



Universidad de Concepción

Dirección de Postgrado

Facultad de Ingeniería Agrícola – Programa de Magíster en Ingeniería Agrícola

**“Evaluación técnica de dos sistemas de secado de granos
de maíz (*Zea mays* L.), mediante modelación a escala
industrial”**

Tesis para optar al grado de Magíster en Ingeniería Agrícola con
mención en Agroindustrias

ALEJANDRO ALFREDO ARANEDA BECERRA

CHILLÁN-CHILE

2014

Profesor Guía: Rudi Radrigán Ewoldt

Dpto. de Agroindustrias, Facultad de Ingeniería Agrícola

Universidad de Concepción



“Evaluación técnica de dos sistemas de secado de granos de maíz (*Zea mays* L.),
mediante modelación a escala industrial”

Aprobado por:

Rudi Radrigán Ewoldt

Ingeniero Agroindustrial

Ph.D. Sistemas de Ingeniería

UNED, España

Profesor Guía

Marco López Roudergue

Ingeniero Civil Industrial

M.Sc. Ingeniería Agrícola

Universidad de Concepción, Chile

Profesor Co-tutor

María González Rodríguez

Ingeniero Agrónomo

Ph.D. Food Science

California Davis University, USA

Profesora Co-tutora

Mario Lillo Saavedra

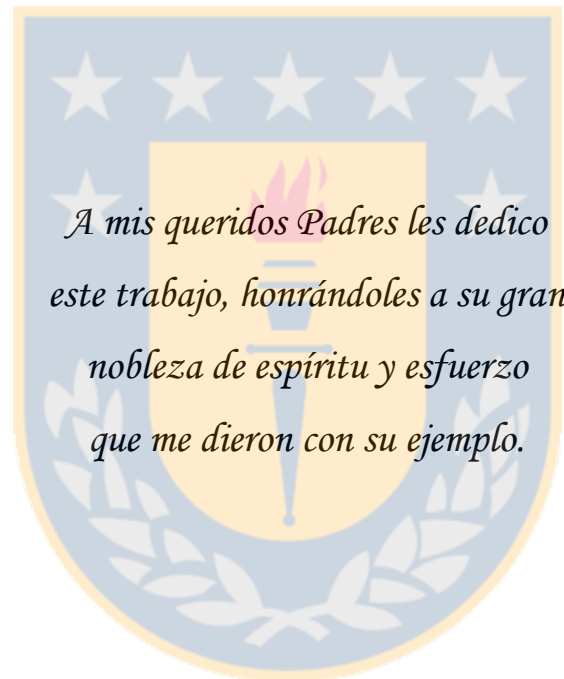
Ingeniero Civil Eléctrico

Ph.D. Informática

Universidad Politécnica, España

Director (s) de Programa

Dedicatoria



Agradecimientos

- Agradezco a Dios por su infinito amor y por darme la fortaleza y el conocimiento para realizar este proyecto de tesis.
- A mis queridos padres René y Marta, por brindarme su apoyo en todo momento y demostrar su confianza en mí.
- A mi profesor guía y a mis profesores cotutores, por su ayuda en la guía de este proyecto.
- A la Universidad de Concepción por la ayuda brindada para poder desarrollarme como profesional y estudiar dentro de esta institución.



Resumen

El secado es una de las operaciones unitarias más usadas en la preservación de los granos y consiste en extraer el agua libre mediante la aplicación de aire y calor, de tal manera que se conserve el aspecto y la calidad nutritiva del grano como alimento o su viabilidad como semilla. En este estudio, se compararon dos sistemas de secado de granos de maíz, con enfriamiento y sin enfriamiento, que consiste en la aplicación y la no aplicación de flujo de aire a temperatura ambiental en la sección de enfriamiento de un secador de caballetes de flujo continuo, simulando las condiciones de operación. El objetivo de este estudio fue evaluar técnicamente estos dos sistemas mediante modelación matemática como herramienta para la toma de decisiones en la elección del sistema de secado como el consumo específico de energía eléctrica, consumo específico de combustible, eficiencia y rendimiento del proceso. El modelo de tiempo de permanencia o residencia, se validó con el modelo de Thompson para curvas de secado de granos, obteniendo resultados comparables con el estándar, siendo la mejor aproximación, el modelo de sistema de secado sin enfriamiento. Además este sistema presentó un menor consumo específico de energía eléctrica, aunque no hubo diferencias significativas (valor $p \leq 0,05$) entre el consumo específico de combustible, eficiencia y rendimiento del proceso de secado de cada sistema.

Palabras clave: sistema de secado con y sin enfriamiento, balance de materia y energía, tiempo de permanencia, *Zea mays*.

Abstract

Drying is one of the most used unit operations in the preservation of grains and involves removing free water by applying air and heat, so that the appearance and nutritional quality of the grain as food or viability as seed is maintained. In this study, were compared two drying systems corn grains with cooling and without cooling, which consists of applying or not applying airflow at room temperature in the cooling section of a easels dryer of continuous flow, simulating operating conditions. The aim of this study was to technically evaluate these two systems through mathematical modeling as a tool for decision making in choosing the drying system as the specific electricity consumption, specific fuel consumption, efficiency and drying process performance. The model of dwell time or residence, was validated with Thompson model for curves drying grains, obtaining results comparable to the standard, being the better approximation, the drying system model without cooling. Furthermore, this system presented a lower specific electricity consumption, although no significant differences (value $p \leq 0,05$) between the specific fuel consumption, efficiency and performance of the drying process of each system.

Key words: drying system with cooling and without cooling, material and energy balance, dwell time, *Zea mays*.

Tabla de contenidos

Ítem	Nº de página
Portada.....	i
Comisión de evaluación.....	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos.....	v
Resumen.....	vi
Abstract.....	vii
Tabla de contenidos.....	viii
Índice de figuras.....	ix
Índice de tablas.....	x
Nomenclatura.....	xi
1. Introducción.....	1
2. Materiales y métodos.....	5
2.1. Sistemas de secado.....	5
2.2. Capacidad de secado o flujo másico de producto.....	6
2.3. Flujo másico de aire, entalpía específica del aire y del producto.....	11
2.4. Pérdidas caloríficas del sistema.....	14
2.5. Consumo específico de energía eléctrica.....	16
2.6. Consumo específico de combustible.....	18
2.7. Eficiencia de secado.....	20
2.8. Rendimiento de secado.....	20
2.9. Tiempo de permanencia.....	20
2.10. Análisis estadístico.....	21
3. Resultados y discusión.....	23
4. Conclusiones y recomendaciones.....	27
Bibliografía.....	28
Anexo y apéndice.....	30

Índice de figuras

Ítem	N° de página
Figura 1: Sistema de secado con enfriamiento, a partir de Aerotérmica Alfa SRL (2012).....	5
Figura 2: Sistema de secado sin enfriamiento, a partir de Aerotérmica Alfa SRL (2012).....	6
Figura 3: Algoritmo para determinar la merma y capacidad de secado.....	8
Figura 4: Algoritmo para determinar la humedad inicial y final del grano en base seca, flujo másico de producto y agua evaporada.....	10
Figura 5: Esquema para determinar las propiedades del aire, a partir de Treybal (2002).....	11
Figura 6: Secador de granos de flujo continuo, tipo caballetes.....	11
Figura 7: Algoritmo para determinar la humedad absoluta del aire, temperatura de bulbo húmedo, flujo másico de aire y calor específico del producto.....	13
Figura 8: Diagrama de flujo del proceso de secado, donde los subíndices 1 y 2 indican entrada y salida del sistema.....	14
Figura 9: Algoritmo para determinar la entalpía específica del aire, entalpía específica del producto y pérdidas caloríficas del sistema.....	15
Figura 10: Algoritmo para determinar el volumen específico, caudal de aire y potencia de ventiladores.....	17
Figura 11: Algoritmo para determinar el consumo específico de energía, flujo másico de combustible y consumo específico de combustible.....	19
Figura 12: Curvas de secado del maíz (<i>Z. mays</i>), a diferentes tamaños de capa.	21
Figura 13: Algoritmo para determinar la eficiencia de secado, rendimiento de secado y tiempo de permanencia.....	22
Figura 14: Curvas de secado del maíz, a temperatura de 40°C y a diferentes tamaños de capa de granos (z) en base húmeda.....	25

Índice de tablas

Ítem	N° de página
Tabla 1: Evaluación técnica del sistema de secado con y sin enfriamiento de granos de maíz (<i>Z. mays</i>) a escala industrial, mediante modelación matemática con 16 datos en base a humedades iniciales de 20 a 35%, con tamaño de paso del 1%, e intervalos de confianza (valor $p \leq 0,05$).....	23



Nomenclatura

C_{PS}	: Calor específico del producto	$\text{kJ kg sólido seco}^{-1}\text{°C}^{-1}$
C_{PSi}	: Calor específico del i-ésimo componente	$\text{kJ kg componente}^{-1}\text{°C}^{-1}$
C_{PW}	: Calor específico del agua líquida	$\text{kJ kg agua}^{-1}\text{°C}^{-1}$
ΔP	: Diferencia de presión estática	kPa
ΔX	: Merma de secado	%
ΔX_N	: Merma de secado nominal	%
E_V	: Consumo específico de energía eléctrica	$\text{kWh kg sólido seco}^{-1}$
G_S	: Flujo másico de aire	$\text{kg aire seco s}^{-1}$
G_V	: Caudal de aire	m^3s^{-1}
H_G	: Entalpía específica del aire	$\text{kJ kg aire seco}^{-1}$
H_{G0}	: Entalpía específica del aire ambiental	$\text{kJ kg aire seco}^{-1}$
H_{G1}	: Entalpía específica del aire caliente	$\text{kJ kg aire seco}^{-1}$
H_{G2}	: Entalpía específica del aire usado	$\text{kJ kg aire seco}^{-1}$
H_S	: Entalpía específica del producto	$\text{kJ kg sólido seco}^{-1}$
H_{S1}	: Entalpía específica inicial del maíz	$\text{kJ kg sólido seco}^{-1}$
H_{S2}	: Entalpía específica final del maíz	$\text{kJ kg sólido seco}^{-1}$
HR	: Humedad relativa del aire	%
η_s	: Eficiencia de secado	%
η_T	: Eficiencia térmica	%
η_V	: Eficiencia del ventilador	%
k_d	: Constante de velocidad de secado	$\text{m s}^{-1}\text{°C}^{-1}$
λ	: Calor latente de evaporación	kJ kg agua^{-1}
\dot{m}	: Capacidad de secado	kg s^{-1}
\dot{m}_C	: Flujo másico de combustible	$\text{kg combustible s}^{-1}$
\dot{m}_N	: Capacidad de secado nominal	kg s^{-1}

\dot{m}_w	: Flujo másico de agua evaporada	kg agua s ⁻¹
N_v	: Potencia de ventiladores	kW
n	: Número de componentes	–
PC	: Poder calorífico del combustible	kJ kg combustible ⁻¹
Q	: Pérdidas caloríficas del sistema	kW
R_c	: Consumo específico de combustible	kg combustible kg sólido seco ⁻¹
R_s	: Rendimiento de secado	%
S_s	: Flujo másico de producto	kg sólido seco s ⁻¹
T_G	: Temperatura de bulbo seco	°C
T_{G0}	: Temperatura del aire ambiental	°C
T_{G1}	: Temperatura del aire caliente	°C
T_{G2}	: Temperatura del aire usado	°C
T_s	: Temperatura superficial del producto	°C
T_{s1}	: Temperatura inicial del maíz	°C
T_{s2}	: Temperatura final del maíz	°C
T_w	: Temperatura de bulbo húmedo	°C
T_0	: Temperatura de referencia	°C
t	: Tiempo de permanencia	s
V_G	: Volumen específico del aire	m ³ kg aire seco ⁻¹
X	: Humedad del producto en base seca	kg agua kg sólido seco ⁻¹
X_1	: Humedad inicial del maíz en base seca	kg agua kg sólido seco ⁻¹
X_2	: Humedad final del maíz en base seca	kg agua kg sólido seco ⁻¹
X_i	: Fracción másica del i-ésimo componente	kg componente kg sólido seco ⁻¹
X_w	: Humedad del producto en base húmeda	%
X_{w1}	: Humedad inicial del maíz en base húmeda	%
X_{w2}	: Humedad final del maíz en base húmeda	%

Y	: Humedad absoluta del aire	$\text{kg agua kg aire seco}^{-1}$
Y_0	: Humedad absoluta del aire ambiental	$\text{kg agua kg aire seco}^{-1}$
Y_1	: Humedad absoluta del aire caliente	$\text{kg agua kg aire seco}^{-1}$
Y_2	: Humedad absoluta del aire usado	$\text{kg agua kg aire seco}^{-1}$
z	: Tamaño de capa de granos	m



1. Introducción

El secado es una de las operaciones unitarias más usadas en la preservación de los alimentos y consiste en extraer el agua libre mediante la aplicación de aire y calor, para impedir la proliferación de microorganismos y cualquier actividad enzimática que afecte la calidad del alimento y sus propiedades organolépticas. El secado puede ser descrito como un método de conservación industrial, para reducir al mínimo el deterioro microbiológico y químico (Doymaz y Pala, 2003).

El proceso de secado de granos de maíz, se puede definir como el método de reducir el contenido de agua del grano hasta un nivel seguro de humedad, de tal manera que se conserve el aspecto y la calidad nutritiva del grano como alimento o su viabilidad como semilla, para una buena conservación después de la cosecha y comercialización del producto. La regla básica para la conservación de los granos almacenados, es ingresar a granel en silos de almacenamiento, grano seco, sano, limpio y frío; la temperatura y la humedad actúan como catalizadores de los procesos metabólicos, aumentando la tasa de respiración de los granos y por ende, las pérdidas de masa; a mayor temperatura y humedad, mayor riesgo en la conservación de los granos y a su vez, un grano que no está sano y limpio, es más propenso a ser atacado por hongos e insectos. La técnica de aireación se basa en utilizar el aire como un fluido de intercambio de calor y humedad con los granos; si las condiciones del aire en cuanto a temperatura y humedad son adecuadas, se puede utilizar el flujo de aire para enfriar los granos y en algunos casos para extraer la humedad, disminuyendo así su actividad metabólica. (Bartosik y Rodríguez, 2006).

La producción de maíz depende de la variedad y del manejo agronómico del cultivo; cuando el maíz alcanza su madurez fisiológica y su destino es el secado artificial, la humedad máxima para la cosecha es del 35% en base húmeda (Callejo, 2002). La humedad máxima segura para el almacenamiento de los granos, es aquella humedad en que la tasa de respiración es lo suficientemente baja para prevenir la acumulación de calor y el consecuente deterioro del producto; para el maíz, el contenido máximo de humedad para el almacenamiento es del 14,5% en base húmeda (FAO, 1996). Para mantener el maíz en buenas condiciones durante el

almacenamiento, se recomienda una temperatura inicial del aire de 40°C a una velocidad de 0,08 m s⁻¹, aunque también existen otras condiciones, donde la velocidad del aire puede llegar a 0,16 m s⁻¹ (Lecorvaisier et al., 2009).

El grano de maíz se puede considerar como un modelo de solución binaria constituido por agua y materia seca; en base a esta teoría, se puede desarrollar un modelo para la estimación del calor específico del producto en base a la fracción másica y de calor específico de cada uno de sus componentes químicos (Akintunde, 2008).

Durante el almacenamiento del maíz, la humedad del grano y la humedad del ambiente llegan a equilibrarse; generalmente los granos se conservarán en buen estado cuando estén en equilibrio higroscópico con el aire, de menos de un 70% de humedad relativa (Callejo, 2002). Existen modelos que predicen el equilibrio higroscópico de diferentes productos en el almacenamiento, como los modelos de Henderson, Chung-Pfost, Langmuir y Rounsley, por nombrar algunos; el modelo de Henderson modificado, es el que mejor expresa el contenido de humedad de equilibrio de granos de maíz, en amplios rangos de temperatura y humedad relativa del aire (FAO, 1991a). El modelo de Henderson modificado, predice la humedad de equilibrio de granos, con un error del 1,27% (Kingsly y Ileleji, 2009). Este modelo también ha sido aplicado en procesos de secado de granos, mediante lechos fluidizados (Osueke, 2013).

El secado de granos de maíz tiene algunos parámetros claves, tales como el consumo específico de energía eléctrica, que corresponde a la potencia del motor eléctrico del ventilador dividido por el flujo másico de granos secos; el consumo específico de combustible, definido como el flujo másico de combustible dividido por el flujo másico de granos secos; la eficiencia de secado, que es la energía mínima para evaporar el agua dividido por la energía consumida de combustible (FAO, 1996) y el rendimiento de secado, que corresponde al flujo másico de salida de granos secos dividido por el flujo másico de entrada de granos húmedos (Treybal, 2002).

En el secado de granos de maíz, se cuenta con escasa información estadística sobre consumo específico de energía eléctrica, consumo específico de combustible, eficiencia y rendimiento del proceso. El INTA (2014), señala que, estimaciones

recientes basadas en datos de producción anual de distintos tipos de granos en Argentina, indican que el proceso de secado consume 13 millones de litros de combustible “gas-oil” al año. Otros datos indican que para una capacidad de 30 toneladas de granos por hora, para una reducción de humedad de 21 a 14% y utilizando un combustible con un poder calorífico de $10100 \text{ kcal kg}^{-1}$, el consumo de combustible es de 316 kg h^{-1} , lo que entrega un consumo específico de $0,97 \text{ kg}$ de combustible por cada 100 kg de granos secos; por otra parte si la capacidad de secado es de 50 toneladas de granos por hora, para una reducción de humedad de 18 a 13,5% y utilizando un combustible con un poder calorífico de $10800 \text{ kcal kg}^{-1}$, la eficiencia de secado es del 42% (FAO, 1996).

El sistema de secado convencional también conocido como sistema de secado con enfriamiento, consiste en secar los granos a altas temperaturas para luego enfriar el producto mediante la aplicación de aire a temperatura ambiental dentro del mismo secador. La sección de enfriamiento corresponde a un tercio del volumen total de las cámaras de secado (FAO, 1996). La temperatura del aire usado (a la salida del secador) varía de 35 a 65°C dependiendo del tipo de secador y de las condiciones de secado. La humedad relativa del aire usado puede llegar a un valor mínimo promedio del 20% en sistemas de secado a altas temperaturas; estudios indican que la temperatura del aire usado y por consiguiente la del grano, disminuyen alrededor de $0,5$ a $0,6^\circ\text{C}$ por cada 1% más de humedad inicial del grano y que los caudales de aire de los ventiladores, varían entre 700 a $5000 \text{ m}^3\text{min}^{-1}$, donde la presión estática se encuentra normalmente entre 30 a 50 mm de columna de agua (FAO, 1996).

El sistema de seca-aireación, es un método que consiste en secar los granos hasta un contenido de humedad final de 16 a 18%, para luego ser transferido a silos de almacenamiento, donde se concluye el secado a temperatura ambiental (FAO, 1996). En el secador sólo se realiza el secado de granos a altas temperaturas (todo calor), por lo que se denomina sistema de secado sin enfriamiento. El secado a bajas temperaturas, se realiza después del secado a todo calor (Doymaz y Pala, 2003). El proceso de secado por capas, se realiza generalmente con espesores de lecho estático que van de $0,15$ a $0,60 \text{ m}$ de capa de granos (Lecorvaisier et al., 2009).

Para describir el comportamiento dinámico de un proceso de secado de granos de maíz, Thompson desarrolló un modelo teórico para el secado de granos, por convección forzada (Araújo et al., 2005). Este modelo se aplicó para validar curvas de secado de granos de maíz, en sistema de secado por capas, para temperatura de secado de 313 K (40°C) a tamaños o espesores de capa de 0,15 a 0,6 m y velocidad del aire de 0,08 m s⁻¹ (Lecorvaisier et al., 2009).

Actualmente la evaluación de sistemas de secado, se realiza bajo rigurosos ensayos técnicos con el fin de obtener resultados que permitan hacer comparaciones válidas entre distintos sistemas (FAO, 1996). Estas pruebas son complejas y de elevado costo, ya que debe instalarse el secador a ensayar en institutos reconocidos para realizar las pruebas lo que conlleva un costo de instalación, además de disponer de una cantidad apreciable de grano húmedo para realizar los estudios. La información obtenida de los catálogos, manuales y folletos de secadoras de granos, entregan una información poco detallada del proceso o más bien básica como la temperatura de secado de entrada y salida del secador, la capacidad de secado nominal o flujo másico de granos en quintales métricos por hora, la humedad inicial y final del grano expresado en porcentaje y la potencia de los ventiladores, medidor y rosca de descarga de granos (FAO, 1996).

El objetivo de este estudio fue evaluar técnicamente dos sistemas de secado a escala industrial (con y sin enfriamiento), mediante modelación matemática como herramienta para la toma de decisiones en la elección del sistema de secado de granos de maíz.

2. Materiales y métodos

El protocolo de cálculo, se basó en lo descrito por la FAO (1991b, 1991c y 1996) para el diseño y evaluación de secadoras de granos, y por Ulrich (1992) y Treybal (2002) en base a los balances de materia y energía en sistemas de secado a altas y bajas temperaturas. El estudio fue realizado durante el periodo 2013-2014, simulando las condiciones de operación a escala industrial, de un secador de granos de maíz de flujo continuo, tipo caballetes (Aerotérmica Alfa SRL, 2012). Para la modelación, se utilizó la aplicación Excel 2007 de Microsoft®, para Windows 7 Starter, sistema operativo de 32 bits.

2.1. Sistemas de secado

Los sistemas de secado que fueron evaluados, son:

- Sistema de secado con enfriamiento.
- Sistema de secado sin enfriamiento.

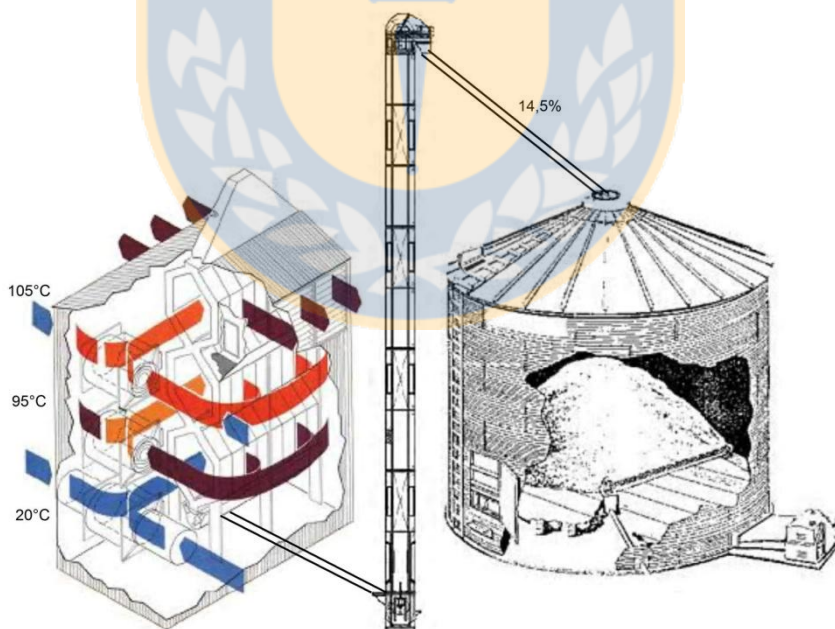


Fig. 1. Sistema de secado con enfriamiento, a partir de Aerotérmica Alfa SRL (2012).

Para la simulación del proceso de secado con enfriamiento (convencional) de la figura 1, el maíz fue secado en las tres secciones o módulos del secador. En los

módulos superiores la temperatura del aire de secado fue de 105 y 95°C. En el módulo inferior el enfriamiento fue de 20°C, donde el maíz sale a una humedad final del 14,5% en base húmeda, y transportado a un silo de almacenamiento, donde se concluye el secado a bajas temperaturas. La aireación en silo se realizó a una temperatura de 40°C y 25% de humedad relativa (Lecorvaisier et al., 2009).

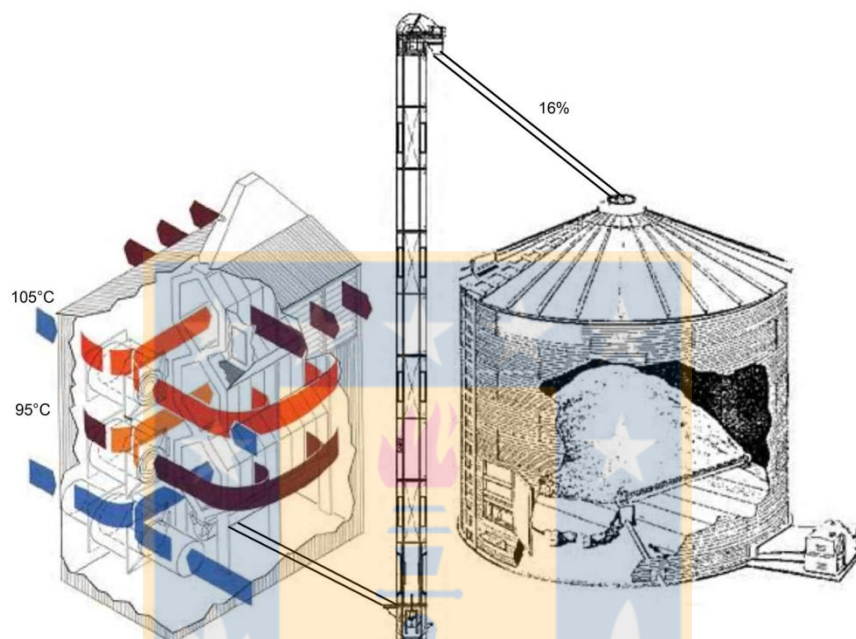


Fig. 2. Sistema de secado sin enfriamiento, a partir de Aerotérmica Alfa SRL (2012).

Para la simulación del proceso de secado sin enfriamiento (seca-aireación) de la figura 2, el maíz fue secado en las dos secciones o módulos superiores del secador, a temperaturas de secado de 105 y 95°C (todo calor), donde el maíz sale a una humedad final del 16% en base húmeda y transportado a un silo de almacenamiento, donde se concluye el secado a bajas temperaturas.

2.2. Capacidad de secado o flujo másico de producto

La capacidad de secado de granos de maíz, se obtuvo de la ecuación 1 (FAO, 1996).

$$\dot{m} = \frac{\dot{m}_N \Delta X_N}{\Delta X} \quad [1]$$

Donde:

\dot{m} = capacidad de secado (kg s^{-1})

\dot{m}_N = capacidad de secado nominal (kg s^{-1})

ΔX = merma de secado (%)

ΔX_N = merma de secado nominal (%)

La capacidad de secado nominal, se obtuvo de catálogo del equipo secador para sistema de secado con y sin enfriamiento. La capacidad de secado incluye los datos de humedad de entrada y salida de granos del secador, para determinar la merma de secado nominal; 20 a 14,5% de humedad del maíz con un $\Delta X_N = 6,43\%$ para sistema con enfriamiento, y 20 a 16% con un $\Delta X_N = 4,76\%$ para sistema sin enfriamiento (Aerotérmica Alfa SRL, 2012). La merma de secado es el porcentaje de agua extraída del grano durante el proceso de secado y se obtuvo de la ecuación 2 (Bülent et al., 2006).

$$\Delta X = \frac{(X_{W1} - X_{W2})100}{100 - X_{W2}} \quad [2]$$

Donde:

X_{W1} = humedad inicial del maíz en base húmeda (%)

X_{W2} = humedad final del maíz en base húmeda (%)

La ecuación 2 se utilizó para determinar la merma de secado a diferentes humedades iniciales, manteniendo fija la humedad final del grano (FAO, 1996). Para el sistema de secado con enfriamiento, se incrementó la humedad inicial del maíz de 20% hasta 35%, con un tamaño de paso del 1%, quedando fija la humedad final del maíz en $X_{W2} = 14,5\%$. Para el sistema de secado sin enfriamiento, se realizó el mismo procedimiento anterior, pero quedando fija la humedad final del maíz en $X_{W2} = 16\%$. En ambos casos, el 20% corresponde a la humedad inicial del maíz que se obtuvo de catálogo y el 35% corresponde a la humedad máxima de cosecha (Callejo, 2002). La capacidad de secado disminuye a medida que ingresan granos

con mayor contenido de humedad al secador (FAO, 1996). La figura 3 muestra el algoritmo para determinar la merma y la capacidad de secado.

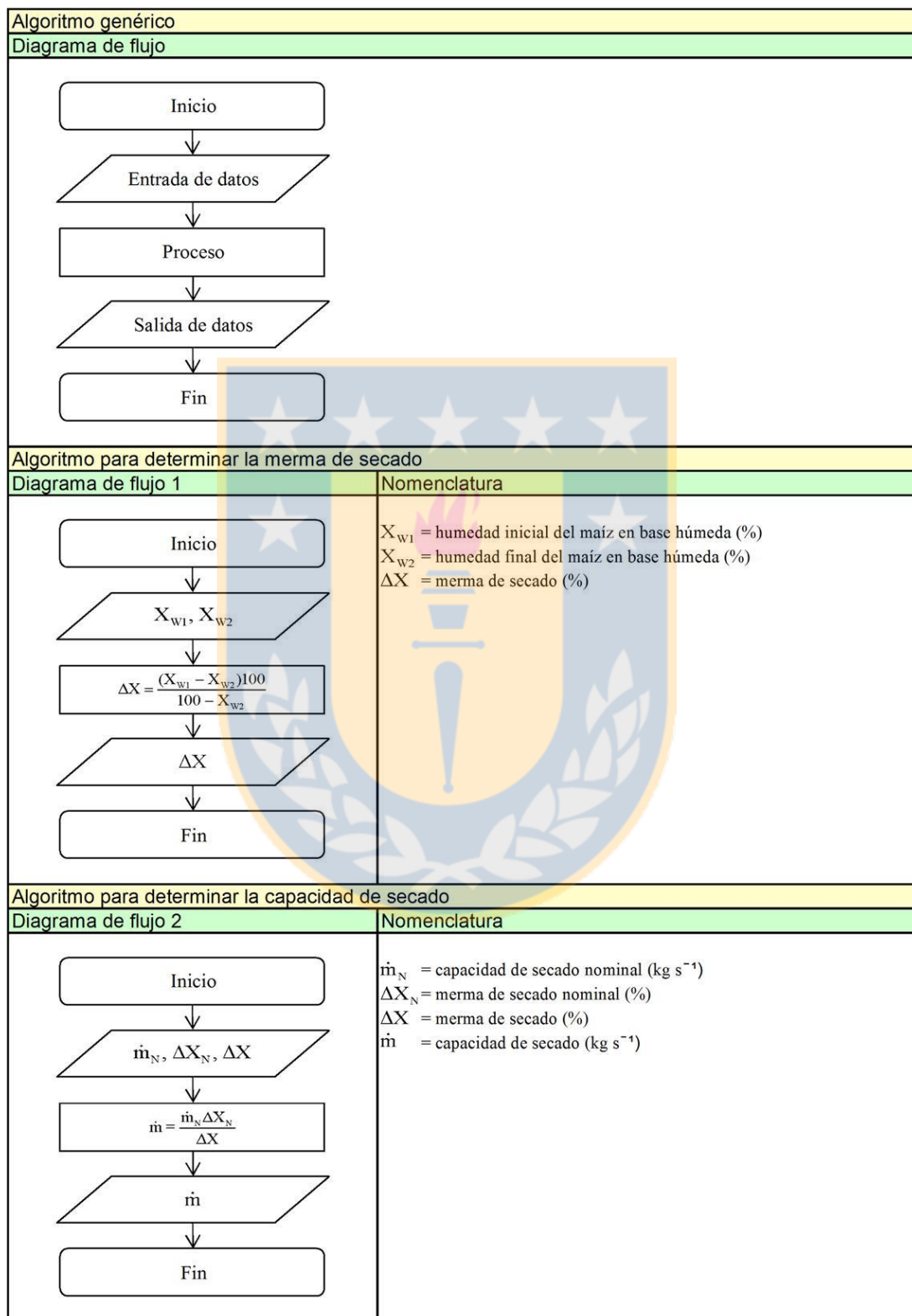


Fig. 3. Algoritmo para determinar la merma y capacidad de secado.

La conversión del contenido de humedad del grano de base húmeda a base seca, se obtuvo de la ecuación 3 (Treybal, 2002).

$$X = \frac{X_w}{100 - X_w} \quad [3]$$

Donde:

X = humedad del producto en base seca (kg agua kg sólido seco⁻¹)

X_w = humedad del producto en base húmeda (%)

El flujo másico de producto en base seca y de agua evaporada, se obtuvieron de las ecuaciones 4 y 5 (Treybal, 2002).

$$S_s = \frac{\dot{m}}{1 + X} \quad [4]$$

Donde: S_s = flujo másico de producto (kg sólido seco s⁻¹)

$$\dot{m}_w = S_s(X_1 - X_2) \quad [5]$$

Donde:

\dot{m}_w = flujo másico de agua evaporada (kg agua s⁻¹)

X_1 = humedad inicial del maíz en base seca (kg agua kg sólido seco⁻¹)

X_2 = humedad final del maíz en base seca (kg agua kg sólido seco⁻¹)

En la simulación, la capacidad de secado fue disminuyendo a medida que fue aumentando la humedad inicial del grano de maíz de 20 a 35% con tamaño de paso del 1%. También cambiaron los valores de flujo másico de producto en base seca y flujo másico de agua evaporada, ya que la capacidad de secado está implícita en las ecuaciones 4 y 5. La figura 4 muestra el algoritmo para determinar la humedad inicial y final del maíz en base seca, flujo másico de producto en base seca y flujo másico de agua evaporada.

