN DE MATERIALES. yerba mate: Determinación de la pérdida de masa a 103°C.

IRAM N° 20510. (1995). INSTITUTO ARGENTINO DE RACIONALIZACIÓN DE MATERIALES- Norma 20510: yerba mate: Determinación del Extracto Acuoso.

IRAM N° 20512. (2000). INSTITUTO ARGENTINO DE RACIONALIZACIÓN DE MATERIALES. Norma 20512: yerba mate: Determinación del Contenido de Cafeína.

IRAM N° 20532.(2004).INSTITUTO ARGENTINO DE RACIONALIZACIÓN DE MATERIALES. Norma 20532: yerba mate: Determinación de Sacarosa y glucosa por HPLC. 2004.

IRAM N° 20533. INSTITUTO ARGENTINO DE RACIONALIZACIÓN DE MATERIALES. Norma 20533: yerba mate: determinación de las sustancias características. Método colorimétrico mediante el uso del reactivo de Folin-Ciocalteu para la determinación del contenido de polifenoles totales. (Envías de aprobación).

Isolabella, S.; Cogoi, L.; López, P.; Anesini, C.; Ferraro, G. y Filip, R. (2010). Study of the bioactive compounds variation during yerba mate (*Ilex paraguariensis*) processing. Food Chemistry 122, p. 695–699.

Jacques, R.A.; Arruda, E.J.; de Oliveira, L.C.S.; de Oliveira, A.P.; Darva, C.; de Oliveira, J.V. y Caramao, E.B. (2007) Influence of Agronomic Variables on the Macronutrient and Micronutrient Contents and Thermal Behavior of Mate Tea Leaves (*Ilex paraguariensis*). J. Agric. Food Chem. 55, p. 7510-7516.

Känzig, R. G. (1995). Calidad 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, p. 175-180.

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. Brazil, p. 406.

Känzig, R.G. y Reta, M.R. (1987). 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, p.8-12.

Känzig, R.G.; Novo, M.A. y Schmalko, M.E. (1987b). Isotermas de desorción de yerba mate sapecada. Actas de las XIV jornadas de investigaciones en ciencias de la ingeniería química y química aplicada, Santa Fe, Argentina, p.403-408.

Känzig, R.G.; Novo, M.A. y Schmalko, M. E.(1985). Isotermas de adsorción de la yerba mate estacionada. En: Revista de ciencia y tecnología de la UNaM 1,p. 47-50.

Känzig, R.G.; Novo, M.A. y Schmalko, M.E. (1987). Isotermas de Desorción de Hojas y Palos de yerba mate Sapecada. Publicado en las Actas de las XIV Jornadas sobre Investigaciones en Ciencias de la Ingeniería Química y Química Aplicada., 26 al 29/10/87.

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,p. 13-24.

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, p. 1-7.

Katsube, T.; Tsurunaga, Y.; Sugiyama, M.; Furuno, T.; Yamasaki, Y.(2009). Effect of air-drying temperature on antioxidant capacity and stability of polyphenolic compounds of mulberry (*Morus alba* L.) leaves. Food Chemistry 113, p. 964-969.

Kaymak-Ertekin, F. y Gedik A. (2005). Kinetic modelling of quality deterioration in onions during drying and storage. Journal of Food Engineering 68, p. 443-453.

Kays, S.J.(1999). Preharvest factors affecting appearance. Postharvest Biology and Technology 15, p. 233-247.

Khanal, R.C.; Howard, L.R.; Prior, R. L. (2010). Effect of heating on the stability of grape and blueberry pomace procyanidins and total anthocyanins. Food Research International 43, p. 1464-1469.

Kim, Y.; Goodner, K.L.; Park, J.D.; Choi, J. y Talcott, S.T. (2011). Changes in antioxidant phytochemicals and volatile composition of *Camellia sinensis* by oxidation during tea fermentation. Food Chemistry, 129 (4), p. 1331-1342.

Koop, L.; Tussolini, L.; Pedersen Voll, F. A. & Zanoelo, E. F. (2015). A dynamic two-dimensional model for deep-bed drying of mate leaves (*Ilex paraguariensis*) in a single-

Pass/Single-zone conveyor-belt dryer. *Drying Technology*,33(2), 185-193.
doi:10.1080/07373937.2014.943236

Kostoglou, M.; Chrysafis, N.; Andritsos N. (2013). Modeling tomato dehydration in a tunnel dryer using geothermal energy. *Drying Technol. Int. J.*, 31 , pp. 5–15.

Kotik, B.E. (1994). 2° curso de capacitación en producción de yerba mate. Molinería de la yerba mate. INTA-Estación Agropecuaria Cerro Azul, p. 109-112.

Kumar, P., Mishra, H.N.(2004). Storage stability of mango soy fortified yoghurt powder in two different packaging materials: HDPP and ALP. *Journal of Food Engineering* 65,p. 569-576.

Laorko, A.; Tongchitpakdee, S. and Youravong, W. (2013).Storage quality of pineapple juice non-thermally pasteurized and clarified by microfiltration.*J. Food Eng.* 116, p. 554–561.

Lasekan, O. y Lasekan, A. (2012). Flavour chemistry of mate and some common herbal teas, *Trends in Food Science & Technology* 27(1), p. 37-46.

