

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería de Biosistemas

**Enfoque Integral del Proceso de Enfriamiento con Aire Forzado
para Piña Fresca de Exportación (*Ananas comosus*)**


**Informe de Proyecto Final de Graduación presentado a la Facultad de
Ingeniería como requisito para optar por el grado de Licenciatura en
Ingeniería Agrícola y de Biosistemas.**

Ronny Chaves Mata

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

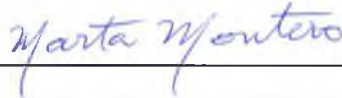
Diciembre de 2017

Sometido a la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Facultad de Ingeniería de la
Universidad de Costa Rica como requisito para optar por el grado de:
LICENCIADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y DE BIOSISTEMAS



Ronny Chaves Mata

Candidato



Dra. Marta Montero Calderón.

Directora, Comité Asesor



Ing. Giovanni Carmona Villalobos, Lic.

Miembro, Comité Asesor



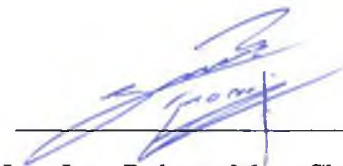
Dra. Kattia Solís Ramírez.

Miembro, Comité Asesor



Dr. Mauricio Bustamante Román.

Miembro, Tribunal Examinador



Ing. Juan Roberto Mora Chaves, Lic

Miembro, Tribunal Examinador

Dedicatoria

A mis padres Rolvin Chaves y Florita Mata y a mis hermanos Jimena y Esteban.

Agradecimientos

A la Dra. Marta Montero Calderón: Su apoyo, paciencia y asesoramiento crítico ha sido fundamental para tallar y pulir mis ideas.

Al Lic. Geovanni Carmona Villalobos. Su confianza, orientación, consejo profesional y humano ha sido fundamental en mi formación universitaria. Quien una vez me dijo: *“A lo largo de esta iniciativa que ya inició, se dará cuenta que día con día, su afán y satisfacción de ir logrando el conocimiento por sí mismo, le suplirá el dote de hacerse dueño de un producto bastante importante, el cual será su primer producto original, producto del empeño de romper el espacio y ser el que conduce y no el que es conducido”*

A la Dra. Kattia Solís Ramírez y al Ing. Guillermo Vargas Elías, MSc. Su disposición y orientación ha sido esencial durante este proceso.

A la Universidad de Costa Rica y a su sistema de becas. Sin los cuales habría sido imposible culminar mis estudios

A la empresa Tropical Paradise Fruits Co, en especial al Ing. Hugo Segnini Polo, al Lic. Álvaro Rodríguez López, al Sr. Ramón y a los demás colaboradores. Que hicieron posible el desarrollo de esta investigación.

A mi familia, Rolvin Chaves, Florita Mata, Jimena Chaves y Esteban Chaves, por su apoyo moral y financiero, su paciencia y su confianza incondicional.

Por último, pero no menos importante, a mis amigos y compañeros, Roy, Víctor, Guillermo, Paola, Karina, Rebeca, Jose María, Fabián, Alexander, Randall, Jessica, por su tiempo y amabilidad.

ÍNDICE GENERAL

Dedicatoria.....	iii
Agradecimientos	iv
Índice de figuras.....	vii
Índice de tablas	xi
Nomenclatura.....	xii
Resumen.....	xv
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	3
3. MATERIALES Y MÉTODOS	18
3.2 Caracterización del producto	19
3.3 Caracterización del proceso.....	19
3.4 Condiciones de temperatura de la fruta y de temperatura y humedad relativa del aire, desde el recibo hasta el despacho de fruta	20
3.5 Capacidad de refrigeración instalada.....	21
3.5.1 Capacidad nominal	21
3.5.2 Análisis de sensibilidad técnica de los subprocesos bajo refrigeración.....	22
3.6 Enfriamiento de la piña dentro de los túneles de aire forzado.....	26
3.6.1 Configuración de empaque de la fruta	26
3.6.2 Análisis conceptual de las principales rutas para el flujo de aire	27
3.6.3 Análisis de la temperatura durante el enfriamiento con aire forzado	27
3.6.4 Análisis del flujo de aire y caída de presión del aire durante el enfriamiento con aire forzado	33
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
4.1 Caracterización del producto	35

4.2	Caracterización del proceso	35
4.2.1	Descripción del proceso.....	35
4.2.1.1	Medición de tiempos del proceso	41
4.3	Condiciones de temperatura de la fruta y de temperatura y humedad relativa del aire, desde el recibo hasta el despacho	43
4.3.1	Monitoreo de temperatura de la fruta en las cámaras de almacenamiento y despacho.....	48
4.4	Capacidad de refrigeración instalada	50
4.4.1	Capacidad nominal de los espacios refrigerados de la planta de empaque	50
4.4.2	Análisis de sensibilidad técnica de los subprocesos llevados a cabo dentro de los espacios refrigerados.....	53
4.5	Estudio del enfriamiento en los túneles de aire forzado	61
4.5.1	Configuración de las tarimas de producto en el túnel de aire forzado.....	61
4.5.2	Análisis conceptual de las principales rutas para el flujo de aire	65
4.5.3	Diagnóstico de espacios vacíos (bypass) entre cajas y tarimas dentro del túnel de aire forzado	69
4.5.4	Análisis de la temperatura durante el enfriamiento con aire forzado	72
4.5.5	Análisis del flujo de aire y caída de presión del aire durante el enfriamiento con aire forzado	101
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	108
5.1	Conclusiones.....	108
5.2	Recomendaciones	110
	Bibliografía	112

Índice de figuras

Figura 1. Núcleo del marco metodológico.....	18
Figura 2. Diagrama de medición de temperatura en el centro geométrico de la piña.	20
Figura 3. Medición de la temperatura interna de la fruta en el subproceso de enfriamiento.	27
Figura 4. Medición de la temperatura de la fruta contenida en la caja adyacente al punto 1 y la contenida en la caja adyacente al punto 2, sobre el nivel medio de la tarima.	29
Figura 5. Puntos de medición de temperatura de la fruta respecto al largo del túnel a capacidad media (13 tarimas) en la descarga (C ₁ y A ₁) y en la succión (C ₂ y A ₂).	30
Figura 6. Puntos de medición de temperatura respecto al largo del túnel a capacidad plena (26 tarimas) en la descarga (C ₁ y A ₁) y en la succión (C ₂ y A ₂).	30
Figura 7. Bloqueo del paso para el flujo de aire en la base de las tarimas con cartón.....	31
Figura 8. Paso libre para el aire en la base de las tarimas.....	31
Figura 9. Diagrama del macroproceso de piña fresca para la planta de la empresa Tropical Paradise Fruits Co, ubicada en Muelle de San Carlos.....	38
Figura 10. Cajones metálicos de transporte de la fruta desde las fincas hasta la planta de empaque.	39
Figura 11. Diagrama de Pareto de tiempos del proceso en (a) y de reducción de temperatura del proceso. ΔT : reducción de temperatura.	42
Figura 12. Caracterización de la temperatura de la fruta y el aire desde el recibo hasta el despacho de la piña, en la planta empacadora.	44
Figura 13. Caracterización de la humedad relativa del aire desde el recibo hasta el despacho de la piña, en la planta empacadora.	45

Figura 14. Perfil de enfriamiento de la piña dentro de la cámara de almacenamiento refrigerado en (a) y cambio adimensional de la temperatura, Y, en (b).	48
Figura 15. Estimación del tiempo requerido para obtener una temperatura de 7 °C dentro de los contenedores de transporte marítimos con unidad de enfriamiento Star Cool ®.	49
Figura 16. Diagrama del sistema de refrigeración instalado.	51
Figura 17. Análisis de sensibilidad técnica para la sala de empaque con 26 tarimas en (a) y con 104 tarimas en (b).	55
Figura 18. Análisis de sensibilidad técnica para el túnel de aire forzado con 26 tarimas en (a) y con 13 tarimas en (b).	57
Figura 19. Análisis de sensibilidad técnica para la cámara de almacenamiento refrigerado con 26 tarimas en (a) y con 104 tarimas en (b).	59
Figura 20. Análisis de sensibilidad técnica para el andén de carga 1 con 26 tarimas en (a) y con 42 tarimas es (b).	60
Figura 21. Caja para empaque de fruta fresca de exportación.	62
Figura 22. Vista isométrica de la tarima de producto empacado en (a), vista frontal de la tarima de producto por el lado corto de la tarima (1 m de ancho) en (b) y vista lateral de la tarima de producto por el lado largo de la tarima (1,2 m de lado) en (c).	62
Figura 23. Refuerzo de cartón en todas las cajas de los primeros 5 niveles de la tarima de producto.	63
Figura 24. Vista frontal del túnel en (a), vista lateral del túnel en (b) y vista isométrica del túnel en (c).	64

Figura 25. Distribución de las tarimas de producto dentro del túnel de aire forzado para la configuración a capacidad media en (a) y para la configuración a capacidad plena en (b).	64
Figura 26. Esquema de las principales rutas para el flujo de aire a través del lado corto de la tarima (1,0 m), en cada nivel para una tarima.	66
Figura 27. Esquema de las principales rutas para el flujo de aire a través de un nivel a capacidad plena por el lado corto de la tarima en (a), cuando la segunda tarima se coloca con una rotación de 90° respecto al lado corto en (b) y cuando la segunda tarima se coloca con una rotación de 270° respecto al lado corto en (c).	67
Figura 28. Esquema de las principales rutas para el flujo de aire a través del lado largo de la tarima (1,2 m), entre un nivel y su consecutivo superior en la configuración a capacidad media.	68
Figura 29. Inclinação de las tarimas de producto en espera para ingresar al túnel en (a) e inclinación de las tarimas una vez ubicadas dentro de los túneles en (b).	70
Figura 30. Regiones de paso libre del aire de enfriamiento a través de la ventana de retorno del aire de enfriamiento.	71
Figura 31. Regiones de paso libre del aire de enfriamiento a través de la ventana de retorno del aire de enfriamiento.	72
Figura 32. Perfil de temperatura promedio, en diferentes puntos ubicados radialmente desde el centro geométrico de la piña.	73
Figura 33. Desviación promedio de la temperatura dentro de la piña con respecto a la temperatura promedio de la fruta a lo largo del enfriamiento.	74
Figura 34. Cambio adimensional de temperatura (Y) dentro de la piña.	75
Figura 35. Heterogeneidad de Y durante el enfriamiento de la piña.	76