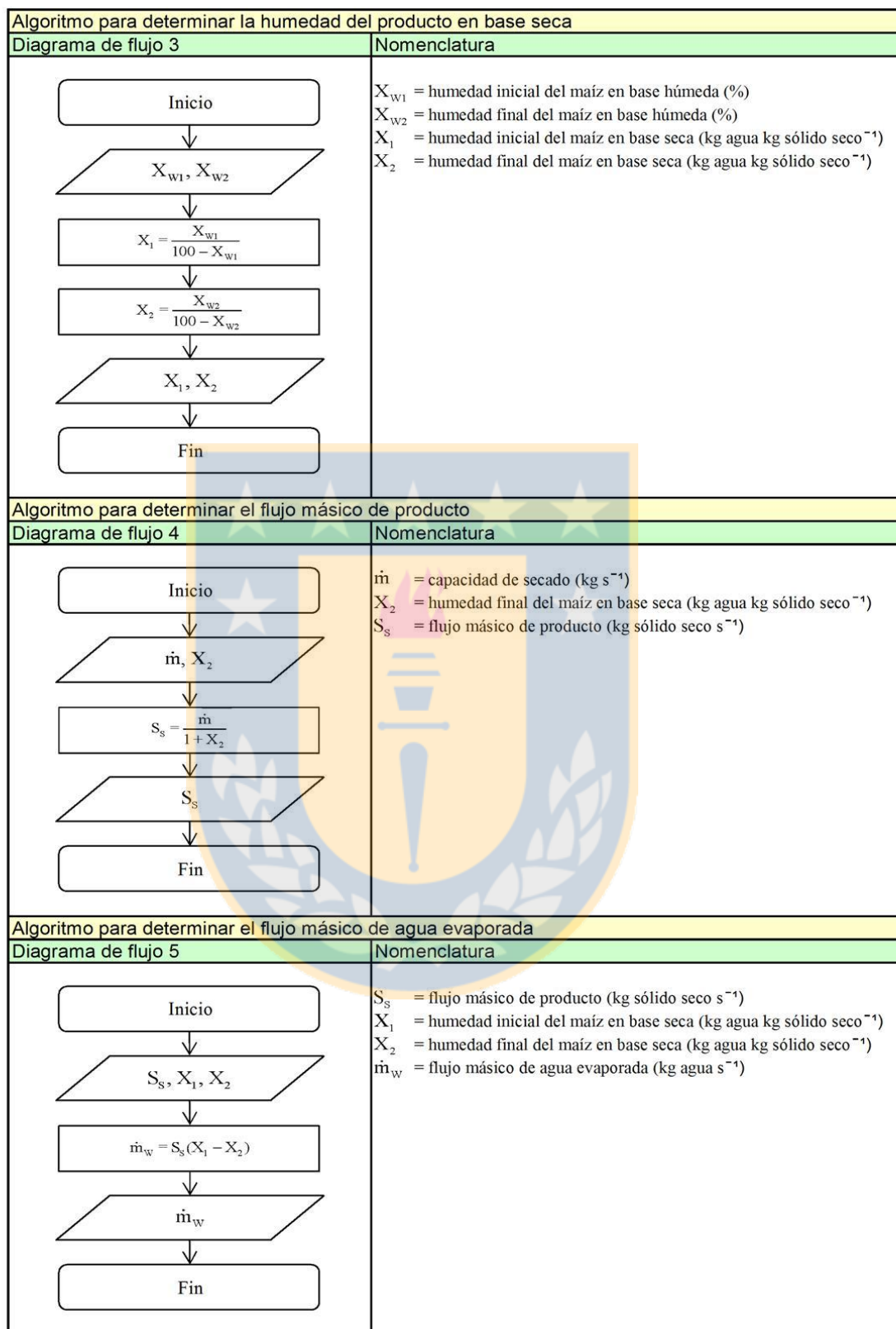


Fig. 4. Algoritmo para determinar la humedad inicial y final del grano en base seca, flujo másico de producto y agua evaporada.

2.3. Flujo másico de aire, entalpía específica del aire y del producto

Las propiedades del aire se obtuvieron del diagrama psicrométrico, cuyo esquema se muestra en la figura 5 (Treybal, 2002).

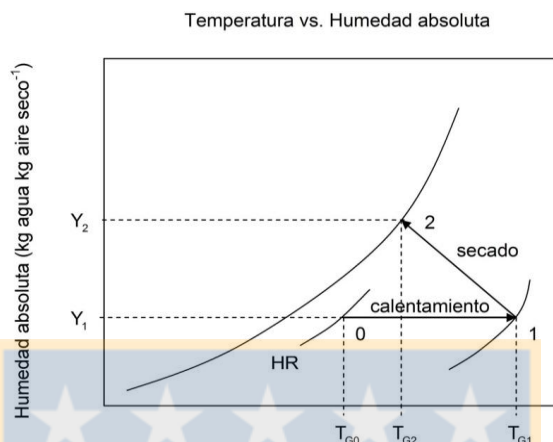


Fig. 5. Esquema para determinar las propiedades del aire, a partir de Treybal (2002).

Donde: T_{G0} , T_{G1} , T_{G2} son las temperaturas de bulbo seco del aire ambiental, aire caliente y aire usado en el proceso de secado ($^{\circ}\text{C}$); Y_0 , Y_1 , Y_2 son las humedades absolutas del aire ambiental, caliente y usado ($\text{kg agua kg aire seco}^{-1}$). Se asumió que en el proceso de calentamiento, la humedad absoluta del aire permanece constante $Y_0 = Y_1$ (Singh y Heldman, 1998). Los valores de temperatura del aire caliente (entrada) y usado (salida), se obtuvieron de catálogo (referencia figura 6).

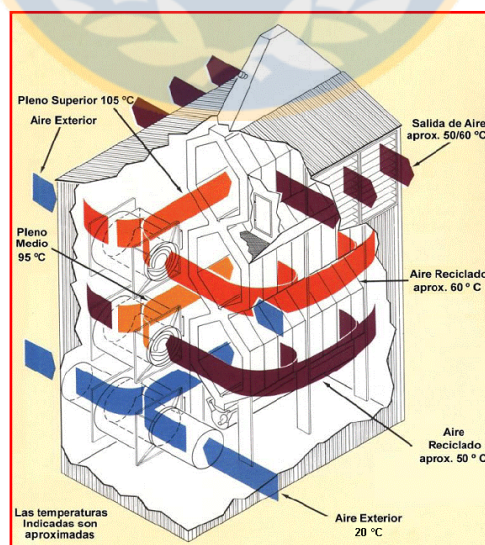


Fig. 6. Secador de granos de flujo continuo, tipo caballetes (Aerotérmica Alfa SRL, 2012).

Para el sistema de secado con enfriamiento, se tomó el promedio de la temperatura del aire de entrada de 105, 95 y 20°C ($T_{G1} = 73,3^\circ\text{C}$) y temperatura de salida de $T_{G2} = 50^\circ\text{C}$. Para el sistema sin enfriamiento (todo calor), se tomó el promedio de 105 y 95°C ($T_{G1} = 100^\circ\text{C}$) y temperatura de salida de $T_{G2} = 60^\circ\text{C}$. En ambos sistemas, el valor de la temperatura ambiental fue de $T_{G0} = 20^\circ\text{C}$ y la humedad relativa (HR) del 70%; la humedad relativa del aire usado, se asumió como un 20% (FAO, 1996). La humedad relativa del aire caliente, se obtuvo siguiendo la línea de proceso de calentamiento del aire, hasta el punto 1 de la figura 5. Con estos datos se obtuvieron los valores de humedad absoluta del aire Y_0, Y_1, Y_2 y las temperaturas de bulbo húmedo, mediante gráfico psicrométrico. Se elaboró una planilla Excel 2007 de Microsoft, para la obtención de los valores psicrométricos, de forma más precisa. El flujo másico de aire, se obtuvo de la ecuación 6 (Treybal, 2002).

$$G_s = \frac{\dot{m}_w}{Y_2 - Y_1} \quad [6]$$

Donde: G_s = flujo másico de aire ($\text{kg aire seco s}^{-1}$)

También se determinó la humedad absoluta del aire usado aplicando la ecuación 6, cuando el flujo másico de agua evaporada cambia por la variación de la capacidad de secado, pero manteniendo constantes los valores Y_1 y G_s . Se consideró una disminución de la temperatura del aire usado, en promedio de $0,55^\circ\text{C}$ por cada 1% más de humedad inicial del grano que ingresa al secador (FAO, 1996). El calor específico del producto, se estimó a partir de la composición química de la materia seca del grano de maíz, mediante la ecuación 7 (Kaletunç, 2007).

$$C_{PS} = \sum_{i=1}^n X_i C_{PSi} \quad [7]$$

Donde:

C_{PS} = calor específico del producto ($\text{kJ kg sólido seco}^{-1}\text{C}^{-1}$)

X_i = fracción másica del i-ésimo componente ($\text{kg componente kg sólido seco}^{-1}$)

C_{PSi} = calor específico del i-ésimo componente ($\text{kJ kg componente}^{-1}\text{C}^{-1}$)

La figura 7 muestra el algoritmo para determinar temperatura, humedad y flujo másico de aire, además del calor específico del producto.

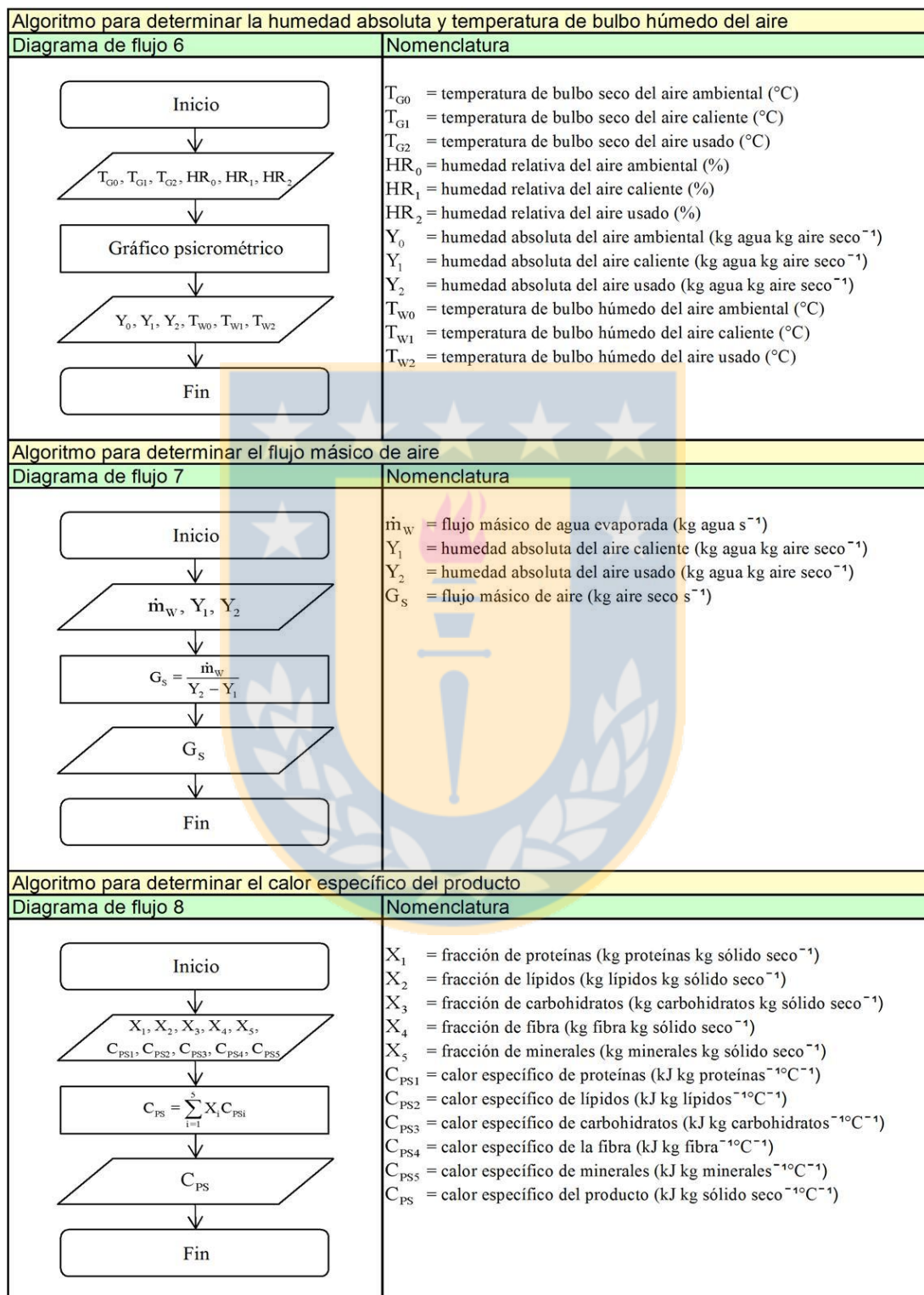


Fig. 7. Algoritmo para determinar la humedad absoluta del aire, temperatura de bulbo húmedo, flujo másico de aire y calor específico del producto.

La entalpía específica del aire y del producto, se obtuvieron de las ecuaciones 8 y 9 (Treybal, 2002).

$$H_G = (1,0047 + 1,8843Y)(T_G - T_0) + 2502,3Y \quad [8]$$

Donde:

H_G = entalpía específica del aire ($\text{kJ kg aire seco}^{-1}$)

T_G = temperatura de bulbo seco ($^{\circ}\text{C}$)

T_0 = temperatura de referencia ($^{\circ}\text{C}$)

Y = humedad absoluta del aire ($\text{kg agua kg aire seco}^{-1}$)

$$H_S = C_{PS}(T_S - T_0) + XC_{PW}(T_S - T_0) \quad [9]$$

Donde:

H_S = entalpía específica del producto ($\text{kJ kg sólido seco}^{-1}$)

T_S = temperatura del producto ($^{\circ}\text{C}$)

C_{PW} = calor específico del agua líquida ($\text{kJ kg agua}^{-1}\text{C}^{-1}$)

2.4. Pérdidas caloríficas del sistema

La figura 8 muestra el diagrama de flujo del proceso de secado (Treybal, 2002).

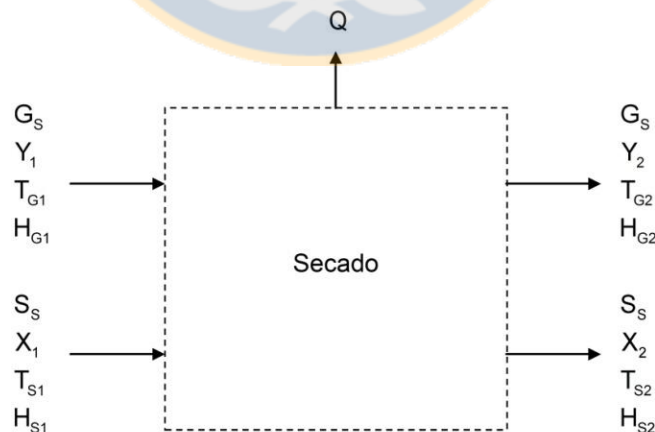


Fig. 8. Diagrama de flujo del proceso de secado, donde los subíndices 1 y 2 indican entrada y salida del sistema (Treybal, 2002).

Donde las pérdidas caloríficas Q (kW), se obtuvieron de la ecuación 10 (Treybal, 2002).

$$Q = G_s(H_{G1} - H_{G2}) - S_s(H_{S2} - H_{S1}) \quad [10]$$

La figura 9 muestra el algoritmo para determinar la entalpía específica del aire y producto, y las pérdidas caloríficas del sistema.

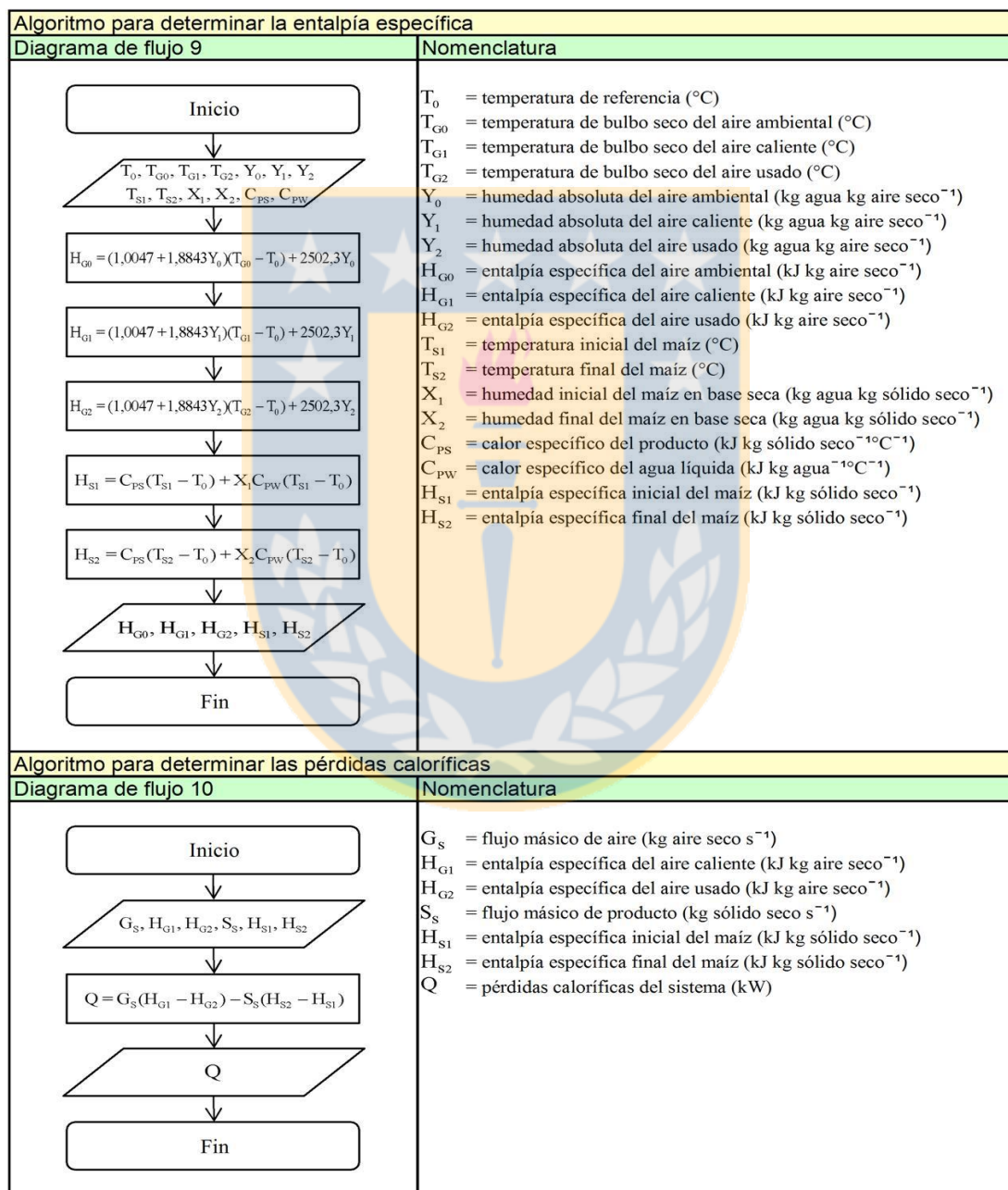


Fig. 9. Algoritmo para determinar la entalpía específica del aire, entalpía específica del producto y pérdidas caloríficas del sistema.

2.5. Consumo específico de energía eléctrica

El consumo específico de energía eléctrica que requieren los ventiladores para el flujo de aire en el secador, se obtuvo de la ecuación 11 (FAO, 1996).

$$E_v = \frac{N_v}{S_s} \quad [11]$$

Donde:

E_v = consumo específico de energía eléctrica (kWh kg sólido seco⁻¹)

N_v = potencia de ventiladores (kW)

La potencia de ventiladores, se obtuvo de la ecuación 12 (FAO, 1991b).

$$N_v = \frac{1,25G_v \Delta P}{\eta_v} \quad [12]$$

Donde:

G_v = caudal de aire (m³s⁻¹)

ΔP = diferencia de presión estática (kPa)

η_v = eficiencia del ventilador expresada en decimal

El caudal de aire en el secador, se obtuvo de la ecuación 13 (Treybal, 2002).

$$G_v = V_g G_s \quad [13]$$

Donde: V_g = volumen específico del aire (m³kg aire seco⁻¹)

El volumen específico del aire, se obtuvo de la ecuación 14 (Treybal, 2002).

$$V_g = (2,8329 \times 10^{-3} + 4,5547 \times 10^{-3} Y)(T_g + 273,15) \quad [14]$$

La figura 10 muestra el algoritmo para determinar el volumen específico del aire, caudal o flujo volumétrico de aire y potencia de los ventiladores.

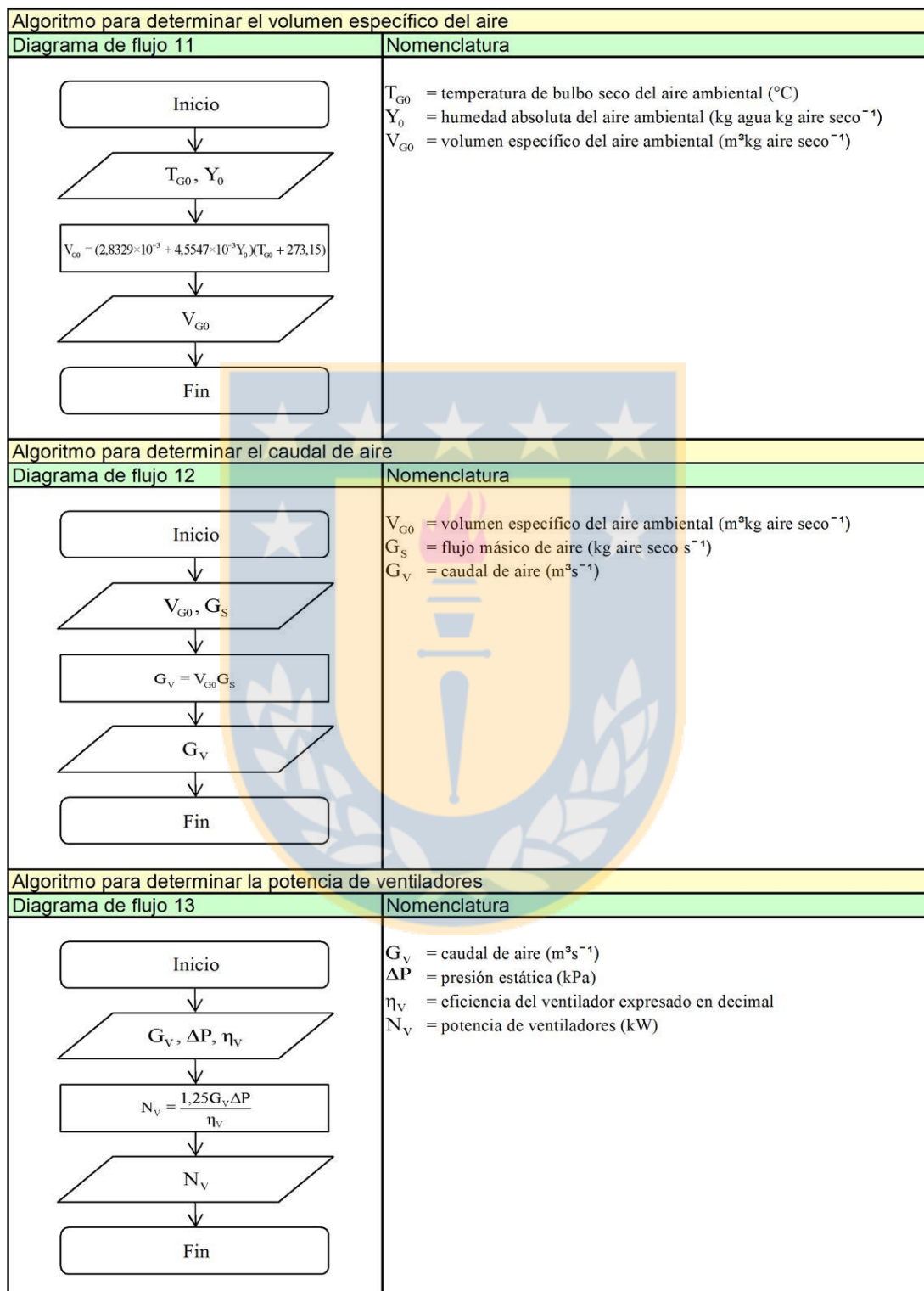


Fig. 10. Algoritmo para determinar el volumen específico, caudal de aire y potencia de ventiladores.

2.6. Consumo específico de combustible

El consumo específico de combustible a emplear en el suministro de energía calórica al aire para efectuar el proceso de secado, se obtuvo de la ecuación 15 (FAO, 1996).

$$R_c = \frac{\dot{m}_c}{S_s} \quad [15]$$

Donde:

R_c = consumo específico de combustible (kg combustible kg sólido seco⁻¹)

\dot{m}_c = flujo másico de combustible (kg combustible s⁻¹)

El flujo másico de combustible, se obtuvo de la ecuación 16 (FAO, 1991c).

$$\dot{m}_c = \frac{G_s(H_{G1} - H_{G0})}{\eta_T PC} \quad [16]$$

Donde:

η_T = eficiencia térmica expresada en decimal

PC = poder calorífico del combustible (kJ kg combustible⁻¹)

Se tomaron los valores promedio de poder calorífico: leña seca con PC = 18296 kJ kg⁻¹ y GLP (gas licuado del petróleo) con PC = 46473 kJ kg⁻¹ (Fuentes, 1989). Para la eficiencia térmica, se tomó un valor de $\eta_T = 0,5$ al igual que la eficiencia del ventilador. El proceso de calentamiento del aire, se representó en el gráfico psicrométrico (figura 5), en la recta que une los puntos 0 y 1, para estimar la energía calórica requerida en el proceso de secado. Esta energía dada por el producto " $\dot{m}_c PC$ " entrega el mismo valor, independiente del tipo de combustible empleado y su correspondiente poder calorífico (FAO, 1991b). La figura 11 muestra el algoritmo para determinar el consumo específico de energía eléctrica, flujo másico de combustible y consumo específico de combustible.

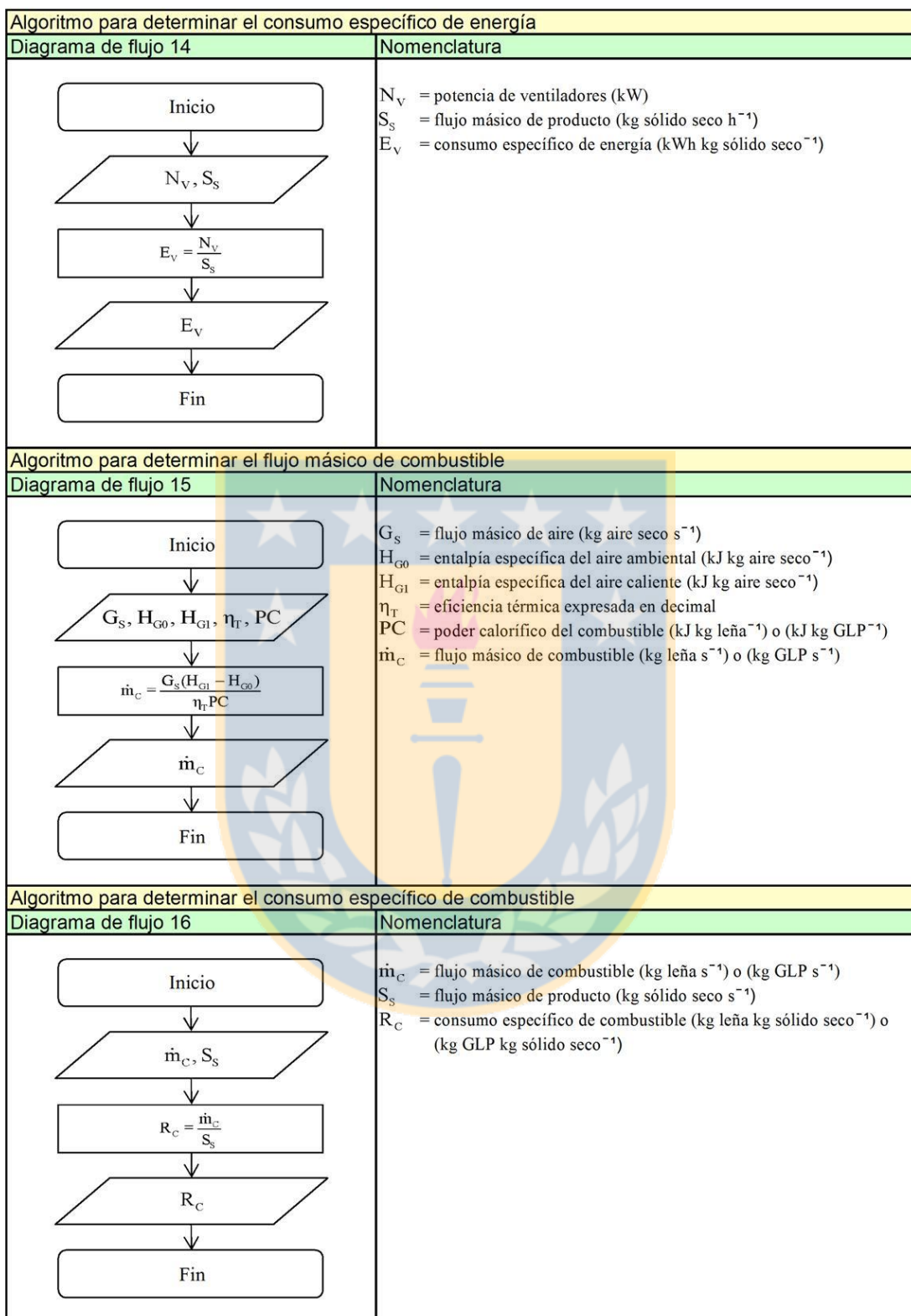


Fig. 11. Algoritmo para determinar el consumo específico de energía, flujo másico de combustible y consumo específico de combustible.

2.7. Eficiencia de secado

La eficiencia del proceso de secado, se obtuvo de la ecuación 17 (FAO, 1996).

$$\eta_s = \frac{(\dot{m}_w \lambda) 100}{\dot{m}_c PC} \quad [17]$$

Donde:

η_s = eficiencia de secado (%)

λ = calor latente de evaporación (kJ kg agua^{-1})

Para el calor latente de evaporación, se tomó un valor de $\lambda = 2502,3 \text{ kJ kg}^{-1}$ a temperatura de referencia de $T_0 = 0^\circ\text{C}$ al igual que en el cálculo de entalpía específica del aire (Treybal, 2002).

2.8. Rendimiento de secado

El rendimiento del proceso de secado, se obtuvo de la ecuación 18 (Treybal, 2002).

$$R_s = \frac{(1 + X_2) 100}{1 + X_1} \quad [18]$$

Donde: R_s = rendimiento de secado (%)

2.9. Tiempo de permanencia

El tiempo de permanencia o residencia del producto en silo de almacenamiento, se obtuvo de la ecuación 19 (Ulrich, 1992).

$$t = \frac{z \ln(X_1/X_2)}{k_d(T_G - T_w)} \quad [19]$$

Donde:

t = tiempo de permanencia (s)

z = tamaño de capa de granos (m)

k_d = constante de velocidad de secado ($\text{m s}^{-1}\text{C}^{-1}$)

T_w = temperatura de bulbo húmedo ($^\circ\text{C}$)

La constante de velocidad de secado (k_d), se encuentra entre 5×10^{-8} y $1 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (Ulrich, 1992). Se tomó un valor de $k_d = 1 \times 10^{-7} \text{ m s}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para estimar el tiempo de permanencia, con espesores o tamaños de capa de granos de 0,15 a 0,60 m, con tamaño de paso de 0,15 m. Se validó el modelo del tiempo de permanencia con los resultados del modelo de Thompson, que describe el comportamiento de un proceso de secado de granos de maíz por convección forzada (Araújo et al., 2005). La figura 12 muestra las curvas de secado de granos de maíz, obtenidas del modelo de Thompson en sistema de secado por capas, para temperatura de secado de 313 K (40°C) a tamaños o espesores de capa de 0,15 a 0,60 m y velocidad del aire de $0,08 \text{ m s}^{-1}$.

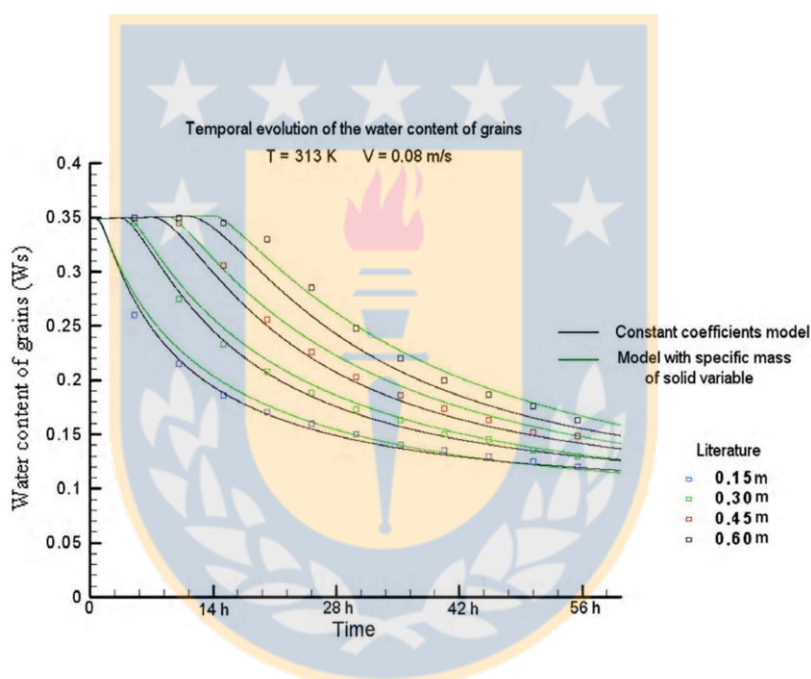


Fig. 12. Curvas de secado del maíz (*Z. mays*), a diferentes tamaños de capa (Lecorvaisier et al., 2009).