Ley XVI N° 106. www.diputadosmisiones.gov.ar/digesto.../mostrar_archivo.php

López, O.; Isolabella, S.; Anesini, C.; Ferraro, G. y Filip, R. (2006) Estudio Cualitativo por HPLC de los Principios Activos presentes en los extractos de *Ilex paraguariensis* (yerba mate) en las diferentes etapas del procesamiento industrial. Libro de Actas del 4 congreso sudamericano de la yerba mate, Posadas, Argentina, p. 116-121.

Maccari Junior, A. (2005). Analise do pre-procesamiento da Erva-Mate para chimarrao. Cap. 4: Fatores que afetam a qualidade da Erva-Mate para chimarrão. Tesis de doctorado de la Universidad Estadual de Campinas. Brasil.

Maiocchi, M.; Moyano, S.; Martínez, L. y Avanza, J. (2003). Estudio comparativo del contenido de minerales en *Ilex paraguariensis* e *Ilex dumosa*. *Comunicaciones Científicas Tecnológicas*, UNNE.

Malik, J.; Szakova, J.; Drabek, O.; Balik, J. y Kokoska, L. (2008) Determination of certain micro and macroelements in plant stimulants and their infusions. *Food Chemistry* 111, p. 520-525.

- Márquez, V.; Martínez, N.; Guerra, M.; Fariña, L.; Boido, E. y Dellacasa, E. (2013). Characterization of aroma-impact compounds in yerba mate (*Ilex paraguariensis*) using Gc-olfatometry and GC-MS. Food Research International, <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2013.01.016>.
- Mastandrea, C. (2010). Hidrocarburos aromáticos policíclicos. Riesgos para la salud y marcadores biológicos. Acta bioquím. clín. latinoam., La Plata, v. 39, n. 1, marzo 2005 Disponible en <http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0325-29572005000100006&lng=es&nrm=iso>.acceso en 04 agosto 2010.
- Meilgaard, M.; Civille, G.V. y Carr, T. (1998). Sensory, Evaluation Techniques, CRC Press, Florida, USA.
- Menges, H.O.; Ertiken, C.(2006).Mathematical modeling of thin layer drying of golden apples.J. Food Eng. 77, 119–125.
- Menshutina, N.V., Gordienko, M.G., Voynovsky, A.A., Kudra, T.(2004). Dynamic analysis of drying energy consumption. Drying Technology 22, 2281–2290.
- 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, p. 85-90.
- Mujumdar, A.S. y Devahastin, S. (2008) Fundamental principles of drying. A.S. Mujumdar (Ed.), Guide to Industrial Drying—Principles, Equipments and New Developments, Three S Colors Publications, Mumbai, India , pp. 1–21
- Mujumdar, A.S. y Huang, L.X. (2007). Global R&D needs in drying. Dry. Technol., 25 (2007), pp. 647–658.
- Mujumdar, A.S.y Wu, Z.H. (2010). Thermal drying technologies: new developments and future R&D potential.S.V. Jangam, B.N. Thorat (Eds.), R&D Needs, Challenges and Opportunities for Innovation in Drying Technology'. e-Book.
- Mujundar, A.S. (2007). Handbook of Industrial Drying. 3rd Edition. Marcel Dekker, Inc. New York.

Mujundar, A.S. (2015). Handbook of Industrial Drying. 4th Edition. Marcel Dekker, Inc. New York.

Murakami, A. N.N.; De Mello Castanho Amboni, R.D.; Prudêncio, E.S.; Amante, E.R.; De Moraes Zanotta, L.; Maraschin, M.; Cunha Petrus, J.C. y Teófilo, R.F. (2011). Concentration of phenolic compounds in aqueous maté (*Ilex paraguariensis* A. St. Hil) extract through nanofiltration. LWT– Food Sci. Technol. 44,p. 2211–2216.

Neiverth, P.C.; Maccari J.R.A.; Reissmann, C.B. y Ribeiro, M.M. (2003) Procedure in dry ashing in ahs dissolution at different HCl normalities in two mate tree (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) morphotypes. 3er Congresso Sul Americano da Erva-Mate. Chapecó. Brasil p. 1-9.

Niamnuy, C.; Devahastin, S.; Soponronnarit, S.; Vijaya Raghavan, G.S. (2008). Kinetics of astaxanthin degradation and color changes of dried shrimp during storage. Journal of Food Engineering 87,p. 591-600.

Núñez, J.C. y Känzig, R.G. (1985). 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, p. 175-180.

Olivera, D. F. y Salvadori, V. O. (2012). Kinetic modeling of quality changes of chilled ready to serve lasagna. Journal of Food Engineering 110,p. 487-492.

Orjuela-Palacio, J.M.; Zamora, M.C.; Lanari, M.C. (2014). Consumers' acceptance of a high-polyphenol yerba mate/ blackcurrant beverage: Effect of repeated tasting. Food Research International 57, p 26-33.

Panchariya, P. C., Popovic, D., & Sharma, A. L. (2002).Thin-layer modelling of black tea drying process. Journal of Food Engineering, 52(4), 349-357. doi:10.1016/S0260-8774(01)00126-1.