Figura 36. Perfil de enfriamiento de la piña dentro del túnel de aire forzado a capacidad media en las tarimas A y C en (a) y a capacidad plena en (b).	78
Figura 37. Cambio adimensional de temperatura Y, de la piña dentro del túnel de aire forzado a capacidad media en las tarimas A y C. Dejando libre el paso del aire en (a) y bloqueándolo en (b).....	80
Figura 38. Heterogeneidad de Y durante el enfriamiento de la piña dentro del túnel de aire forzado a capacidad media para las tarimas A y C. Dejando libre el paso del aire en (a) y bloqueándolo en (b).	82
Figura 39. Cambio adimensional de temperatura Y, de la piña dentro del túnel de aire forzado a capacidad plena en las tarimas A y C. Dejando libre el paso del aire en (a) y bloqueándolo en (b).....	84
Figura 40. Heterogeneidad de Y durante el enfriamiento de la piña dentro del túnel de aire forzado a capacidad plena para las tarimas A y C. Dejando libre el paso del aire en (a) y bloqueándolo en (b).	86
Figura 41. Modelación del enfriamiento de la fruta ubicada en la tarima central del túnel cerca de la succión (C ₂).	92
Figura 42. Modelación del enfriamiento de la fruta ubicada en la tarima extrema, cerca de la descarga (A ₁) en (a) y cerca de la succión, A ₂ , en (b).....	94
Figura 43. Diagrama de procedimiento de cálculo de la transferencia de calor multidimensional por conducción interna dentro de la fruta, para un tiempo de 3,5 h. λ_1 y A ₁ , interpolados a partir del número de Biot (Bi) [22].....	99
Figura 44. Diagrama de procedimiento de cálculo de la transferencia de calor multidimensional por conducción interna dentro de la fruta, para un tiempo de 5,5 h. λ_1 y A ₁ , interpolados a partir del número de Biot (Bi) [22].....	100
Figura 45. Herramienta para la evaluación integral del enfriamiento de productos frescos.	107

Índice de tablas

Tabla 1. Propiedades reportadas en la literatura para la piña	13
Tabla 2. Parámetros de la estimación de la capacidad requerida de refrigeración.	25
Tabla 3. Escenarios del análisis de sensibilidad técnica.	26
Tabla 4. Condiciones de operación de la cámara de refrigeración del Laboratorio de Tecnología Poscosecha, CIA, UCR.	28
Tabla 5. Condiciones de operación de los túneles de aire forzado	32
Tabla 6. Propiedades físicas de la piña de cultivar MD2 ^a	35
Tabla 7. Capacidad nominal del sistema de refrigeración instalado.	51
Tabla 8. Ajuste exponencial* de las curvas de cambio adimensional (Y) dentro del túnel de aire forzado a capacidad media.	87
Tabla 9. Ajuste exponencial* de las curvas de cambio adimensional (Y) dentro del túnel de aire forzado a capacidad plena	89
Tabla 10. Tiempos de enfriamiento experimentales y modelados, de la piña dentro del túnel de aire forzado a capacidad media (13 tarimas)	90
Tabla 11. Tiempos de enfriamiento experimentales y modelados, de la piña dentro del túnel de aire forzado a capacidad plena (26 tarimas).....	91
Tabla 12. Estimación del coeficiente de transferencia de calor por cada posición dentro del túnel de aire forzado a capacidad media.	96
Tabla 13. Estimación del coeficiente de transferencia de calor por cada posición dentro del túnel de aire forzado a capacidad plena.	97
Tabla 14. Separación de medias de las evaluaciones del flujo y caída de presión del aire durante el enfriamiento de la piña dentro de los túneles de aire forzado.....	101

Nomenclatura

A:	área de la fruta, m ²
A _a :	área externa del aislamiento, m ²
A _l :	área iluminada, m ²
AN:	andén de carga
A _i :	posición de la fruta en la tarima extrema (número 1)
AF:	túnel de aire forzado
AR:	cámara de almacenamiento refrigerado
A ₁ :	coeficiente de la solución aproximada de un término de la conducción de calor unidimensional en régimen transitorio
C _e :	centro geométrico de la fruta
C _i :	calor específico del elemento del empaque, J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹
C _p :	calor específico del producto, J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹
C _i :	posición de la fruta en la tarima central (número 7)
D _{TP} :	valor absoluto de la desviación promedio de la temperatura, °C
E _i :	evaporador i
EM:	sala de empaque
E _M :	eficiencia del motor, dec
F _{EM} :	factor de carga del motor, dec
F _{LM} :	factor de uso del motor, dec
F _{ul} :	factor de uso de la iluminación, dec
F _{sa} :	factor especial de asignación, dec
HR:	humedad relativa, %
L:	espesor de la pared plana, m
P:	potencia del motor, W
P _i :	cantidad de tarimas de producto para el escenario i
Q _i :	carga requerida del escenario i, kW
Q _{instalada} :	carga de refrigeración instalada, W o kW
Q:	capacidad de refrigeración, W o kW
Q _{fija} :	carga de refrigeración fija, W o kW
R:	respiración, mgCO ₂ ·kg ⁻¹ ·h ⁻¹
S _i :	pulpa i
T _i :	temperatura inicial, °C
T _a :	temperatura del aire, °C
T _n :	temperatura de la fruta en la posición n, °C
\bar{T} :	temperatura promedio de la fruta, °C
T _f :	temperatura final, °C
T _{inf} :	tasa de infiltración, m ³ ·s ⁻¹
U:	coeficiente de transferencia de calor global, W·m ⁻² ·°C ⁻¹
W _l :	potencia total de la iluminación, W·m ⁻²
$\bar{Y}_{T,t}$:	cambio adimensional promedio de la temperatura, adim

$Y_{T,t,n}$:	cambio adimensional de la temperatura, de la posición n en el tiempo t, adim
a_w :	actividad de agua
$d_{\text{medio, fruta}}$:	diámetro medio de la fruta, cm
e :	error relativo porcentual, %
h_i :	conductancia superficial en el interior del espacio refrigerado, $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$
h_{int} :	entalpía del aire interno, $J \cdot kg^{-1}$
h_{ext} :	entalpía del aire externo, $J \cdot kg^{-1}$
h_o :	conductancia superficial en el exterior del espacio refrigerado, $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$
h :	coeficiente de transferencia de calor, $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$
j :	factor de retardo, adim
k_i :	constante de velocidad del enfriamiento de la fase i, min^{-1}
k_p :	conductividad térmica del material, $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$
m_p :	masa de producto, kg
m_i :	masa del elemento del empaque, kg
m :	cantidad de posiciones medidas o puntos de medición dentro del sistema
n :	posición de medición n
n_e :	tiempo de enfriamiento, h
p_1 :	pulpa de la fruta
q_p :	ganancia de calor del producto, W
q_{per} :	carga de calor de una persona, W
q_e :	carga de calor del empaque, W
q_{el} :	ganancia de calor por iluminación, W
q_s :	carga de refrigeración por cambio de aire, W
q_r :	calor de respiración, W
q_{em} :	calor equivalente a la operación del equipo, W
q_w :	ganancia de calor del aislamiento, W
r^2 :	coeficiente de determinación, adim
r :	radio promedio de la fruta, m
t_p :	temperatura del espacio refrigerado, $^\circ C$
$t_{7/8}$:	tiempo para alcanzar siete octavos de enfriamiento ($Y=0,125$, $1-Y=7/8$) adim
$t_{1/2}$:	tiempo para alcanzar la mitad del enfriamiento, ($Y=0,5$, $1-Y=1/2$) adim
$t_{3/4}$:	tiempo para alcanzar tres cuartos de enfriamiento, ($Y=0,25$, $1-Y=3/4$) adim
t_{enf} :	tiempo de enfriamiento, min
v :	volumen específico del aire externo a la cámara, $m^3 \cdot kg^{-1}$
x :	espesor del material, m
x_t :	tiempo de operación de los motores, h
α :	difusividad térmica, $mm^2 \cdot s^{-1}$
ρ :	densidad, $kg \cdot m^{-3}$
τ :	número de Fourier, adim
θ :	temperatura adimensional, análogo al cambio adimensional de temperatura, Y
λ_1 :	coeficiente de la solución aproximada de un término de la conducción de calor unidimensional en régimen transitorio

Δt_a :	diferencia entre la temperatura del aire externo y la temperatura del espacio refrigerado, °C
Δt :	diferencia entre la temperatura inicial del producto y la deseada, °C
$\Delta Y_{T,t,n}$:	heterogeneidad de Y, de la posición n en el tiempo t, adim
$\Delta Y_{\text{máx-P}}$:	heterogeneidad máxima positiva de Y, adim
$\Delta Y_{\text{máx}}$:	heterogeneidad máxima de Y, adim
$\Delta Y_{\text{máx-N}}$:	heterogeneidad máxima negativa de Y, adim

Resumen

Se realizó un análisis integral del enfriamiento con aire forzado de la piña (*Ananas comosus*), de la variedad MD2 calibre número 7, en el proceso de preparación y empaque de fruta fresca de la planta Tropical Paradise Fruits Co. Se registraron las temperaturas de la fruta y del aire y los periodos de permanencia de la fruta en cada etapa del proceso, se analizó la capacidad de refrigeración instalada y se determinó la carga térmica requerida en las distintas áreas del proceso, así como los patrones de flujo y acomodo de los empaques y tarimas dentro de los túneles de aire forzado. Se elaboraron las curvas de enfriamiento de la fruta en términos del cambio adimensional de la temperatura, Y , y se estudió la heterogeneidad del enfriamiento dentro de la fruta y dentro de los túneles de aire forzado.

Se encontró que la transferencia de calor por conducción fue el factor que limitaba el enfriamiento de las piñas ($Biot = 1,14 - 2,3$), por lo que se establece un perfil de temperaturas desde el centro geométrico de la fruta hacia su superficie.

La capacidad instalada nominal de los túneles de aire forzado operando al 100% de eficiencia podría reducir la temperatura de la fruta de 27 °C a 10 °C en 1,6 h y 3,2 h, a capacidad media (13 tarimas de producto) y plena (26 tarimas de producto) respectivamente. Las tarimas colocadas con el lado de 1,0 m contra la ventana de retorno permiten el paso directo y uniforme del aire a través de las ventilaciones de las cajas con piña, no así la del extremo, que se rota 90°, porque impone barreras al flujo y resta eficacia al proceso de enfriamiento. La reducción de las dimensiones de la ventana de retorno en 16 cm de largo, el ajuste de los subprocesos de la preparación y estabilización de tarimas para asegurar verticalidad y alineación de cajas y ventilaciones se recomendó para minimizar los bypass de aire durante el enfriamiento.

La fruta colocada cerca de la antecámara de succión se enfría más lentamente que la fruta ubicada cerca de la descarga de los evaporadores (hasta 3 °C de diferencia después de 3,5 h) y el grado de heterogeneidad del enfriamiento en los túneles al finalizar la operación, mostró que los 210 min utilizados comercialmente eran insuficientes para alcanzar los 7/8 de

enfriamiento para fruta que ingresaba a 27 °C; por lo que se requeriría aumentar estos tiempos en 38 min y 123 min, para 13 y 26 tarimas, respectivamente. El caudal de aire a través de las ventilaciones laterales ($128,6 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$) resultó 3 veces mayor que el caudal de aire a través de las ventilaciones frontales ($42,5 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$), por lo que para una mayor eficiencia y heterogeneidad se recomendó aumentar las ventilaciones frontales.