2.10. Análisis estadístico

Los resultados obtenidos de consumo específico de energía eléctrica, consumo específico de combustible, eficiencia y rendimiento del proceso de secado, fueron analizados estadísticamente mediante análisis de varianza y test de Scheffé (Fernández, 2010), para determinar la existencia de diferencias significativas entre sistemas de secado con y sin enfriamiento (valor $p \leq 0,05$).

La figura 13 muestra el algoritmo para determinar la eficiencia, rendimiento de secado y tiempo de permanencia del producto en silo de almacenamiento.

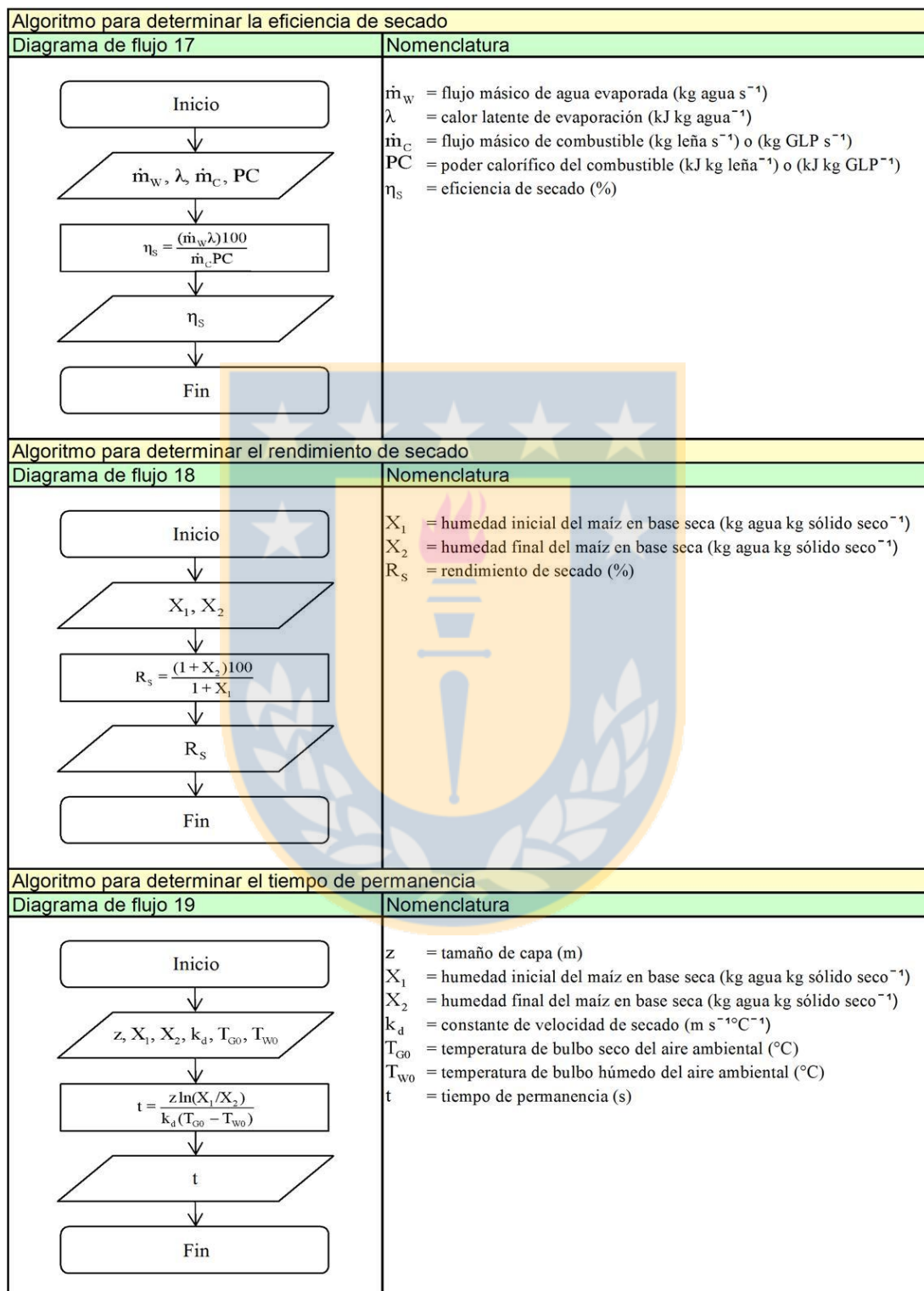


Fig. 13. Algoritmo para determinar la eficiencia de secado, rendimiento de secado y tiempo de permanencia.

3. Resultados y discusión

En la tabla 1, se pueden apreciar los parámetros más relevantes, como el consumo específico de energía eléctrica (E_V), consumo específico de combustible (R_C), eficiencia de secado (η_s) y rendimiento de secado (R_s), para sistema con y sin enfriamiento.

Tabla 1. Evaluación técnica del sistema de secado con y sin enfriamiento de granos de maíz (*Z. mays*) a escala industrial, mediante modelación matemática con 16 datos en base a humedades iniciales de 20 a 35%, con tamaño de paso del 1%, e intervalos de confianza (valor $p \leq 0,05$).

Variable	Sist. con enfriamiento	Sist. sin enfriamiento	Unidad de medida
E_V	$0,0056 \pm 0,0011^a$	$0,0034 \pm 0,0007^b$	kWh kg sólido seco ⁻¹
R_C	$0,0773 \pm 0,0151^a$	$0,0696 \pm 0,0153^a$	kg leña kg sólido seco ⁻¹
R_C	$0,0304 \pm 0,0059^a$	$0,0274 \pm 0,0060^a$	kg GLP kg sólido seco ^{-1*}
η_s	$37,279 \pm 1,3116^a$	$37,271 \pm 1,3128^a$	%
R_s	$84,795 \pm 2,9674^a$	$86,310 \pm 3,0204^a$	%

* GLP = gas licuado del petróleo.

Letras iguales en cada fila, indican que los valores no difieren estadísticamente. Test de Scheffé $p \leq 0,05$.

El consumo específico de energía eléctrica fue menor en el sistema de secado sin enfriamiento. De los datos de catálogo del secador, se tiene que la potencia de los tres ventiladores fue de 30 HP cada uno (22,4 kW) y del medidor de grano y rosca de descarga, suman 4 HP (2,98 kW). Considerando los flujos máxicos promedios de granos en base seca de $3,7450 \text{ kg sólido seco s}^{-1}$ (13482 kg h^{-1}) y $4,4001 \text{ kg sólido seco s}^{-1}$ (15840 kg h^{-1}), el consumo específico de energía eléctrica fue de $(3 \times 22,4 + 2,98) / 13482 = 0,0052 \text{ kWh kg sólido seco}^{-1}$ para sistema de secado con enfriamiento y de $(2 \times 22,4 + 2,98) / 15840 = 0,0030 \text{ kWh kg sólido seco}^{-1}$ para sistema de secado sin enfriamiento. Estos valores son cercanos a los obtenidos por modelación. Mediante análisis de varianza y test de Scheffé (valor $p \leq 0,05$), se determinó que existen diferencias significativas entre los valores de consumo específico de energía eléctrica de cada sistema de secado, ya que para la simulación

del proceso con enfriamiento, el maíz fue secado en las tres secciones o módulos del secador, donde en los módulos superiores, la temperatura del aire de secado fue de 105 y 95°C y en el módulo inferior, el enfriamiento fue de 20°C. En cambio en la simulación del proceso sin enfriamiento, el maíz fue secado solamente en los módulos superiores (todo calor).

En la misma tabla 1 se aprecia que el consumo específico de combustible para el sistema de secado sin enfriamiento, fue en promedio menor al sistema con enfriamiento. Sin embargo, estas diferencias no fueron significativas (valor $p \leq 0,05$). En el catálogo del equipo secador, no se tiene información sobre el consumo específico de combustible. Según datos de la FAO (1996), para una capacidad de secado de 30 toneladas por hora, para una reducción de humedad de 21 a 14% y utilizando un combustible con un poder calorífico de $10100 \text{ kcal kg}^{-1}$, el consumo de combustible es de 316 kg h^{-1} , lo que entrega un consumo específico de 0,97 kg de combustible por cada 100 kg de granos secos. Si la masa de granos se expresa en base seca: $100 \times (1 - 14/100) = 86 \text{ kg}$ de sólido seco, entonces el consumo específico sería de $0,97/86 = 0,0113 \text{ kg combustible kg sólido seco}^{-1}$, lo cual es el valor más cercano al consumo específico de GLP, obtenido de modelación.

Por otra parte, la tabla 1 muestra también la comparación de la eficiencia de secado entre ambos sistemas. En el sistema sin enfriamiento, el valor promedio fue menor en comparación al sistema con enfriamiento. Sin embargo, estas diferencias no fueron significativas (valor $p \leq 0,05$). Esto se debe a la cantidad de agua a evaporar, ya que en el sistema sin enfriamiento, la reducción mínima de humedad del grano de maíz fue de 20 a 16% en comparación a la reducción de 20 a 14% en el sistema de secado con enfriamiento (Aerotérmica Alfa SRL, 2012). La eficiencia está relacionada con la reducción de humedad, de las condiciones de secado y del diseño del equipo secador (FAO, 1996). Según datos de la misma fuente bibliográfica, para una capacidad de secado de 50 toneladas por hora, para una reducción de humedad de 18 a 13,5% y utilizando un combustible con un poder calorífico de $10800 \text{ kcal kg}^{-1}$, la eficiencia de secado es del 42% (FAO, 1996).

Finalmente, la misma tabla 1 compara el rendimiento de secado de ambos sistemas, y se aprecia que valor promedio fue mayor en el sistema sin enfriamiento.

No obstante, y similar a los resultados anteriores, no se encontraron diferencias significativas entre ambos sistemas (valor $p \leq 0,05$).

La figura 14 muestra los resultados obtenidos de la ecuación 19 para la validación del modelo, a temperatura de 40°C y tamaños de capa de granos de 0,15 a 0,60 m.

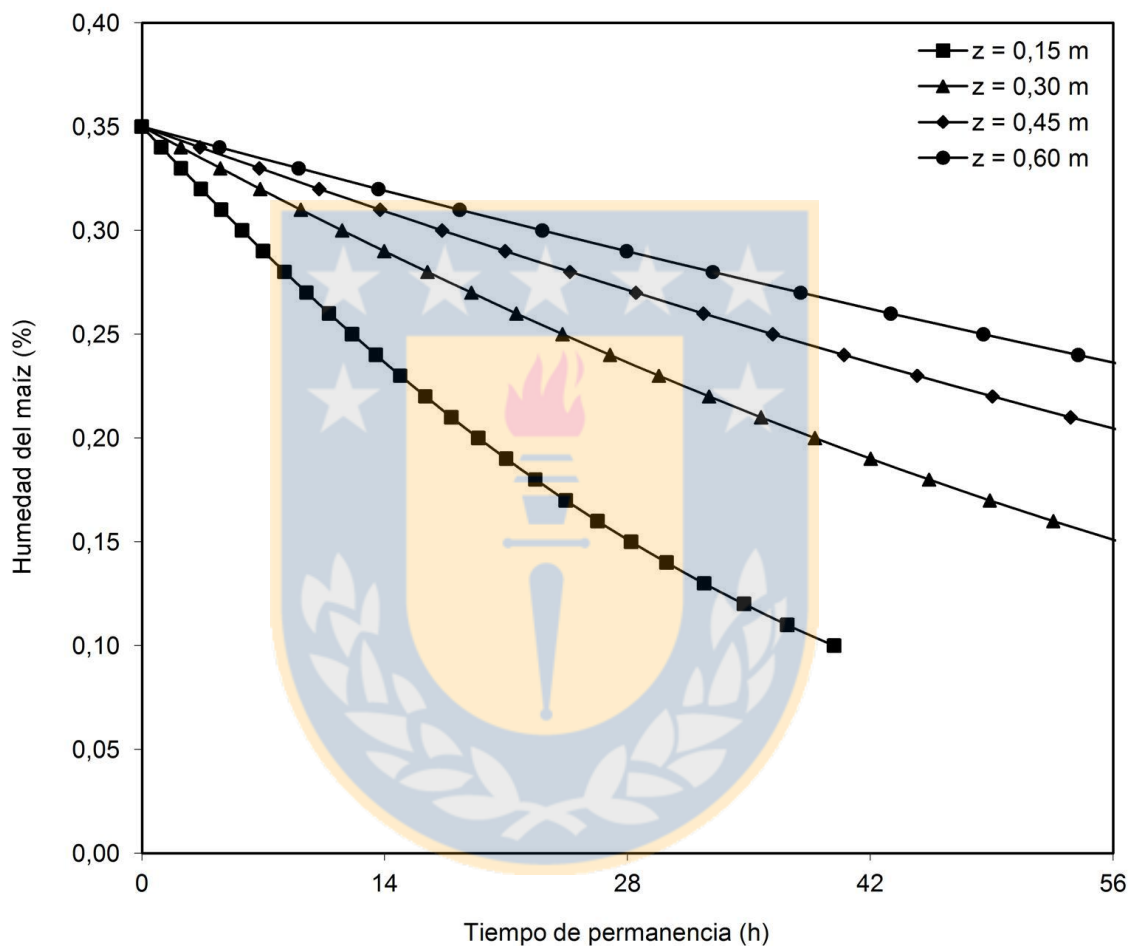


Fig. 14. Curvas de secado del maíz, a temperatura de 40°C y a diferentes tamaños de capa de granos (z) en base húmeda.

En el sistema de secado con enfriamiento, el maíz sale del secador a una humedad del 14,5% e ingresa al silo de almacenamiento, donde se concluye el secado a bajas temperaturas (40°C). En la curva de secado para tamaño de capa de 0,15 m, el tiempo de permanencia en silo de almacenamiento, fue de 27 horas (diferencia: 56 – 29 horas). Al comparar este tiempo teórico con el bibliográfico (figura 12), el valor fue

de 25,2 horas (diferencia: 56 – 30,8 horas), por lo que el modelo teórico presentó una aproximación al modelo de Thompson, con un error relativo: $|25,2 - 27| \times 100 / |25,2| = 7,14\%$. En el sistema de secado sin enfriamiento, el maíz sale del secador a una humedad del 16% e ingresa al silo de almacenamiento. En la curva de secado para tamaño de capa de 0,15 m, el tiempo de permanencia fue de 30 horas (diferencia: 56 – 26 horas). Al comparar este tiempo teórico con el bibliográfico (figura 12), el valor fue de 30,8 horas (diferencia: 56 – 25,2 horas), por lo que el modelo teórico presentó una aproximación al modelo de Thompson, con un error relativo: $|30,8 - 30| \times 100 / |30,8| = 2,60\%$. Por lo tanto el tiempo de permanencia del sistema de secado sin enfriamiento, presentó una mejor aproximación al modelo de Thompson. A mayores tamaños de capa, el tiempo de permanencia es mayor en ambos casos.



4. Conclusiones y recomendaciones

De los resultados obtenidos de la evaluación técnica de sistemas de secado con y sin enfriamiento mediante modelación matemática, se tiene que el sistema secado de granos de maíz sin enfriamiento es la mejor alternativa, ya que presenta un menor consumo específico de energía eléctrica, aun cuando no existen diferencias significativas (valor $p \leq 0,05$) entre los valores de consumo específico de combustible, eficiencia y rendimiento del proceso de secado de cada sistema. Asimismo, cabe destacar que esta conclusión considera que las condiciones en el silo de almacenamiento, son las adecuadas para evitar la rehumidificación de los granos.

El modelo de tiempo de permanencia aplicado en el presente estudio, se validó con el modelo de Thompson para curvas de secado de granos, obteniendo resultados comparables con el estándar, siendo mejor la aproximación, el modelo de sistema de secado sin enfriamiento.

Por último, se recomienda estudiar el efecto del uso de colectores solares en el sistema de ventilación del silo de almacenamiento, lo cual permitiría precalentar el flujo de aire, para así disminuir la humedad relativa en la aireación del producto final.

Bibliografía

1. Aerotérmica Alfa SRL. 2012. Catálogo de secador de granos de maíz, modelo CH. Tepalqué, Buenos Aires, Argentina.
2. Akintunde, M.A. 2008. Modeling of thermal properties of food components. *Pacific Journal of Science and Technology*. 9(2):629-639.
3. Araújo, J., R. Farias, A. Sant'Ana, J. de Gouveia, M. da Silva y A. Gomes. 2005. Simulação de secagem de milho (*Zea mays* L.) utilizando o modelo matemático de Thompson. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*. 5(2):2ºsem. 2005.
4. Bartosik, R., J. Rodríguez. 2006. El flujo de aire en la aireación de granos. Boletín INTA N°14. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Estación Experimental Agropecuaria Balcarce, Buenos Aires, Argentina.
5. Bülent, M., I. Yalçın y C. Özarlan. 2006. Physical properties of sweet corn seed (*Zea mays saccharata* Sturt.). *Journal of Food Engineering*. 74:523-528.
6. Callejo, M. 2002. *Industria de cereales y derivados*. 1ª ed. Editorial A.M.V. Mundi-Prensa. España.
7. Doymaz, I., M. Pala. 2003. The thin-layer drying characteristics of corn. *Journal of Food Engineering*. 60:125-130.
8. FAO. 1991a. Principios de secado de granos, psicrometría, higroscopía. Food and Agriculture Organization. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/x5057s/x5057s00.htm> (Consulta 12 de octubre de 2014).
9. FAO. 1991b. Secado de granos: natural, solar y a bajas temperaturas. Food and Agriculture Organization. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/x5058s/x5058s00.htm> (Consulta 12 de octubre de 2014).
10. FAO. 1991c. Secado de granos a altas temperaturas. Food and Agriculture Organization. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/x5059s/x5059s00.htm> (Consulta 12 de octubre de 2014).
11. FAO. 1996. Secado de granos y secadoras. Food and Agriculture Organization. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/x5028s/x5028s00.htm> (Consulta 12 de octubre de 2014).

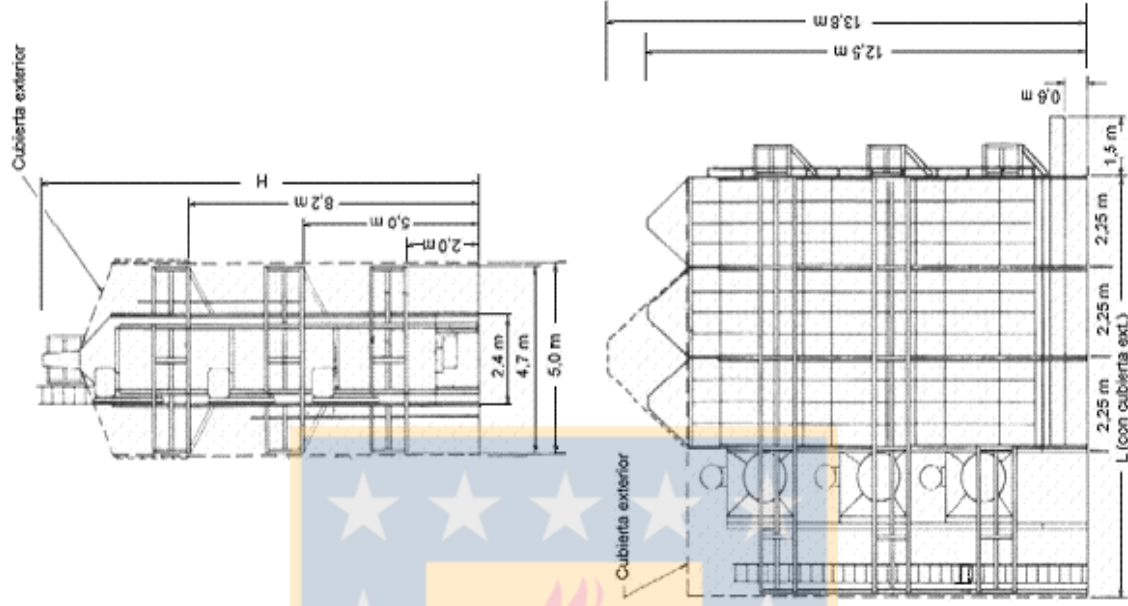
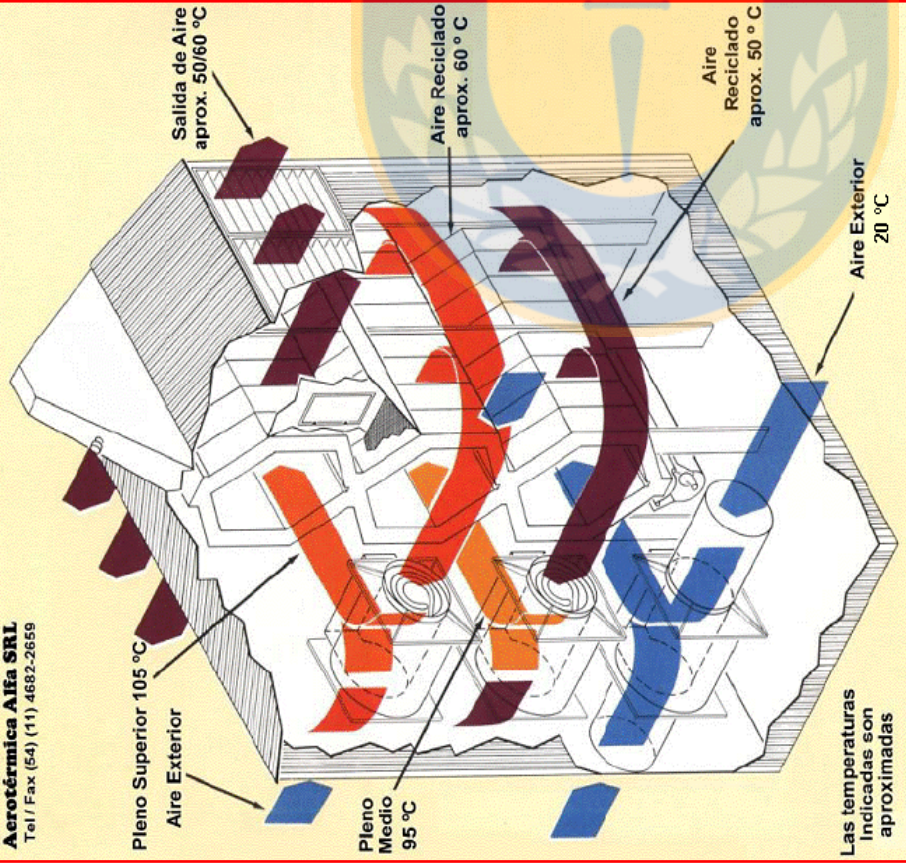
12. Fernández, R. 2010. Experimentación en agricultura. Consejería de agricultura y pesca 631.001.4. España.
13. Fuentes, J. 1989. Secado y almacenaje de granos. Boletín de extensión N° 40. Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales. Departamento de Ingeniería Agrícola, Chillán, Chile.
14. INTA. 2014. Estimación del consumo energético para secar maíz con sistemas de alta temperatura en Argentina. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Disponible en <http://inta.gov.ar/documentos/estimacion-del-consumo-energetico-para-secar-maiz-con-sistemas-de-alta-temperatua-en-argentina/> (Consulta 12 de octubre de 2014).
15. Kaletunç, G. 2007. Prediction of specific heat of cereal flours: A quantitative empirical correlations. *Journal of Food Engineering*. 82:589-594.
16. Kingsly, A., K. Ileleji. 2009. Sorption isotherm of corn distillers dried grains with solubles (DDGS) and its prediction using chemical composition. *Food Chemistry*. 116:939-946.
17. Lecorvaisier, E., S. Darche, Z. da Silva y C. da Silva. 2009. Theoretical model of a drying system including turbulence aspects. *Journal of Food Engineering*. 96:365-373.
18. Osueke, C. 2013. Design modelling of a fluidized bed for grain drying. *International Journal of Engineering Research and Development*. 7(9):10-15.
19. Singh, R., D. Heldman. 1998. Introducción a la ingeniería de los alimentos. 1ª ed. Editorial Acribia, S. A. España.
20. Treybal, R. 2002. Operaciones de transferencia de masa. 2ª ed. Editorial McGraw-Hill Interamericana, S. A. México.
21. Ulrich, G. 1992. Diseño y economía de los procesos de ingeniería química. 1ª ed. Editorial McGraw-Hill Interamericana, S. A. México.



Anexo y apéndice

Secador de granos de maíz a escala industrial

Aerotérmica Alfa SRL
Tel / Fax (54) (11) 4682-2659



Modelo CH

Régimen Flujo continuo

Capacidad nominal 20,0 – 14,5% → 320 – 342 qqm/h

20,0 – 16,0% → 440 – 462 qqm/h

HP de secado 2x30 HP

HP de enfriamiento 1x30 HP

HP medidor de grano 2 HP

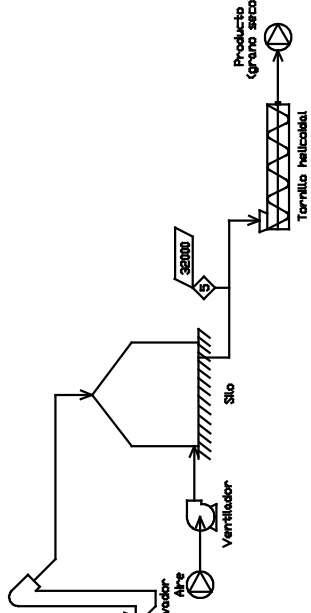
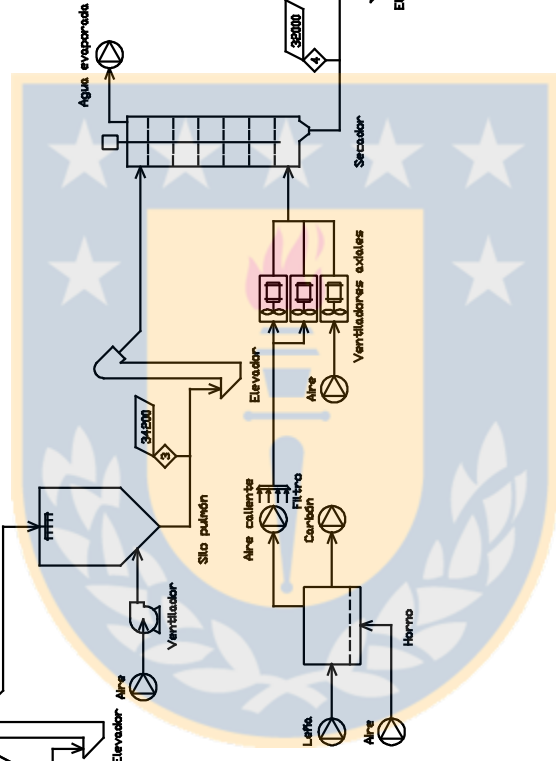
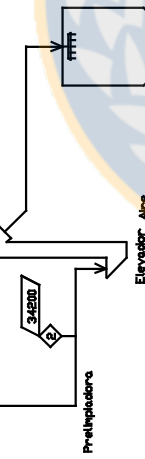
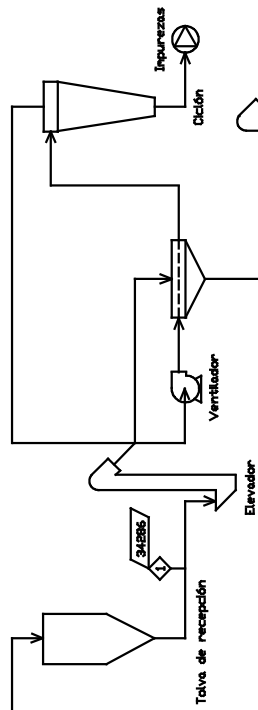
HP rosca de descarga 2 HP

Dimensión L 8,1 m

Dimensión H 13,6 m

qqm (quintal-métrico) = 100 kg

Máquina pinta
(grano húmedo)



BALANCE DE MATERIA, kg/h

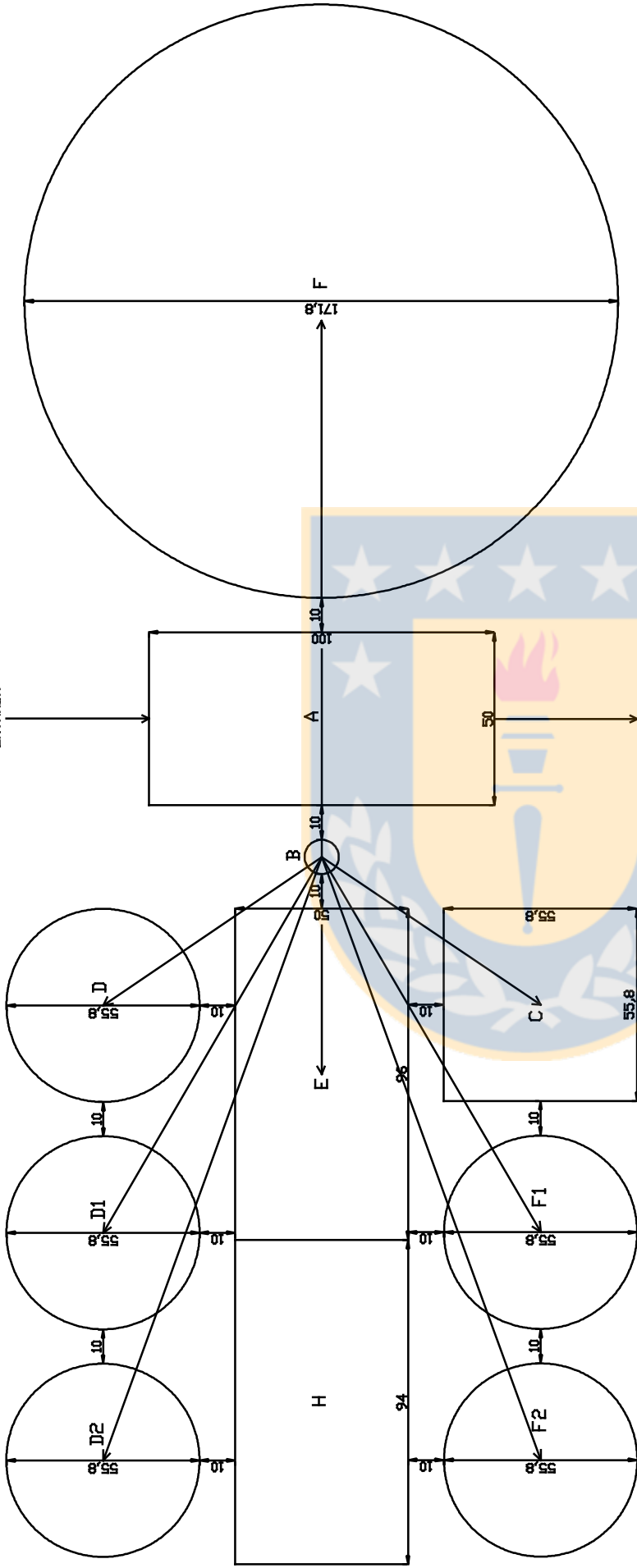
CLAVE
Punto de balance de materia
Flujo másico (kg/h)

CORRIENTES PRINCIPALES DEL PROCESO DE SECADO CONVENCIONAL

Componente	grano 20,0%	kh grano 20,0%	kh grano 20,0%	kh grano 14,5%	kh grano 14,5%
Agua	6857	6840	6840	4640	4640
Sólido seco	27429	27360	27360	27360	27360
Total	34286	34200	34200	32000	32000

DIAGRAMA DE PROCESO DE SECADO DE MAIZ
 Por: Alejandro Aranda Becerra
 Diseño de Plantas Agroindustriales, 2014

ENTRADA



SALIDA

491,6

RESUMEN

ETAPA	
A	Recepción
B	Elevador
C	Preempieza
D	Silo puzón
D1	Silo puzón optativo 1
D2	Silo puzón optativo 2
E	Secador
F	Silo de almacenamiento final
F1	Silo de almacenamiento optativo 1
F2	Silo de almacenamiento optativo 2
H	Horno