Paredes, A. M.; Valdez, E. C.; Núñez, J. C. y Känzig, R. G. (2000).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, p. 182-185.

Peralta, J. M. y Schmalko, M. E. (2007). Modeling heat and mass transfer in the heat treatment step of yerba maté processing.Brazilian Journal of Chemical Engineering 24 (1), p. 73-82.

Pereira C.P., Toledo M.C.F., Noll I.B.(1999).B(a)P in mate (*Ilex paraguayensis* St. Hil.) processed by liquefied petroleum gas; Outra; IFT Annual Meeting; Institute of Food Technologists; Chicago; Chicago; Estados Unidos.

Prat Kricun, S. D. (1994).2° Curso de Capacitación en Producción de yerba mate. La Transformación Primaria. INTA-Estación Agropecuaria Cerro Azul, p. 99-107.

Ramallo, L. A.; Herrera, J. L. y Schmalko, M. E. (1996). Determinación de Vitaminas Hidrosolubles en la yerba mate. Presentado en la Reunión de Comunicaciones Científicas y tecnológicas de la Universidad Nacional del Nordeste. Resistencia 9 al 13 de Setiembre de 1996.

Ramallo, L. A.; Schmalko, M. E. y Känzig, R. G. (1998). Variación del contenido de ácido ascórbico (Vitamina C) durante la elaboración de la yerba mate. Revista Ciencia y Tecnología. Año 1. Nro. 1. Pp. 25-29. ISSN: 0392-8922.

Ramallo, L.A.; Morawicki, R.O y Schmalko, M.E. (1996). Determinación del Coeficiente Convectivo de Calor Utilizando el Método de la Superficie de Respuesta. Revista "Información Tecnológica" Vol 7. No 2. Pág. 163 ISSN: 0716-8756.

Ramallo, L.A.; Smorzewski, 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. Revista "La Alimentación Latinoamericana". N° 225. p 48-52. ISSN: 0325-3414.

Robichaud, J. L. y Noble, A. C. (1990). Astringency and bitterness of selected phenolics in wine. Journal of the Science of Food and Agriculture 53,p. 343-353.

Saavedra, J.; Córdova, A.; Gálvez, L.; Quezada, C.; Navarro, R. (2013). Principal component analysis as an exploration tool for kinetic modeling of food quality: A case study of a dried Apple cluster snack. Journal of Food Engineering 119, p. 229-235.

Sabarez, H.T. (2012). Computational modeling of the transport phenomena occurring during convective drying of prunes. J. Food Eng. 111 (2), 279–288.

Sabarez, H. T. (2015) Modeling Food Processing Operations, Modelling of drying processes for food materials. Chpt. 4. 95-127. doi:10.1016/ B978-1-78242-284-6.00004-0.

- Sanjuán, N.; Bon, J.; Clemente, G. y Mulet, A. (2004). Changes in the quality of dehydrated broccoli florets during storage. *J. Food Eng.* 62,p. 15–21.
- Santa Cruz, M.J.; Garitta, L. y Houg, G. (2003). Relationships of consumer acceptability and sensory attributes of yerba mate (*Ilex paraguariensis* Saint Hilaire) using preference mapping. *Food Science and Technology International* 5, p. 347–352, 2003.
- Santa Cruz, M.J.; Garitta, L.y Houg, G. (2002). Sensory descriptive analysis of yerba mate (*Ilex paraguariensis* Saint Hilaire), a South American beverage. *Food Science and Technology International* 1, p. 25–31.
- Schinella, G.; Troiani, G.; Dávila, V.; de Buschiazzo, P. M. y Tournier, H. A. (2000). Antioxidant effects of an aqueous extract of *Ilex paraguariensis*. *Biochemical & Biophysical Research Communications* 269, p. 357–360.
- Schmalko M.E., Kanzig R.G., Prat Kricun S.D. (2016) La yerba mate: Tecnología de la producción y propiedades. Ed. Universitaria. ISBN: 978-950-579-397-6. P 365-383.
- Schmalko, M. E. y Alzamora, S. M. (2005). Modelling the drying of a twig of “yerba mate” considering as a composite material.Part II: mathematical model.*Journal of Food Engineering* 67, p. 267-272.
- Schmalko, M. E.; Maciel, S. y Delfederico, L.E. (2003). Estudio de la Eficiencia Energética de un Secadero de yerba mate. 3º Congresso Sul-Americano da Erva Mate; Chapecó, Brasil 16 al 19 de Noviembre de 2003 (en CD).
- Schmalko, M. E.; Morawicki, R. O. y Ramallo, L. A. (1997). Simultaneous determination of specific heat and thermal conductivity using the finite difference method. *Revista Journal of Food Engineering* :31, 531-540. ISSN: 0260-8774.
- Schmalko, M. E.; Reta, M. R. y Kánzig, R. G. (1998). Contenido de Humedad de Equilibrio de la yerba mate: Influencia de diversas variables. *Revista La Alimentación Latinoamericana*. Año 21 - Nro 171- Julio-Agosto de 1988. ISSN: 0325-3414.
- Schmalko, M. E.; Scipioni, P. G. y Ferreyra, D. J. (2005). Effect of Water Activity and Temperature in Color and Chlorophylls Changes in Yerba Maté Leaves.*International Journal of Food Properties* 8, p. 313-322.