Se recomendó realizar nuevas mediciones de temperatura, caída de presión y caudal de aire durante el enfriamiento, una vez que se incorporen las modificaciones a la ventana de retorno y la preparación y acomodo de las tarimas, con el fin de validar los modelos exponenciales de predicción de los tiempos de enfriamiento.

1. INTRODUCCIÓN

Para el 2015 se produjeron cerca de 2.290.073,06 toneladas de piña del cultivar MD2 en la región Huetar Norte, Pacífico y Huetar Atlántica, en un área sembrada de 43.000 hectáreas [1]. De la producción, se exportaron 1.858.899 toneladas de fruta fresca, el restante se exportó como piña seca, piña congelada y jugos y el 10 % se destinó al mercado local de Costa Rica [1]. La fruta se cosecha y traslada a las plantas de empaque para su preparación y exportación para el mercado fresco principalmente a América del Norte y la Unión Europea [1]; sin embargo a mediados de 2017, 4 empresas costarricenses enviaron 9 contenedores con alrededor de 15.120 cajas de fruta fresca a China y se espera que esta cantidad crezca cada vez más [2].

El enfriamiento de la fruta hasta su temperatura óptima de almacenamiento, permite conservar su calidad por un mayor tiempo. La remoción de calor de la fruta es considerada uno de los factores claves de las operaciones de estas empresas, que demanda tiempo y recursos, así como también la comprensión de las variables que afectan la eficacia del enfriamiento, que involucran las características de la piña, sus empaques, las condiciones ambientales y las variables de operación de los sistemas de enfriamiento.

Este trabajo se enfocó en realizar un estudio de los sistemas de enfriamiento de una planta empacadora de piña e identificar las oportunidades de mejora del proceso, para lo cual se trabajó en la empresa Tropical Paradise Fruits Co, que cuenta con plantaciones comerciales de piña y una planta de empaque, ubicada en Muelle de San Carlos (Latitud Norte 10° 27' 37" Longitud Oeste -84° 25' 36")

El objetivo general es: analizar el enfriamiento con aire forzado de la piña fresca de exportación, *Ananas comosus*, mediante un enfoque integral de las operaciones poscosecha en la planta de empaque. Los objetivos específicos son:

- Caracterizar las propiedades de la piña, los materiales de empaque y las condiciones de llegada de la fruta a la planta de empaque.

- Monitorear el enfriamiento de la fruta desde el recibo en planta hasta el despacho de la fruta.
- Determinar la capacidad de refrigeración de los sistemas de enfriamiento instalados.
- Evaluar el efecto de las condiciones de operación sobre las curvas y el tiempo de enfriamiento de la piña en el sistema de enfriamiento con aire forzado instalado.

2. MARCO TEÓRICO

La piña, *Ananas comusus*, es una fruta compuesta [3], formada por 100 a 200 frutículos, que definen la pulpa, unidos a un eje central o corazón [4], y recubierta por una cáscara [5]. Como todo biomaterial, presenta anisotropía, que significa no homogeneidad de sus propiedades físicas en todas las direcciones [6] y se clasifica como una fruta no climatérica, es decir, después de la cosecha no continua madurando o aumentando significativamente su dulzura [5].

Después del banano y los cítricos, la piña es la tercera fruta más importante en la producción mundial y su mercado está creciendo en todos los países de la Unión Europea, con Alemania, Italia y Reino Unido como los más grandes; además, Costa Rica es el segundo mayor productor de piña en el mundo, presentó un crecimiento de 6 veces en la producción en el periodo 1990-2012 y lidera el comercio, con una participación en las exportaciones del 55,6 % [5].

Es una fruta muy apetecida por sus atributos sensoriales (sabor, color y textura) y composición nutricional (baja en calorías, fuente de fructuosa, fibra, vitamina B₁, B₆, C, etcétera.) [5]. Esa calidad cambia progresivamente después de la cosecha, debido a la continuidad de los procesos fisiológicos, bioquímicos y microbiológicos [7]. El enfriamiento de la fruta, contribuye a reducir la tasa con que ocurren esos procesos, por lo que el pronto enfriamiento permite conservar la calidad del producto [8] y prolongar la vida útil por un mayor tiempo.

La temperatura es considerada como el factor más importante a controlar [9] ya que entre más se reduzca, más lentos son los procesos internos de la fruta [10-13]; sin embargo la piña sufre de daño por frío, por lo que hay un límite de tolerancia de bajas temperaturas, que algunos autores reportan como 6,1°C [14], y otros a menos de 10 °C o menos de 12 °C [15]

El enfriamiento depende de las propiedades físicas del producto (forma, masa, densidad, etcétera.), propiedades térmicas (conductividad térmica, difusividad térmica, calor específico) [16], equipos/instalaciones, operación, empaque, acomodo, diseño del sistema de enfriamiento, condiciones del producto, etcétera. [17].

En la práctica, los sistemas de enfriamiento tienden a manejarse según recomendaciones preestablecidas, con parámetros fijos, particularmente, los tiempos de operación. Se dejan de lado, aspectos como la respuesta del fruto al enfriamiento, las condiciones iniciales del producto, los materiales de empaque, el acomodo de empaques, etcétera., lo que hace que no necesariamente, la operación sea eficiente.

A través de todo el proceso de empaque de fruta fresca, la diferencia de temperatura entre la fruta y el aire/agua que la rodea, provoca la transferencia de calor y el enfriamiento de la fruta. El intercambio de calor ocurre cuando hay un gradiente de temperatura, por ejemplo, al llegar la fruta de campo y estar bajo la sombra, durante el lavado y desinfección por inmersión, a través de la selección, encerado, aplicación de fungicida y secado y al pasar a través de los subprocesos de clasificación y empaque bajo refrigeración, enfriamiento con aire forzado, almacenamiento refrigerado y transporte refrigerado en contenedores marítimos.

Las operaciones de enfriamiento son un sistema complejo, con muchos factores que se encuentran en estado transitorio y que interactúan entre sí, alterando el comportamiento del producto [18], lo que exige un enfoque no-reduccionista, integrativo y holístico [19] con el fin de definir las intervenciones necesarias para su gestión [20].

Es común encontrar en el análisis del enfriamiento, un parámetro (Y , ecuación 1) que se define como la diferencia entre la temperatura de la fruta y la del aire en un tiempo " t " ($T\{t\}-T_a$), respecto a la diferencia inicial de temperatura entre ellos, (T_i-T_a) [21], y que representa la proporción del enfriamiento que no se ha completado, así, para el tiempo 0, $Y=1$, y el valor disminuye a lo largo del tiempo [21]. A este parámetro se le conoce como la fracción del cambio de temperatura faltante para completar el enfriamiento (Fractional Unaccomplished

Temperature Change, en inglés), así como también se le ha llamado, cambio adimensional de temperatura [22].

$$Y = \frac{T - T_a}{T_i - T_a} \quad (1)$$

Donde,

T_a : temperatura promedio del aire de enfriamiento [$^{\circ}\text{C}$]

T_i : temperatura inicial de la fruta [$^{\circ}\text{C}$]

T : temperatura de la fruta a través del tiempo [$^{\circ}\text{C}$]

Por otro lado, con el fin de determinar una escala de tiempo adimensional, para comparar sistemas cuyos tiempos y condiciones de operación pueden diferir, Olatunji et al. [23] definieron un índice promedio para la progresión del proceso, conocido como $\bar{Y}_{T,t}$ (ecuación 2), denominado cantidad de cambio de la fracción incompleta promedio (The average fractional unaccomplished quantity change en inglés) o bien cambio adimensional de la temperatura promedio, definido por:

$$\bar{Y}_{T,t} = \sum_{n=1}^{m_p} (Y_{T,t,n} / m_p) \quad (2)$$

Donde,

$Y_{T,t,n}$: cambio adimensional de temperatura de la posición n , de m posiciones medidas, en el tiempo t .

m_p : cantidad de posiciones medidas o puntos de medición dentro del sistema.

De esta manera, es posible comparar entre distintos sistemas de enfriamiento, independientemente de las condiciones de temperatura tanto de aire como de fruta y del tiempo de operación. El $t_{7/8}$ (tiempo de enfriamiento siete octavos) ocurre cuando $\bar{Y} = 0,125$,

es decir cuando en promedio y en las distintas posiciones, se ha completado un 87,5 % del enfriamiento y el tiempo medio de enfriamiento ($t_{1/2}$) cuando $\bar{Y} = 0,5$ [23].

En procesos discontinuos de enfriamiento, como en los túneles de aire forzado, la mayoría del producto que se enfría, lo hace cerca del cambio adimensional de temperatura promedio (\bar{Y}) [23], sin embargo es posible que otras zonas dentro del sistema, se enfríen más rápido o más lento, dando lugar a una multitud de puntos fríos o calientes. Olatunji et al. [23] sugirieron comparar el cambio adimensional de temperatura (Y), en distintas posiciones del sistema, con respecto al cambio adimensional de temperatura promedio (\bar{Y}), definido con el término $\Delta Y_{T,t,n}$ en la ecuación 3. La magnitud y dirección de este parámetro indica si se trata de una posición asociada a un sitio más caliente ($\Delta Y > 0$) o más frío ($\Delta Y < 0$) en comparación con el cambio adimensional de temperatura promedio (\bar{Y}).

$$\Delta Y_{T,t,n} = Y_{T,t,n} - \bar{Y}_{T,t} \quad (3)$$

Los mismos autores propusieron graficar ΔY vs \bar{Y} , para las distintas posiciones, como una medida de heterogeneidad del enfriamiento del sistema, así como para identificar las zonas calientes o frías dentro del mismo. La representatividad de estos gráficos, dependerá en parte de la selección de los puntos donde se miden las temperaturas durante el enfriamiento y cabe destacar que estas curvas, permiten apreciar la heterogeneidad de cada posición medida respecto al enfriamiento promedio, por tanto, permite un análisis interno del sistema.

Han et al. [24], sugirieron que la heterogeneidad también puede medirse buscando las diferencias extremas dentro del sistema, utilizando los valores más altos (positivos y negativos) con la variable $\Delta Y_{m\acute{a}x}$, como se muestra en la ecuación 4.

$$\Delta Y_{m\acute{a}x} = \Delta Y_{m\acute{a}x-P} - \Delta Y_{m\acute{i}n-N} \quad (4)$$

Donde,

$\Delta Y_{m\acute{a}x-P}$: máximo de todos los valores positivos de $\Delta Y_{T,t,n}$

$\Delta Y_{\text{mín-P}}$: mínimo de todos los valores negativos de $\Delta Y_{T,t,n}$

Una de las ventajas que ofrece este parámetro, es que a través de un único valor ($\Delta Y_{\text{máx}}$), se puede evaluar la heterogeneidad desde un punto de vista más general del sistema y no internamente como lo es el caso del ΔY propuesto por Olatunji et al. [23]. Además, aumenta su aplicabilidad al ser un parámetro más simple que el índice global de heterogeneidad (OHI) propuesto por Olatunji et al. [23], que requiere un conocimiento más amplio en probabilidad y estadística ya que utiliza la distribución de probabilidad denominada distribución sesgada-normal (SN), que incorpora el sesgo a través del factor de forma α y hace uso de la función T de Owen para la determinación de la función de densidad acumulada de esta distribución.