PROCESO DE SECADO CONVENCIONAL DE MAIZ

Por: Alejandro Arnedo Becerra

DISEÑO DE PLANTAS AGROINDUSTRIALES, 2014

Unidad de medida: Decímetro

Materia prima
Grano húmedo

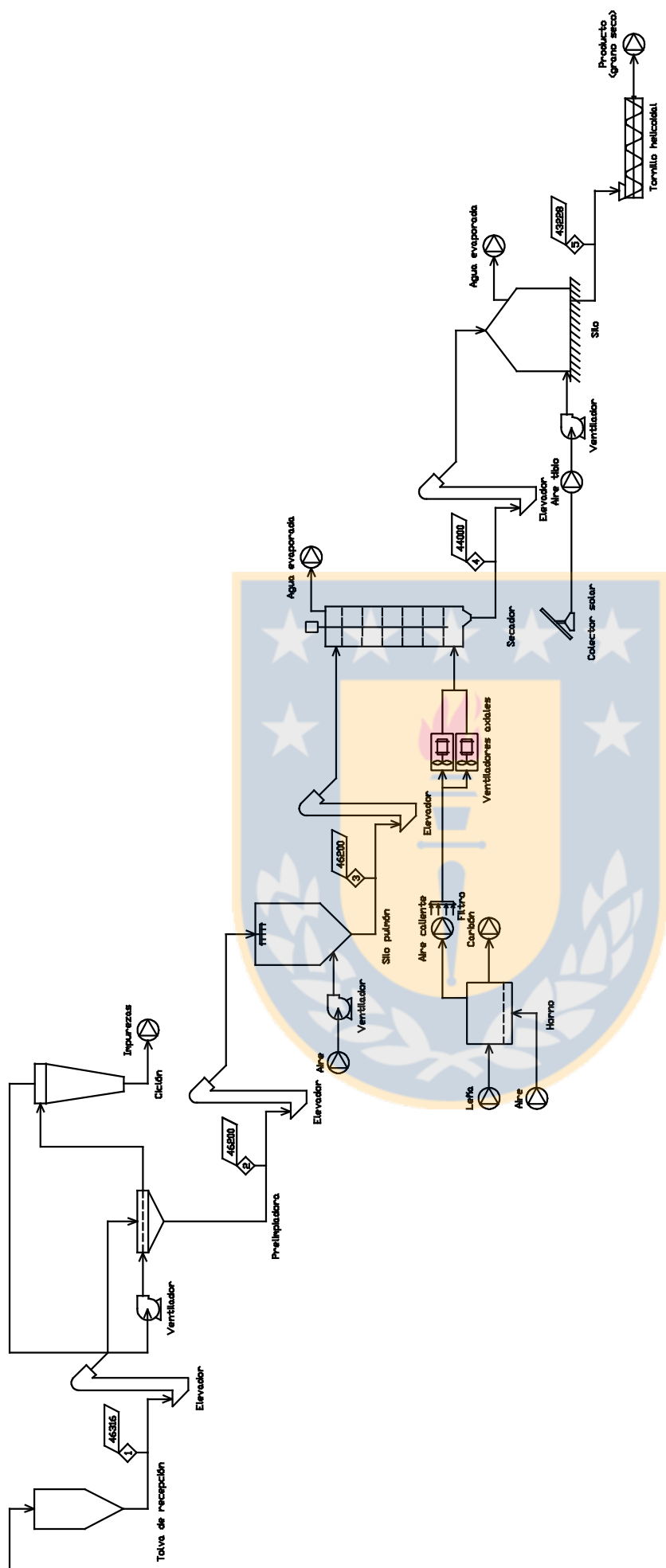


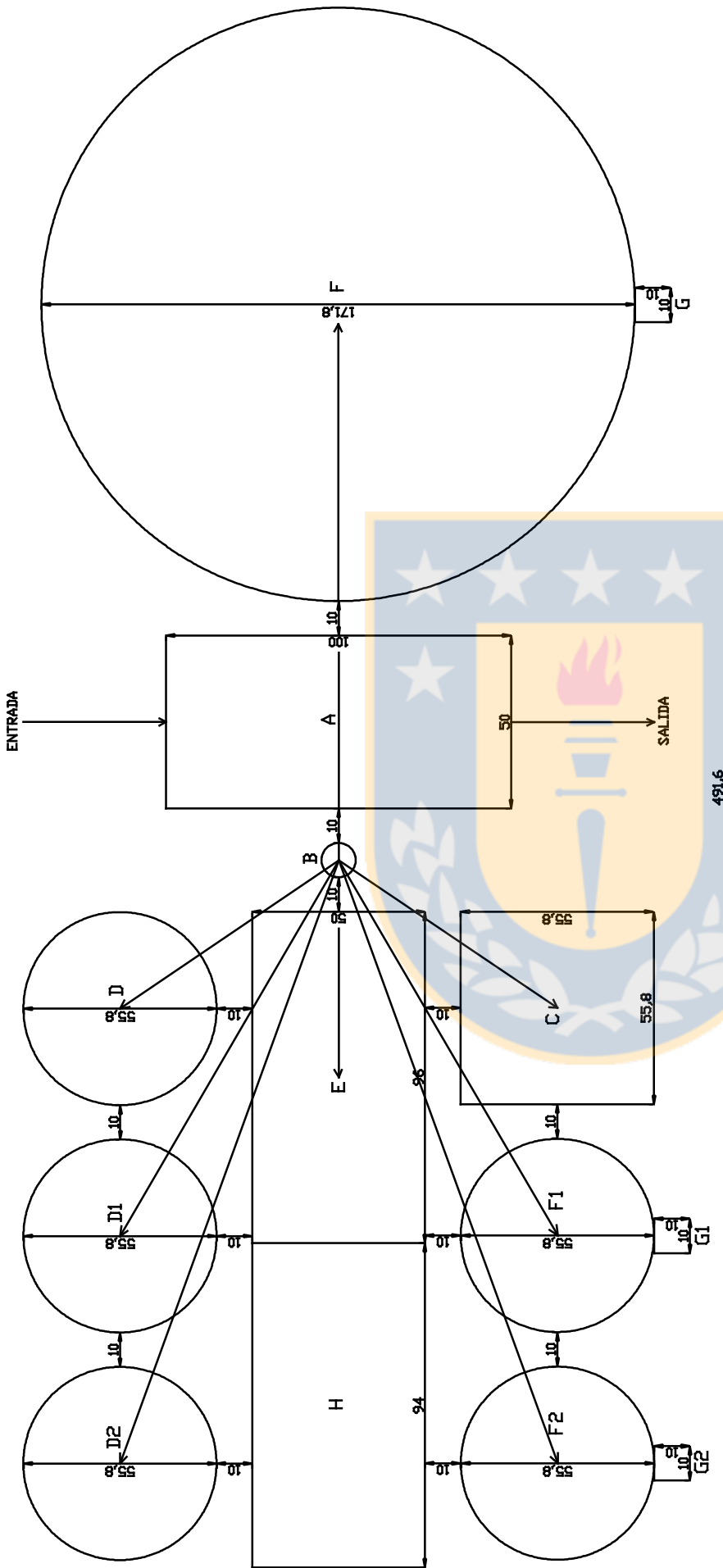
DIAGRAMA DE PROCESO DE SECADO DE MAIZ
Por: Alejandro Aranceda Becerra
Diseño de Plantas Agroindustriales, 2014

BALANCE DE MATERIA, kg/h

Componente	CORRIENTES PRINCIPALES DEL PROCESO DE SECA-AIREACION				
	grano 20.0%	h grano 20.0%	h grano 16.0%	h grano 14.5%	h
Agua	9263	9240	9240	7040	6268
Sólido seco	37053	36960	36960	36960	36960
Total	46315	46200	46200	44000	43228

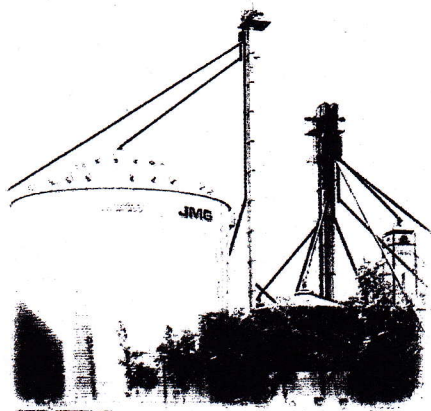
CLAVE

Punto de balance de materia
 Flujo másico (kg/h)



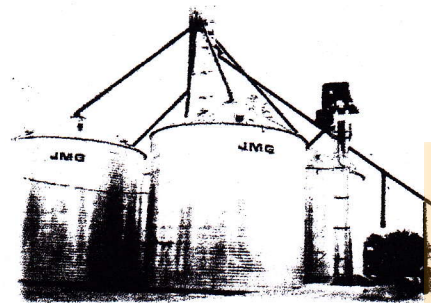
PROCESO DE SECA-AIREACION DE MAIZ
 Por: Alejandro Aruando Becerra
 DISEÑO DE PLANTAS AGROINDUSTRIALES, 2014
 UNIDAD DE MEDIDA: DECIMETRO

RESUMEN	
ETAPA	
A	Recepcion
B	Elevador
C	Prehulepleza
D	Silo pulmon
D1	Silo pulmon optativo 1
D2	Silo pulmon optativo 2
E	Secador
F	Silo de almacenaje final
F1	Silo de almacenaje optativo 1
F2	Silo de almacenaje optativo 2
G	Colector solar
G1	Colector solar optativo 1
G2	Colector solar optativo 2
H	Horno

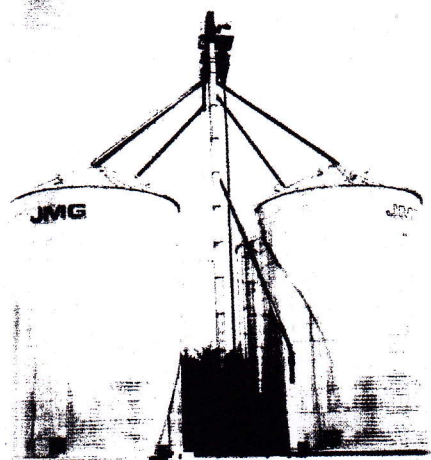


SILOS ELEVADOS (Fondo Cónico Suspendido) (Inclinación cono 35°)								
MODELO	DIAMETRO NOMINAL (m)	CANT. FILAS (Unidad)	DIMENSIONES			CAPACIDAD		
			A (mm)	B (mm)	C (mm)	m3	TONELADAS	
							600 kg/m3 (Arroz)	800 kg/m3 (Maiz)
S 372-40-3-35	3,72	3	5856	2856	2116	40	24	32
S 372-50-4-35	3,72	4	6808	3808	2116	50	30	40
S 372-60-5-35	3,72	5	7760	4760	2116	60	36	48
S 496-112-5-35	4,96	5	8118	4760	2116	112	67	90
S 496-131-6-35	4,96	6	9070	5712	2116	131	79	105
S 496-149-7-35	4,96	7	10022	6664	2116	149	89	119
S 558-145-5-35	5,58	5	9198	4760	3017	145	87	116
S 558-169-6-35	5,58	6	10150	5712	3017	169	101	135
S 558-192-7-35	5,58	7	11102	6664	3017	192	115	154
S 620-184-5-35	6,20	5	8982	4760	2622	184	110	147
S 620-212-6-35	6,20	6	9934	5712	2622	212	127	170
S 620-241-7-35	6,20	7	10886	6664	2622	241	145	193
S 744-276-5-35	7,44	5	10720	4760	4002	276	166	221
S 744-317-6-35	7,44	6	11672	5712	4002	317	190	254
S 744-359-7-35	7,44	7	12624	6664	4002	359	215	287

Disponibles con inclinación fondo cónico 44°



SILOS FONDO CONICO (Base Hormigón Armado) (Inclinación cono 35°)								
MODELO	DIAMETRO NOMINAL (m)	CANT. FILAS (Unidad)	DIMENSIONES			CAPACIDAD		
			A (mm)	B (mm)	m3	TONELADAS		
						600 kg/m3 (Arroz)	800 kg/m3 (Maiz)	
H 744-360-7-35	7,44	7	8872	6664	360	216	288	
H 744-441-9-35	7,44	9	10776	8568	441	265	353	
H 744-524-11-35	7,44	11	12680	10472	524	314	419	
H 868-504-7-35	8,68	7	9230	6664	504	302	403	
H 868-617-9-35	8,68	9	11134	8568	617	370	494	
H 868-729-11-35	8,68	11	13038	10472	729	437	583	
H 992-900-10-35	9,92	10	12384	9520	900	540	720	
H 992-1046-12-35	9,92	12	14288	11424	1046	628	837	
H 992-1267-15-35	9,92	15	17144	14280	1267	760	1014	
H 1118-1263-11-35	11,18	11	13699	10472	1263	758	1010	
H 1118-1450-13-35	11,18	13	15603	12376	1450	870	1160	
H 1118-1637-15-35	11,18	15	17507	14280	1637	982	1310	
H 1304-1772-11-35	13,048	11	14239	10472	1772	1063	1418	
H 1304-2026-13-35	13,048	13	16143	12376	2026	1216	1621	
H 1304-2281-15-35	13,048	15	18047	14280	2281	1369	1825	
H 1472-2481-12-35	14,72	12	15673	11424	2481	1489	1985	
H 1472-2805-14-35	14,72	14	17577	13328	2805	1683	2244	
H 1472-3130-16-35	14,72	16	19481	15232	3130	1878	2504	
H 1584-2730-11-35	15,84	11	15045	10472	2730	1638	2184	
H 1584-3105-13-35	15,84	13	16949	12376	3105	1863	2484	
H 1584-3481-15-35	15,84	15	18853	14280	3481	2089	2785	
H 1718-3498-12-35	17,18	12	16383	11424	3498	2099	2798	
H 1718-3939-14-35	17,18	14	18287	13328	3939	2363	3151	
H 1718-4381-16-35	17,18	16	20191	15232	4381	2629	3505	



SILOS FONDO PLANO (Base Hormigón Armado)								
MODELO	DIAMETRO NOMINAL (m)	CANT. FILAS (Unidad)	DIMENSIONES			CAPACIDAD		
			A (mm)	B (mm)	m3	TONELADAS		
						600 kg/m3 (Arroz)	800 kg/m3 (Maiz)	
H 992-810-10-P	9,92	10	12884	9520	810	486	648	
H 992-957-12-P	9,92	12	14788	11424	957	574	766	
H 992-1178-15-P	9,92	15	17644	14280	1178	707	942	
H 1118-1041-10-P	11,18	10	13247	9520	1041	625	833	
H 1118-1228-12-P	11,18	12	15151	11424	1228	737	982	
H 1118-1509-15-P	11,18	15	18007	14280	1509	905	1207	
H 1472-2188-12-P	14,72	12	16173	11424	2188	1313	1750	
H 1472-2512-14-P	14,72	14	18077	13328	2512	1507	2010	
H 1472-2837-16-P	14,72	16	19981	15232	2837	1702	2270	
H 1718-3033-12-P	17,18	12	16883	11424	3033	1820	2426	
H 1718-3474-14-P	17,18	14	18787	13328	3474	2084	2779	
H 1718-3916-16-P	17,18	16	20691	15232	3916	2350	3133	
H 1851-4067-14-P	18,51	14	19171	13328	4067	2440	3254	
H 1851-4323-15-P	18,51	15	20123	14280	4323	2594	3458	
H 1851-4580-16-P	18,51	16	21075	15232	4580	2748	3664	
H 2221-5257-12-P	22,21	12	18335	11424	5257	3154	4206	
H 2221-5995-14-P	22,21	14	20239	13328	5995	3597	4796	
H 2221-6733-16-P	22,21	16	22143	15232	6733	4040	5386	



Obs.: Los datos contenidos en la tabla son informativos, las fotos, dibujos y plantas, son meramente ilustrativos; **JMG SALCA** se reserva el derecho de efectuar alteraciones sin previo aviso.

CONSULTAR POR OTRAS MEDIDAS Y CAPACIDADES

área a la derecha de t		0,0005	0,0025	0,005	0,0075	0,01	0,015	0,02	0,025	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,45	g.d.i
1	636,619	127,321	63,657	42,433	31,821	21,205	15,895	12,706	6,314	3,078	1,963	1,376	0,727	0,325	0,158	1	
2	31,599	14,089	9,925	8,073	6,965	5,643	4,849	4,303	2,920	1,886	1,386	1,061	0,617	0,289	0,142	2	
3	12,924	7,453	5,841	5,047	4,541	3,896	3,482	3,182	2,353	1,638	1,250	0,978	0,584	0,277	0,137	3	
4	8,610	5,598	4,604	4,088	3,747	3,298	2,999	2,776	2,132	1,533	1,190	0,941	0,569	0,271	0,134	4	
5	6,869	4,773	4,032	3,634	3,365	3,003	2,757	2,571	2,015	1,476	1,156	0,920	0,559	0,267	0,132	5	
6	5,959	4,317	3,707	3,372	3,143	2,829	2,612	2,447	1,943	1,440	1,134	0,906	0,553	0,265	0,131	6	
7	5,408	4,029	3,499	3,203	2,998	2,715	2,517	2,365	1,895	1,415	1,119	0,896	0,549	0,263	0,130	7	
8	5,041	3,833	3,355	3,085	2,896	2,634	2,449	2,306	1,860	1,397	1,108	0,889	0,546	0,262	0,130	8	
9	4,781	3,690	3,250	2,998	2,821	2,574	2,398	2,262	1,833	1,383	1,100	0,883	0,543	0,261	0,129	9	
10	4,587	3,581	3,169	2,932	2,764	2,527	2,359	2,228	1,812	1,372	1,093	0,879	0,542	0,260	0,129	10	
11	4,437	3,497	3,106	2,879	2,718	2,491	2,328	2,201	1,796	1,363	1,088	0,876	0,540	0,260	0,129	11	
12	4,318	3,428	3,055	2,836	2,681	2,461	2,303	2,179	1,782	1,356	1,083	0,873	0,539	0,259	0,128	12	
13	4,221	3,372	3,012	2,801	2,650	2,436	2,282	2,160	1,771	1,350	1,079	0,870	0,538	0,259	0,128	13	
14	4,140	3,326	2,977	2,771	2,624	2,415	2,264	2,145	1,761	1,345	1,076	0,868	0,537	0,258	0,128	14	
15	4,073	3,286	2,947	2,746	2,602	2,397	2,249	2,131	1,753	1,341	1,074	0,866	0,536	0,258	0,128	15	
16	4,015	3,252	2,921	2,724	2,583	2,382	2,235	2,120	1,746	1,337	1,071	0,865	0,535	0,258	0,128	16	
17	3,965	3,222	2,898	2,706	2,567	2,368	2,224	2,110	1,740	1,333	1,069	0,863	0,534	0,257	0,128	17	
18	3,922	3,197	2,878	2,689	2,552	2,356	2,214	2,101	1,734	1,330	1,067	0,862	0,534	0,257	0,127	18	
19	3,883	3,174	2,861	2,674	2,539	2,346	2,205	2,093	1,729	1,328	1,066	0,861	0,533	0,257	0,127	19	
20	3,850	3,153	2,845	2,661	2,528	2,336	2,197	2,086	1,725	1,325	1,064	0,860	0,533	0,257	0,127	20	
21	3,819	3,135	2,831	2,649	2,518	2,328	2,189	2,080	1,721	1,323	1,063	0,859	0,532	0,257	0,127	21	
22	3,792	3,119	2,819	2,639	2,508	2,320	2,183	2,074	1,717	1,321	1,061	0,858	0,532	0,256	0,127	22	
23	3,768	3,104	2,807	2,629	2,500	2,313	2,177	2,069	1,714	1,319	1,060	0,858	0,532	0,256	0,127	23	
24	3,745	3,091	2,797	2,620	2,492	2,307	2,172	2,064	1,711	1,318	1,059	0,857	0,531	0,256	0,127	24	
25	3,725	3,078	2,787	2,612	2,485	2,301	2,167	2,060	1,708	1,316	1,058	0,856	0,531	0,256	0,127	25	
26	3,707	3,067	2,779	2,605	2,479	2,296	2,162	2,056	1,706	1,315	1,058	0,856	0,531	0,256	0,127	26	
27	3,690	3,057	2,771	2,598	2,473	2,291	2,158	2,052	1,703	1,314	1,057	0,855	0,531	0,256	0,127	27	
28	3,674	3,047	2,763	2,592	2,467	2,286	2,154	2,048	1,701	1,313	1,056	0,855	0,530	0,256	0,127	28	
29	3,659	3,038	2,756	2,586	2,462	2,282	2,150	2,045	1,699	1,311	1,055	0,854	0,530	0,256	0,127	29	
30	3,646	3,030	2,750	2,581	2,457	2,278	2,147	2,042	1,697	1,310	1,055	0,854	0,530	0,256	0,127	30	
31	3,633	3,022	2,744	2,576	2,453	2,275	2,144	2,040	1,696	1,309	1,054	0,853	0,530	0,256	0,127	31	
32	3,622	3,015	2,738	2,571	2,449	2,271	2,141	2,037	1,694	1,309	1,054	0,853	0,530	0,255	0,127	32	
33	3,611	3,008	2,733	2,566	2,445	2,268	2,138	2,035	1,692	1,308	1,053	0,853	0,530	0,255	0,127	33	
34	3,601	3,002	2,728	2,562	2,441	2,265	2,136	2,032	1,691	1,307	1,052	0,852	0,529	0,255	0,127	34	
35	3,591	2,996	2,724	2,558	2,438	2,262	2,133	2,030	1,690	1,306	1,052	0,852	0,529	0,255	0,127	35	
40	3,551	2,971	2,704	2,542	2,423	2,250	2,123	2,021	1,684	1,303	1,050	0,851	0,529	0,255	0,126	40	
60	3,460	2,915	2,660	2,504	2,390	2,223	2,099	2,000	1,671	1,296	1,045	0,848	0,527	0,254	0,126	60	
80	3,416	2,887	2,639	2,486	2,374	2,209	2,088	1,990	1,664	1,292	1,043	0,846	0,526	0,254	0,126	80	
90	3,402	2,878	2,632	2,480	2,368	2,205	2,084	1,987	1,662	1,291	1,042	0,846	0,526	0,254	0,126	90	
100	3,390	2,871	2,626	2,475	2,364	2,201	2,081	1,984	1,660	1,290	1,042	0,845	0,526	0,254	0,126	100	
120	3,373	2,860	2,617	2,468	2,358	2,196	2,076	1,980	1,658	1,289	1,041	0,845	0,526	0,254	0,126	120	
inf.	3,291	2,807	2,576	2,432	2,326	2,170	2,054	1,960	1,645	1,282	1,036	0,842	0,524	0,253	0,126	inf.	

Grados de libertad del Numerador

g.d.i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	g.d.i
1	161,4	199,5	215,7	224,6	230,2	234,0	236,8	238,9	240,5	241,9	243,0	243,9	244,7	245,4	245,9	1
2	18,513	19,000	19,164	19,247	19,296	19,330	19,353	19,371	19,385	19,396	19,405	19,413	19,419	19,424	19,429	2
3	10,128	9,552	9,277	9,117	9,013	8,941	8,887	8,845	8,812	8,786	8,763	8,745	8,729	8,715	8,703	3
4	7,709	6,944	6,591	6,388	6,256	6,163	6,094	6,041	5,999	5,964	5,936	5,912	5,891	5,873	5,858	4
5	6,608	5,786	5,409	5,192	5,050	4,950	4,876	4,818	4,772	4,735	4,704	4,678	4,655	4,636	4,619	5
6	5,987	5,143	4,757	4,534	4,387	4,284	4,207	4,147	4,099	4,060	4,027	4,000	3,976	3,956	3,938	6
7	5,591	4,737	4,347	4,120	3,972	3,866	3,787	3,726	3,677	3,637	3,603	3,575	3,550	3,529	3,511	7
8	5,318	4,459	4,066	3,838	3,687	3,581	3,500	3,438	3,388	3,347	3,313	3,284	3,259	3,237	3,218	8
9	5,117	4,256	3,863	3,633	3,482	3,374	3,293	3,230	3,179	3,137	3,102	3,073	3,048	3,025	3,006	9
10	4,965	4,103	3,708	3,478	3,326	3,217	3,135	3,072	3,020	2,978	2,943	2,913	2,887	2,865	2,845	10
11	4,844	3,982	3,587	3,357	3,204	3,095	3,012	2,948	2,896	2,854	2,818	2,788	2,761	2,739	2,719	11
12	4,747	3,885	3,490	3,259	3,106	2,996	2,913	2,849	2,796	2,753	2,717	2,687	2,660	2,637	2,617	12
13	4,667	3,806	3,411	3,179	3,025	2,915	2,832	2,767	2,714	2,671	2,635	2,604	2,577	2,554	2,533	13
14	4,600	3,739	3,344	3,112	2,958	2,848	2,764	2,699	2,646	2,602	2,565	2,534	2,507	2,484	2,463	14
15	4,543	3,682	3,287	3,056	2,901	2,790	2,707	2,641	2,588	2,544	2,507	2,475	2,448	2,424	2,403	15
16	4,494	3,634	3,239	3,007	2,852	2,741	2,657	2,591	2,538	2,494	2,456	2,425	2,397	2,373	2,352	16
17	4,451	3,592	3,197	2,965	2,810	2,699	2,614	2,548	2,494	2,450	2,413	2,381	2,353	2,329	2,308	17
18	4,414	3,555	3,160	2,928	2,773	2,661	2,577	2,510	2,456	2,412	2,374	2,342	2,314	2,290	2,269	18
19	4,381	3,522	3,127	2,895	2,740	2,628	2,544	2,477	2,423	2,378	2,340	2,308	2,280	2,256	2,234	19
20	4,351	3,493	3,098	2,866	2,711	2,599	2,514	2,447	2,393	2,348	2,310	2,278	2,250	2,225	2,203	20
21	4,325	3,467	3,072	2,840	2,685	2,573	2,488	2,420	2,366	2,321	2,283	2,250	2,222	2,197	2,176	21
22	4,301	3,443	3,049	2,817	2,661	2,549	2,464	2,397	2,342	2,297	2,259	2,226	2,198	2,173	2,151	22
23	4,279	3,422	3,028	2,796	2,640	2,528	2,442	2,375	2,320	2,275	2,236	2,204	2,175	2,150	2,128	23
24	4,260	3,403	3,009	2,776	2,621	2,508	2,423	2,355	2,300	2,255	2,216	2,183	2,155	2,130	2,108	24
25	4,242	3,385	2,991	2,759	2,603	2,490	2,405	2,337	2,282	2,236	2,198	2,165	2,136	2,111	2,089	25
26	4,225	3,369	2,975	2,743	2,587	2,474	2,388	2,321	2,265	2,220	2,181	2,148	2,119	2,094	2,072	26
27	4,210	3,354	2,960	2,728	2,572	2,459	2,373	2,305	2,250	2,204	2,166	2,132	2,103	2,078	2,056	27
28	4,196	3,340	2,947	2,714	2,558	2,445	2,359	2,291	2,236	2,190	2,151	2,118	2,089	2,064	2,041	28
29	4,183	3,328	2,934	2,701	2,545	2,432	2,346	2,278	2,223	2,177	2,138	2,104	2,075	2,050	2,027	29
30	4,171	3,316	2,922	2,690	2,534	2,421	2,334	2,266	2,211	2,165	2,126	2,092	2,063	2,037	2,015	30
31	4,160	3,305	2,911	2,679	2,523	2,409	2,323	2,255	2,199	2,153	2,114	2,080	2,051	2,026	2,003	31
32	4,149	3,295	2,901	2,668	2,512	2,399	2,313	2,244	2,189	2,142	2,103	2,070	2,040	2,015	1,992	32
33	4,139	3,285	2,892	2,659	2,503	2,389	2,303	2,235	2,179	2,133	2,093	2,060	2,030	2,004	1,982	33
34	4,130	3,276	2,883	2,650	2,494	2,380	2,294	2,225	2,170	2,123	2,084	2,050	2,021	1,995	1,972	34
35	4,121	3,267	2,874	2,641	2,485	2,372	2,285	2,217	2,161	2,114	2,075	2,041	2,012	1,986	1,963	35
40	4,085	3,232	2,839	2,606	2,449	2,336	2,249	2,180	2,124	2,077	2,038	2,003	1,974	1,948	1,924	40
60	4,001	3,250	2,758	2,525	2,368	2,254	2,167	2,097	2,040	1,993	1,952	1,917	1,887	1,860	1,836	60
80	3,960	3,111	2,719	2,486	2,329	2,214	2,126	2,056	1,999	1,951	1,910	1,875	1,845	1,817	1,793	80
90	3,947	3,098	2,706	2,473	2,316	2,201	2,113	2,043	1,986	1,938	1,897	1,861	1,830	1,803	1,779	90
100	3,936	3,087	2,696	2,463	2,305	2,191	2,103	2,032	1,975	1,927	1,886	1,850	1,819	1,792	1,768	100
120	3,920	3,072	2,680	2,447	2,290	2,175	2,087	2,016	1,959	1,910	1,869	1,834	1,803	1,775	1,750	120
inf.	3,841	2,996	2,605	2,372	2,214	2,099	2,010	1,938	1,880	1,831	1,789	1,752	1,720	1,692	1,666	inf.

Grados de libertad del Denominador

Propiedades termofísicas

Propiedades térmicas del aire					
Difusividad térmica	Variable	Modelo matemático	Parámetro	Valor	Unidad de medida
$\alpha_A = \frac{k_A}{\rho_A C_{PA}}$	Densidad	$\rho_A = 352,94/(T + 273,15)$	a	1,4580E-06	Pa s ⁻¹
	Calor específico	$C_{PA} = 9,9921 \times 10^{-1} + 1,4341 \times 10^{-4}T - 5,0812 \times 10^{-7}T^2$	b	110,40	
	Conductividad térmica	$k_A = 2,4401 \times 10^{-2} + 6,9591 \times 10^{-5}T$	c	273,15	
Viscosidad cinemática	Variable	Modelo matemático	Parámetro	Valor	Unidad de medida
$\nu_A = \frac{\mu_A}{\rho_A}$	Viscosidad dinámica	$\mu_A = \frac{a\sqrt{T+c}}{1+b/(T+c)}$	a	1,4580E-06	Pa s ⁻¹
			b	110,40	
			c	273,15	
Temperatura (°C)	Densidad (kg aire seco m ⁻³)	Viscosidad cinemática (m ² s ⁻¹)	Calor específico (kJ kg aire seco ⁻¹ °C ⁻¹)	Conductividad térmica (W m ⁻¹ °C ⁻¹)	Difusividad térmica (m ² s ⁻¹)
-40	1,5138	9,9805E-06	0,9927	0,0216	1,4374E-05
-35	1,4820	1,0373E-05	0,9936	0,0220	1,4940E-05
-30	1,4515	1,0772E-05	0,9945	0,0223	1,5448E-05
-25	1,4223	1,1176E-05	0,9953	0,0227	1,6035E-05
-20	1,3942	1,1586E-05	0,9961	0,0230	1,6562E-05
-15	1,3672	1,2002E-05	0,9969	0,0234	1,7168E-05
-10	1,3412	1,2423E-05	0,9977	0,0237	1,7711E-05
-5	1,3162	1,2849E-05	0,9985	0,0241	1,8338E-05
0	1,2921	1,3281E-05	0,9992	0,0244	1,8899E-05
5	1,2689	1,3718E-05	0,9999	0,0247	1,9468E-05
10	1,2465	1,4161E-05	1,0006	0,0251	2,0124E-05
15	1,2248	1,4610E-05	1,0012	0,0254	2,0713E-05
20	1,2040	1,5062E-05	1,0019	0,0258	2,1388E-05
25	1,1838	1,5520E-05	1,0025	0,0261	2,1993E-05
30	1,1642	1,5984E-05	1,0031	0,0265	2,2692E-05
35	1,1454	1,6451E-05	1,0036	0,0268	2,3314E-05
40	1,1271	1,6925E-05	1,0041	0,0272	2,4034E-05
45	1,1094	1,7403E-05	1,0046	0,0275	2,4675E-05
50	1,0922	1,7886E-05	1,0051	0,0279	2,5415E-05
55	1,0755	1,8375E-05	1,0056	0,0282	2,6074E-05
60	1,0594	1,8868E-05	1,0060	0,0286	2,6835E-05
65	1,0437	1,9366E-05	1,0064	0,0289	2,7514E-05
70	1,0285	1,9868E-05	1,0068	0,0293	2,8296E-05
75	1,0138	2,0374E-05	1,0071	0,0296	2,8991E-05
80	0,9994	2,0886E-05	1,0074	0,0300	2,9798E-05
85	0,9855	2,1401E-05	1,0077	0,0303	3,0511E-05
90	0,9719	2,1923E-05	1,0080	0,0307	3,1337E-05
95	0,9587	2,2448E-05	1,0082	0,0310	3,2072E-05
100	0,9458	2,2980E-05	1,0085	0,0314	3,2920E-05
105	0,9333	2,3514E-05	1,0087	0,0317	3,3673E-05

Propiedades termofísicas

Interpolación e integración numérica					
Variables	Valores extremos	Temperatura (°C)	Calor específico (kJ kg aire seco ⁻¹ °C ⁻¹)	Interpolación lineal (kJ kg aire seco ⁻¹ °C ⁻¹)	Error relativo (%)
$T = x$	$T_1 = x_0 = 0^\circ\text{C}$	2,50	0,9996	0,9996	0,0000
$C_{PA} = f(x)$	$T_2 = x_n = 100^\circ\text{C}$ $n = 20$	7,50	1,0003	1,0003	0,0000
Interpolación mediante trazadores lineales					
$f_{i+1}(x) = f(x_i) + \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{x_{i+1} - x_i}(x - x_i)$					
$x_i \leq x \leq x_{i+1} ; x \in \mathbb{R}$					
$0 \leq i \leq n - 1 ; i \in \mathbb{N}_0$					
Calor específico del aire promedio					
$\bar{C}_{PA} = \frac{\Delta H_A}{\Delta T}$					
$\Delta H_A = \int_{T_1}^{T_2} C_{PA} dT \approx \frac{x_n - x_0}{2n} \left(f(x_0) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i) + f(x_n) \right)$					
$\Delta T = T_2 - T_1$					
Método	C_{PA} (kJ kg aire seco ⁻¹ °C ⁻¹)				
Integración analítica	1,0047				
Regla trapezoidal	1,0047				
Error relativo (%)	0,0000				
		2,50	0,9996	0,9996	0,0000
		7,50	1,0003	1,0003	0,0000
		12,5	1,0009	1,0009	0,0000
		17,5	1,0016	1,0016	0,0000
		22,5	1,0022	1,0022	0,0000
		27,5	1,0028	1,0028	0,0000
		32,5	1,0033	1,0034	0,0100
		37,5	1,0039	1,0039	0,0000
		42,5	1,0044	1,0044	0,0000
		47,5	1,0049	1,0049	0,0000
		52,5	1,0053	1,0054	0,0099
		57,5	1,0058	1,0058	0,0000
		62,5	1,0062	1,0062	0,0000
		67,5	1,0066	1,0066	0,0000
		72,5	1,0069	1,0070	0,0099
		77,5	1,0073	1,0073	0,0000
		82,5	1,0076	1,0076	0,0000
		87,5	1,0079	1,0079	0,0000
		92,5	1,0081	1,0081	0,0000
		97,5	1,0084	1,0084	0,0000