Schmalko, M.E. (2005). Estudio y Modelado del procesamiento Primario de la yerba mate. Tesis para acceder al Doctorado de la Universidad de Buenos Aires – Área Ciencias Químicas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales Dirigida por la Dra. Stella Maris Alzamora.

Schmalko, M.E. y Alzamora, S.M. (2001). Color, chlorophyll, caffeine and water content variation during Yerba Maté processing. *Drying Technology* 19,p. 599-610.

Schmalko, M.E.; Morawicki, R. O. y Ramallo, L. A. (1998). An Application of Simultaneous Heat and Mass Transfer in a Cylinder Using the Finite Difference Method. *Revista Drying Technology Volumen 26, N°s 1-2, Pags. 283-296. ISSN: 0737-3937.*

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*. *Revista Latin American Applied Research* 26, 215-220. ISSN: 0327-0793.

Schmalko, M.E.; Ramallo, L.A.; Herrera, J.L.; Valdez, E.C.; Paredes, A.M.; Morawicki, R.O.; Grosso, S.M.; Smorzewski, M.; Benitez Britez, S. y Escalada, A. (1995). Programa Eco Mate. Reconocimiento de Calidad. Análisis de Composición General, Minerales y Vitaminas en yerba mate. Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales. Universidad Nacional de Misiones.

Schubert, A.; Zanin, F.F.; Pereira, D. F. y Athayde, M.L. (2006). Variação anual de metilxantinas totais em a mostras de *Ilex paraguariensis* a. St. - Hil. (ervamate) em Ijuí e Santa Maria, estado do Rio Grande do Sul. *Quimica Nova*. 29(6), p. 1233-1236.

Scipioni, G. P.; Ferreyra, D. J.; Acuña, M. G. y Schmalko, M. E. (2010). Rebaudioside A release from matrices used in a yerba maté infusion. *Journal of Food Engineering* 100, p. 627-633.

Scipioni, G.P. (2007). Efectos de los tratamientos con Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cu^{2+} y Zn^{2+} sobre el color de las hojas de yerba mate. Tesis de Maestría en Tecnología de alimentos. Universidad Nacional de Misiones, p. 125.

Scipioni, G.P.; Ferreyra, D.J.; Acuña, M.G. y Schmalko, M.E. (2010). Rebaudioside A release from matrices used in a yerba maté infusion. En: *Journal of Food Engineering* 100: 627-633

Serpe F., Esposito M, Gallo P., Serpe L. (2010). Optimisation and validation of an HPLC method for determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in mussels. *Food Chemistry* 122:20-5.

Sharp, J. R. (1982). A review of low temperature drying simulation models. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 27(3), 169-190. doi:10.1016/0021-8634(82)90060-9.

Siles, J.A.; González-Tello P.; Martín, M.A.; Martín, A. (2015). Kinetics of alfalfa drying: Simultaneous modelling of moisture content and temperature. *Biosystems Engineering*. Vol 129, p 185-196.

Singh, S.P.; Jairaj, K.S.; Srikant, K. (2012). Universal drying rate constant of seedless grapes: a review. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 16, 6295–6302.

Soetan, K.O.; Olaiya, C.O. y Oyewole, O.E. (2010). The importance of mineral for humans, domestic animals and plants: A review. *African Journal of Food Science* 4(5), p. 200-220.

Stalmach, A.; Mullen, W.; Nagai, Ch. y Crozier, A. (2006). On-line HPLC analysis of the antioxidant activity of phenolic compounds in brewed, paper-filtered coffee. *Brazilian Journal of Plant Physiology* 18(1), p. 253-262.

STATGRAPHICS.CENTURION XV. (2009). Statpoint Technologies, Inc. Warrenton VA, U.S.A.

Stolyhwo A.; Sikorski Z.E. (2005). Polycyclic aromatic hydrocarbons in smoked fish- a critical review. *Food Chemistry* 91: 303-11.

Stone, H. y Sidel, J. (1974). *Sensory Evaluation Practices*, Academic Press, Inc., Florida, USA.

Surkan, S. A.; Albani, O. y Ramallo, L.A. (2009). Influence of Storage Conditions of Sensory Shelf Life of yerba mate. *Journal of Food Quality* 32, p. 58-72.