Analizando el enfriamiento de manzanas dentro de diez diferentes configuraciones de empaque de cartón, donde se varió el tipo de ventilación, los niveles de frutas dentro de las cajas y el material de la bandeja, Han et al. [24] encontraron $\Delta Y_{\text{máx}}$ entre 0,26 y 0,94 con una velocidad del aire de $0,78 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Sajadiye y Zolfaghari [25] y Sayadiye et al. [26], utilizaron como medida de heterogeneidad, el valor absoluto de la desviación promedio de la temperatura de la fruta entre las distintas posiciones y la temperatura promedio de la fruta, durante el enfriamiento (ecuación 5), sin embargo, este parámetro no toma en cuenta si el producto representa una zona más caliente o más fría en comparación con la temperatura promedio.

$$D_{TP} = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^m |\bar{T} - T_n| \quad (5)$$

Donde,

D_{TP} : valor absoluto de la desviación promedio de la temperatura de n posiciones, para un tiempo t

\bar{T} : temperatura promedio de la fruta, en las distintas posiciones, en cada instante de tiempo t

T_n : temperatura de la fruta en la posición n , de m posiciones medidas, en el tiempo t

La D_{TP} , al igual que el parámetro $\Delta Y_{m\acute{a}x}$, le da un vistazo más general al sistema, en el caso de la D_{TP} a través de una única curva (como una función del tiempo), que muestra la diferencia promedio de temperatura de la fruta, para cada tiempo, con respecto a la temperatura promedio del producto, sin embargo, al no ser adimensional respecto a la temperatura, se limita a ser utilizada en situaciones donde las condiciones iniciales del producto son las mismas para todas las posiciones medidas.

Por otro lado, Sajadiye et al. [26], modelaron el almacenamiento refrigerado de manzanas (*Malus domestica* Borkh cv. Golden Delicious). Para validar el modelo, midieron la temperatura de la fruta, en el centro de la cámara de refrigeración y en los extremos (con sensores ubicados en el centro de la fruta, en la región media de la caja) en posiciones cerca de la descarga del evaporador, así como cerca de la antecámara de succión. Registraron la temperatura de la fruta, en la parte superior e inferior de la tarima y en la posición central de la cámara, aparte de esas, se tomó un punto de medición en el centro de la tarima.

En esta validación, la diferencia entre la temperatura del producto más caliente y el más frío, en el tiempo medio de enfriamiento, fue de 11 °C, consistente con los resultados de la simulación que predijeron 10 °C de diferencia. Esta diferencia varió conforme avanzó el enfriamiento hasta que alcanzó cerca de 4 °C al finalizar el proceso. Además encontraron un valor de D_{TP} simulado de 1,9 °C entre las 7 h y 9 h de enfriamiento y se redujo hasta 0,6 °C al finalizar [26].

En la simulación del enfriamiento de naranja dentro de cajas ventiladas, con arreglos de llenado a la cámara, en línea y escalonados, reportada por Sajadiye y Zolfaghari [25], se asumió que, despreciando algunas localizaciones cerca de las paredes de la cámara y el ventilador, la distribución del aire de enfriamiento tiene un patrón simétrico a lo ancho y alto de la cámara (esto para una cámara con un tiro de aire, de 17 m) por lo tanto establecieron una condición de frontera simétrica que permitió el análisis del enfriamiento en las cajas,

desde el lado de la descarga del evaporador hasta la antecámara de succión, ubicadas en una región media de la tarima de producto.

Estos autores encontraron que el valor absoluto de la desviación promedio de la temperatura (D_{TP}) alcanza su pico cerca del tiempo medio de enfriamiento ($t_{1/2}$), así como que no se observó una mejoría en la homogeneidad cuando se situaron las cajas de producto de forma escalonada en comparación con un arreglo alineado de las cajas y también que utilizar un flujo de aire mayor y una mayor distancia entre cajas consecutivas, puede conducir a un enfriamiento más rápido, causando relativamente más homogeneidad en la temperatura del producto.

Por otro lado, el comportamiento de las curvas de cambio adimensional de temperatura (Y) en el tiempo, se puede expresar como una ecuación exponencial (ecuación 6). Shim et al. [27], definieron el factor de retardo “ j ” como una medida de la resistencia del producto a la transferencia de calor frente al flujo de aire y el factor “ k ” como el coeficiente de velocidad de enfriamiento o la tasa del cambio adimensional de la temperatura del producto durante el enfriamiento.

$$Y = je^{-kt} \quad (6)$$

Donde,

j : factor de retardo [adimensional]

k : coeficiente de velocidad del enfriamiento [min^{-1}].

t : tiempo [min].

Shim et al. [27], utilizaron este modelo para analizar el enfriamiento de media tarima de cajas de kiwi empacado y encontraron que “ k ” cambió a lo largo del enfriamiento y propusieron dividir las curvas en tres fases, según el valor de Y , de 1 a 0,75 como fase inicial, de 0,75 a 0,5 como fase de transición y una fase final de 0,5 a 0,125.

En este estudio, se encontró que la fase inicial tuvo la pendiente (k) más alta en comparación con la fase final, por lo que al inicio, el enfriamiento es más rápido y que la fase de transición fue aproximadamente el promedio entre la fase final e inicial por lo que analizaron el enfriamiento dentro de las cajas y entre cajas, comparando la fase inicial con la final [27]. Estos autores, concluyeron que este método permite proveer una descripción más detallada y dinámica del enfriamiento, en comparación con únicamente comparar el $t_{1/2}$ y el $t_{7/8}$, además mencionaron que este método puede asistir la creación de modelos y entonces la predicción del proceso, como una función de la posición dentro del sistema, así como establecer sus relaciones existentes con las características del flujo de aire que atraviesa las cajas.

A partir de la ecuación 6, se puede determinar el $t_{1/2}$, $t_{3/4}$ ($Y= 0,25$) y el $t_{7/8}$, con las ecuaciones 7, 8 y 9, respectivamente [28]. Y con el coeficiente de enfriamiento “k”, es posible estimar el coeficiente de transferencia de calor convectivo “h” entre el aire y la fruta, según la ecuación 10 [29].

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2j}{k_f} \quad (7)$$

$$t_{3/4} = \frac{\ln 4j}{k_f} \quad (8)$$

$$t_{7/8} = \frac{\ln 8j}{k_f} \quad (9)$$

$$h = \frac{mC_p k_f}{A} \quad (10)$$

Donde,

h: coeficiente de transferencia de calor convectivo [$W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$].

m_p : masa del producto [kg]

C_p : calor específico de la fruta [$J \cdot kg^{-1} \cdot C^{-1}$].

k_f : coeficiente de velocidad del enfriamiento en la fase final [s^{-1}]

A: área de la fruta [m²]

Dentro de las tecnologías poscosecha disponibles, el preenfriamiento es considerado una actividad crítica en el proceso, con el propósito de remover el calor de campo del producto recién cosechado, para reducir su metabolismo y deterioro antes del almacenamiento o transporte. El enfriamiento con aire forzado es un tipo de preenfriamiento que requiere tiempos relativamente cortos para remover el calor de campo de la fruta, al exponer al producto empacado, a mayores presiones y caudales de aire, que el enfriamiento en cámaras de refrigeración [21].

En el enfriamiento con aire forzado, el calor es removido por conducción hacia la superficie del producto seguido por la transferencia de calor por convección desde la superficie del producto, sobre la cual el aire es forzado por el ventilador. El efecto neto de la radiación en los productos empacados es pequeño por lo que el mecanismo puede describirse suficientemente como una pseudoconvección [7].

Asumiendo un dominio simple, homogéneo y que la evaporación y la respiración son despreciables, el análisis del enfriamiento de los productos agrícolas, puede simplificarse en base a la razón de la resistencia interna del producto a la conducción de calor con respecto a su resistencia externa a la convección de calor [7]. Esta razón es descrita por el número de Biot, ecuación 11.

$$Bi = \frac{hL}{k_p} = \frac{L/k_p}{1/h} \quad (11)$$

Donde,

h: coeficiente de transferencia de calor convectivo [W·m⁻²·°C⁻¹].

k_p: conductividad térmica [W m⁻¹ °C⁻¹]

L: longitud característica del producto [m]

Esta ecuación, permite establecer un parámetro de comparación entre la resistencia térmica interna de un sólido ($L \cdot k_p^{-1}$) y la resistencia térmica de la capa límite ($1 \cdot h^{-1}$) [30]. Cuando el número de Biot es menor a $< 0,1$, se considera al producto en una condición simplificada en la que el factor limitante de la transferencia de calor es la convección, por lo que el gradiente de temperatura dentro del producto puede despreciarse y entonces no existe retraso en el cambio de temperatura entre el centro del producto y su superficie [27].

Por su parte, cuando $Bi > 0,1$, se dice que la resistencia a la conducción del calor dentro del producto es mayor que la resistencia a la convección entre el fluido y el producto [27,30], por lo que el factor que limita la transferencia de calor es la conducción interna [7], así que, es de esperarse que la superficie expuesta al flujo de aire se enfríe más rápidamente que la pulpa de la fruta, situación que provoca diferencias de temperatura en el interior y un retraso en el tiempo de enfriamiento. En esta condición ($Bi > 0,1$), utilizar solo el valor de “k” de la curva de cambio adimensional de temperatura, Y, en función del tiempo (ecuación 6), no es suficiente para describir por completo el enfriamiento del producto [27], sino que se debe analizar el enfriamiento interno de la fruta.

El principio de superposición llamado “solución producto” puede ser utilizado para encontrar la solución de la conducción de calor bidimensional en régimen transitorio en el interior del producto, para sistemas en que la conducción de calor es el factor limitante. El producto de las soluciones unidimensionales (cuya intersección es el sólido multidimensional) es la solución de la configuración multidimensional [22], de esta forma es posible modelar el enfriamiento dentro de la fruta, estimar la temperatura en algún instante y algún punto interno del producto y entonces proveer un estudio más amplio y profundo, junto con las curvas de Y, para el análisis del enfriamiento con aire forzado de la piña.

En la tabla 1 se muestran las propiedades reportadas en la literatura para la piña. Es una variedad de pulpa brillante de coloración amarilla, con alto contenido de sólidos solubles (entre 12,6 % y 13,0 %) y acidez titulable (entre $0,75 \text{ g}_{\text{ácido cítrico}} \cdot 100 \text{ g}_{\text{peso fresco}}^{-1}$ y

0,70 g ácido cítrico 100 g peso fresco⁻¹), es rica en vitamina C (entre 305 mg·kg peso fresco⁻¹ y 351 mg·kg peso fresco⁻¹) [31] y tiene una densidad entre 920 kg·m⁻³ y 1100 kg·m⁻³ [32].