Propiedades termofísicas

Propiedades térmicas del vapor			
Difusividad térmica	Variable	Modelo matemático	Unidad de medida
$\alpha_v = \frac{k_v}{\rho_v C_{Pv}}$	Densidad	$\rho_v = 219,57(T + 273,15)$	
	Calor específico	$C_{Pv} = 1,8527 + 6,1463 \times 10^{-4}T + 2,5613 \times 10^{-7}T^2$	
	Conductividad térmica	$k_v = 1,5202 \times 10^{-2} + 9,3112 \times 10^{-5}T$	
Viscosidad cinemática	Variable	Parámetro	Unidad de medida
$\nu_v = \frac{\mu_v}{\rho_v}$	Viscosidad dinámica	a b c	Pa s ⁻¹
		$\mu_v = a(T + c)^b$	
Temperatura (°C)	Densidad (kg agua m ⁻³)	Viscosidad cinemática (m ² s ⁻¹)	Calor específico (kJ kg agua ⁻¹ °C ⁻¹)
-40	0,9418	7,3748E-06	1,8285
-35	0,9220	7,7019E-06	1,8315
-30	0,9030	8,0365E-06	1,8345
-25	0,8848	8,3779E-06	1,8375
-20	0,8674	8,7259E-06	1,8405
-15	0,8506	9,0818E-06	1,8435
-10	0,8344	9,4454E-06	1,8466
-5	0,8188	9,8164E-06	1,8496
0	0,8038	1,0194E-05	1,8527
5	0,7894	1,0579E-05	1,8558
10	0,7755	1,0971E-05	1,8589
15	0,7620	1,1371E-05	1,8620
20	0,7490	1,1778E-05	1,8651
25	0,7364	1,2193E-05	1,8682
30	0,7243	1,2614E-05	1,8714
35	0,7125	1,3043E-05	1,8745
40	0,7012	1,3478E-05	1,8777
45	0,6901	1,3923E-05	1,8809
50	0,6795	1,4373E-05	1,8841
55	0,6691	1,4832E-05	1,8873
60	0,6591	1,5297E-05	1,8905
65	0,6493	1,5771E-05	1,8937
70	0,6399	1,6250E-05	1,8970
75	0,6307	1,6738E-05	1,9002
80	0,6217	1,7235E-05	1,9035
85	0,6131	1,7735E-05	1,9068
90	0,6046	1,8246E-05	1,9101
95	0,5964	1,8763E-05	1,9134
100	0,5884	1,9288E-05	1,9167
105	0,5806	1,9821E-05	1,9201
			Conductividad térmica (W m ⁻¹ °C ⁻¹)
			0,0115
			0,0119
			0,0124
			0,0129
			0,0133
			0,0138
			0,0143
			0,0147
			0,0152
			0,0157
			0,0161
			0,0166
			0,0171
			0,0175
			0,0180
			0,0185
			0,0189
			0,0194
			0,0199
			0,0203
			0,0208
			0,0213
			0,0217
			0,0222
			0,0227
			0,0231
			0,0236
			0,0240
			0,0245
			0,0250
			Difusividad térmica (m ² s ⁻¹)
			6,6780E-06
			7,0471E-06
			7,4854E-06
			7,9345E-06
			8,3310E-06
			8,8006E-06
			9,2809E-06
			9,7065E-06
			1,0207E-05
			1,0717E-05
			1,1168E-05
			1,1700E-05
			1,2241E-05
			1,2720E-05
			1,3280E-05
			1,3852E-05
			1,4355E-05
			1,4946E-05
			1,5544E-05
			1,6075E-05
			1,6693E-05
			1,7323E-05
			1,7876E-05
			1,8524E-05
			1,9182E-05
			1,9759E-05
			2,0436E-05
			2,1031E-05
			2,1724E-05
			2,2425E-05

Propiedades termofísicas

Interpolación e integración numérica					
Variables	Valores extremos	Temperatura (°C)	Calor específico (kJ kg agua ⁻¹ °C ⁻¹)	Interpolación lineal (kJ kg agua ⁻¹ °C ⁻¹)	Error relativo (%)
T = x	T ₁ = x ₀ = 0°C	2,50	1,8542	1,8543	0,0054
C _{Pv} = f(x)	T ₂ = x _n = 100°C n = 20	7,50	1,8573	1,8574	0,0054
Interpolación mediante trazadores lineales					
$f_{i+1}(x) = f(x_i) + \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{x_{i+1} - x_i} (x - x_i)$					
$x_i \leq x \leq x_{i+1} ; x \in \mathbb{R}$					
$0 \leq i \leq n - 1 ; i \in \mathbb{N}_0$					
Calor específico del vapor promedio					
$\bar{C}_{Pv} = \frac{\Delta H_v}{\Delta T}$					
$\Delta H_v = \int_{T_1}^{T_2} C_{Pv} dT \approx \frac{x_n - x_0}{2n} \left(f(x_0) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i) + f(x_n) \right)$					
$\Delta T = T_2 - T_1$					
Método	\bar{C}_{Pv} (kJ kg agua ⁻¹ °C ⁻¹)				
Integración analítica	1,8843				
Regla trapezoidal	1,8843				
Error relativo (%)	0,0000				
		2,50	1,8542	1,8543	0,0054
		7,50	1,8573	1,8574	0,0054
		12,5	1,8604	1,8605	0,0054
		17,5	1,8635	1,8636	0,0054
		22,5	1,8667	1,8667	0,0000
		27,5	1,8698	1,8698	0,0000
		32,5	1,8729	1,8730	0,0053
		37,5	1,8761	1,8761	0,0000
		42,5	1,8793	1,8793	0,0000
		47,5	1,8825	1,8825	0,0000
		52,5	1,8857	1,8857	0,0000
		57,5	1,8889	1,8889	0,0000
		62,5	1,8921	1,8921	0,0000
		67,5	1,8954	1,8954	0,0000
		72,5	1,8986	1,8986	0,0000
		77,5	1,9019	1,9019	0,0000
		82,5	1,9052	1,9052	0,0000
		87,5	1,9084	1,9085	0,0052
		92,5	1,9117	1,9118	0,0052
		97,5	1,9151	1,9151	0,0000

Propiedades termofísicas

Propiedades térmicas del agua					
Difusividad térmica	Variable	Modelo matemático	Unidad de medida		
$\alpha_w = \frac{k_w}{\rho_w C_{pw}}$	Densidad	$\rho_w = 9,9718 \times 10^2 + 3,1439 \times 10^{-3}T - 3,7574 \times 10^{-3}T^2$	Pa s ⁻¹		
	Calor específico	$C_{pw} = 4,0817 - 5,3062 \times 10^{-3}T + 9,9516 \times 10^{-4}T^2$; $-40^\circ\text{C} \leq T < 0^\circ\text{C}$			
	Calor específico	$C_{pw} = 4,1762 - 9,0864 \times 10^{-5}T + 5,4731 \times 10^{-6}T^2$; $0^\circ\text{C} \leq T \leq 100^\circ\text{C}$			
	Conductividad térmica	$k_w = 5,7109 \times 10^{-1} + 1,7625 \times 10^{-3}T - 6,7030 \times 10^{-6}T^2$			
Viscosidad cinemática	Variable	Modelo matemático	Parámetro		
$\nu_w = \frac{\mu_w}{\rho_w}$	Viscosidad dinámica	$\mu_w = a \times 10^{b/(T+c)}$	a b c		
			2,4140E-05 247,80 133,15		
Temperatura (°C)	Densidad (kg agua m ⁻³)	Viscosidad cinemática (m ² s ⁻¹)	Calor específico (kJ kg agua ⁻¹ °C ⁻¹)	Conductividad térmica (W m ⁻¹ °C ⁻¹)	Difusividad térmica (m ² s ⁻¹)
-40	991,04	1,1140E-05	5,8862	0,4899	8,3981E-08
-35	992,47	8,1419E-06	5,4865	0,5012	9,2045E-08
-30	993,70	6,1349E-06	5,1365	0,5122	1,0035E-07
-25	994,75	4,7455E-06	4,8363	0,5228	1,0867E-07
-20	995,61	3,7554E-06	4,5859	0,5332	1,1678E-07
-15	996,29	3,0317E-06	4,3852	0,5431	1,2431E-07
-10	996,77	2,4907E-06	4,2343	0,5528	1,3098E-07
-5	997,07	2,0782E-06	4,1331	0,5621	1,3640E-07
0	997,18	1,7580E-06	4,1762	0,5711	1,3714E-07
5	997,10	1,5056E-06	4,1759	0,5797	1,3922E-07
10	996,84	1,3037E-06	4,1758	0,5880	1,4126E-07
15	996,38	1,1401E-06	4,1761	0,5960	1,4324E-07
20	995,74	1,0060E-06	4,1766	0,6037	1,4516E-07
25	994,91	8,9499E-07	4,1773	0,6110	1,4702E-07
30	993,89	8,0213E-07	4,1784	0,6179	1,4879E-07
35	992,69	7,2378E-07	4,1797	0,6246	1,5054E-07
40	991,29	6,5715E-07	4,1813	0,6309	1,5221E-07
45	989,71	6,0006E-07	4,1832	0,6368	1,5381E-07
50	987,94	5,5080E-07	4,1853	0,6425	1,5539E-07
55	985,99	5,0804E-07	4,1878	0,6478	1,5689E-07
60	983,84	4,7071E-07	4,1905	0,6527	1,5832E-07
65	981,51	4,3794E-07	4,1934	0,6573	1,5970E-07
70	978,99	4,0902E-07	4,1967	0,6616	1,6103E-07
75	976,28	3,8340E-07	4,2002	0,6656	1,6232E-07
80	973,38	3,6059E-07	4,2040	0,6692	1,6354E-07
85	970,30	3,4021E-07	4,2080	0,6725	1,6471E-07
90	967,03	3,2193E-07	4,2124	0,6754	1,6580E-07
95	963,57	3,0548E-07	4,2170	0,6780	1,6686E-07
100	959,92	2,9063E-07	4,2218	0,6803	1,6787E-07

Propiedades termofísicas

Propiedades térmicas del hielo					
Difusividad térmica	Variable	Modelo matemático			
$\alpha_H = \frac{k_H}{\rho_H C_{PH}}$	Densidad	$\rho_H = 9,1689 \times 10^2 - 1,3071 \times 10^{-1} T$			
	Calor específico	$C_{PH} = 2,0623 + 6,0769 \times 10^{-3} T$			
	Conductividad térmica	$k_H = 2,2196 - 6,2489 \times 10^{-3} T + 1,0154 \times 10^{-4} T^2$			
Temperatura (°C)	Densidad (kg agua m ⁻³)	Volumen específico (m ³ kg agua ⁻¹)	Calor específico (kJ kg agua ⁻¹ °C ⁻¹)	Conductividad térmica (W m ⁻¹ °C ⁻¹)	Difusividad térmica (m ² s ⁻¹)
-40	922,12	1,0845E-03	1,8192	2,6320	1,5690E-06
-35	921,46	1,0852E-03	1,8496	2,5627	1,5036E-06
-30	920,81	1,0860E-03	1,8800	2,4985	1,4433E-06
-25	920,16	1,0868E-03	1,9104	2,4393	1,3876E-06
-20	919,50	1,0875E-03	1,9408	2,3852	1,3366E-06
-15	918,85	1,0883E-03	1,9711	2,3362	1,2899E-06
-10	918,20	1,0891E-03	2,0015	2,2922	1,2473E-06
-5	917,54	1,0899E-03	2,0319	2,2534	1,2087E-06
0	916,89	1,0906E-03	2,0623	2,2196	1,1738E-06
Calor latente de cambio de fase					
Sustancia	Cambio de fase		Modelo matemático		
Hielo	Fusión		$\lambda = 3,3425 \times 10^2 - 1,9603 T ; -40^\circ C \leq T \leq 0^\circ C$		
Agua	Evaporación		$\lambda = 2,5023 \times 10^3 - 2,4560 T ; 0^\circ C \leq T \leq 100^\circ C$		
Temperatura (°C)	Calor latente (kJ kg agua ⁻¹)	Temperatura (°C)	Calor latente (kJ kg agua ⁻¹)	Temperatura (°C)	Calor latente (kJ kg agua ⁻¹)
-40	412,66	5	2490,0	55	2367,2
-35	402,86	10	2477,7	60	2354,9
-30	393,06	15	2465,5	65	2342,7
-25	383,26	20	2453,2	70	2330,4
-20	373,46	25	2440,9	75	2318,1
-15	363,65	30	2428,6	80	2305,8
-10	353,85	35	2416,3	85	2293,5
-5	344,05	40	2404,1	90	2281,3
0	334,25	45	2391,8	95	2269,0
0	2502,3	50	2379,5	100	2256,7

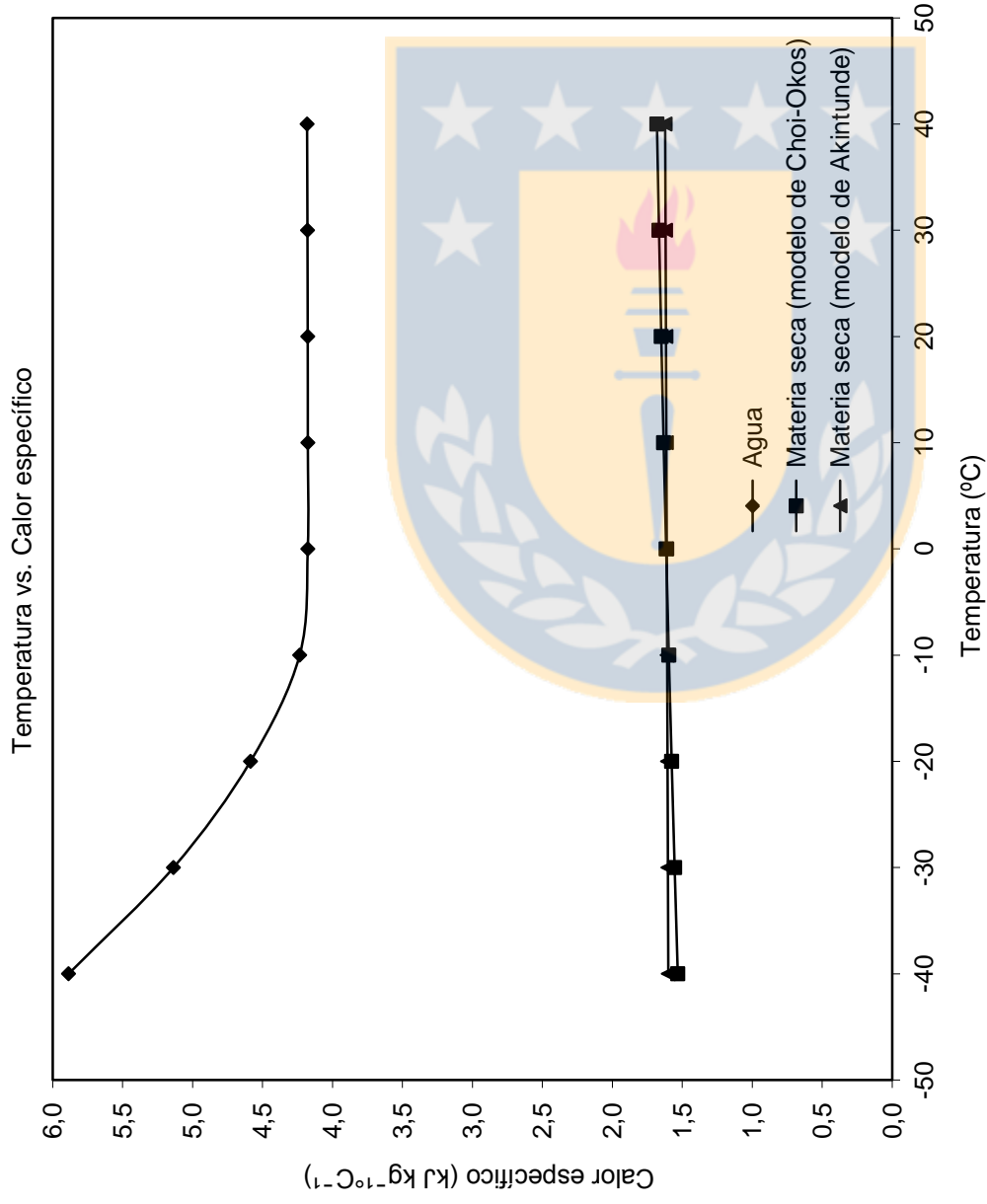
Propiedades termofísicas

Propiedades térmicas del maíz						
Difusividad térmica	Componente	Porcentaje mínimo	Porcentaje máximo	Promedio (%)	X_i (kg i kg sólido seco ⁻¹)	
$\alpha_s = \frac{k_s}{\rho_s C_{ps}}$	Proteínas	8,10	11,5	9,80	0,0980	
	Lípidos	3,90	5,80	4,85	0,0485	
	Carbohidratos	77,2	84,2	80,7	0,8070	
	Fibra	2,40	3,50	2,95	0,0295	
	Minerales	1,40	2,00	1,70	0,0170	
Modelo de Choi-Okos						
Volumen específico	Proteínas	$\rho_{S1} = 1,3299 \times 10^3 - 5,1840 \times 10^{-1} T$				
	Lípidos	$\rho_{S2} = 9,2559 \times 10^2 - 4,1757 \times 10^{-1} T$				
	Carbohidratos	$\rho_{S3} = 1,5991 \times 10^3 - 3,1046 \times 10^{-1} T$				
	Fibra	$\rho_{S4} = 1,3115 \times 10^3 - 3,6589 \times 10^{-1} T$				
	Minerales	$\rho_{S5} = 2,4238 \times 10^3 - 2,8063 \times 10^{-1} T$				
Modelo de Choi-Okos						
Calor específico	Proteínas	$C_{PS1} = 2,0082 + 1,2089 \times 10^{-3} T - 1,3129 \times 10^{-6} T^2$				
	Lípidos	$C_{PS2} = 1,9842 + 1,4733 \times 10^{-3} T - 4,8008 \times 10^{-6} T^2$				
	Carbohidratos	$C_{PS3} = 1,5488 + 1,9625 \times 10^{-3} T - 5,9399 \times 10^{-6} T^2$				
	Fibra	$C_{PS4} = 1,8459 + 1,8306 \times 10^{-3} T - 4,6509 \times 10^{-6} T^2$				
	Minerales	$C_{PS5} = 1,0926 + 1,8896 \times 10^{-3} T - 3,6817 \times 10^{-6} T^2$				
Modelo de Choi-Okos						
Conductividad térmica	Proteínas	$k_{S1} = 1,7881 \times 10^{-1} + 1,1958 \times 10^{-3} T - 2,7178 \times 10^{-6} T^2$				
	Lípidos	$k_{S2} = 1,8071 \times 10^{-1} - 2,7604 \times 10^{-3} T - 1,7749 \times 10^{-7} T^2$				
	Carbohidratos	$k_{S3} = 2,0141 \times 10^{-1} + 1,3874 \times 10^{-3} T - 4,3312 \times 10^{-6} T^2$				
	Fibra	$k_{S4} = 1,8331 \times 10^{-1} + 1,2497 \times 10^{-3} T - 3,1683 \times 10^{-6} T^2$				
	Minerales	$k_{S5} = 3,2962 \times 10^{-1} + 1,4011 \times 10^{-3} T - 2,9069 \times 10^{-6} T^2$				
Modelo de Choi-Okos						
Temperatura (°C)	Densidad (kg sólido seco m ⁻³)	Volumen específico (m ³ kg sólido seco ⁻¹)	Calor específico (kJ kg sólido seco ⁻¹ °C ⁻¹)	Conductividad térmica (W m ⁻¹ °C ⁻¹)	Difusividad térmica (m ² s ⁻¹)	
	-40	1529,0	6,5403E-04	1,5330	0,1506	6,4250E-08
	-30	1525,4	6,5557E-04	1,5553	0,1636	6,8958E-08
	-20	1521,8	6,5712E-04	1,5766	0,1758	7,3272E-08
	-10	1518,2	6,5868E-04	1,5968	0,1873	7,7261E-08
0	1514,6	6,6025E-04	1,6159	0,1980	8,0901E-08	
10	1511,0	6,6183E-04	1,6340	0,2079	8,4205E-08	
20	1507,3	6,6342E-04	1,6510	0,2171	8,7239E-08	
30	1503,7	6,6502E-04	1,6669	0,2255	8,9965E-08	
40	1500,1	6,6662E-04	1,6818	0,2331	9,2395E-08	
50	1496,5	6,6823E-04	1,6955	0,2400	9,4588E-08	
60	1492,9	6,6986E-04	1,7083	0,2461	9,6498E-08	
70	1489,2	6,7149E-04	1,7199	0,2514	9,8154E-08	
80	1485,6	6,7313E-04	1,7305	0,2560	9,9579E-08	
90	1482,0	6,7478E-04	1,7400	0,2598	1,0075E-07	

Propiedades termofísicas

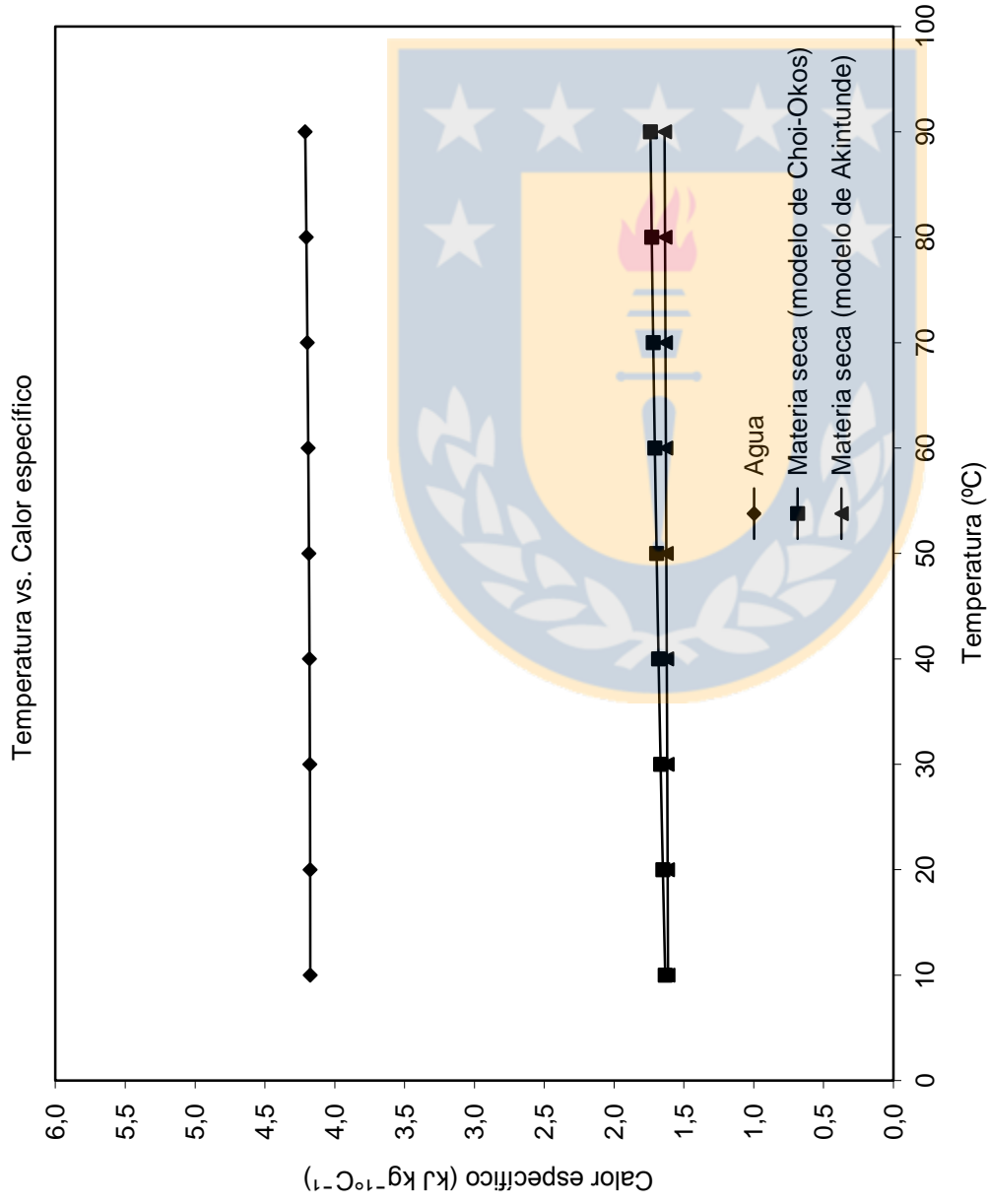
Propiedades térmicas del maíz						
Difusividad térmica	Componente	Porcentaje mínimo	Porcentaje máximo	Promedio (%)	X_i (kg i kg sólido seco ⁻¹)	
$\alpha_s = \frac{k_s}{\rho_s C_{ps}}$	Proteínas	8,10	11,5	9,80	0,0980	
	Lípidos	3,90	5,80	4,85	0,0485	
	Carbohidratos	77,2	84,2	80,7	0,8070	
	Fibra	2,40	3,50	2,95	0,0295	
	Minerales	1,40	2,00	1,70	0,0170	
Volumen específico						
$\frac{1}{\rho_s} = \sum_{i=1}^5 \frac{X_i}{\rho_{Si}}$	Componente	Modelo de Akitunde				
	Proteínas	$\rho_{S1} = 1329,8 \exp(-0,0004T)$				
	Lípidos	$\rho_{S2} = 925,53 \exp(-0,0005T)$				
	Carbohidratos	$\rho_{S3} = 1599,1 \exp(-0,0002T)$				
	Fibra	$\rho_{S4} = 1311,5 \exp(-0,0003T)$				
Minerales	$\rho_{S5} = 2423,8 \exp(-0,0001T)$					
Calor específico						
$C_{ps} = \sum_{i=1}^5 X_i C_{pSi}$	Componente	Modelo de Akitunde				
	Proteínas	$C_{pS1} = 2,0071 \exp(0,0006T)$				
	Lípidos	$C_{pS2} = 1,9807 \exp(0,0007T)$				
	Carbohidratos	$C_{pS3} = 1,5440 \exp(0,0001T)$				
	Fibra	$C_{pS4} = 1,8422 \exp(-0,0010T)$				
Minerales	$C_{pS5} = 1,0890 \exp(0,0017T)$					
Conductividad térmica						
$k_s = \sum_{i=1}^5 \frac{X_i k_{si} \rho_s}{\rho_{Si}}$	Componente	Modelo de Akitunde				
	Proteínas	$k_{S1} = 0,1742 \exp(0,0069T)$				
	Lípidos	$k_{S2} = 0,1647 \exp(-0,0171T)$				
	Carbohidratos	$k_{S3} = 0,1951 \exp(0,0072T)$				
	Fibra	$k_{S4} = 0,1782 \exp(0,0071T)$				
Minerales	$k_{S5} = 0,3277 + 0,0400T$					
Temperatura						
Temperatura (°C)	Densidad (kg sólido seco m ⁻³)	Volumen específico (m ³ kg sólido seco ⁻¹)	Calor específico (kJ kg sólido seco ⁻¹ °C ⁻¹)	Conductividad térmica (W m ⁻¹ °C ⁻¹)	Difusividad térmica (m ² s ⁻¹)	
	-40	1529,7	6,5374E-04	1,6003	0,1433	5,8538E-08
	-30	1525,9	6,5536E-04	1,6031	0,1533	6,2669E-08
	-20	1522,1	6,5699E-04	1,6059	0,1647	6,7380E-08
	-10	1518,3	6,5863E-04	1,6088	0,1773	7,2585E-08
	0	1514,5	6,6026E-04	1,6116	0,1912	7,8336E-08
	10	1510,8	6,6191E-04	1,6145	0,2063	8,4577E-08
	20	1507,0	6,6355E-04	1,6174	0,2227	9,1367E-08
	30	1503,3	6,6521E-04	1,6203	0,2404	9,8695E-08
	40	1499,6	6,6686E-04	1,6233	0,2594	1,0656E-07
	50	1495,8	6,6853E-04	1,6263	0,2797	1,1498E-07
60	1492,1	6,7019E-04	1,6293	0,3015	1,2402E-07	
70	1488,4	6,7186E-04	1,6323	0,3248	1,3369E-07	
80	1484,7	6,7354E-04	1,6354	0,3496	1,4398E-07	
90	1481,0	6,7522E-04	1,6384	0,3761	1,5500E-07	

Propiedades termofísicas



Análisis de varianza			
Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	F-calculado
Inter-modelo	1,6200E-06	1	0,0012
Intra-modelo	2,1340E-02	16	1,3338E-03
Total	2,1342E-02	17	
F-tabulado (5%, 1, 16) = 4,4940 > F-calculado → no existen diferencias significativas			
Análisis de correlación			
Variable	Símbolo	Valor	Correlación
Coefficiente de Pearson	R	0,9973	Positiva fuerte
			R ² (%)
			99,461

Propiedades termofísicas



Análisis de varianza			
Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	F-calculado
Inter-modelo	1,9424E-02	1	1,9424E-02
Intra-modelo	1,1159E-02	16	6,9744E-04
Total	3,0583E-02	17	
F-tabulado (5%, 1, 16) = 4,4940 < F-calculado → existen diferencias significativas			
Análisis de correlación			
Variable	Símbolo	Valor	Correlación
Coefficiente de Pearson	R	0,9951	Positiva fuerte
			R ² (%)
			99,022

Psicrometría

Psicrometría (punto 0)			
Temperatura de bulbo seco	20,000 °C	7,46908269	-7,50675994E-03
Temperatura de bulbo húmedo	16,327 °C	-4,62032290E-09	-1,215470111E-03
X1	-637,40		
X2	-644,01		35,15789
Presión de vapor (a TBS)	2,3377 kPa		24,592588
Presión de vapor (a TBH)	1,8564 kPa		2,1182069
Pv (unidades SI)	1,6197 kPa		-0,3414474
Pv (unidades inglesas)	0,2349 psia		0,15741642
Pv-inter	0,8540		-0,031329585
Temperatura del punto de rocío	14,202 °C		0,003865828
Humedad absoluta	0,0101 kg agua kg aire seco ⁻¹		-0,000249018
Humedad relativa	69,286 %		6,8401559E-06
Volumen específico	0,8440 m ³ kg aire seco ⁻¹		
Entalpía específica	45,748 kJ kg aire seco ⁻¹		

B2 ingresar valor de temperatura de bulbo seco

B3 ingresar valor de temperatura de bulbo húmedo

B4 =(B2*1,8+32)-705,398

B5 =(B3*1,8+32)-705,398

B6 =6,895*EXP(8,0728362+(B4*(D2+E2*B4+D3*B4^3)/((1+E3*B4)*((B2*1,8+32)+459,688))))

B7 =6,895*EXP(8,0728362+(B5*(D2+E2*B5+D3*B5^3)/((1+E3*B5)*((B3*1,8+32)+459,688))))

B8 =B7-((101,325-B7)*(B2-B3)/(1555,56-(0,722*B3)))

B9 =B8/6,895

B10 =LN(10*B9)

B11 =((E5+E6*B10+E7*B10^2+E8*B10^3+E9*B10^4+E10*B10^5+E11*B10^6+E12*B10^7+E13*B10^8)-32)/1,8

B12 =0,622*B8/(101,325-B8)

B13 =B8*100/B6

B14 =(2,8329*10^-3+4,5547*10^-3*B12)*(B2+273,15)

B15 =(1,0047+1,8843*B12)*(B2-0)+2502,3*B12

Psicrometría

Psicrometría (punto 1-sistema de secado con enfriamiento)			
Temperatura de bulbo seco	73,333 °C	7,46908269	-7,50675994E-03
Temperatura de bulbo húmedo	30,382 °C	-4,62032290E-09	-1,215470111E-03
X1	-541,40		
X2	-618,71		35,15789
Presión de vapor (a TBS)	35,933 kPa		24,592588
Presión de vapor (a TBH)	4,3359 kPa		2,1182069
Pv (unidades SI)	1,6196 kPa		-0,3414474
Pv (unidades inglesas)	0,2349 psia		0,15741642
Pv-inter	0,8540		-0,031329585
Temperatura del punto de rocío	14,201 °C		0,003865828
Humedad absoluta	0,0101 kg agua kg aire seco ⁻¹		-0,000249018
Humedad relativa	4,5074 %		6,8401559E-06
Volumen específico	0,9975 m ³ kg aire seco ⁻¹		
Entalpía específica	100,35 kJ kg aire seco ⁻¹		

B2 ingresar valor de temperatura de bulbo seco

B3 ingresar valor de temperatura de bulbo húmedo

B4 =(B2*1,8+32)-705,398

B5 =(B3*1,8+32)-705,398

B6 =6,895*EXP(8,0728362+(B4*(D2+E2*B4+D3*B4^3)/((1+E3*B4)*((B2*1,8+32)+459,688))))

B7 =6,895*EXP(8,0728362+(B5*(D2+E2*B5+D3*B5^3)/((1+E3*B5)*((B3*1,8+32)+459,688))))

B8 =B7-((101,325-B7)*(B2-B3)/(1555,56-(0,722*B3)))

B9 =B8/6,895

B10 =LN(10*B9)

B11 =((E5+E6*B10+E7*B10^2+E8*B10^3+E9*B10^4+E10*B10^5+E11*B10^6+E12*B10^7+E13*B10^8)-32)/1,8

B12 =0,622*B8/(101,325-B8)