- Tao, F.; Zhang, M.; Hangking, Y. y Jincai, S. (2006). Effects of the different storage conditions on chemical and physical properties of white mushrooms after vacuum cooling. *J. Food Eng.* 77, p. 545–549.
- Temple, S. J., y Van Boxtel, A. J. B. (2000a). A comparison of dryer types used for tea drying. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 77(4), 401-407. Retrieved from www.scopus.com
- Temple, S. J., y Van Boxtel, A. J. B. (2000b). Control of fluid bed tea dryers: Controller design and tuning. *Computers and Electronics in Agriculture*, 26(2), 159-170. doi:10.1016/S0168-1699(00)00069-7.
- Tenorio Sanz, M.D. y Torija Isasa, M.E. (1991). Elementos Minerales en la yerba mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.). *Archivos Latinoamericanos de Nutrición* XLI (3), p. 441-454.
- Thea A.E. (2016). Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs) en yerba mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) de origen argentino: Influencia del procesamiento y contenido en las diferentes formas de consumo. Tesis de Doctorado en Ciencias Aplicadas. Universidad Nacional de Misiones.
- Togrul, H. (2005). Simple modeling of infrared drying of fresh apple slices. *J. Food Eng.* 71, 311–323.
- Trela, V.D.; Byczko, G.D. y Schmalko, M.E. (2011). Estudio de las variaciones de las propiedades de la yerba mate durante el estacionamiento. 5° Congreso Sudamericano de la yerba mate, 5 y 6/05/2011 Posadas- Argentina, p. 297-302.
- Turner, S.; Cogoi, L.; Isolabella, S.; Filip, R. y Anesini, C. (2011). Evaluation of the antioxidant activity and polyphenols content of *Ilex paraguariensis* (maté) during industrialization. *Adv. J. Food Sci. Technol.* 3, p. 23–30.
- Tussolini, L., de Oliveira, J. S., Freire, F. B., Freire, J. T., y Zanoelo, E. F. (2014). Thin-layer drying of mate leaves (*Ilex paraguariensis*) in a conveyor-belt dryer: A semi-automatic control strategy based on a dynamic model. *Drying Technology*, 32(12), 1457-1465. doi:10.1080/07373937.2014.900504
- Uddin, M.S., Hawlader, M.N.A., Ding, L., Mujumndar, A.S., (2002). Degradation of ascorbic acid in dried guava during storage. *Journal of Food Engineering* 51, p. 21-26.

Valerga, J.; Reta, M. y Lanari, M. C. (2012). Polyphenol input to the antioxidant activity of yerba mate (*Ilex paraguariensis*) extracts. *LWT – Food Sci. Technol.* 45, p. 28–35.

Woniaczuk, M.I. y Schmalko, M.E. (2005). Estudio de la Variabilidad de los Parámetros de Calidad de la yerba mate Elaborada en Diferentes Establecimientos. X Congreso Argentino de Ciencia y Tecnología de Alimentos, Mar del Plata 18 al 20 de Mayo de 2005(en CD).

Wood, W. y González, C. E. (2012). Estudio de la ganancia de humedad en la yerba mate durante el estacionamiento. *Revista Ciencia Technol.* 17,p. 25–29.

Yaldiz, O.; Ertekin, C.; Uzun, H.I. (2001). Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy* 26, 457–465.

Ybarra, L.R.; Duce, J.A.; Bordenave, S.A. y Schmalko, M.E. (2010). Study of ashes and their use to determine twig content in yerba mate. *Revista de Ciencia y Tecnología* 13, p. 25-29.

Zanoelo, E. F. (2007). A theoretical and experimental study of simultaneous heat and mass transport resistances in a shallow fluidized bed dryer of mate leaves. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 46(12), 1365-1375. doi:10.1016/j.cep.2006.10.016

Zanoelo, E. F., Benincá, C., & Ribeiro, E. (2011). Thermophysical properties of mate leaves: Experimental determination and theoretical effect of moisture content. *Journal of Food Process Engineering*, 34(6), 2124-2136. doi:10.1111/j.1745-4530.2009.00385.x

Zanoelo, E. F., di Celso, G. M., y Kaskantzis, G. (2007). Drying kinetics of mate leaves in a packed bed dryer. *Biosystems Engineering*, 96(4), 487-494. doi:10.1016/j.biosystemseng.2006.12.006

Zanoelo, E.F.; Benincá, C. y Ribeiro, E. (2009). Thermophysical properties of mate leaves: Experimental determination and theoretical effect of moisture content. *J. Food Process Eng.* 29,p. 253–268.