Tabla 1. Propiedades reportadas en la literatura para la piña

Propiedad	Magnitud	Cultivar	Fuente
L*	66,8 - 70,5	DED	[31]
a*	-4,8 - -5,7	DED	[31]
b*	46,0 - 49,0	DED	[31]
Contenido de sólidos solubles [%]	12,6 - 13,0	DED	[31]
Acidez titulable (g ácido cítrico·100 g peso fresco ⁻¹)	0,75 - 0,70	DED	[31]
Vitamina C [mg·kg peso fresco ⁻¹]	305 - 351	DED	[31]
Densidad, ρ [kg·m ⁻³]	920 - 1100	DED	[33]
Calor específico, C_p [kJ·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹]	3,68 - 3,85	nd	[34,35]
Conductividad térmica, k_p [W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹]	0,49 ¹ - 0,549 ²	nd	[36,37]
Coefficiente de transferencia de calor, h [W·m ⁻² ·°C ⁻¹]	11,2 - 20 ²	nd	[38]
Difusividad térmica, α [mm ² ·s ⁻¹]	0,14 ³	nd	[36]
Actividad de agua, a_w	0,985 - 0,988	nd	[37]
Contenido de humedad [%]	81 - 86	DED	[31,39,40]

¹ reportado entre 2°C - 18°C

² $T_i = 21,6$ °C, $T_{aire} = 9,5$ °C, HR= 95 %, $V_{aire} = 0,88$ m·s⁻¹

³ para trozos de piña entre 3 °C y 21 °C

nd: no disponible, DED: dorada extra dulce (MD2)

Sus propiedades térmicas, importantes para los procesos de enfriamiento, son similares a las de otras frutas y muy relacionadas a su contenido de humedad. Aunque la información disponible para estas propiedades de la piña, no hace referencia a la variedad, los valores sirven de referencia de las propiedades de esta fruta.

Así, el calor específico, C_p , varía entre 3,68 kJ·kg⁻¹·°C⁻¹ y 3,85 kJ·kg⁻¹·°C⁻¹, que representa la energía que debe removerse o agregarse para reducir o aumentar la temperatura del producto 1 °C, valor que se relaciona directamente con el contenido de humedad del producto. Productos con mayor contenido de agua como el melón y la fresa, tienden a tener mayores capacidades (3,99 kJ·kg⁻¹·°C⁻¹ y 4,00 kJ·kg⁻¹·°C⁻¹) [34] y otros como la granada y el mango que tienen contenidos de humedad del orden de 81 % - 82 %, tienen calores específicos similares a la piña (3,70 kJ·kg⁻¹·°C⁻¹ y 3,74 kJ·kg⁻¹·°C⁻¹ [34]).

Conociendo el calor específico de la piña, se puede estimar la cantidad de energía necesaria para reducir su temperatura de campo; así para enfriar una fruta que ingresa a la planta empacadora con una temperatura de 33 °C, hasta su temperatura recomendada (7 °C), es necesario remover entre 95,7 kJ·kg⁻¹ y 100,1 kJ·kg⁻¹, y si la temperatura de ingreso es mayor, será necesario remover adicionalmente entre 3,7 kJ y 3,8 kJ por cada kg y °C de diferencia, respectivamente.

La remoción de calor de la fruta, desde su centro geométrico hasta su superficie externa, está gobernada por la diferencia de temperatura entre el centro de la fruta y el exterior, y por la conductividad térmica de la fruta y su cáscara, que es una medida de su capacidad de transferir calor por conducción.

La conductividad térmica de la piña es del orden de 0,49 W·m⁻¹·°C⁻¹ y 0,549 W·m⁻¹·°C⁻¹ (entre 2 °C y 18 °C), un poco menor que la del agua a temperatura ambiente (0,60 W m⁻¹ °C⁻¹ [41]) y similar a otras frutas, como el mango, naranja, granada y papaya (0,562 W·m⁻¹·°C⁻¹ [42], 0,584 W·m⁻¹·°C⁻¹ [25], 0,52 W·m⁻¹·°C⁻¹ [43] 0,58 W·m⁻¹·°C⁻¹ - 0,62 W·m⁻¹·°C⁻¹ [44], respectivamente), mientras que es levemente inferior a la de la fresa (0,75 W·m⁻¹·°C⁻¹ [45] y 0,63 W·m⁻¹·°C⁻¹ a 14 °C [44]). Esta comparación indica que la velocidad con que la piña y otras frutas pueden transferir calor por conducción a través de su pulpa es similar, pero cuanto mayor sea su diámetro, más tiempo se requerirá para reducir la temperatura en su centro, por tanto, las piñas, al ser frutas grandes, requerirán más tiempo para el enfriamiento que otras más pequeñas.

La tercera propiedad térmica de la piña es la difusividad térmica, α , reportada para la piña como 0,14 mm²·s⁻¹ (entre 3 °C y 21 °C). En esta propiedad se combina la capacidad de la fruta de transferir el calor y su capacidad de almacenar energía, al guardar una relación directa con la conductividad térmica y recíproca con la capacidad calorífica ($\alpha = k \cdot \rho^{-1} \cdot c_p^{-1}$). Esta propiedad también depende del contenido de humedad y de la temperatura, por lo que otras frutas tiene difusividades térmicas similares, como la de la papaya, fresa, banano y limón (entre 0,103 mm²·s⁻¹ - 0,118 mm²·s⁻¹, entre 20 °C y 40 °C [44]).

Por su parte, otra propiedad térmica, que no es propiamente de la piña, sino de su interacción con el ambiente, es el coeficiente de transferencia de calor convectivo, h , y este depende de las propiedades del fluido (densidad, viscosidad, calor específico y conductividad térmica), su velocidad, el área de contacto con la fruta y la diferencia de temperatura entre la fruta y el fluido [41]. El valor que aparece en la tabla 1, corresponde a un estudio de un sistema de aire forzado con una velocidad de aire de $0,88 \text{ m s}^{-1}$, una temperatura del aire y temperatura inicial de la fruta de $9,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y $21,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente y se incluyó en la tabla 1, como referencia y para poder hacer un estimado del número de Biot (ecuación 11).

Nicolai et al. [38], realizaron una validación experimental del estudio de fluctuaciones de la temperatura de la piña durante el enfriamiento. Encontraron que el enfriamiento varía dentro de la fruta. En el centro térmico (y geométrico) de la fruta, la reducción de la temperatura fue menor en comparación a otros sitios ubicados radial y longitudinalmente más cercanos a la cáscara, lo que muestra por un lado que existe un enfriamiento heterogéneo dentro de la fruta y a su vez que el centro geométrico es el sitio más caliente, durante el enfriamiento [38]. Además, el enfriamiento no sólo varía dentro de la fruta como se mencionó anteriormente, sino también entre las frutas según su posición dentro del sistema de enfriamiento [27].

Las operaciones de enfriamiento son usualmente gestionadas en base al producto más caliente, por tanto, es necesario inspeccionar la temperatura en diferentes posiciones del sistema para determinar donde se localiza el producto más caliente. El monitoreo de la temperatura consume mucho tiempo, pero es una herramienta de gestión muy valiosa para evaluar la eficacia de la operación y debe ser hecha rutinariamente para asegurar que el enfriamiento sea completado [46].

Como se resaltó previamente, existen diferencias de temperatura del producto a múltiples escalas, por ejemplo entre distintos puntos de la cámara [26], entre la misma tarima [47,48], entre el mismo nivel de la tarima [43], entre las frutas dentro de la caja [25] e incluso en el interior de una sola fruta [38] y aunque lo ideal es contar con un gran número de puntos de medición, resulta complicado llevarlos a cabo durante la operación de los sistemas de enfriamiento, debido a que el producto ya se encuentra

colocado dentro del empaque final y al alto costo de tiempo y recursos para cada corrida, por lo que se ha recurrido a realizar simulaciones e incluso validaciones experimentales, de forma separada y con carga parcial [26], es decir no considerando todos los elementos del sistema, sino sólo una parte del mismo. Si bien es cierto, los modelos como la dinámica de fluidos computacional son una herramienta eficiente para la simulación de diversos procesos de enfriamiento en la industria de la fruta fresca, ya que también integran el flujo de aire y la transferencia de calor y masa, su validez está directamente determinada por la precisión de los resultados experimentales [49], que son influenciados por múltiples componentes como las características del producto y del empaque (dimensiones y ventilaciones), acomodo de tarimas (espacios libres entre tarimas), posición dentro de la tarima, temperatura, velocidad del aire y humedad relativa del aire y otros.

Ferrua y Singh [50] propusieron una guía de diseño para el proceso de enfriamiento de fresas con aire forzado, con dos columnas de tarimas y un túnel central de succión. Definieron como supuesto que, existe una distribución uniforme del flujo de aire a través de las tarimas y consideraron una simetría estructural del empaque. Encontraron que, los fenómenos de transporte local dentro del sistema pueden ser caracterizados totalmente, modelando solo una mitad de las bandejas de fresas en un solo nivel de la tarima, considerando el paso del aire de un lado a otro, desde la descarga del ventilador (entrada del aire a la tarima) hasta el lado de la succión del ventilador (salida del aire al atravesar la tarima) [50]. Además, consideraron que el nivel en que se colocaban las cajas dentro de la tarima no afectaba el enfriamiento y se utilizaron estas suposiciones para el desarrollo del modelo numérico [45]. En este estudio, incluso después de la primera hora de enfriamiento, encontraron diferencias de temperatura promedio entre las fresas dentro de una bandeja, de 5,1 °C en la bandeja cercana a la succión del túnel y de 3,5 °C en la bandeja cercana al aire de la descarga del evaporador y concluyeron que la heterogeneidad del proceso de aire forzado no es sólo generada por el incremento de la temperatura del aire conforme pasa a través del sistema, sino también por el comportamiento local del mismo debido a la estructura del empaque [45]. Además

mencionaron que las consideraciones que plantearon para modelar el fenómeno de transporte dentro del empaque utilizado, además de la dificultad de reproducir el lado, la forma y la posición de las frutas en las corridas experimentales, permitieron obtener un buen ajuste entre los perfiles de temperatura promedio predichos y los medidos, por bandeja [51].

3. MATERIALES Y MÉTODOS

El núcleo del marco metodológico de este estudio, se muestra en la figura 1.