B13 =B8*100/B6

B14 =(2,8329*10^-3+4,5547*10^-3*B12)*(B2+273,15)

B15 =(1,0047+1,8843*B12)*(B2-0)+2502,3*B12

Psicrometría

Psicrometría (punto 1-sistema de secado sin enfriamiento)			
Temperatura de bulbo seco	100,00 °C	7,46908269	-7,50675994E-03
Temperatura de bulbo húmedo	35,163 °C	-4,62032290E-09	-1,215470111E-03
X1	-493,40		
X2	-610,10		35,15789
Presión de vapor (a TBS)	101,33 kPa		24,592588
Presión de vapor (a TBH)	5,6726 kPa		2,1182069
Pv (unidades SI)	1,6196 kPa		-0,3414474
Pv (unidades inglesas)	0,2349 psia		0,15741642
Pv-inter	0,8540		-0,031329585
Temperatura del punto de rocío	14,201 °C		0,003865828
Humedad absoluta	0,0101 kg agua kg aire seco ⁻¹		-0,000249018
Humedad relativa	1,5984 %		6,8401559E-06
Volumen específico	1,0743 m ³ kg aire seco ⁻¹		
Entalpía específica	127,65 kJ kg aire seco ⁻¹		

B2 ingresar valor de temperatura de bulbo seco

B3 ingresar valor de temperatura de bulbo húmedo

B4 =(B2*1,8+32)-705,398

B5 =(B3*1,8+32)-705,398

B6 =6,895*EXP(8,0728362+(B4*(D2+E2*B4+D3*B4^3)/((1+E3*B4)*((B2*1,8+32)+459,688))))

B7 =6,895*EXP(8,0728362+(B5*(D2+E2*B5+D3*B5^3)/((1+E3*B5)*((B3*1,8+32)+459,688))))

B8 =B7-((101,325-B7)*(B2-B3)/(1555,56-(0,722*B3)))

B9 =B8/6,895

B10 =LN(10*B9)

B11 =((E5+E6*B10+E7*B10^2+E8*B10^3+E9*B10^4+E10*B10^5+E11*B10^6+E12*B10^7+E13*B10^8)-32)/1,8

B12 =0,622*B8/(101,325-B8)

B13 =B8*100/B6

B14 =(2,8329*10^-3+4,5547*10^-3*B12)*(B2+273,15)

B15 =(1,0047+1,8843*B12)*(B2-0)+2502,3*B12

Psicrometría

Psicrometría (punto 1-alta temperatura)			
Temperatura de bulbo seco	105,00 °C	7,46908269	-7,50675994E-03
Temperatura de bulbo húmedo	35,956 °C	-4,62032290E-09	-1,215470111E-03
X1	-484,40		
X2	-608,68		35,15789
Presión de vapor (a TBS)	120,81 kPa		24,592588
Presión de vapor (a TBH)	5,9258 kPa		2,1182069
Pv (unidades SI)	1,6196 kPa		-0,3414474
Pv (unidades inglesas)	0,2349 psia		0,15741642
Pv-inter	0,8540		-0,031329585
Temperatura del punto de rocío	14,201 °C		0,003865828
Humedad absoluta	0,0101 kg agua kg aire seco ⁻¹		-0,000249018
Humedad relativa	1,3407 %		6,8401559E-06
Volumen específico	1,0887 m ³ kg aire seco ⁻¹		
Entalpía específica	132,77 kJ kg aire seco ⁻¹		

B2 ingresar valor de temperatura de bulbo seco

B3 ingresar valor de temperatura de bulbo húmedo

B4 =(B2*1,8+32)-705,398

B5 =(B3*1,8+32)-705,398

B6 =6,895*EXP(8,0728362+(B4*(D2+E2*B4+D3*B4^3)/((1+E3*B4)*((B2*1,8+32)+459,688))))

B7 =6,895*EXP(8,0728362+(B5*(D2+E2*B5+D3*B5^3)/((1+E3*B5)*((B3*1,8+32)+459,688))))

B8 =B7-((101,325-B7)*(B2-B3)/(1555,56-(0,722*B3)))

B9 =B8/6,895

B10 =LN(10*B9)

B11 =((E5+E6*B10+E7*B10^2+E8*B10^3+E9*B10^4+E10*B10^5+E11*B10^6+E12*B10^7+E13*B10^8)-32)/1,8

B12 =0,622*B8/(101,325-B8)

B13 =B8*100/B6

B14 =(2,8329*10^-3+4,5547*10^-3*B12)*(B2+273,15)

B15 =(1,0047+1,8843*B12)*(B2-0)+2502,3*B12

Psicrometría

Psicrometría (punto 2-sistema de secado con enfriamiento)			
Temperatura de bulbo seco	50,000 °C	7,46908269	-7,50675994E-03
Temperatura de bulbo húmedo	29,544 °C	-4,62032290E-09	-1,215470111E-03
X1	-583,40		
X2	-620,22		35,15789
Presión de vapor (a TBS)	12,333 kPa		24,592588
Presión de vapor (a TBH)	4,1325 kPa		2,1182069
Pv (unidades SI)	2,8367 kPa		-0,3414474
Pv (unidades inglesas)	0,4114 psia		0,15741642
Pv-inter	1,4144		-0,031329585
Temperatura del punto de rocío	23,164 °C		0,003865828
Humedad absoluta	0,0179 kg agua kg aire seco ⁻¹		-0,000249018
Humedad relativa	23,000 %		6,8401559E-06
Volumen específico	0,9418 m ³ kg aire seco ⁻¹		
Entalpía específica	96,713 kJ kg aire seco ⁻¹		

B2 ingresar valor de temperatura de bulbo seco

B3 ingresar valor de temperatura de bulbo húmedo

B4 =(B2*1,8+32)-705,398

B5 =(B3*1,8+32)-705,398

B6 =6,895*EXP(8,0728362+(B4*(D2+E2*B4+D3*B4^3)/((1+E3*B4)*((B2*1,8+32)+459,688))))

B7 =6,895*EXP(8,0728362+(B5*(D2+E2*B5+D3*B5^3)/((1+E3*B5)*((B3*1,8+32)+459,688))))

B8 =B7-((101,325-B7)*(B2-B3)/(1555,56-(0,722*B3)))

B9 =B8/6,895

B10 =LN(10*B9)

B11 =((E5+E6*B10+E7*B10^2+E8*B10^3+E9*B10^4+E10*B10^5+E11*B10^6+E12*B10^7+E13*B10^8)-32)/1,8

B12 =0,622*B8/(101,325-B8)

B13 =B8*100/B6

B14 =(2,8329*10^-3+4,5547*10^-3*B12)*(B2+273,15)

B15 =(1,0047+1,8843*B12)*(B2-0)+2502,3*B12

Psicrometría

Psicrometría (punto 2-sistema de secado sin enfriamiento)			
Temperatura de bulbo seco	60,000 °C	7,46908269	-7,50675994E-03
Temperatura de bulbo húmedo	33,291 °C	-4,62032290E-09	-1,215470111E-03
X1	-565,40		
X2	-613,47		35,15789
Presión de vapor (a TBS)	19,916 kPa		24,592588
Presión de vapor (a TBH)	5,1120 kPa		2,1182069
Pv (unidades SI)	3,4341 kPa		-0,3414474
Pv (unidades inglesas)	0,4981 psia		0,15741642
Pv-inter	1,6055		-0,031329585
Temperatura del punto de rocío	26,367 °C		0,003865828
Humedad absoluta	0,0218 kg agua kg aire seco ⁻¹		-0,000249018
Humedad relativa	17,243 %		6,8401559E-06
Volumen específico	0,9769 m ³ kg aire seco ⁻¹		
Entalpía específica	117,30 kJ kg aire seco ⁻¹		

B2 ingresar valor de temperatura de bulbo seco

B3 ingresar valor de temperatura de bulbo húmedo

B4 =(B2*1,8+32)-705,398

B5 =(B3*1,8+32)-705,398

B6 =6,895*EXP(8,0728362+(B4*(D2+E2*B4+D3*B4^3)/((1+E3*B4)*((B2*1,8+32)+459,688))))

B7 =6,895*EXP(8,0728362+(B5*(D2+E2*B5+D3*B5^3)/((1+E3*B5)*((B3*1,8+32)+459,688))))

B8 =B7-((101,325-B7)*(B2-B3)/(1555,56-(0,722*B3)))

B9 =B8/6,895

B10 =LN(10*B9)

B11 =((E5+E6*B10+E7*B10^2+E8*B10^3+E9*B10^4+E10*B10^5+E11*B10^6+E12*B10^7+E13*B10^8)-32)/1,8

B12 =0,622*B8/(101,325-B8)

B13 =B8*100/B6

B14 =(2,8329*10^-3+4,5547*10^-3*B12)*(B2+273,15)

B15 =(1,0047+1,8843*B12)*(B2-0)+2502,3*B12

Psicrometría

Psicrometría (aireación)			
Temperatura de bulbo seco	40,000 °C	7,46908269	-7,50675994E-03
Temperatura de bulbo húmedo	23,519 °C	-4,62032290E-09	-1,215470111E-03
X1	-601,40		
X2	-631,06		35,15789
Presión de vapor (a TBS)	7,3746 kPa		24,592588
Presión de vapor (a TBH)	2,8980 kPa		2,1182069
Pv (unidades SI)	1,8436 kPa		-0,3414474
Pv (unidades inglesas)	0,2674 psia		0,15741642
Pv-inter	0,9835		-0,031329585
Temperatura del punto de rocío	16,217 °C		0,003865828
Humedad absoluta	0,0115 kg agua kg aire seco ⁻¹		-0,000249018
Humedad relativa	25,000 %		6,8401559E-06
Volumen específico	0,9035 m ³ kg aire seco ⁻¹		
Entalpía específica	69,831 kJ kg aire seco ⁻¹		

B2 ingresar valor de temperatura de bulbo seco

B3 ingresar valor de temperatura de bulbo húmedo

B4 =(B2*1,8+32)-705,398

B5 =(B3*1,8+32)-705,398

B6 =6,895*EXP(8,0728362+(B4*(D2+E2*B4+D3*B4^3)/((1+E3*B4)*((B2*1,8+32)+459,688))))

B7 =6,895*EXP(8,0728362+(B5*(D2+E2*B5+D3*B5^3)/((1+E3*B5)*((B3*1,8+32)+459,688))))

B8 =B7-((101,325-B7)*(B2-B3)/(1555,56-(0,722*B3)))

B9 =B8/6,895

B10 =LN(10*B9)

B11 =((E5+E6*B10+E7*B10^2+E8*B10^3+E9*B10^4+E10*B10^5+E11*B10^6+E12*B10^7+E13*B10^8)-32)/1,8

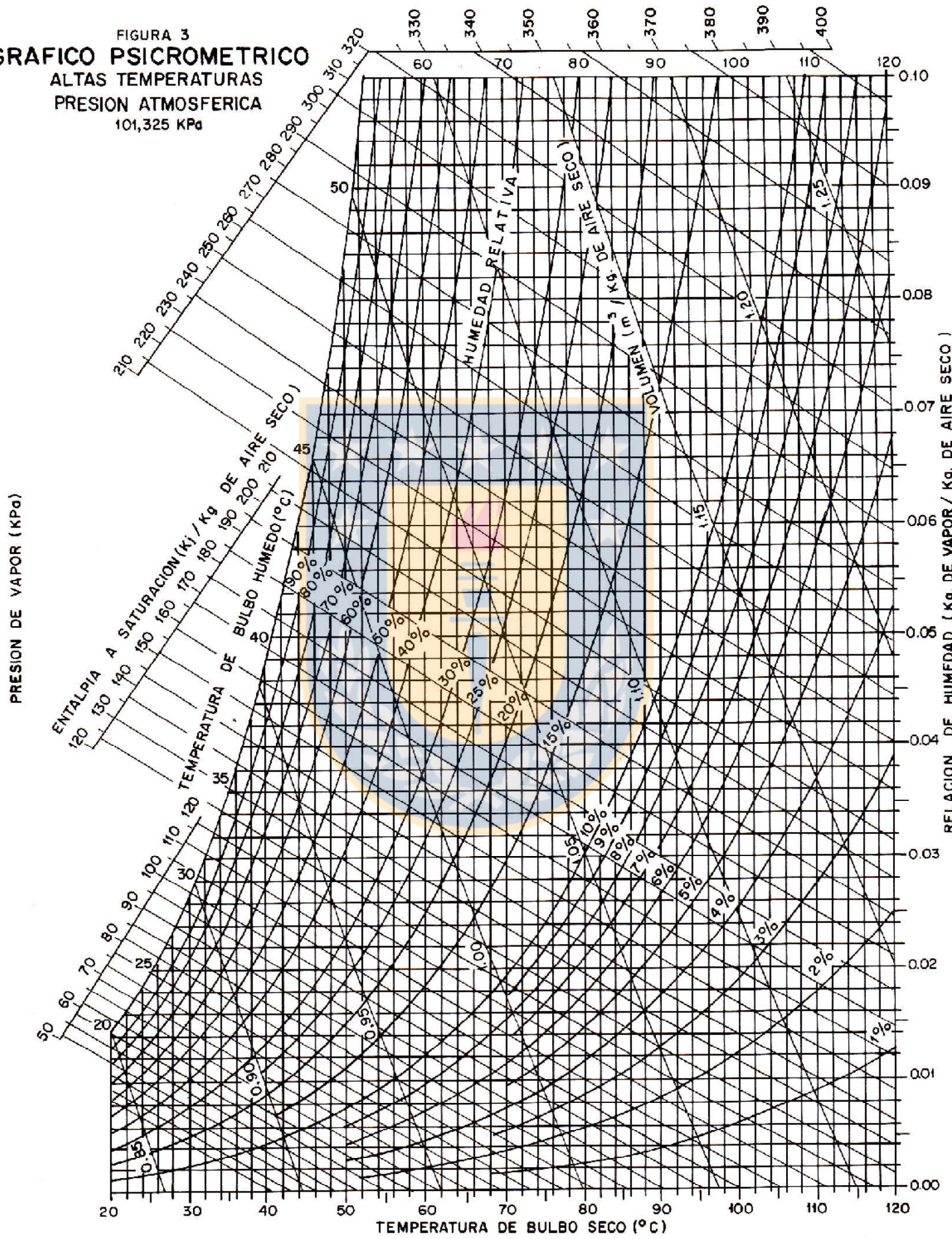
B12 =0,622*B8/(101,325-B8)

B13 =B8*100/B6

B14 =(2,8329*10^-3+4,5547*10^-3*B12)*(B2+273,15)

B15 =(1,0047+1,8843*B12)*(B2-0)+2502,3*B12

FIGURA 3
GRAFICO PSICROMETRICO
 ALTAS TEMPERATURAS
 PRESION ATMOSFERICA
 101,325 KPa

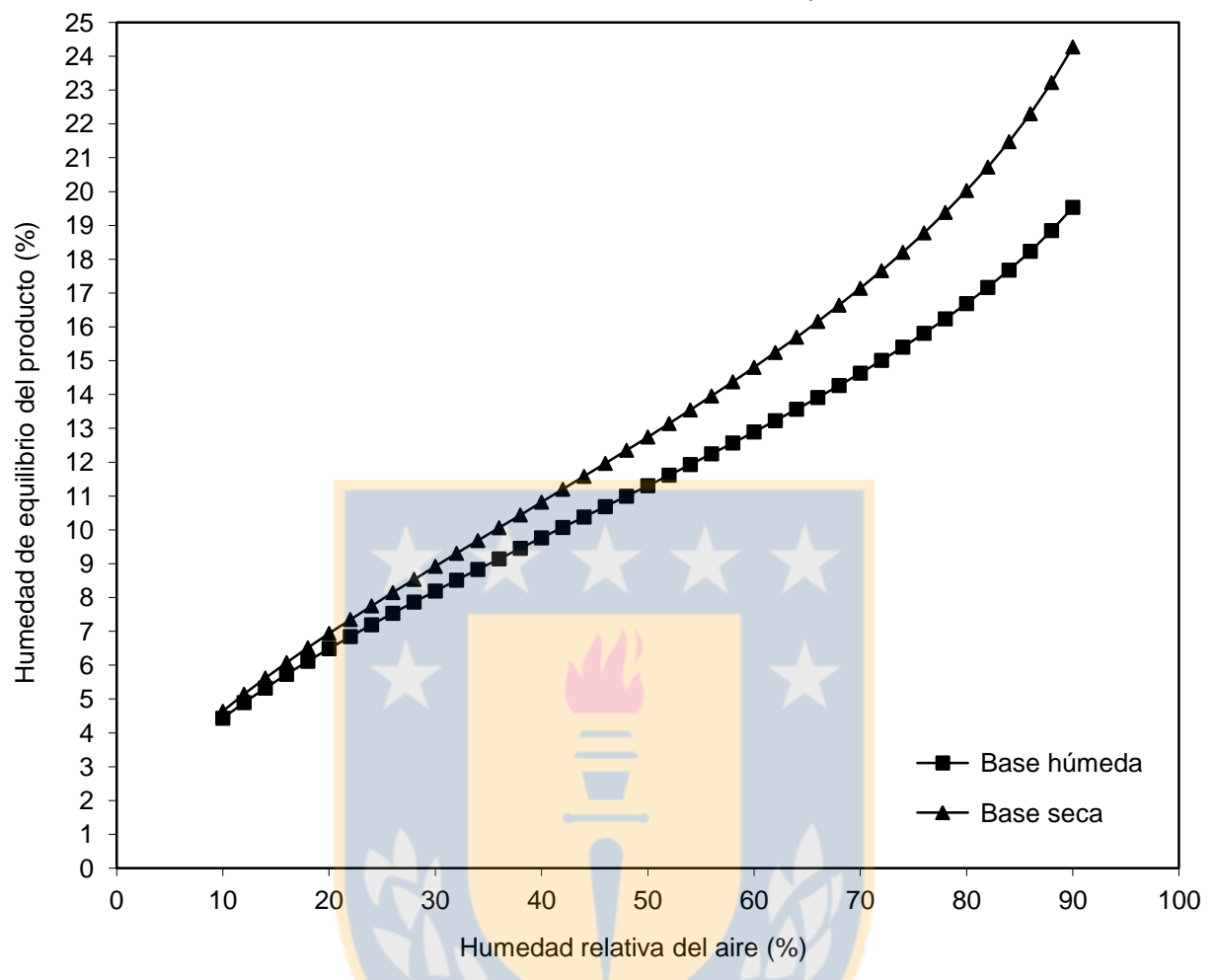


Higroscopía

Higroscopía				
Ecuación de Henderson		Variable		Descripción
$X^* = \left(\frac{\ln(1 - HR)}{-a(T_G + b)} \right)^{1/c}$		X*	Humedad de equilibrio del producto (%)	
		T _G	Temperatura de bulbo seco (°C)	
		HR	Humedad relativa expresada en decimal	
Parámetros del modelo de equilibrio higroscópico				
Producto	a	b	c	Error estándar
Maíz	8,6541E-05	49,810	1,8634	0,0127
Humedad de equilibrio del producto				
T _G (°C)	HR (%)	X* (%)	X* (kg agua kg sólido seco ⁻¹)	X _w * (%)
20	10,000	4,6374	0,0464	4,4319
20	12,000	5,1444	0,0514	4,8927
20	14,000	5,6219	0,0562	5,3227
20	16,000	6,0767	0,0608	5,7286
20	18,000	6,5139	0,0651	6,1155
20	20,000	6,9370	0,0694	6,4870
20	22,000	7,3489	0,0735	6,8458
20	24,000	7,7517	0,0775	7,1940
20	26,000	8,1473	0,0815	7,5335
20	28,000	8,5371	0,0854	7,8656
20	30,000	8,9225	0,0892	8,1916
20	32,000	9,3046	0,0930	8,5125
20	34,000	9,6844	0,0968	8,8293
20	36,000	10,063	0,1006	9,1429
20	38,000	10,441	0,1044	9,4539
20	40,000	10,819	0,1082	9,7628
20	42,000	11,199	0,1120	10,071
20	44,000	11,581	0,1158	10,379
20	46,000	11,965	0,1197	10,686
20	48,000	12,353	0,1235	10,995
20	50,000	12,745	0,1275	11,304
20	52,000	13,142	0,1314	11,615
20	54,000	13,546	0,1355	11,930
20	56,000	13,957	0,1396	12,248
20	58,000	14,376	0,1438	12,569
20	60,000	14,804	0,1480	12,895
20	62,000	15,243	0,1524	13,227
20	64,000	15,695	0,1570	13,566
20	66,000	16,160	0,1616	13,912
20	68,000	16,641	0,1664	14,267
20	69,286	16,960	0,1696	14,500
20	70,000	17,140	0,1714	14,632
20	72,000	17,661	0,1766	15,010
20	74,000	18,205	0,1821	15,401
20	76,000	18,778	0,1878	15,809
20	78,000	19,384	0,1938	16,237
20	80,000	20,030	0,2003	16,687
20	82,000	20,723	0,2072	17,166
20	84,000	21,475	0,2148	17,679
20	86,000	22,301	0,2230	18,235
20	88,000	23,223	0,2322	18,846
20	90,000	24,274	0,2427	19,533

Higroscopía

Humedad relativa vs. Humedad de equilibrio



Apéndice

Capacidad de secado (sistema de secado con enfriamiento)				
Número de datos	X_{w1} (%)	X_{w2} (%)	ΔX (%)	\dot{m} (kg s ⁻¹)
1	20,000	14,500	6,4327	8,8889
2	21,000	14,500	7,6023	7,5214
3	22,000	14,500	8,7719	6,5185
4	23,000	14,500	9,9415	5,7516
5	24,000	14,500	11,111	5,1462
6	25,000	14,500	12,281	4,6559
7	26,000	14,500	13,450	4,2513
8	27,000	14,500	14,620	3,9111
9	28,000	14,500	15,789	3,6215
10	29,000	14,500	16,959	3,3716
11	30,000	14,500	18,129	3,1540
12	31,000	14,500	19,298	2,9630
13	32,000	14,500	20,468	2,7936
14	33,000	14,500	21,637	2,6427
15	34,000	14,500	22,807	2,5071
16	35,000	14,500	23,977	2,3848
Promedio	27,500	14,500	15,205	4,3802
Desviación estándar	4,7610	0,0000	5,5684	1,9266
CV (%)	17,313	0,0000	36,622	43,984
Capacidad de secado (sistema de secado sin enfriamiento)				
Número de datos	X_{w1} (%)	X_{w2} (%)	ΔX (%)	\dot{m} (kg s ⁻¹)
1	20,000	16,000	4,7619	12,222
2	21,000	16,000	5,9524	9,7776
3	22,000	16,000	7,1429	8,1479
4	23,000	16,000	8,3333	6,9840
5	24,000	16,000	9,5238	6,1110
6	25,000	16,000	10,714	5,4321
7	26,000	16,000	11,905	4,8887
8	27,000	16,000	13,095	4,4444
9	28,000	16,000	14,286	4,0739
10	29,000	16,000	15,476	3,7607
11	30,000	16,000	16,667	3,4919
12	31,000	16,000	17,857	3,2592
13	32,000	16,000	19,048	3,0554
14	33,000	16,000	20,238	2,8758
15	34,000	16,000	21,429	2,7159
16	35,000	16,000	22,619	2,5731
Promedio	27,500	16,000	13,691	5,2384
Desviación estándar	4,7610	0,0000	5,6679	2,7900
CV (%)	17,313	0,0000	41,399	53,261

Apéndice

Flujo másico de producto (sistema de secado con enfriamiento)				
Número de datos	X_w (%)	X (kg agua kg sólido seco ⁻¹)	\dot{m} (kg s ⁻¹)	S_s (kg sólido seco s ⁻¹)
1	14,500	0,1696	8,8889	7,5999
2	14,500	0,1696	7,5214	6,4307
3	14,500	0,1696	6,5185	5,5733
4	14,500	0,1696	5,7516	4,9176
5	14,500	0,1696	5,1462	4,4000
6	14,500	0,1696	4,6559	3,9808
7	14,500	0,1696	4,2513	3,6348
8	14,500	0,1696	3,9111	3,3440
9	14,500	0,1696	3,6215	3,0964
10	14,500	0,1696	3,3716	2,8827
11	14,500	0,1696	3,1540	2,6966
12	14,500	0,1696	2,9630	2,5333
13	14,500	0,1696	2,7936	2,3885
14	14,500	0,1696	2,6427	2,2595
15	14,500	0,1696	2,5071	2,1436
16	14,500	0,1696	2,3848	2,0390
Promedio	14,500	0,1696	4,3802	3,7450
Desviación estándar	0,0000	0,0000	1,9266	1,6473
CV (%)	0,0000	0,0000	43,984	43,987
Flujo másico de producto (sistema de secado sin enfriamiento)				
Número de datos	X_w (%)	X (kg agua kg sólido seco ⁻¹)	\dot{m} (kg s ⁻¹)	S_s (kg sólido seco s ⁻¹)
1	16,000	0,1905	12,222	10,266
2	16,000	0,1905	9,7776	8,2130
3	16,000	0,1905	8,1479	6,8441
4	16,000	0,1905	6,9840	5,8664
5	16,000	0,1905	6,1110	5,1331
6	16,000	0,1905	5,4321	4,5629
7	16,000	0,1905	4,8887	4,1064
8	16,000	0,1905	4,4444	3,7332
9	16,000	0,1905	4,0739	3,4220
10	16,000	0,1905	3,7607	3,1589
11	16,000	0,1905	3,4919	2,9331
12	16,000	0,1905	3,2592	2,7377
13	16,000	0,1905	3,0554	2,5665
14	16,000	0,1905	2,8758	2,4156
15	16,000	0,1905	2,7159	2,2813
16	16,000	0,1905	2,5731	2,1614
Promedio	16,000	0,1905	5,2384	4,4001
Desviación estándar	0,0000	0,0000	2,7900	2,3435
CV (%)	0,0000	0,0000	53,261	53,260

Apéndice

Flujo másico de agua evaporada (sistema de secado con enfriamiento)				
Número de datos	X_1 (kg agua kg sólido seco ⁻¹)	X_2 (kg agua kg sólido seco ⁻¹)	S_s (kg sólido seco s ⁻¹)	\dot{m}_w (kg agua s ⁻¹)
1	0,2500	0,1696	7,5999	0,6110
2	0,2658	0,1696	6,4307	0,6186
3	0,2821	0,1696	5,5733	0,6270
4	0,2987	0,1696	4,9176	0,6349
5	0,3158	0,1696	4,4000	0,6433
6	0,3333	0,1696	3,9808	0,6517
7	0,3514	0,1696	3,6348	0,6608
8	0,3699	0,1696	3,3440	0,6698
9	0,3889	0,1696	3,0964	0,6790
10	0,4085	0,1696	2,8827	0,6887
11	0,4286	0,1696	2,6966	0,6984
12	0,4493	0,1696	2,5333	0,7086
13	0,4706	0,1696	2,3885	0,7189
14	0,4925	0,1696	2,2595	0,7296
15	0,5152	0,1696	2,1436	0,7408
16	0,5385	0,1696	2,0390	0,7522
Promedio	0,3849	0,1696	3,7450	0,6771
Desviación estándar	0,0914	0,0000	1,6473	0,0447
CV (%)	23,746	0,0000	43,987	6,6017
Flujo másico de agua evaporada (sistema de secado sin enfriamiento)				
Número de datos	X_1 (kg agua kg sólido seco ⁻¹)	X_2 (kg agua kg sólido seco ⁻¹)	S_s (kg sólido seco s ⁻¹)	\dot{m}_w (kg agua s ⁻¹)
1	0,2500	0,1905	10,266	0,6108
2	0,2658	0,1905	8,2130	0,6184
3	0,2821	0,1905	6,8441	0,6269
4	0,2987	0,1905	5,8664	0,6347
5	0,3158	0,1905	5,1331	0,6432
6	0,3333	0,1905	4,5629	0,6516
7	0,3514	0,1905	4,1064	0,6607
8	0,3699	0,1905	3,7332	0,6697
9	0,3889	0,1905	3,4220	0,6789
10	0,4085	0,1905	3,1589	0,6886
11	0,4286	0,1905	2,9331	0,6984
12	0,4493	0,1905	2,7377	0,7085
13	0,4706	0,1905	2,5665	0,7189
14	0,4925	0,1905	2,4156	0,7295
15	0,5152	0,1905	2,2813	0,7407
16	0,5385	0,1905	2,1614	0,7522
Promedio	0,3849	0,1905	4,4001	0,6770
Desviación estándar	0,0914	0,0000	2,3435	0,0447
CV (%)	23,746	0,0000	53,260	6,6027

Apéndice

Humedad absoluta del aire (sistema de secado con enfriamiento)				
Número de datos	\dot{m}_w (kg agua s ⁻¹)	G_s (kg aire seco s ⁻¹)	Y_1 (kg agua kg aire seco ⁻¹)	Y_2 (kg agua kg aire seco ⁻¹)
1	0,6110	78,333	0,0101	0,0179
2	0,6186	78,333	0,0101	0,0180
3	0,6270	78,333	0,0101	0,0181
4	0,6349	78,333	0,0101	0,0182
5	0,6433	78,333	0,0101	0,0183
6	0,6517	78,333	0,0101	0,0184
7	0,6608	78,333	0,0101	0,0185
8	0,6698	78,333	0,0101	0,0187
9	0,6790	78,333	0,0101	0,0188
10	0,6887	78,333	0,0101	0,0189
11	0,6984	78,333	0,0101	0,0190
12	0,7086	78,333	0,0101	0,0191
13	0,7189	78,333	0,0101	0,0193
14	0,7296	78,333	0,0101	0,0194
15	0,7408	78,333	0,0101	0,0196
16	0,7522	78,333	0,0101	0,0197
Promedio	0,6771	78,333	0,0101	0,0187
Desviación estándar	0,0447	0,0000	0,0000	0,0006
CV (%)	6,6017	0,0000	0,0000	3,2086
Humedad absoluta del aire (sistema de secado sin enfriamiento)				
Número de datos	\dot{m}_w (kg agua s ⁻¹)	G_s (kg aire seco s ⁻¹)	Y_1 (kg agua kg aire seco ⁻¹)	Y_2 (kg agua kg aire seco ⁻¹)
1	0,6108	52,222	0,0101	0,0218
2	0,6184	52,222	0,0101	0,0219
3	0,6269	52,222	0,0101	0,0221
4	0,6347	52,222	0,0101	0,0223
5	0,6432	52,222	0,0101	0,0224
6	0,6516	52,222	0,0101	0,0226
7	0,6607	52,222	0,0101	0,0228
8	0,6697	52,222	0,0101	0,0229
9	0,6789	52,222	0,0101	0,0231
10	0,6886	52,222	0,0101	0,0233
11	0,6984	52,222	0,0101	0,0235
12	0,7085	52,222	0,0101	0,0237
13	0,7189	52,222	0,0101	0,0239
14	0,7295	52,222	0,0101	0,0241
15	0,7407	52,222	0,0101	0,0243
16	0,7522	52,222	0,0101	0,0245
Promedio	0,6770	52,222	0,0101	0,0231
Desviación estándar	0,0447	0,0000	0,0000	0,0009
CV (%)	6,6027	0,0000	0,0000	3,8961

Apéndice

Entalpía específica del aire (sistema de secado con enfriamiento)				
Número de datos	T_{G1} (°C)	T_{G2} (°C)	H_{G1} (kJ kg aire seco ⁻¹)	H_{G2} (kJ kg aire seco ⁻¹)
1	73,333	50,000	100,35	96,713
2	73,333	49,450	100,35	96,401
3	73,333	48,900	100,35	96,089
4	73,333	48,350	100,35	95,777
5	73,333	47,800	100,35	95,465
6	73,333	47,250	100,35	95,153
7	73,333	46,700	100,35	94,840
8	73,333	46,150	100,35	94,786
9	73,333	45,600	100,35	94,473
10	73,333	45,050	100,35	94,160
11	73,333	44,500	100,35	93,846
12	73,333	43,950	100,35	93,532
13	73,333	43,400	100,35	93,477
14	73,333	42,850	100,35	93,162
15	73,333	42,300	100,35	93,106
16	73,333	41,750	100,35	92,791
Promedio	73,333	45,875	100,35	94,611
Desviación estándar	0,0000	2,6185	0,0000	1,2439
CV (%)	0,0000	5,7079	0,0000	1,3148
Entalpía específica del aire (sistema de secado sin enfriamiento)				
Número de datos	T_{G1} (°C)	T_{G2} (°C)	H_{G1} (kJ kg aire seco ⁻¹)	H_{G2} (kJ kg aire seco ⁻¹)
1	100,00	60,000	127,65	117,30
2	100,00	59,450	127,65	116,98
3	100,00	58,900	127,65	116,93
4	100,00	58,350	127,65	116,88
5	100,00	57,800	127,65	116,56
6	100,00	57,250	127,65	116,51
7	100,00	56,700	127,65	116,45
8	100,00	56,150	127,65	116,14
9	100,00	55,600	127,65	116,08
10	100,00	55,050	127,65	116,03
11	100,00	54,500	127,65	115,97
12	100,00	53,950	127,65	115,92
13	100,00	53,400	127,65	115,86
14	100,00	52,850	127,65	115,80
15	100,00	52,300	127,65	115,75
16	100,00	51,750	127,65	115,69
Promedio	100,00	55,875	127,65	116,30
Desviación estándar	0,0000	2,6185	0,0000	0,5065
CV (%)	0,0000	4,6864	0,0000	0,4355