Anexos

Anexo 1: Diagrama psicrométrico

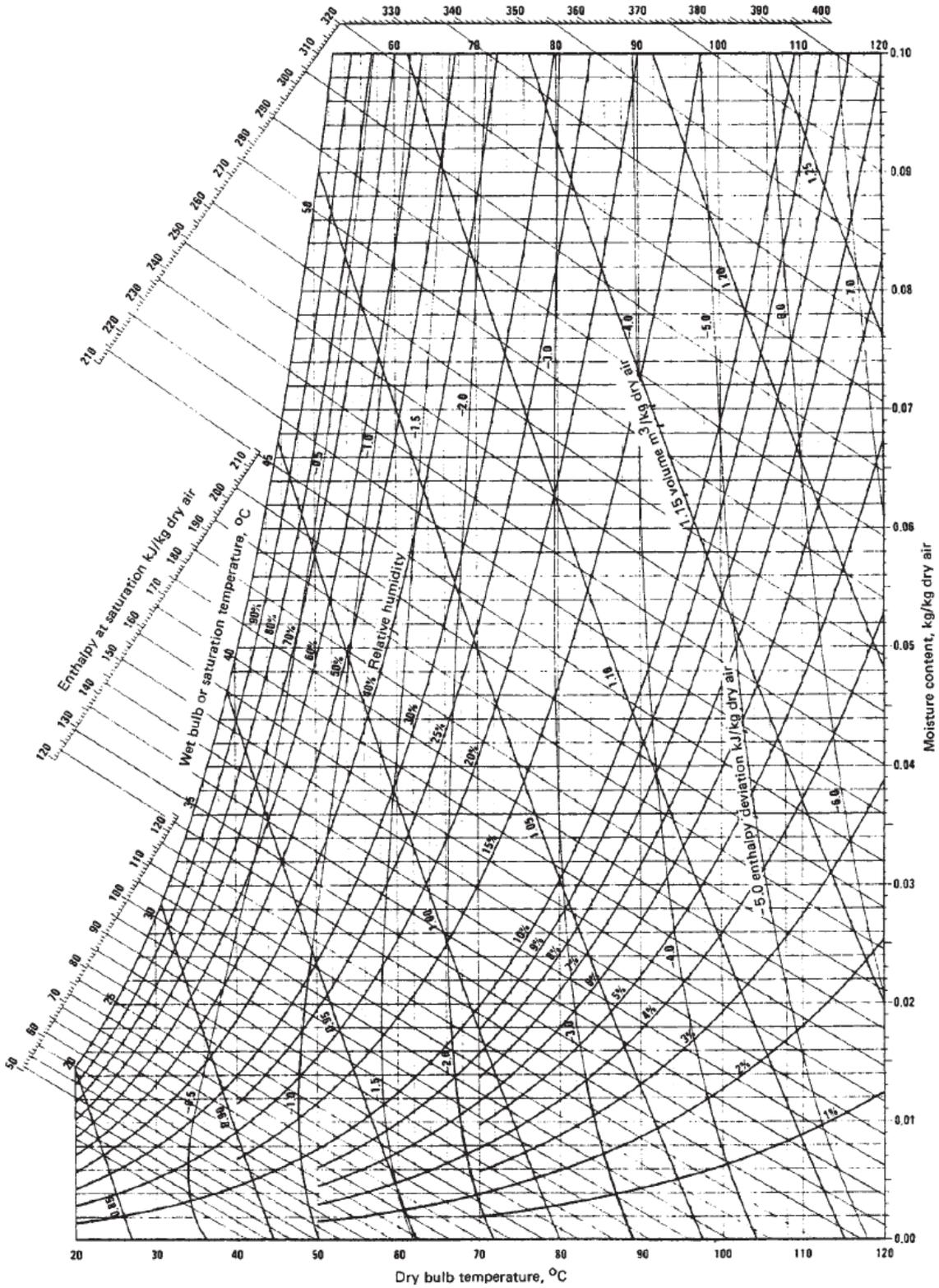
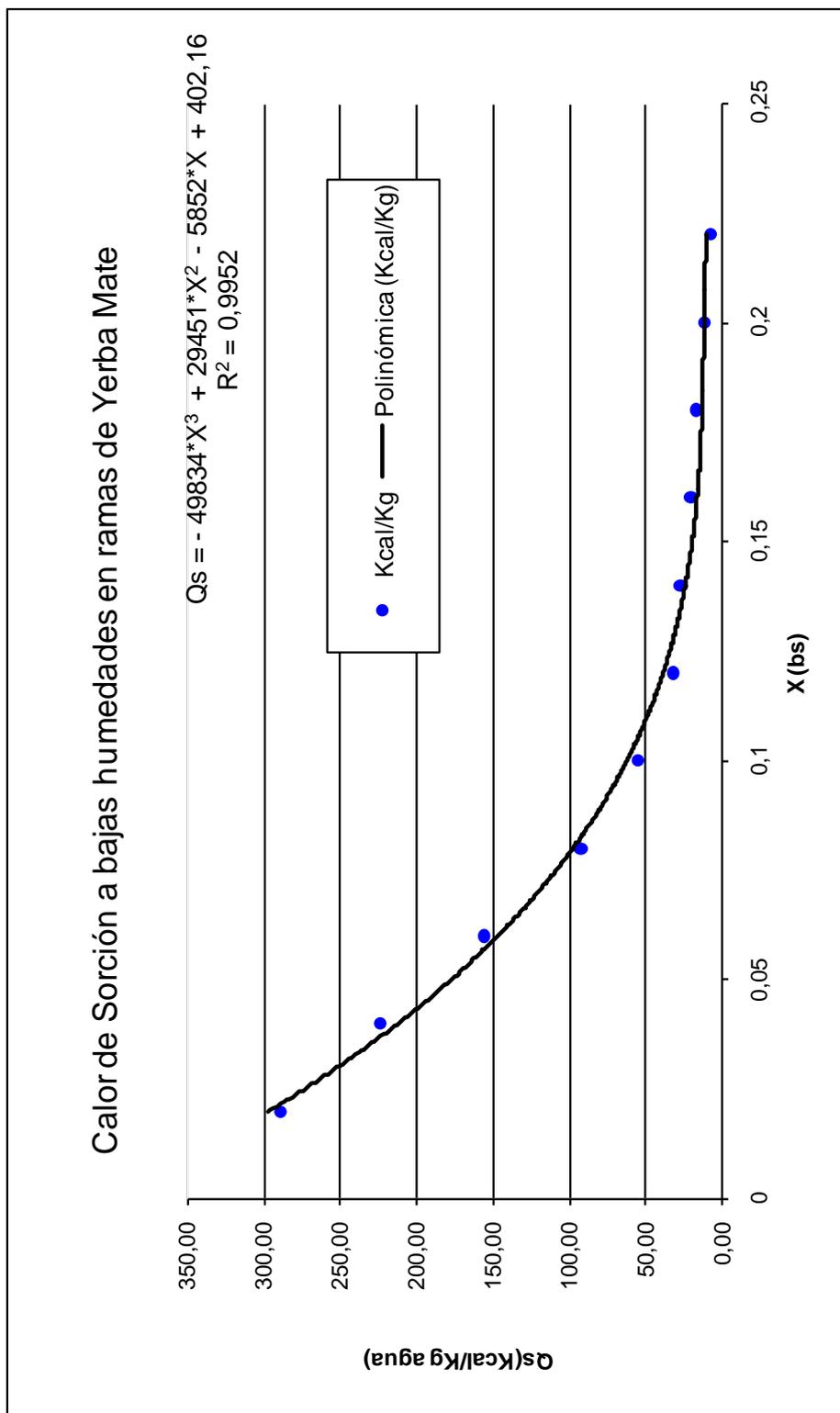