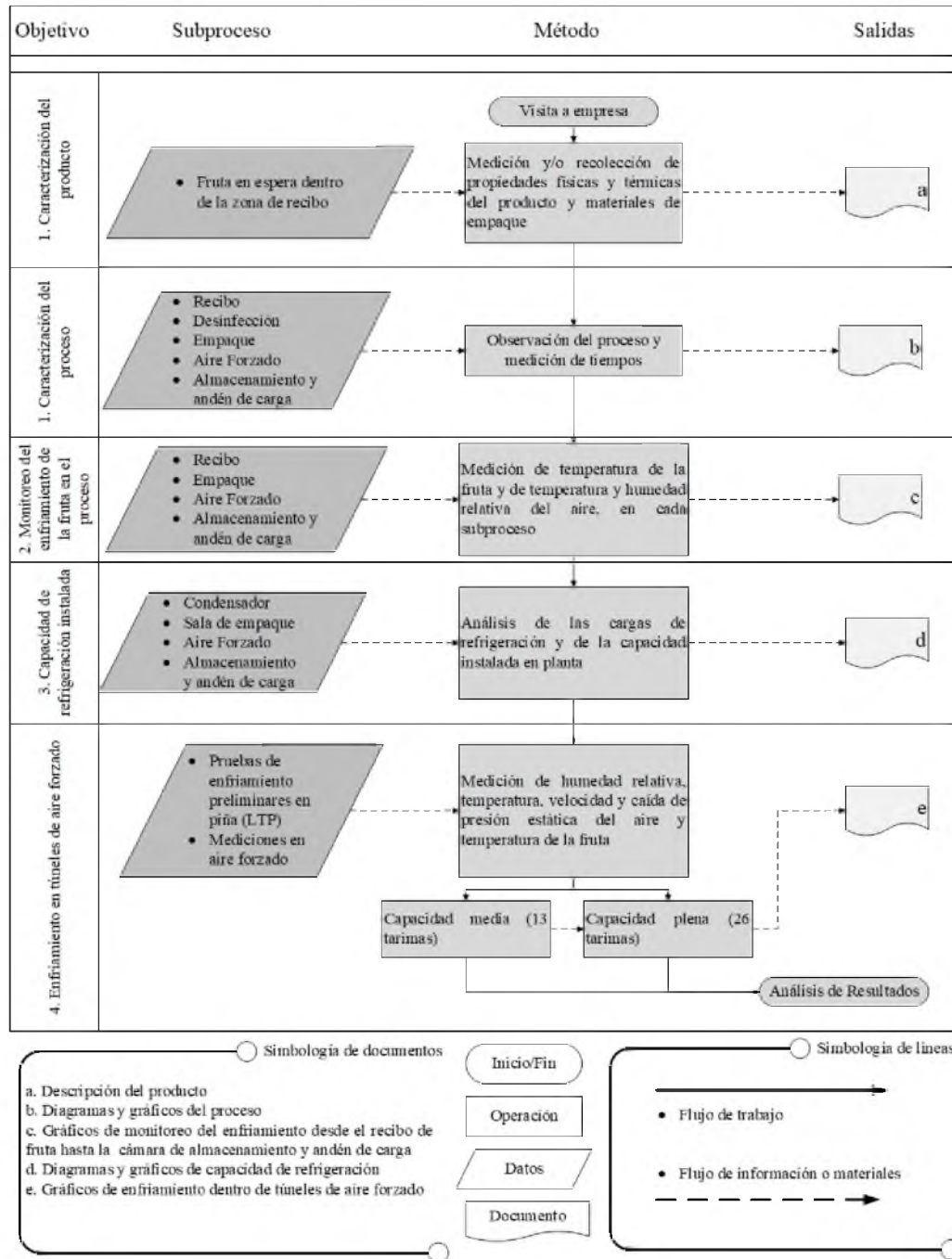


Figura 1. Núcleo del marco metodológico.

3.2 Caracterización del producto

Este estudio se realizó en la planta empacadora de piña de la empresa Tropical Paradise Fruits Co, ubicada en Muelle de San Carlos, Alajuela, Costa Rica. La caracterización del producto se realizó a través de la medición de la masa, longitud y diámetro de la fruta y se llevó a cabo una síntesis de propiedades desde una revisión literaria. La masa fue medida con una balanza METTLER TOLEDO modelo IND226 utilizando 7 frutas calibre 7. El diámetro y la longitud de la fruta sin corona, fueron medidas con una regla convencional (resolución de 1 mm), se cortaron las frutas transversalmente a la longitud de la misma, a 4 cm del pedúnculo, en el centro y a 4 cm de la corona, de forma tal que se pudo medir el diámetro cerca del pedúnculo, en el centro y cerca de la corona.

3.3 Caracterización del proceso

La descripción del proceso de preparación y empaque de fruta fresca, fue realizado de forma cualitativa, mediante la observación de las actividades, con el uso de un diagrama de flujo horizontal con el propósito de identificar los distintos niveles dentro del sistema productivo de piña [52], dividiéndolo en macroproceso, procesos y subprocesos.

Cuantitativamente, en la medición de tiempos de las operaciones de preparación y empaque de fruta fresca, se utilizó un cronómetro convencional, con el que se midió el tiempo que permanecía una fruta al atravesar cada subproceso, para un total de 5 repeticiones. Los tiempos de los subprocesos fueron agrupados en una primera etapa que comprende desde el recibo hasta la clasificación (llamada Recibo-Empaque), seguido del tiempo de operación de empaque y entarimado (llamada Sala de empaque) y finalmente el tiempo de los subprocesos de enfriamiento con aire forzado y almacenamiento refrigerado. Dichos tiempos, fueron referenciados en base al tiempo necesario para lograr el llenado e inicio de la operación dentro de un túnel de aire forzado a capacidad plena (26 tarimas), así que la unidad de flujo es 26 tarimas de producto terminado. Estos datos fueron resumidos a través del diagrama de Pareto, que muestra la proporción acumulada de los tiempos de los subprocesos respecto al tiempo total del proceso, así como a la reducción total de temperatura.

3.4 Condiciones de temperatura de la fruta y de temperatura y humedad relativa del aire, desde el recibo hasta el despacho de fruta

Para el monitoreo de las condiciones ambientales del proceso, se utilizaron sensores de temperatura y humedad relativa UX100-003 HOBO. Se ubicó un sensor en una de las paredes del área de recibo, dos en la zona de empaque, dentro de un túnel de aire forzado se colocó un sensor sobre la pared frontal al aire de descarga del evaporador y uno sobre la pared frontal al aire de succión, dos sensores en la pared de la cámara de refrigeración y un sensor sobre la pared del área de despacho.

A su vez, fue medida la temperatura en el centro geométrico de una de piña calibre número 7 (a una profundidad de $7,2 \text{ cm} \pm 0,7 \text{ cm}$ desde el pedúnculo) en cada subproceso (figura 2). Dicho registro se realizó mediante el sensor TMC-HA, HOBO, cuyo rango es de $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ a $100 \text{ }^\circ\text{C}$ en aire y de $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ a $50 \text{ }^\circ\text{C}$ en agua, con una precisión de $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ y con la unidad de adquisición de datos U12-012 HOBO, cuyo rango de medición es de $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ a $70 \text{ }^\circ\text{C}$ con una precisión de $\pm 0,21 \text{ }^\circ\text{C}$ de $0 \text{ }^\circ\text{C}$ a $50 \text{ }^\circ\text{C}$.

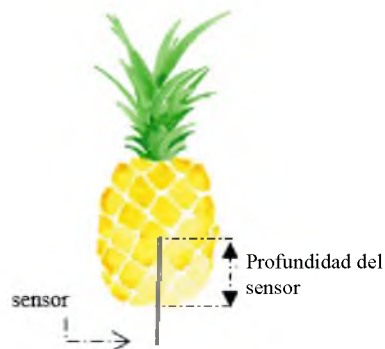


Figura 2. Diagrama de medición de temperatura en el centro geométrico de la piña.

Se midió la temperatura del centro geométrico de la fruta antes de entrar a la pila de lavado y desinfección, posteriormente se devolvieron las frutas a la pila y se extrajeron al culminar el secado después de la aplicación de cera y fungicida. Las frutas se devolvieron a las bandas de transporte y una vez clasificadas y empacadas, se extrajeron para anotar las mediciones.

La fruta empacada se colocó en el nivel superior de una tarima y se ubicó en la región central del túnel de aire forzado. Después de 210 min en el túnel, se dejó la caja, un total de 240 min dentro de la cámara de refrigeración y se extrajo finalmente para registrar las mediciones de temperatura de la fruta, de esta manera se obtuvo el registro de temperatura en el centro geométrico de la fruta desde el recibo hasta el despacho.

Estas mediciones fueron repetidas tres veces, por lo que los valores reportados corresponden al valor promedio de las variables por cada subproceso, durante las visitas realizadas a la empresa en enero de 2017 para el turno comprendido entre la 1:00 pm y las 10:00 pm.

3.4.1 Monitoreo de temperatura en las cámaras de almacenamiento y despacho

El monitoreo de la temperatura dentro de la cámara de almacenamiento y el andén de carga fue realizado con el mismo equipo de medición empleado en los túneles de aire forzado (sección 3.6.3.2). Las cajas que fueron retiradas de las tarimas, una vez terminada la operación del túnel, fueron situadas en esta cámara para monitorear el enfriamiento durante 240 min. Los datos de temperatura registrados, se transformaron a la variable Y , con la ecuación 1. Además, se realizó una proyección de lo que sería el enfriamiento de las tarimas de producto dentro de un contenedor de transporte marítimo para exportación, siguiendo el procedimiento de estimación de la carga de refrigeración descrito en la siguiente sección.

3.5 Capacidad de refrigeración instalada

3.5.1 Capacidad nominal

Se identificaron los datos nominales de los equipos de evaporación marca Güntner, el equipo de compresión marca Vilter y la unidad de condensación marca BAC y se solicitaron los datos técnicos al proveedor de diseño e instalación de los sistemas de refrigeración de la empresa.

3.5.2 *Análisis de sensibilidad técnica de los subprocesos bajo refrigeración*

La estimación de la capacidad requerida de refrigeración para cada sala con base en la carga térmica, se detalla en el siguiente procedimiento [53]. Para el caso del calor de respiración se tomaron los valores reportados en la literatura [12].