Apéndice

Entalpía específica del producto (sistema de secado con enfriamiento)				
Número de datos	T_{s1} (°C)	T_{s2} (°C)	H_{s1} (kJ kg sólido seco ⁻¹)	H_{s2} (kJ kg sólido seco ⁻¹)
1	20,000	38,265	53,903	91,390
2	20,000	37,715	55,223	90,044
3	20,000	37,165	56,584	88,700
4	20,000	36,615	57,971	87,357
5	20,000	36,065	59,399	86,015
6	20,000	35,515	60,861	84,673
7	20,000	34,965	62,373	83,332
8	20,000	34,415	63,918	81,992
9	20,000	33,865	65,505	80,653
10	20,000	33,315	67,143	79,315
11	20,000	32,765	68,822	77,978
12	20,000	32,215	70,551	76,641
13	20,000	31,665	72,330	75,306
14	20,000	31,115	74,159	73,971
15	20,000	30,565	76,055	72,637
16	20,000	30,015	78,002	71,304
Promedio	20,000	34,140	65,175	81,332
Desviación estándar	0,0000	2,6185	7,6342	6,3751
CV (%)	0,0000	7,6699	11,713	7,8384
Entalpía específica del producto (sistema de secado sin enfriamiento)				
Número de datos	T_{s1} (°C)	T_{s2} (°C)	H_{s1} (kJ kg sólido seco ⁻¹)	H_{s2} (kJ kg sólido seco ⁻¹)
1	20,000	42,919	53,903	106,55
2	20,000	42,369	55,223	105,15
3	20,000	41,819	56,584	103,75
4	20,000	41,269	57,971	102,36
5	20,000	40,719	59,399	100,96
6	20,000	40,169	60,861	99,562
7	20,000	39,619	62,373	98,166
8	20,000	39,069	63,918	96,771
9	20,000	38,519	65,505	95,376
10	20,000	37,969	67,143	93,983
11	20,000	37,419	68,822	92,590
12	20,000	36,869	70,551	91,198
13	20,000	36,319	72,330	89,808
14	20,000	35,769	74,159	88,417
15	20,000	35,219	76,055	87,028
16	20,000	34,669	78,002	85,640
Promedio	20,000	38,794	65,175	96,082
Desviación estándar	0,0000	2,6185	7,6342	6,6377
CV (%)	0,0000	6,7498	11,713	6,9084

Apéndice

Pérdidas caloríficas (sistema de secado con enfriamiento)				
Número de datos	ΔX (%)	$G_s(H_{G1} - H_{G2})$ (kW)	$S_s(H_{S2} - H_{S1})$ (kW)	Q (kW)
1	6,4327	284,90	284,90	0,0000
2	7,6023	309,34	223,92	85,420
3	8,7719	333,78	178,99	154,79
4	9,9415	358,22	144,51	213,71
5	11,111	382,66	117,11	265,55
6	12,281	407,10	94,791	312,31
7	13,450	431,61	76,182	355,43
8	14,620	435,84	60,439	375,40
9	15,789	460,36	46,904	413,46
10	16,959	484,88	35,088	449,79
11	18,129	509,48	24,690	484,79
12	19,298	534,07	15,428	518,64
13	20,468	538,38	7,1082	531,27
14	21,637	563,06	-0,4248	563,48
15	22,807	567,44	-7,3268	574,77
16	23,977	592,12	-13,657	605,78
Promedio	15,205	449,58	80,541	369,04
Desviación estándar	5,5684	97,433	88,380	183,95
CV (%)	36,622	21,672	109,73	49,846
Pérdidas caloríficas (sistema de secado sin enfriamiento)				
Número de datos	ΔX (%)	$G_s(H_{G1} - H_{G2})$ (kW)	$S_s(H_{S2} - H_{S1})$ (kW)	Q (kW)
1	4,7619	540,50	540,50	0,0000
2	5,9524	557,21	410,05	147,16
3	7,1429	559,82	322,81	237,01
4	8,3333	562,43	260,40	302,03
5	9,5238	579,14	213,34	365,80
6	10,714	581,75	176,59	405,16
7	11,905	584,89	146,98	437,91
8	13,095	601,08	122,65	478,43
9	14,286	604,21	102,22	501,99
10	15,476	606,82	84,785	522,04
11	16,667	609,95	69,714	540,24
12	17,857	612,56	56,525	556,04
13	19,048	615,70	44,857	570,84
14	20,238	618,83	34,442	584,39
15	21,429	621,44	25,033	596,41
16	22,619	624,58	16,509	608,07
Promedio	13,691	592,56	164,21	428,34
Desviación estándar	5,6679	26,450	151,43	177,08
CV (%)	41,399	4,4637	92,217	41,341

Apéndice

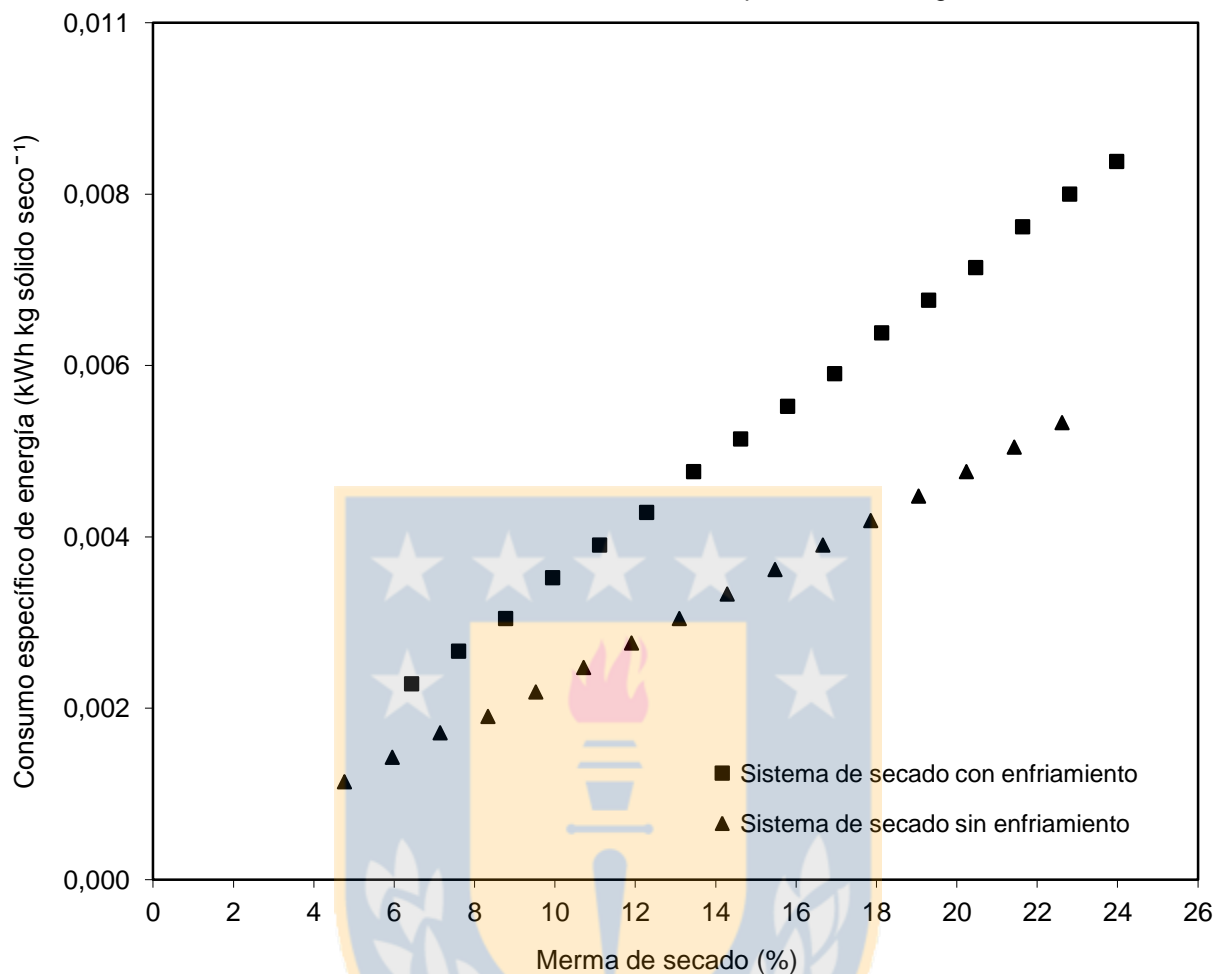
Potencia de ventiladores (sistema de secado con enfriamiento)				
Número de datos	V_G (m ³ kg aire seco ⁻¹)	G_V (m ³ s ⁻¹)	ΔP (kPa)	N_V (kW)
1	0,8440	66,113	0,3923	64,840
2	0,8440	66,113	0,3923	64,840
3	0,8440	66,113	0,3923	64,840
4	0,8440	66,113	0,3923	64,840
5	0,8440	66,113	0,3923	64,840
6	0,8440	66,113	0,3923	64,840
7	0,8440	66,113	0,3923	64,840
8	0,8440	66,113	0,3923	64,840
9	0,8440	66,113	0,3923	64,840
10	0,8440	66,113	0,3923	64,840
11	0,8440	66,113	0,3923	64,840
12	0,8440	66,113	0,3923	64,840
13	0,8440	66,113	0,3923	64,840
14	0,8440	66,113	0,3923	64,840
15	0,8440	66,113	0,3923	64,840
16	0,8440	66,113	0,3923	64,840
Promedio	0,8440	66,113	0,3923	64,840
Desviación estándar	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
CV (%)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Potencia de ventiladores (sistema de secado sin enfriamiento)				
Número de datos	V_G (m ³ kg aire seco ⁻¹)	G_V (m ³ s ⁻¹)	ΔP (kPa)	N_V (kW)
1	0,8440	44,075	0,3923	43,227
2	0,8440	44,075	0,3923	43,227
3	0,8440	44,075	0,3923	43,227
4	0,8440	44,075	0,3923	43,227
5	0,8440	44,075	0,3923	43,227
6	0,8440	44,075	0,3923	43,227
7	0,8440	44,075	0,3923	43,227
8	0,8440	44,075	0,3923	43,227
9	0,8440	44,075	0,3923	43,227
10	0,8440	44,075	0,3923	43,227
11	0,8440	44,075	0,3923	43,227
12	0,8440	44,075	0,3923	43,227
13	0,8440	44,075	0,3923	43,227
14	0,8440	44,075	0,3923	43,227
15	0,8440	44,075	0,3923	43,227
16	0,8440	44,075	0,3923	43,227
Promedio	0,8440	44,075	0,3923	43,227
Desviación estándar	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
CV (%)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Apéndice

Consumo específico de energía (sistema de secado con enfriamiento)				
Número de datos	ΔX (%)	S_s (kg sólido seco h^{-1})	N_v (kW)	E_v (kWh kg sólido seco $^{-1}$)
1	6,4327	27360	64,840	0,0024
2	7,6023	23151	64,840	0,0028
3	8,7719	20064	64,840	0,0032
4	9,9415	17703	64,840	0,0037
5	11,111	15840	64,840	0,0041
6	12,281	14331	64,840	0,0045
7	13,450	13085	64,840	0,0050
8	14,620	12038	64,840	0,0054
9	15,789	11147	64,840	0,0058
10	16,959	10378	64,840	0,0062
11	18,129	9707,8	64,840	0,0067
12	19,298	9119,9	64,840	0,0071
13	20,468	8598,6	64,840	0,0075
14	21,637	8134,2	64,840	0,0080
15	22,807	7717,0	64,840	0,0084
16	23,977	7340,4	64,840	0,0088
Promedio	15,205	13482	64,840	0,0056
Desviación estándar	5,5684	5930,2	0,0000	0,0020
CV (%)	36,622	43,986	0,0000	35,714
Consumo específico de energía (sistema de secado sin enfriamiento)				
Número de datos	ΔX (%)	S_s (kg sólido seco h^{-1})	N_v (kW)	E_v (kWh kg sólido seco $^{-1}$)
1	4,7619	36958	43,227	0,0012
2	5,9524	29567	43,227	0,0015
3	7,1429	24639	43,227	0,0018
4	8,3333	21119	43,227	0,0020
5	9,5238	18479	43,227	0,0023
6	10,714	16426	43,227	0,0026
7	11,905	14783	43,227	0,0029
8	13,095	13440	43,227	0,0032
9	14,286	12319	43,227	0,0035
10	15,476	11372	43,227	0,0038
11	16,667	10559	43,227	0,0041
12	17,857	9855,7	43,227	0,0044
13	19,048	9239,4	43,227	0,0047
14	20,238	8696,2	43,227	0,0050
15	21,429	8212,7	43,227	0,0053
16	22,619	7781,0	43,227	0,0056
Promedio	13,691	15840	43,227	0,0034
Desviación estándar	5,6679	8436,7	0,0000	0,0014
CV (%)	41,399	53,262	0,0000	41,176

Apéndice

Merma de secado vs. Consumo específico de energía



Análisis de varianza (consumo específico de energía)				
Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F-calculado
Inter-sistema	3,9828E-05	1	3,9828E-05	12,977
Intra-sistema	9,2074E-05	30	3,0691E-06	
Total	1,3190E-04	31		
F-tabulado (0,05) = 4,1709 < F-calculado → existen diferencias significativas				
Prueba de comparación de medias (test de Scheffé)				
m	n ₁	n ₂	N	α
2	16	16	32	0,05
\bar{x}	\bar{y}	$ \bar{x} - \bar{y} $	CME	F-tabulado
0,0056	0,0034	0,0022	3,0691E-06	4,1709
VC = 0,0013 < $ \bar{x} - \bar{y} $ → existen diferencias significativas				

Apéndice

Entalpía específica del aire				
Número de datos	T_{G_0} (°C)	T_{G_1} (°C)	H_{G_0} (kJ kg aire seco ⁻¹)	H_{G_1} (kJ kg aire seco ⁻¹)
1	20,000	105,00	45,748	132,77
2	20,000	105,00	45,748	132,77
3	20,000	105,00	45,748	132,77
4	20,000	105,00	45,748	132,77
5	20,000	105,00	45,748	132,77
6	20,000	105,00	45,748	132,77
7	20,000	105,00	45,748	132,77
8	20,000	105,00	45,748	132,77
9	20,000	105,00	45,748	132,77
10	20,000	105,00	45,748	132,77
11	20,000	105,00	45,748	132,77
12	20,000	105,00	45,748	132,77
13	20,000	105,00	45,748	132,77
14	20,000	105,00	45,748	132,77
15	20,000	105,00	45,748	132,77
16	20,000	105,00	45,748	132,77
Promedio	20,000	105,00	45,748	132,77
Desviación estándar	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
CV (%)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Energía requerida para el calentamiento del aire				
Número de datos	G_s (kg aire seco s ⁻¹)	H_{G_0} (kJ kg aire seco ⁻¹)	H_{G_1} (kJ kg aire seco ⁻¹)	$G_s(H_{G_1} - H_{G_0})$ (kW)
1	26,111	45,748	132,77	2272,2
2	26,111	45,748	132,77	2272,2
3	26,111	45,748	132,77	2272,2
4	26,111	45,748	132,77	2272,2
5	26,111	45,748	132,77	2272,2
6	26,111	45,748	132,77	2272,2
7	26,111	45,748	132,77	2272,2
8	26,111	45,748	132,77	2272,2
9	26,111	45,748	132,77	2272,2
10	26,111	45,748	132,77	2272,2
11	26,111	45,748	132,77	2272,2
12	26,111	45,748	132,77	2272,2
13	26,111	45,748	132,77	2272,2
14	26,111	45,748	132,77	2272,2
15	26,111	45,748	132,77	2272,2
16	26,111	45,748	132,77	2272,2
Promedio	26,111	45,748	132,77	2272,2
Desviación estándar	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
CV (%)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Apéndice

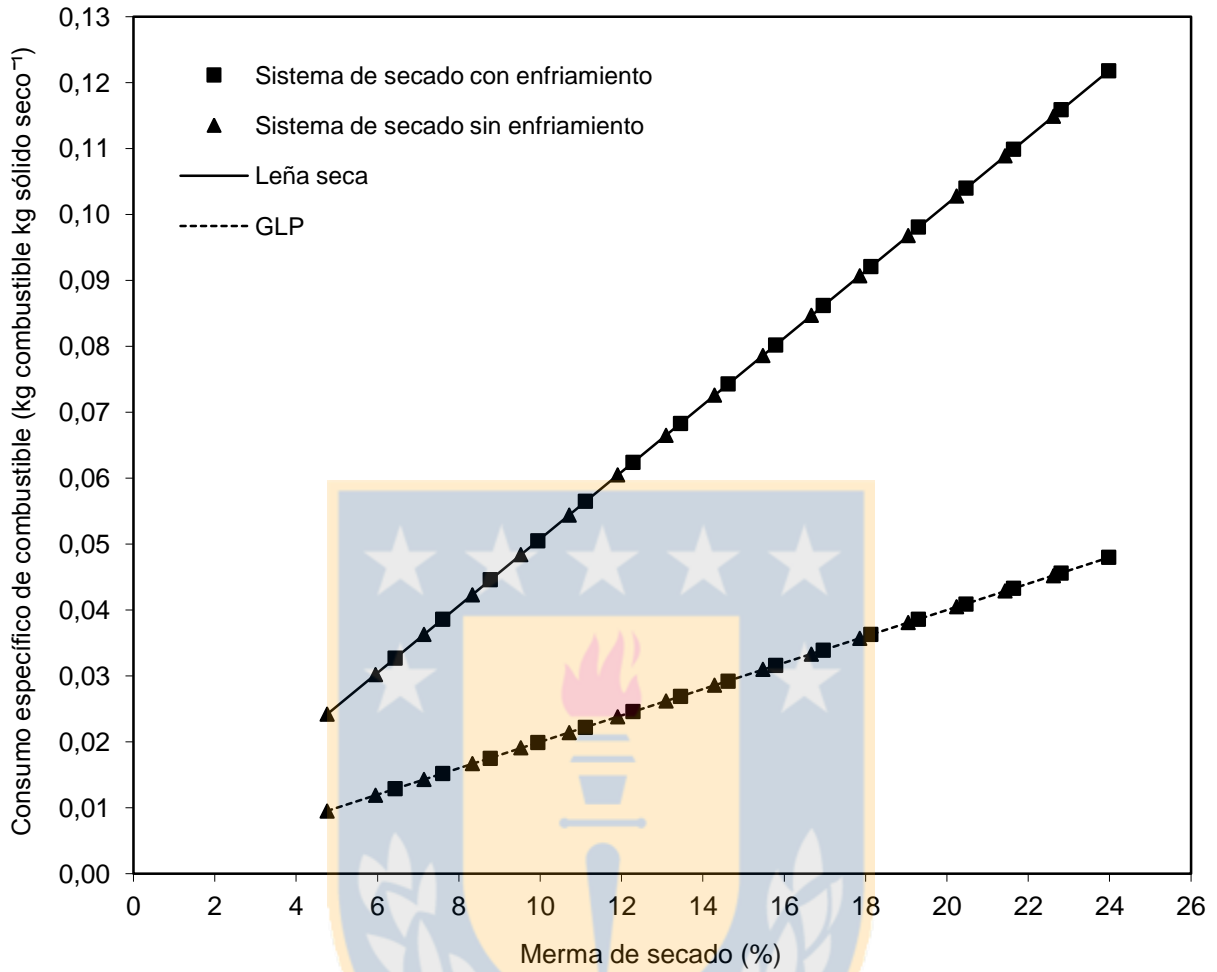
Flujo másico de combustible (leña seca)				
Número de datos	$G_S(H_{G1} - H_{G0})$ (kW)	η_T (%)	PC (kJ kg leña ⁻¹)	\dot{m}_c (kg leña s ⁻¹)
1	2272,2	50,000	18296	0,2484
2	2272,2	50,000	18296	0,2484
3	2272,2	50,000	18296	0,2484
4	2272,2	50,000	18296	0,2484
5	2272,2	50,000	18296	0,2484
6	2272,2	50,000	18296	0,2484
7	2272,2	50,000	18296	0,2484
8	2272,2	50,000	18296	0,2484
9	2272,2	50,000	18296	0,2484
10	2272,2	50,000	18296	0,2484
11	2272,2	50,000	18296	0,2484
12	2272,2	50,000	18296	0,2484
13	2272,2	50,000	18296	0,2484
14	2272,2	50,000	18296	0,2484
15	2272,2	50,000	18296	0,2484
16	2272,2	50,000	18296	0,2484
Promedio	2272,2	50,000	18296	0,2484
Desviación estándar	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
CV (%)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Flujo másico de combustible (GLP)				
Número de datos	$G_S(H_{G1} - H_{G0})$ (kW)	η_T (%)	PC (kJ kg GLP ⁻¹)	\dot{m}_c (kg GLP s ⁻¹)
1	2272,2	50,000	46473	0,0978
2	2272,2	50,000	46473	0,0978
3	2272,2	50,000	46473	0,0978
4	2272,2	50,000	46473	0,0978
5	2272,2	50,000	46473	0,0978
6	2272,2	50,000	46473	0,0978
7	2272,2	50,000	46473	0,0978
8	2272,2	50,000	46473	0,0978
9	2272,2	50,000	46473	0,0978
10	2272,2	50,000	46473	0,0978
11	2272,2	50,000	46473	0,0978
12	2272,2	50,000	46473	0,0978
13	2272,2	50,000	46473	0,0978
14	2272,2	50,000	46473	0,0978
15	2272,2	50,000	46473	0,0978
16	2272,2	50,000	46473	0,0978
Promedio	2272,2	50,000	46473	0,0978
Desviación estándar	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
CV (%)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Apéndice

Consumo específico de combustible (sistema de secado con enfriamiento)				
Número de datos	ΔX (%)	S_s (kg sólido seco s^{-1})	R_c (kg leña kg sólido seco $^{-1}$)	R_c (kg GLP kg sólido seco $^{-1}$)
1	6,4327	7,5999	0,0327	0,0129
2	7,6023	6,4307	0,0386	0,0152
3	8,7719	5,5733	0,0446	0,0175
4	9,9415	4,9176	0,0505	0,0199
5	11,111	4,4000	0,0565	0,0222
6	12,281	3,9808	0,0624	0,0246
7	13,450	3,6348	0,0683	0,0269
8	14,620	3,3440	0,0743	0,0292
9	15,789	3,0964	0,0802	0,0316
10	16,959	2,8827	0,0862	0,0339
11	18,129	2,6966	0,0921	0,0363
12	19,298	2,5333	0,0981	0,0386
13	20,468	2,3885	0,1040	0,0409
14	21,637	2,2595	0,1099	0,0433
15	22,807	2,1436	0,1159	0,0456
16	23,977	2,0390	0,1218	0,0480
Promedio	15,205	3,7450	0,0773	0,0304
Desviación estándar	5,5684	1,6473	0,0283	0,0111
CV (%)	36,622	43,987	36,611	36,513
Consumo específico de combustible (sistema de secado sin enfriamiento)				
Número de datos	ΔX (%)	S_s (kg sólido seco s^{-1})	R_c (kg leña kg sólido seco $^{-1}$)	R_c (kg GLP kg sólido seco $^{-1}$)
1	4,7619	10,266	0,0242	0,0095
2	5,9524	8,2130	0,0302	0,0119
3	7,1429	6,8441	0,0363	0,0143
4	8,3333	5,8664	0,0423	0,0167
5	9,5238	5,1331	0,0484	0,0191
6	10,714	4,5629	0,0544	0,0214
7	11,905	4,1064	0,0605	0,0238
8	13,095	3,7332	0,0665	0,0262
9	14,286	3,4220	0,0726	0,0286
10	15,476	3,1589	0,0786	0,0310
11	16,667	2,9331	0,0847	0,0333
12	17,857	2,7377	0,0907	0,0357
13	19,048	2,5665	0,0968	0,0381
14	20,238	2,4156	0,1028	0,0405
15	21,429	2,2813	0,1089	0,0429
16	22,619	2,1614	0,1149	0,0452
Promedio	13,691	4,4001	0,0696	0,0274
Desviación estándar	5,6679	2,3435	0,0288	0,0113
CV (%)	41,399	53,260	41,379	41,241

Apéndice

Merma de secado vs. Consumo específico de combustible



Análisis de varianza (consumo específico de combustible)				
Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F-calculado
Inter-sistema	4,7509E-04	1	4,7509E-04	0,5830
Intra-sistema	2,4447E-02	30	8,1489E-04	
Total	2,4922E-02	31		
F-tabulado (0,05) = 4,1709 > F-calculado → no existen diferencias significativas				
Inter-sistema	7,3205E-05	1	7,3205E-05	0,5796
Intra-sistema	3,7891E-03	30	1,2630E-04	
Total	3,8623E-03	31		
F-tabulado (0,05) = 4,1709 > F-calculado → no existen diferencias significativas				
Prueba de comparación de medias (test de Scheffé)				
m	n ₁	n ₂	N	α
2	16	16	32	0,05
\bar{x}	\bar{y}	$ \bar{x} - \bar{y} $	CME	F-tabulado
0,0773	0,0696	0,0077	8,1489E-04	4,1709
VC = 0,0206 > $ \bar{x} - \bar{y} $ → no existen diferencias significativas				
m	n ₁	n ₂	N	α
2	16	16	32	0,05
\bar{x}	\bar{y}	$ \bar{x} - \bar{y} $	CME	F-tabulado
0,0304	0,0274	0,0030	1,2630E-04	4,1709
VC = 0,0081 > $ \bar{x} - \bar{y} $ → no existen diferencias significativas				

Apéndice

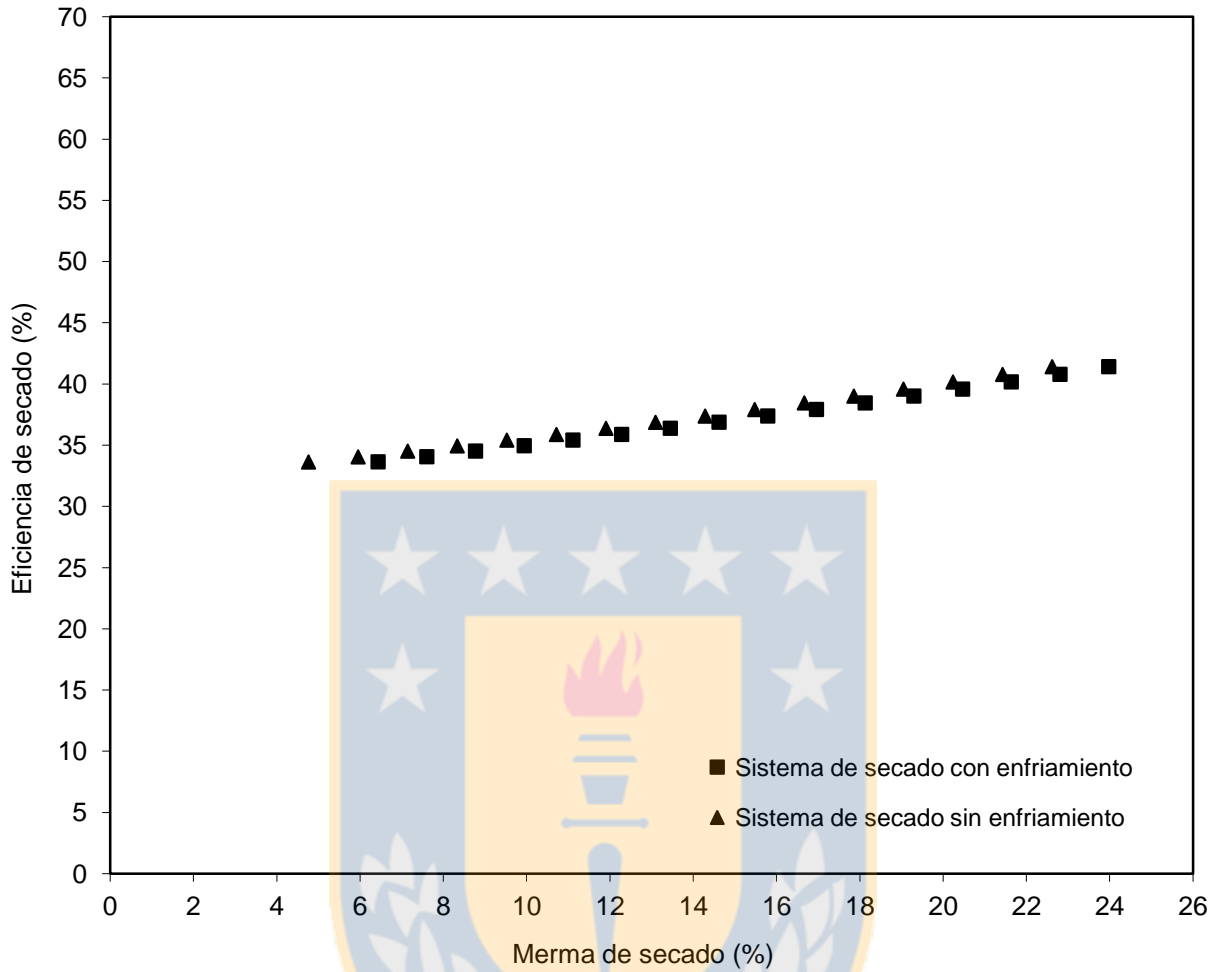
Energía requerida para evaporar el agua (sistema de secado con enfriamiento)				
Número de datos	ΔX (%)	\dot{m}_w (kg agua s ⁻¹)	λ (kJ kg agua ⁻¹)	$\dot{m}_w \lambda$ (kW)
1	6,4327	0,6110	2502,3	1528,9
2	7,6023	0,6186	2502,3	1547,9
3	8,7719	0,6270	2502,3	1568,9
4	9,9415	0,6349	2502,3	1588,7
5	11,111	0,6433	2502,3	1609,7
6	12,281	0,6517	2502,3	1630,7
7	13,450	0,6608	2502,3	1653,5
8	14,620	0,6698	2502,3	1676,0
9	15,789	0,6790	2502,3	1699,1
10	16,959	0,6887	2502,3	1723,3
11	18,129	0,6984	2502,3	1747,6
12	19,298	0,7086	2502,3	1773,1
13	20,468	0,7189	2502,3	1798,9
14	21,637	0,7296	2502,3	1825,7
15	22,807	0,7408	2502,3	1853,7
16	23,977	0,7522	2502,3	1882,2
Promedio	15,205	0,6771	2502,3	1694,2
Desviación estándar	5,5684	0,0447	0,0000	111,86
CV (%)	36,622	6,6017	0,0000	6,6025
Energía requerida para evaporar el agua (sistema de secado sin enfriamiento)				
Número de datos	ΔX (%)	\dot{m}_w (kg agua s ⁻¹)	λ (kJ kg agua ⁻¹)	$\dot{m}_w \lambda$ (kW)
1	4,7619	0,6108	2502,3	1528,4
2	5,9524	0,6184	2502,3	1547,4
3	7,1429	0,6269	2502,3	1568,7
4	8,3333	0,6347	2502,3	1588,2
5	9,5238	0,6432	2502,3	1609,5
6	10,714	0,6516	2502,3	1630,5
7	11,905	0,6607	2502,3	1653,3
8	13,095	0,6697	2502,3	1675,8
9	14,286	0,6789	2502,3	1698,8
10	15,476	0,6886	2502,3	1723,1
11	16,667	0,6984	2502,3	1747,6
12	17,857	0,7085	2502,3	1772,9
13	19,048	0,7189	2502,3	1798,9
14	20,238	0,7295	2502,3	1825,4
15	21,429	0,7407	2502,3	1853,5
16	22,619	0,7522	2502,3	1882,2
Promedio	13,691	0,6770	2502,3	1694,0
Desviación estándar	5,6679	0,0447	0,0000	111,97
CV (%)	41,399	6,6027	0,0000	6,6098

Apéndice

Eficiencia de secado (sistema de secado con enfriamiento)				
Número de datos	ΔX (%)	$\dot{m}_w \lambda$ (kW)	$\dot{m}_c PC$ (kW)	η_s (%)
1	6,4327	1528,9	4544,7	33,641
2	7,6023	1547,9	4544,7	34,059
3	8,7719	1568,9	4544,7	34,522
4	9,9415	1588,7	4544,7	34,957
5	11,111	1609,7	4544,7	35,419
6	12,281	1630,7	4544,7	35,881
7	13,450	1653,5	4544,7	36,383
8	14,620	1676,0	4544,7	36,878
9	15,789	1699,1	4544,7	37,386
10	16,959	1723,3	4544,7	37,919
11	18,129	1747,6	4544,7	38,454
12	19,298	1773,1	4544,7	39,015
13	20,468	1798,9	4544,7	39,582
14	21,637	1825,7	4544,7	40,172
15	22,807	1853,7	4544,7	40,788
16	23,977	1882,2	4544,7	41,415
Promedio	15,205	1694,2	4544,7	37,279
Desviación estándar	5,5684	111,86	0,0000	2,4615
CV (%)	36,622	6,6025	0,0000	6,6029
Eficiencia de secado (sistema de secado sin enfriamiento)				
Número de datos	ΔX (%)	$\dot{m}_w \lambda$ (kW)	$\dot{m}_c PC$ (kW)	η_s (%)
1	4,7619	1528,4	4545,1	33,627
2	5,9524	1547,4	4545,1	34,045
3	7,1429	1568,7	4545,1	34,514
4	8,3333	1588,2	4545,1	34,943
5	9,524	1609,5	4545,1	35,412
6	10,714	1630,5	4545,1	35,874
7	11,905	1653,3	4545,1	36,375
8	13,095	1675,8	4545,1	36,870
9	14,286	1698,8	4545,1	37,377
10	15,476	1723,1	4545,1	37,911
11	16,667	1747,6	4545,1	38,450
12	17,857	1772,9	4545,1	39,007
13	19,048	1798,9	4545,1	39,579
14	20,238	1825,4	4545,1	40,162
15	21,429	1853,5	4545,1	40,780
16	22,619	1882,2	4545,1	41,412
Promedio	13,691	1694,0	4545,1	37,271
Desviación estándar	5,6679	111,97	0,0000	2,4637
CV (%)	41,399	6,6098	0,0000	6,6102