FIG. 12-36 Psychrometric chart: properties of air and water-vapor mixtures from 20 to 120°C. (Carrier Corp.)

Anexo2: Calor de sorción en hojas a bajas humedades.



Proyectos de Investigación, Financiamiento, Artículos publicados en Revistas y Congresos, Jornadas de Divulgación y Vinculación.

Proyectos dentro del cual se enmarcó la Tesis:

1. Proyecto de Investigación "Estudio de métodos alternativos del procesamiento de la yerba mate" Código: 16Q517 - Incentivado. Acreditado por la Universidad Nacional de Misiones. 01/01/2013 hasta 31/12/2015. Director: Miguel E. Schmalko.
2. Proyecto INYM-PRASY: Estudio de la calidad del producto y la eficiencia energética en diferentes métodos de procesamiento de la yerba mate. Director: Miguel E. Schmalko. Financiamiento: Monto Solicitado \$70300,⁰⁰
3. Proyecto de Investigación incentivado 16Q611: "Estudio y simulación de secaderos de yerba mate de tipo cinta en etapas múltiples superpuestas" Aprobado Res CD.301/16 (06-09/16) . Director: Miguel E. Schmalko.

Publicaciones:

1. Santiago A. Holowaty, Valeria Trela, Ana E. Thea*, Griselda P. Scipioni, Miguel E. Schmalko. Yerba Maté (*Ilex Paraguariensis* St. Hil): Chemical And Physical Changes Under Different Aging Conditions. Journal Of Food Process Engineering. Article First Published Online : 10 Feb 2015, Doi: 10.1111/Jfpe.12195 (ISSN: 0145-8876). (Área temática)
2. Santiago A. Holowaty, Mirta C. Martínez, Adriana E. Brignardello, Miguel E. Schmalko. Estudio Comparativo: Secado De Yerba Mate Con Leña De Bosque Implantado vs Chip de madera. Revista de Ciencia y Tecnología. Suplemento Ingeniería y Tecnología. pp 59 – 64. 2016 ISSN: 1851-7587. (VINCULADO).

Capítulo de Libro.

1. YERBA MATE. Reseña histórica y Estadística. Producción e Industrialización en el siglo XXI. Editorial CFI – Pablo L. Capellari. 310 paginas. Cap.16: Industrialización. Procesos decisivos para un producto de calidad. Holowaty Santiago A.

Presentaciones a Congresos:

1. Estudio térmico en establecimientos de yerba mate según el tipo de combustible. Holowaty S.A., Aguerre Y. S., Miguel E. Schmalko. XVI Congreso Argentino Ciencia y Tecnología de los Alimentos. Libro de trabajos completos (EN CD).AATA. Rosario, Argentina. 23 -25 de Octubre de 2013.ISBN: 978-987-22165-5-9.
2. Eficiencia térmica en el secado de yerba mate. Holowaty S.A., Aguerre Y. S., Miguel E. Schmalko. Memorias del VI Congreso sudamericano de la yerba mate y II Simposio internacional de yerba mate y salud. Universidad de la República, Montevideo Uruguay. 8-10/05/2014. ISBN: 978-9974-0-1085-7.
3. Procesamiento alternativo de la yerba mate. Holowaty S.A., Alegre C.G. Miguel E. Schmalko. Memorias del VI Congreso sudamericano de la yerba mate y II Simposio internacional de yerba mate y salud. Universidad de la República, Montevideo Uruguay. 8-10/05/2014. ISBN: 978-9974-0-1085-7.
4. Influencia de distintos tipos de zapeado en las propiedades fisicoquímicas de la yerba mate. Holowaty S.A. , Alegre C.A. , Bohazcenko E.A., Schmalko M.E. Libro de resúmenes del V Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos , Córdoba, Argentina. 17-19/11/2014. CP:68 ISBN: 978-987-45738-5-8.
5. Efecto del combustible empleado en el procesamiento de la yerba mate sobre la calidad. Holowaty S.A., Thea A.E., Bohazcenko E.A., Schmalko M.E. Libro de resúmenes del V Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos, Córdoba, Argentina. 17-19/11/2014. CP:71 ISBN: 978-987-45738-5-8
6. Cinética de secado de yerba mate con diferentes pre-tratamientos. Alegre C.A. , Holowaty S.A. , Schmalko M.E. Libro de resúmenes del V Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos, Córdoba, Argentina. 17-