- i. Carga de transmisión a través de paredes, piso y cielo.

$$q_w = UA_a \Delta t_a \quad (12)$$

$$U = \frac{1}{1/h_i + x/k_p + 1/h_o} \quad (13)$$

- ii. Carga del producto

$$q_p = \frac{m_p c_p \Delta t}{3600 n_e} \quad (14)$$

- iii. Calor de respiración

$$q_r = 0,0059 * R * m_p \quad (15)$$

- iv. Carga interna

- a. Motores.

$$q_{em} = \frac{P}{E_M} F_{EM} F_{LM} \frac{x_t}{24} \quad (16)$$

- b. Personas

$$q_{per} = 272 - 6t_p \quad (17)$$

- c. Iluminación

$$q_{el} = W_l A_l F_{ul} F_{sa} \quad (18)$$

- v. Empaques

$$q_e = \sum \frac{m_i C_i \Delta t}{3600 n_e} \quad (19)$$

vi. Infiltración por cambio de aire

$$q_s = \left(\frac{T_{inf}}{v} \right) (h_{int} - h_{ext}) \quad (20)$$

Donde,

- A_a: área externa del aislamiento, m²
- A_i: área iluminada, m²
- C_i: calor específico del elemento del empaque, J·kg⁻¹·°C⁻¹
- C_p: calor específico del producto, J·kg⁻¹·°C⁻¹
- E_M: eficiencia del motor, dec
- F_{EM}: factor de carga del motor, dec
- F_{LM}: factor de uso del motor, dec
- F_{ul}: factor de uso de la iluminación, dec
- F_{sa}: factor especial de asignación, dec
- P: potencia del motor, W
- R: respiración, mgCO₂·kg⁻¹·h⁻¹
- T_{inf}: tasa de infiltración, m³·s⁻¹
- W_i: potencia total de la iluminación, W·m⁻²
- h_i: conductancia superficial en el interior del espacio refrigerado, W·m⁻²·°C⁻¹
- h_o: conductancia superficial en el exterior del espacio refrigerado, W·m⁻²·°C⁻¹
- h_{int}: entalpía del aire interno, J·kg⁻¹
- h_{ext}: entalpía del aire externo, J·kg⁻¹
- k_p: conductividad térmica del material, W·m⁻¹·°C⁻¹
- m_p: masa de producto, kg
- m_i: masa del elemento del empaque, kg
- n_e: tiempo de enfriamiento, h
- q_p: ganancia de calor del producto, W
- q_w: ganancia de calor del aislamiento, W
- q_r: calor de respiración, W
- q_{em}: calor equivalente a la operación del equipo, W
- q_{per}: carga de calor de una persona, W
- q_{el}: ganancia de calor por iluminación, W
- q_e: carga de calor del empaque, W
- q_s: carga de refrigeración por cambio de aire, W
- t_p: temperatura del espacio refrigerado, °C
- v: volumen específico del aire externo a la cámara, m³·kg⁻¹
- x_t: tiempo de operación de los motores, h

x: espesor del material, m

Δt : diferencia entre la temperatura inicial del producto y la temperatura deseada, °C

La tabla 2, muestra los parámetros utilizados para la estimación de la capacidad requerida por cada espacio refrigerado y para cada uno de los escenarios (tabla 3), que corresponden al análisis de sensibilidad técnica.

Se asumió que las paredes de los espacios refrigerados fueron consideradas a estar constituidas de panel con núcleo de espuma de poliuretano; que la tasa de respiración corresponde al valor promedio de respiración a la temperatura de la fruta dentro de cada sala; que el efecto de las variables h_i y h_o de la ecuación 13, para la estimación de la variable “U” es despreciable, debido a que las paredes son delgadas y presentan bajas conductividades [53] y las propiedades del aire fueron estimadas a partir de una carta psicrométrica [54].

Para contrastar la capacidad instalada con tres condiciones de operación (tabla 3), se hizo un análisis de sensibilidad técnica integrada, en el que se varió la cantidad de tarimas de producto, así como la diferencia entre la temperatura inicial y final en cada subproceso.

En la sala de empaque, se usó la carga requerida para 26 tarimas de producto terminado, que es la cantidad con que se completa el llenado de un túnel de aire forzado.

También se analizó como escenario una carga de 104 tarimas que corresponde al llenado de los 4 túneles de aire forzado, con diferenciales de temperatura de 6 °C, 5 °C y 3 °C, de tal forma que, con una temperatura inicial de la fruta de 33 °C la temperatura final correspondió a 27 °C, 28 °C y 30 °C respectivamente.

En los túneles de aire forzado, se analizó la variación de la carga de producto (13 o 26 tarimas) y diferenciales de temperatura de 20 °C, 17 °C y 12 °C, tal que, con una temperatura inicial de la fruta de 27 °C la temperatura final correspondió a 7 °C, 10 °C y 15 °C respectivamente.

Tabla 2. Parámetros de la estimación de la capacidad requerida de refrigeración.

Elemento	Descripción	(AF)	(EM)	(AR)	(AN-1)	Fuente	
Aislamientos	Espesor [m]	Paredes, pisos y techo	0,075	0,075	0,075	0,075	[53]
	k [W/(m °C)]	Paredes, pisos y techo	0,027	0,027	0,027	0,027	[53]
	U [W/(m ² °C)]	Paredes, pisos y techo	0,36	0,36	0,36	0,36	[53]
	Área [m ²]	Núcleo de poliuretano	237	2627	1784	454	
Producto	Tarimas		13 o 26	26 o 104	26 o 104	26 o 42	
	m _p [kg]	Por cada tarima	981,68	981,68	981,68	981,68	
	Cajas	Cajas por tarima	80	80	80	80	
	m [kg] por tarima	Cartón (cajas)	0,8	0,8	0,8	0,8	
		Madera (tarima)	25	25	25	25	
		Plástico	2,13	2,13	2,13	2,13	
	Cp [J/(kg °C)]	Fruta	3850	3850	3850	3850	[35]
		Cartón	1400	1400	1400	1400	[53]
		Madera	1700	1700	1700	1700	[53]
		Plástico	1600	1600	1600	1600	[53]
Respiración	[mgCO ₂ /(kg h)]	5,5 a 7°C	43 a 27 °C	5,5 a 8,3 °C	5,5 a 6,4°C	[12]	
Motores	P [W]		7460 ²	11479 ¹	8952 ²	2984 ²	
	E _m		0,85	0,85	0,85	0,85	[55]
	F _{UM}	Operación continua	1	1	1	1	[55]
	x _t [h]		10	12	24	24	
Iluminación	F _{LM}		1	0,865 ³	1	1	[55]
	W ₁ [W/m ²]		4,6	4,6	4,6	4,6	[55]
	A ₁ [m ²]		42	1012	598	115	
	F _{ul}		1	1	1	1	[55]
	F _{sa}		1	1	1	1	[55]
Infiltración	Volumen [m ³]		N. A	4554	3588	460	
	T ₁ [1/s]		N. A	124,4	99,28	17,95	[40]
	h _{ext} [kJ/kg]		N. A	93,74	43,03	93,74	
	h _{int} [kJ/kg]		N. A	43,03	23,26	20,21	
Personas	Δt _a [°C]	Aislamientos	10,4	18,6	9,3	29,7	
		Producto	20-17-12	6-5-3	8-3	8-3	
		Personas a T _{int} del espacio	2 personas a 7,2 °C	30 personas a 17,6 °C	3 personas a 8,3 °C	2 personas a 6,5	

¹ 45 motores con potencias entre 746 W (1 hp) y 2238 (3 hp). AR (almacenamiento refrigerado).

² 12 motores. ³Varía en función de la potencia. N.A: no aplica infiltración. AN-1 (Andén de carga 1)

Los subíndices int y ext son las temperaturas, T, (o entalpías, h) interna y externa de cada espacio

Los subíndices int y ext son las temperaturas, T, (o entalpías, h) interna y externa de cada espacio.

En Δt_a (diferencia de temperatura entre la T_{ext} y la T_{int}) la T_{ext} es 36,2°C para todos menos para A.F (Aire forzado), su T_{ext} es la T_{int} (17,6 °C) de la sala de empaque (EM).

Tabla 3. Escenarios del análisis de sensibilidad técnica.

Espacio refrigerado	Carga de producto de cada escenario (Número de tarimas)	Q_i	T_i [°C]	T_f [°C]
Sala de empaque (EM)	26 y 104	1	33	27
		2	33	28
		3	33	30
Túnel de aire forzado (AF)	26 y 13	1	27	7
		2	27	10
		3	27	15
Cámara de almacenamiento refrigerado (AR)	26 y 104	1	15	7
		2	10	7
		3	7	7
Andén de carga 1 (AN-1)	26 y 42	1	15	7
		2	10	7
		3	7	7

Q_i : carga de refrigeración del escenario i ; T_i : Temperatura inicial de la fruta; T_f : Temperatura final de la fruta

La cantidad de producto que se analizó para la cámara de refrigeración, fue de 26 y 104 tarimas, pero con diferenciales de temperatura de 8 °C (temperatura inicial de la fruta de 15 °C para llevarla a 7 °C), 3 °C (temperatura inicial de la fruta de 10 °C para llevarla a 7 °C) y la estimación de la carga requerida para mantener la temperatura de la fruta en 7 °C.

El andén de carga tiene dos plataformas para la disposición del producto en los contenedores, por lo que esta sala fue estimada en base a 42 tarimas, que es la cantidad que completa dos contenedores para la exportación, así como también con una carga de 26 tarimas, y diferenciales de temperatura de 8 °C y 3 °C y la estimación de la carga requerida para mantener la temperatura de la fruta en 7 °C. Las cargas debidas a la transmisión de calor a través de paredes, piso y cielo, a motores, personas, iluminación e infiltración del aire fueron agrupadas como cargas fijas, en el análisis de sensibilidad.

3.6 Enfriamiento de la piña dentro de los túneles de aire forzado

3.6.1 Configuración de empaque de la fruta

Mediante el programa de dibujo Inventor[®], se dibujó en 3D el empaque de la fruta y se analizó de forma conceptual el paso del aire a través de los empaques.

3.6.2 Análisis conceptual de las principales rutas para el flujo de aire

El análisis del paso del flujo de aire fue realizado de forma conceptual, sobre los modelos tridimensionales, señalizando las líneas de corrientes principales, así como posibles puntos de bloqueo dentro de las configuraciones de acomodo en los túneles de aire forzado. Se analizaron las rutas para el flujo de aire en un nivel de la tarima (con 5 cajas de producto), considerando la entrada del aire por el lado de 1,0 m de ancho, así como la entrada del aire por el lado de 1,2 m de ancho y de igual forma para el caso a capacidad plena, donde dos niveles de cajas se encuentran adyacentes en la dirección del paso del aire. También se estudiaron los espacios libres (bypass) entre tarimas, producto de las actividades de acomodo de las mismas dentro de los túneles.

3.6.3 Análisis de la temperatura durante el enfriamiento con aire forzado

3.6.3.1 Pruebas preliminares de enfriamiento

El enfriamiento individual dentro de la fruta fue realizado en el Laboratorio de Tecnología Poscosecha (LTP) del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica. Se adquirieron tres piñas de un minorista local con un diámetro promedio de $16,8 \text{ cm} \pm 0,4 \text{ cm}$ y una longitud de $24,3 \text{ cm} \pm 1,0 \text{ cm}$.

En cada una de las muestras, se insertaron 4 termopares tipo T (marca Pyromation, Inc.), ubicadas radialmente desde el centro geométrico del producto (figura 2) hacia la superficie, conectadas al módulo de adquisición de datos marca FLUKE, tal como muestra la figura 3.



Figura 3. Medición de la temperatura interna de la fruta en el subproceso de enfriamiento.

Las condiciones de operación de la cámara utilizada para el enfriamiento de la piña en esta etapa, se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Condiciones de operación de la cámara de refrigeración del Laboratorio de Tecnología Poscosecha, CIA, UCR.