Apéndice

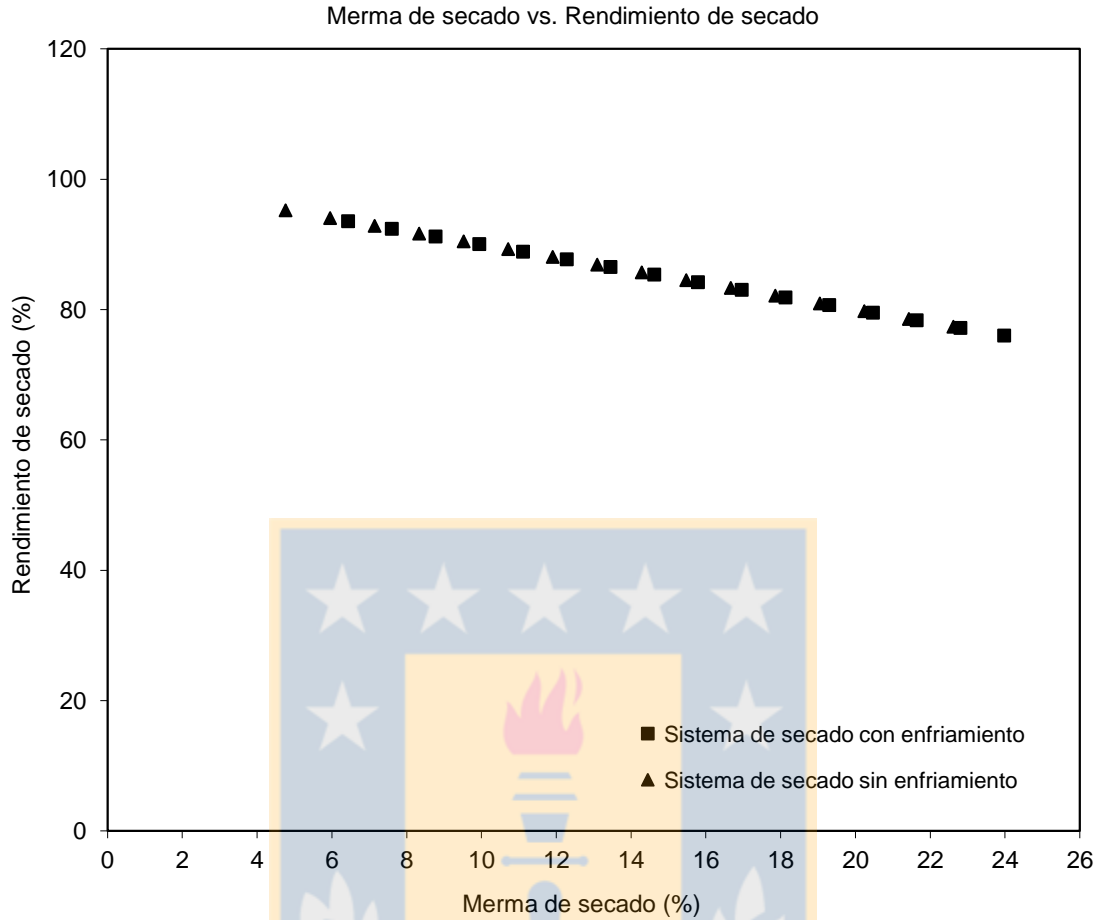
Merma de secado vs. Eficiencia de secado



Análisis de varianza (eficiencia de secado)				
Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F-calculado
Inter-sistema	5,5278E-04	1	5,5278E-04	0,0001
Intra-sistema	1,8193E+02	30	6,0643E+00	
Total	1,8193E+02	31		
F-tabulado (0,05) = 4,1709 > F-calculado → no existen diferencias significativas				
Prueba de comparación de medias (test de Scheffé)				
m	n ₁	n ₂	N	α
2	16	16	32	0,05
\bar{x}	\bar{y}	$ \bar{x} - \bar{y} $	CME	F-tabulado
37,279	37,271	0,0080	6,0643E+00	4,1709
VC = 1,7781 > $ \bar{x} - \bar{y} $ → no existen diferencias significativas				

Apéndice

Rendimiento de secado (sistema de secado con enfriamiento)				
Número de datos	ΔX (%)	X_1 (kg agua kg sólido seco ⁻¹)	X_2 (kg agua kg sólido seco ⁻¹)	R_s (%)
1	6,4327	0,2500	0,1696	93,568
2	7,6023	0,2658	0,1696	92,400
3	8,7719	0,2821	0,1696	91,225
4	9,9415	0,2987	0,1696	90,059
5	11,111	0,3158	0,1696	88,889
6	12,281	0,3333	0,1696	87,722
7	13,450	0,3514	0,1696	86,547
8	14,620	0,3699	0,1696	85,378
9	15,789	0,3889	0,1696	84,211
10	16,959	0,4085	0,1696	83,039
11	18,129	0,4286	0,1696	81,870
12	19,298	0,4493	0,1696	80,701
13	20,468	0,4706	0,1696	79,532
14	21,637	0,4925	0,1696	78,365
15	22,807	0,5152	0,1696	77,191
16	23,977	0,5385	0,1696	76,022
Promedio	15,205	0,3849	0,1696	84,795
Desviación estándar	5,5684	0,0914	0,0000	5,5688
CV (%)	36,622	23,746	0,0000	6,5674
Rendimiento de secado (sistema de secado sin enfriamiento)				
Número de datos	ΔX (%)	X_1 (kg agua kg sólido seco ⁻¹)	X_2 (kg agua kg sólido seco ⁻¹)	R_s (%)
1	4,7619	0,2500	0,1905	95,240
2	5,9524	0,2658	0,1905	94,051
3	7,1429	0,2821	0,1905	92,855
4	8,3333	0,2987	0,1905	91,669
5	9,5238	0,3158	0,1905	90,477
6	10,714	0,3333	0,1905	89,290
7	11,905	0,3514	0,1905	88,094
8	13,095	0,3699	0,1905	86,904
9	14,286	0,3889	0,1905	85,715
10	15,476	0,4085	0,1905	84,523
11	16,667	0,4286	0,1905	83,333
12	17,857	0,4493	0,1905	82,143
13	19,048	0,4706	0,1905	80,953
14	20,238	0,4925	0,1905	79,765
15	21,429	0,5152	0,1905	78,570
16	22,619	0,5385	0,1905	77,381
Promedio	13,691	0,3849	0,1905	86,310
Desviación estándar	5,6679	0,0914	0,0000	5,6683
CV (%)	41,399	23,746	0,0000	6,5674



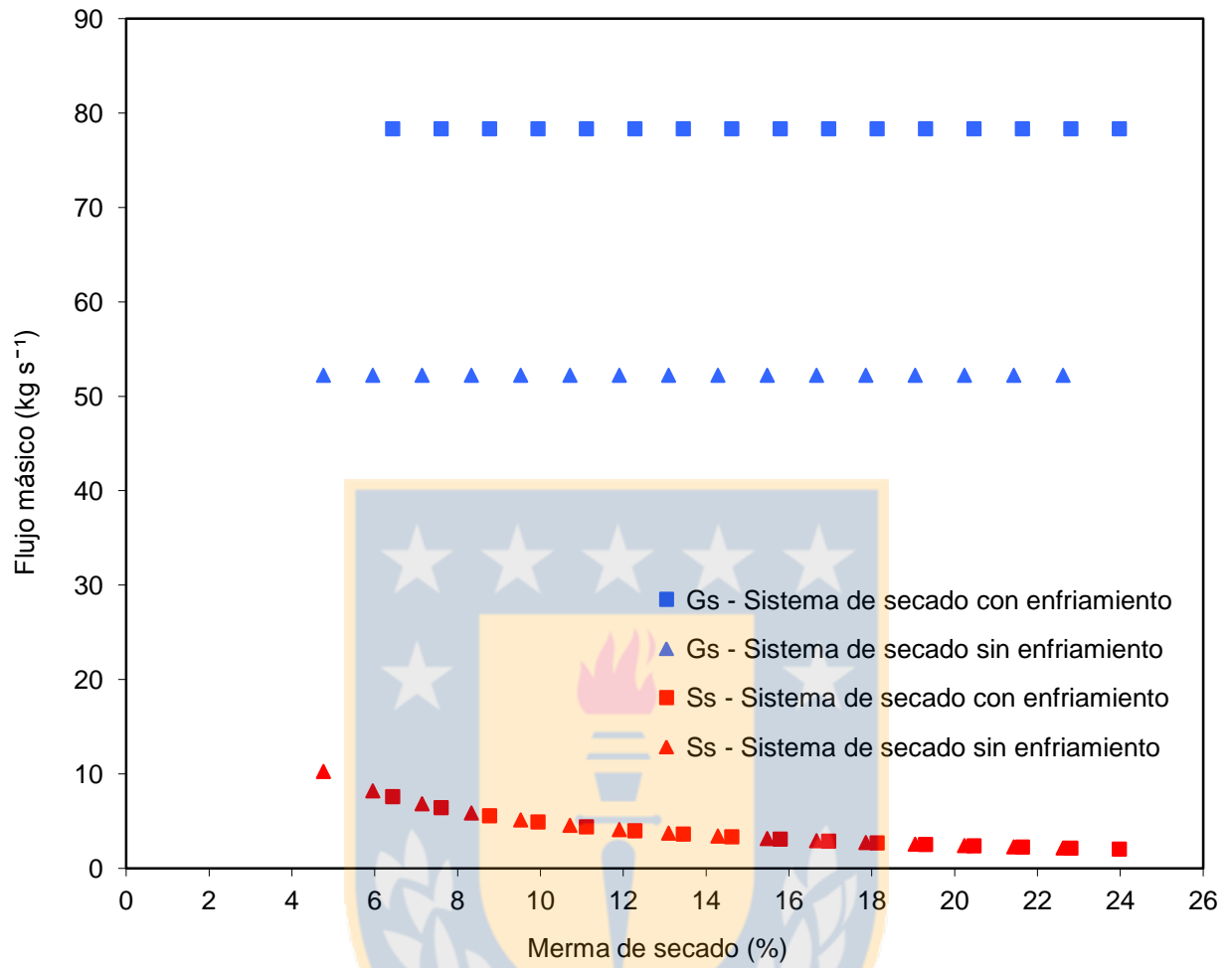
Análisis de varianza (rendimiento de secado)				
Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F-calculado
Inter-sistema	1,8368E+01	1	1,8368E+01	0,5818
Intra-sistema	9,4711E+02	30	3,1570E+01	
Total	9,6548E+02	31		
F-tabulado (0,05) = 4,1709 > F-calculado → no existen diferencias significativas				
Prueba de comparación de medias (test de Scheffé)				
m	n ₁	n ₂	N	α
2	16	16	32	0,05
\bar{x}	\bar{y}	$ \bar{x} - \bar{y} $	CME	F-tabulado
84,795	86,310	1,5150	3,1570E+01	4,1709
VC	=	4,0570	>	$ \bar{x} - \bar{y} $ → no existen diferencias significativas

Apéndice

Sistema de secado con enfriamiento			
Variable	Valor	Unidad de medida	Observaciones
G_s	$78,333 \pm 0,0000$	kg aire seco s^{-1}	Valor obtenido de ecuación 6
Y_1	$0,0101 \pm 0,0000$	kg agua kg aire seco $^{-1}$	Valor obtenido de gráfico psicrométrico
Y_2	$0,0187 \pm 0,0003$	kg agua kg aire seco $^{-1}$	Valor obtenido de gráfico psicrométrico
T_{G1}	$73,333 \pm 0,0000$	$^{\circ}C$	Valor obtenido de catálogo
T_{G2}	$45,875 \pm 1,3953$	$^{\circ}C$	Valor estimado por aumento de humedad
H_{G1}	$100,35 \pm 0,0000$	kJ kg aire seco $^{-1}$	Valor obtenido de ecuación 8
H_{G2}	$94,611 \pm 0,6628$	kJ kg aire seco $^{-1}$	Valor obtenido de ecuación 8
S_s	$3,7450 \pm 0,8778$	kg sólido seco s^{-1}	Valor obtenido de ecuación 4
X_1	$0,3849 \pm 0,0487$	kg agua kg sólido seco $^{-1}$	Valor obtenido de ecuación 3
X_2	$0,1696 \pm 0,0000$	kg agua kg sólido seco $^{-1}$	Valor obtenido de ecuación 3
T_{S1}	$20,000 \pm 0,0000$	$^{\circ}C$	Valor asumido
T_{S2}	$34,140 \pm 1,3953$	$^{\circ}C$	Valor estimado por aumento de humedad
H_{S1}	$65,175 \pm 4,0680$	kJ kg sólido seco $^{-1}$	Valor obtenido de ecuación 9
H_{S2}	$81,332 \pm 3,3971$	kJ kg sólido seco $^{-1}$	Valor obtenido de ecuación 9
Q	$369,04 \pm 98,020$	kW	Valor obtenido de ecuación 10
E_v	$0,0056 \pm 0,0011$	kWh kg sólido seco $^{-1}$	Valor obtenido de ecuación 11
R_c	$0,0773 \pm 0,0151$	kg leña kg sólido seco $^{-1}$	Valor obtenido de ecuación 15
R_c	$0,0304 \pm 0,0059$	kg GLP kg sólido seco $^{-1}$	Valor obtenido de ecuación 15
ΔX	$15,205 \pm 2,9672$	%	Valor obtenido de ecuación 2
η_s	$37,279 \pm 1,3116$	%	Valor obtenido de ecuación 17
R_s	$84,795 \pm 2,9674$	%	Valor obtenido de ecuación 18
Sistema de secado sin enfriamiento			
Variable	Valor	Unidad de medida	Observaciones
G_s	$52,222 \pm 0,0000$	kg aire seco s^{-1}	Valor obtenido de ecuación 6
Y_1	$0,0101 \pm 0,0000$	kg agua kg aire seco $^{-1}$	Valor obtenido de gráfico psicrométrico
Y_2	$0,0231 \pm 0,0005$	kg agua kg aire seco $^{-1}$	Valor obtenido de gráfico psicrométrico
T_{G1}	$100,00 \pm 0,0000$	$^{\circ}C$	Valor obtenido de catálogo
T_{G2}	$55,875 \pm 1,3953$	$^{\circ}C$	Valor estimado por aumento de humedad
H_{G1}	$127,65 \pm 0,0000$	kJ kg aire seco $^{-1}$	Valor obtenido de ecuación 8
H_{G2}	$116,30 \pm 0,2699$	kJ kg aire seco $^{-1}$	Valor obtenido de ecuación 8
S_s	$4,4001 \pm 1,2488$	kg sólido seco s^{-1}	Valor obtenido de ecuación 4
X_1	$0,3849 \pm 0,0487$	kg agua kg sólido seco $^{-1}$	Valor obtenido de ecuación 3
X_2	$0,1905 \pm 0,0000$	kg agua kg sólido seco $^{-1}$	Valor obtenido de ecuación 3
T_{S1}	$20,000 \pm 0,0000$	$^{\circ}C$	Valor asumido
T_{S2}	$38,794 \pm 1,3953$	$^{\circ}C$	Valor estimado por aumento de humedad
H_{S1}	$65,175 \pm 4,0680$	kJ kg sólido seco $^{-1}$	Valor obtenido de ecuación 9
H_{S2}	$96,082 \pm 3,5370$	kJ kg sólido seco $^{-1}$	Valor obtenido de ecuación 9
Q	$428,34 \pm 94,359$	kW	Valor obtenido de ecuación 10
E_v	$0,0034 \pm 0,0007$	kWh kg sólido seco $^{-1}$	Valor obtenido de ecuación 11
R_c	$0,0696 \pm 0,0153$	kg leña kg sólido seco $^{-1}$	Valor obtenido de ecuación 15
R_c	$0,0274 \pm 0,0060$	kg GLP kg sólido seco $^{-1}$	Valor obtenido de ecuación 15
ΔX	$13,691 \pm 3,0202$	%	Valor obtenido de ecuación 2
η_s	$37,271 \pm 1,3128$	%	Valor obtenido de ecuación 17
R_s	$86,310 \pm 3,0204$	%	Valor obtenido de ecuación 18
Número de datos	= 16		
Grados de libertad	= 15		
Nivel de significación	= 0,05		
Nivel de confianza	= 0,95		

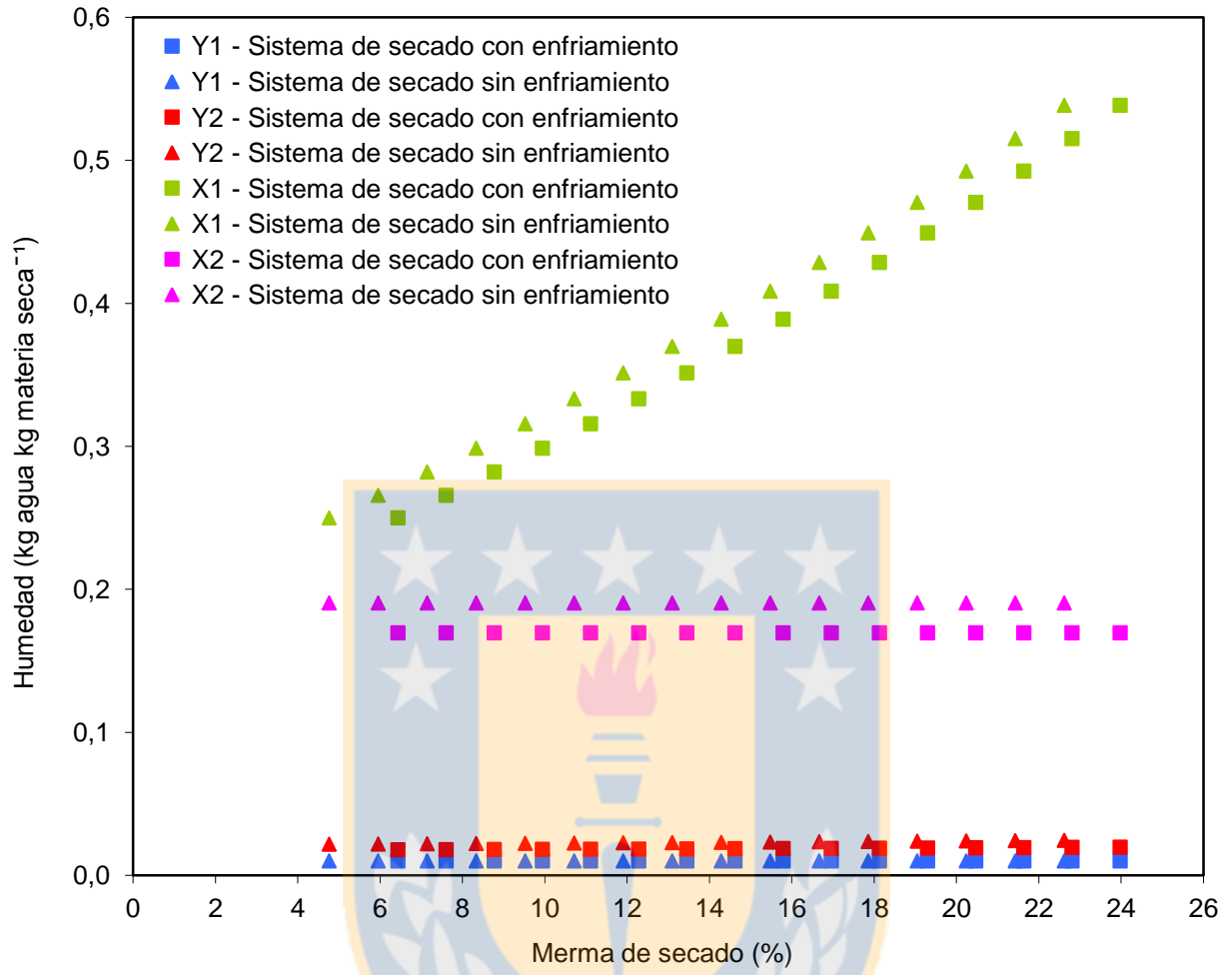
Apéndice

Merma de secado vs. Flujo másico de aire (Gs) y producto (Ss)



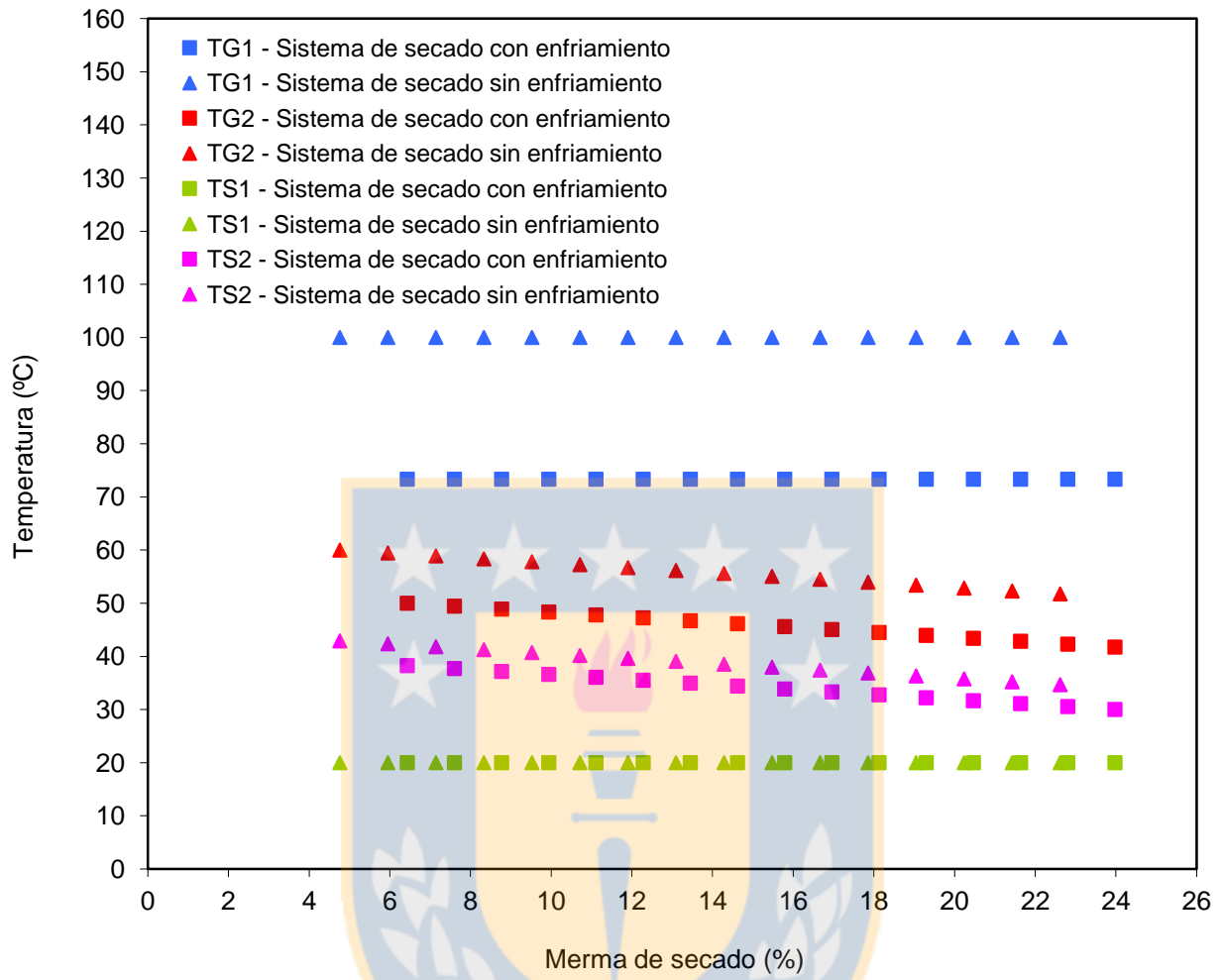
Apéndice

Merma de secado vs. Humedad absoluta del aire (Y_1, Y_2) y producto (X_1, X_2)

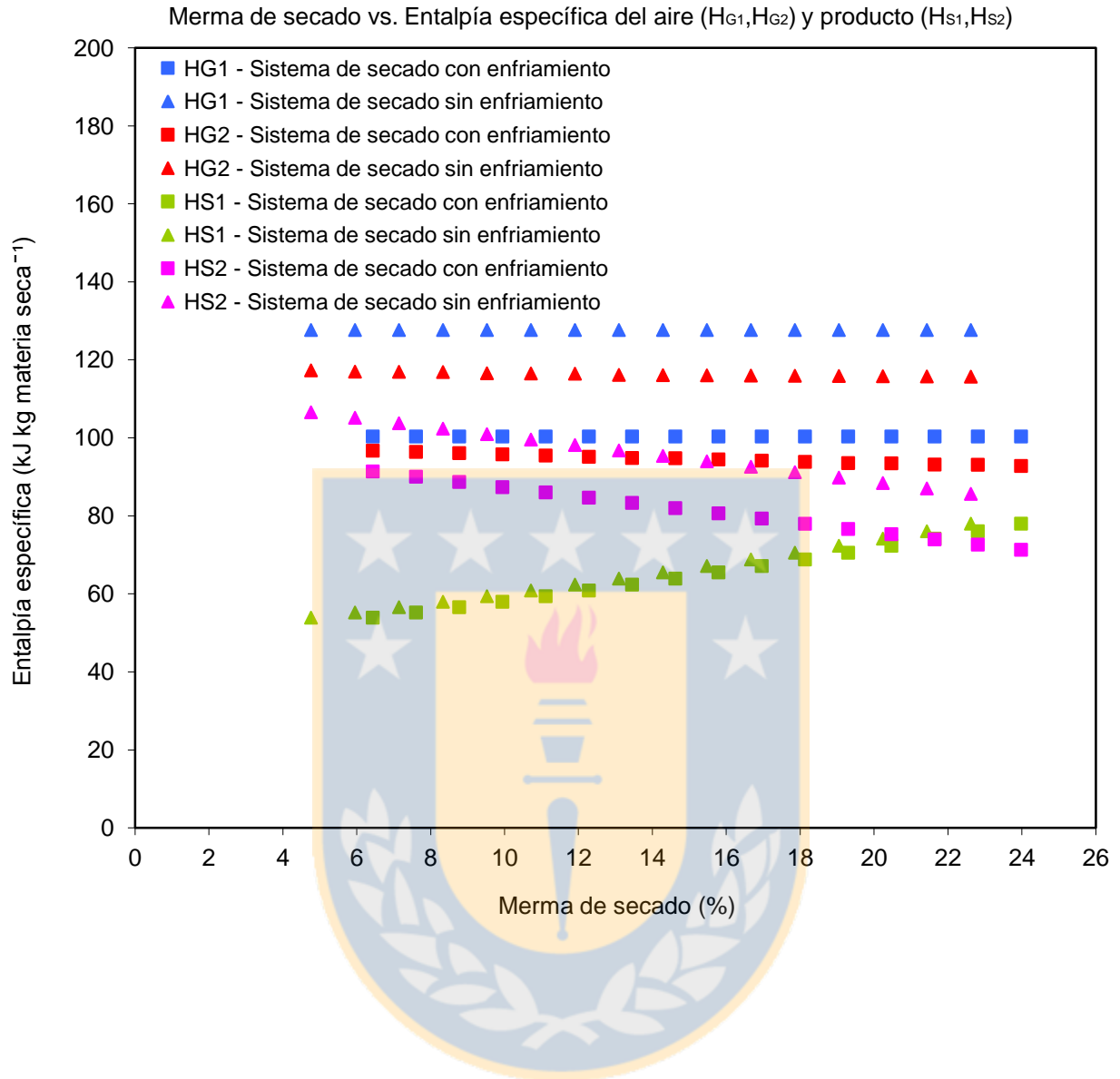


Apéndice

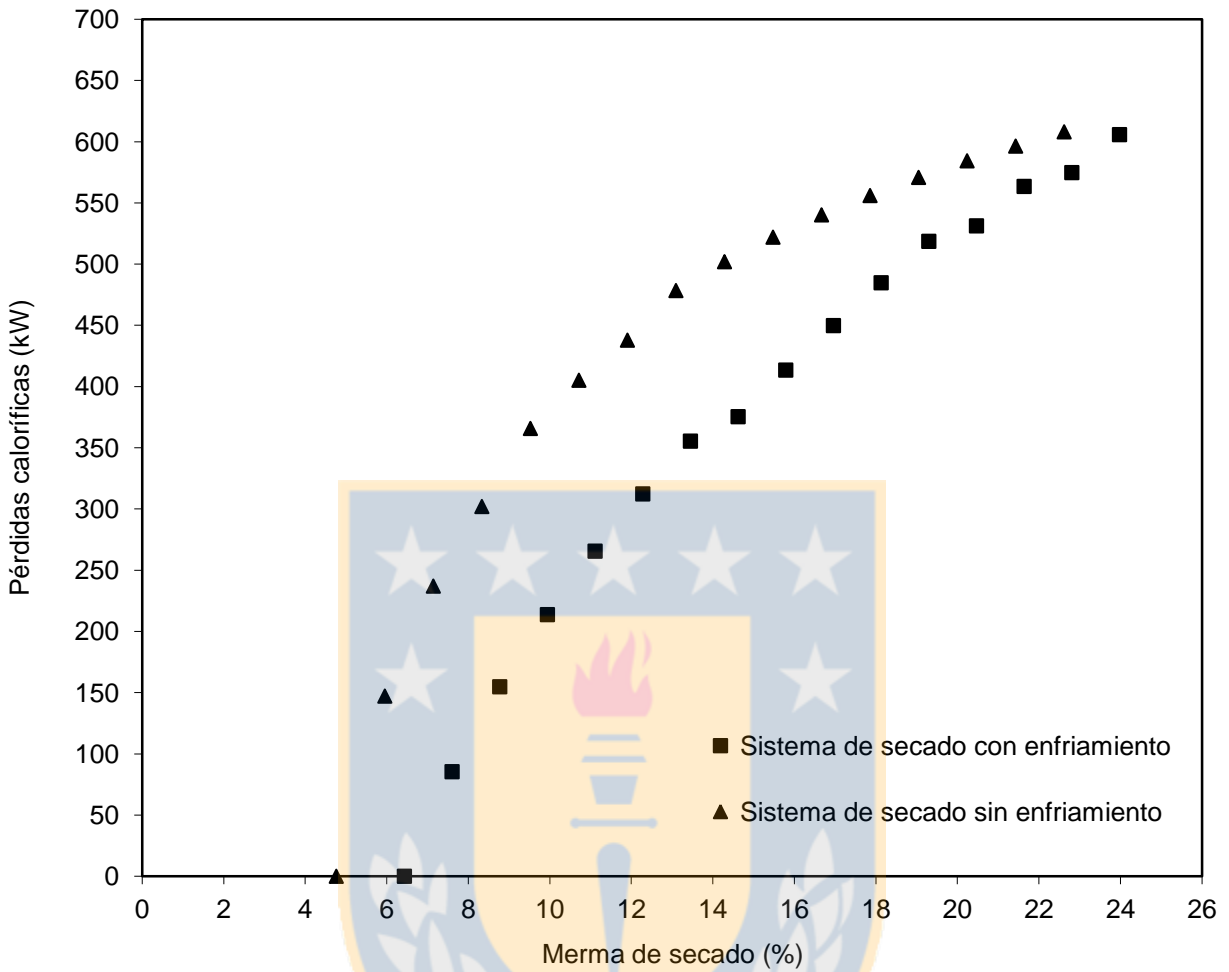
Merma de secado vs. Temperatura del aire (T_{G1}, T_{G2}) y producto (T_{S1}, T_{S2})



Apéndice



Merma de secado vs. Pérdidas caloríficas



Tiempo de permanencia

Tiempo de permanencia				
Tiempo de permanencia en silo (s)		Variable	Descripción	
$t = \frac{z \ln(X_1/X_2)}{k_d(T_G - T_W)}$		z	Tamaño de capa de granos (m)	
		T _G	Temperatura de bulbo seco (°C)	
		T _W	Temperatura de bulbo húmedo (°C)	
Parámetros de secado				
X _{w1} (%)	X ₁ (kg agua kg sólido seco ⁻¹)	k _d (m°C ⁻¹ s ⁻¹)	T _G (°C)	T _W (°C)
35	0,5385	1,0E-07	40	23,519
Tiempo de permanencia en silo (h) a distintas humedades y tamaños de capa				
X ₂ (kg agua kg sólido seco ⁻¹)	z (m)			
	0,15	0,30	0,45	0,60
0,5385	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,5152	1,1183	2,2365	3,3548	4,4731
0,4925	2,2575	4,5149	6,7724	9,0299
0,4706	3,4074	6,8149	10,222	13,630
0,4493	4,5784	9,1568	13,735	18,314
0,4286	5,7709	11,542	17,313	23,083
0,4085	6,9852	13,970	20,956	27,941
0,3889	8,2283	16,457	24,685	32,913
0,3699	9,4946	18,989	28,484	37,979
0,3514	10,792	21,584	32,375	43,167
0,3333	12,129	24,257	36,386	48,515
0,3158	13,492	26,985	40,477	53,969
0,2987	14,900	29,799	44,699	59,599
0,2821	16,345	32,690	49,036	65,381
0,2658	17,850	35,700	53,550	71,400
0,2500	19,399	38,799	58,198	77,597
0,2346	21,007	42,013	63,020	84,027
0,2195	22,689	45,377	68,066	90,755
0,2048	24,441	48,882	73,323	97,764
0,1905	26,271	52,542	78,813	105,08
0,1765	28,201	56,402	84,602	112,80
0,1628	30,244	60,487	90,731	120,97
0,1494	32,415	64,830	97,245	129,66
0,1364	34,717	69,433	104,15	138,87
0,1236	37,208	74,416	111,62	148,83
0,1111	39,903	79,807	119,71	159,61