- 19/11/2014. FP: 7 ISBN: 978-987-45738-5-8. S.A. Holowaty, E.A. Bohazcenko, A.C. Alegre, M. E. Schmalko. Efecto de métodos alternativos de procesamiento sobre la calidad de yerba mate (*Ilex paraguariensis* St. Hill.). Libro de Actas XV CYTAL. ISBN 978-987-22165-7-3. 3-5 de Noviembre de 2015. Buenos Aires, Argentina.
7. Alegre Andrea C., Zárate Maria F., Brumovsky Tamara N., Holowaty Santiago A. Procesamiento alternativo de yerba mate: evaluación sensorial con consumidores habituales de mate (I). Libro de Resúmenes. IX Jornadas Científicas y Tecnológicas de la Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales. 978-950-766-112-9.
http://www.fceqyn.unam.edu.ar/secip/files/jornadas/2015/LIBRO_IXjornadas_FCEQyN_2015.pdf
 8. Martinez M. Claudia, Holowaty Santiago A., Bignardello Adriana E., Schmalko Miguel E. Costos comparativos para el zapecado y secado tradicional de yerba mate: leña de bosque implantado vs. Chip. Libro de Resúmenes. IX Jornadas Científicas y Tecnológicas de la Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales. 978-950-766-112-9.
http://www.fceqyn.unam.edu.ar/secip/files/jornadas/2015/LIBRO_IXjornadas_FCEQyN_2015.pdf
 9. Holowaty Santiago A., Schmalko Miguel E. Efecto del cambio de combustible sobre la eficiencia térmica en un secadero de yerba mate. Libro de Resúmenes. IX Jornadas Científicas y Tecnológicas de la Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales. 978-950-766-112-9.
http://www.fceqyn.unam.edu.ar/secip/files/jornadas/2015/LIBRO_IXjornadas_FCEQyN_2015.pdf
 10. Martínez, Mirta C., Zubrzycki, MariaC., Holowaty, Santiago A., Brignardello Adriana. ESTUDIO COMPARATIVO DE COSTOS DEL SECADO UTILIZANDO LEÑA DE BOSQUES IMPLANTADO O CHIP DE MADERA. Anais do VII Congresso Sul-Americano da Erva-Mate. Erechim,RS, Brasil. 16-18 de mayo de 2017. ISBN 978-85-7892-121-7.
 11. Holowaty S.A., Schmalko M.E. SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE SECADO EN CONTACTO DIRECTO E INDIRECTO. Anais do VII Congresso Sul-

Americano da Erva-Mate. Erechim,RS, Brasil. 16-18 de mayo de 2017. ISBN 978-85-7892-121-7.

12. Holowaty S.A., Alegre A.C., Schmalko M.E. ASPECTOS SENSORIALES DE YERBA MATE ELABORADA POR METODOS ALTERNATIVOS. Anais do VII Congresso Sul-Americano da Erva-Mate. Erechim,RS, Brasil. 16-18 de mayo de 2017. ISBN 978-85-7892-121-7.

13. Guillermo M. Arndt1. Marcelo F. Ricci. Jonatan G. Tetzlaff. Santiago A. Holowaty. ESTUDIO DE LA EFICIENCIA TÉRMICA EN TRES TIPOS DE SECADEROS DE YERBA MATE. Anais do VII Congresso Sul-Americano da Erva-Mate. Erechim,RS, Brasil. 16-18 de mayo de 2017. ISBN 978-85-7892-121-7.

Presentaciones Orales (Conferencias y Jornadas):

1. Utilización de combustibles alternativos en el procesamiento de yerba mate. II Jornada técnica para secaderos de Yerba mate. 25/10/2013. Parque de las Naciones, Oberá, Misiones. Organizado por el Instituto Nacional de la Yerba Mate.
2. “Calidad y eficiencia térmica - procesamiento alternativo de yerba mate”. Jornadas Técnicas. 36º Fiesta Nacional de la Yerba Mate. 3 de Octubre de 2014. Apóstoles, Misiones.
3. “Procesamiento alternativo de yerba mate: calidad y eficiencia térmica - vinculación con la industria”. I Jornada de Ciencia, Tecnología e Industria y II Jornadas de Jóvenes Investigadores. Posadas Misiones. (Organizado por AMEIQ y la FCEQyN-UNaM) Noviembre/2014.
4. “Optimización de recursos energéticos en el procesamiento de la yerba mate: Avances” I Encuentro Tecnológico de Yerba y Té. Organizado por la Comisión Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) a través de la Secretaria de Vinculación tecnológica. Auspicio: INYM. 08/05/15.
5. “PROCESOS ALTERNATIVOS DE ZAPECADO Y SECADO”. VII Congresso Sul-Americano da Erva-Mate. Erechim,RS, Brasil. 16-18 de mayo de 2017.