Condiciones	
$T_{\text{aire}} [^{\circ}\text{C}]^{\dagger}$	$4,9 \pm 0,8$
HR [%] [†]	$74,2 \pm 8,2$
$T_{\text{fruta (inicial)}} [^{\circ}\text{C}]$	$23,2 \pm 0,1$
$t_{\text{enf.}} [\text{min}]$	340
S_1^{\ddagger} [cm]	$8,3 \pm 0,2$
S_2^{\ddagger} [cm]	$7,0 \pm 0,3$
P_1^{\ddagger} [cm]	$4,0 \pm 0,3$
C_e^{\ddagger} [cm]	-

Notas: [†] a partir de estabilización a los 30 min de iniciado el subproceso; \pm indica la desviación estándar; [‡] indica distancia radial desde el centro geométrico de la fruta; $d_{\text{medio, fruta}}$ [cm] $16,75 \pm 0,35$; S_1 : Pulpa a $8,3 \pm 0,2$ cm del centro geométrico; S_2 : Pulpa a $7,0 \pm 0,3$ del centro geométrico; P_1 : Pulpa a $4,0 \pm 0,3$ del centro geométrico; C_e : centro geométrico de la fruta; T: Temperatura; HR: Humedad Relativa; t: tiempo de enfriamiento

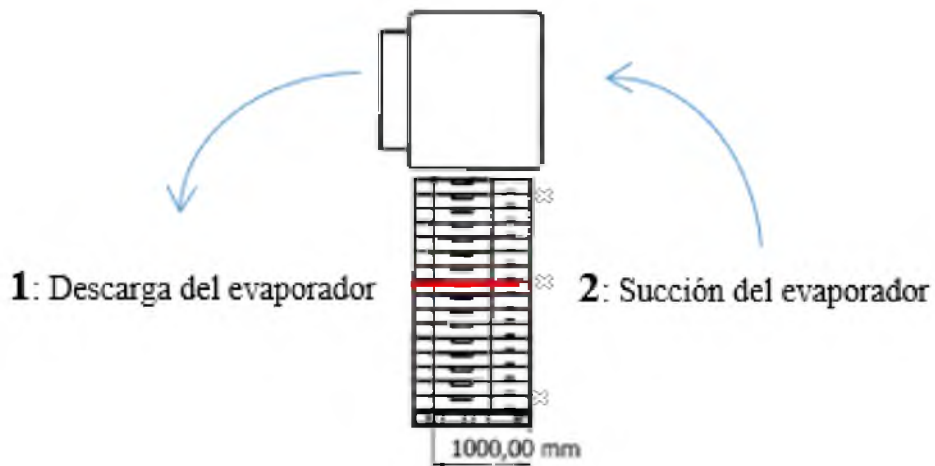
Los datos medidos de temperatura de estas pruebas preliminares de enfriamiento fueron procesados a través del uso de las ecuaciones 1, 2, 3, 4 y 5, detalladas en la sección anterior. De esta forma, el rendimiento del subproceso de enfriamiento fue analizado a través del cambio adimensional de temperatura (Y) y la heterogeneidad del mismo en base al ΔY , $\Delta Y_{\text{máx}}$ y la D_{TP} .

3.6.3.2 Enfriamiento en los túneles de aire forzado

Se realizaron los registros de temperatura en el centro geométrico de la fruta (calibre número 7 y 100 % de color verde externo, escala 0), a lo largo de la línea de corriente principal del aire de enfriamiento, que atraviesa la(s) tarima(s). Los registros se hicieron dentro de una caja ubicada cerca de la zona de abastecimiento del aire (1, descarga del evaporador) y otra ubicada en la salida del aire de la tarima (2, cerca de la antecámara de retorno del aire o succión). La figura 4, muestra la ubicación de las mediciones de temperatura, sobre el nivel medio de la tarima (nivel 9), tal que la caja adyacente al punto 1 es la caja que contiene la fruta cerca de la descarga y la caja adyacente al punto 2, la que contiene la fruta cerca de la succión. Cabe destacar que el aire recorre una distancia de 1,2 m al atravesar una fila de

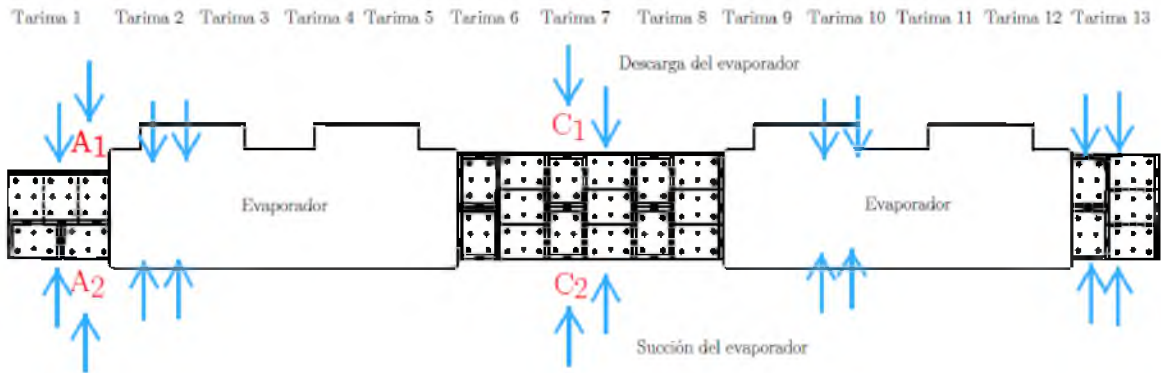
tarimas a capacidad media y 2,4 m al hacerlo a través de dos filas de tarimas cuando el túnel se carga a capacidad plena.

Para estos registros, se utilizaron sensores TMC-HA, conectados a unidades de adquisición de datos U12-012 y para medir las condiciones ambientales (temperatura y humedad relativa del aire) de los túneles de aire forzado se utilizaron dos unidades de adquisición de datos UX100-003, una colocada sobre la descarga del evaporador y la otra sobre la succión. Las mediciones de temperatura de las frutas, se hicieron tanto para una tarima ubicada en el centro del túnel (C, tarima 7) como para una tarima ubicada en uno de los extremos del túnel (A, tarima 1), que es la tarima que se coloca con 90° de rotación respecto a las demás, tal como se muestra en las figuras 5 y 6, para capacidad media y plena, respectivamente. Cuando el túnel se analizó a capacidad plena, el concepto fue el mismo, sin embargo, se registró la temperatura de la fruta ubicada cerca de la descarga en una tarima independiente y en la tarima adyacente, se registró la temperatura de la fruta ubicada cerca de la succión (figura 6).



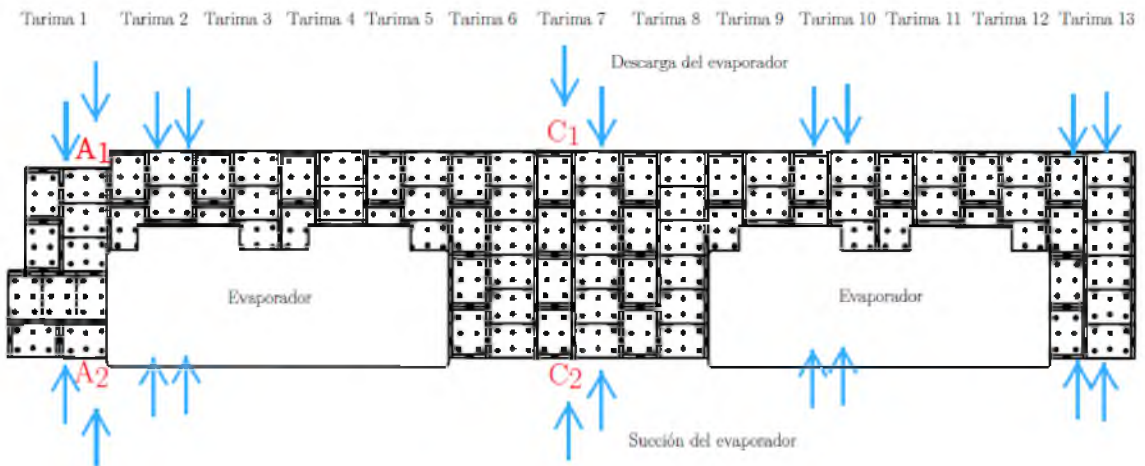
Las "X" señalan los puntos donde se midió velocidad y caída de presión del aire y la línea roja muestra el nivel medio de la tarima

Figura 4. Medición de la temperatura de la fruta contenida en la caja adyacente al punto 1 y la contenida en la caja adyacente al punto 2, sobre el nivel medio de la tarima.



Las flechas azules señalan las cajas donde se midió velocidad y caída de presión del aire.

Figura 5. Puntos de medición de temperatura de la fruta respecto al largo del túnel a capacidad media (13 tarimas) en la descarga (C_1 y A_1) y en la succión (C_2 y A_2).



Las flechas azules señalan las cajas donde se midió velocidad y caída de presión del aire.

Figura 6. Puntos de medición de temperatura respecto al largo del túnel a capacidad plena (26 tarimas) en la descarga (C_1 y A_1) y en la succión (C_2 y A_2).

Los puntos de medición anteriores, tanto para el túnel a capacidad media como plena, fueron sometidos a dos distintas configuraciones, la primera con el bloqueo de la base de todas las tarimas del sistema, como se presenta en la figura 7 y la otra con paso libre por dicha región (figura 8). Este bloqueo se realizó con parte del cartón con el que el proveedor de cajas, envuelve las tarimas de cajas sin armar y fue adherido a las tarimas mediante cinta adhesiva.

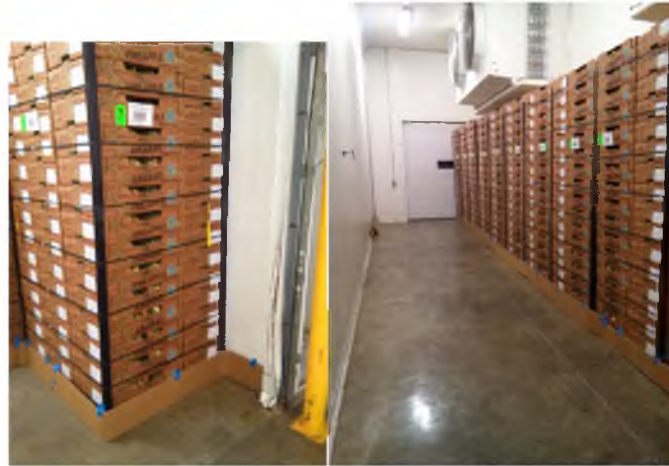


Figura 7. Bloqueo del paso para el flujo de aire en la base de las tarimas con cartón.



Figura 8. Paso libre para el aire en la base de las tarimas.

La tabla 5, muestra las condiciones en las que se operaron los túneles de aire forzado, bajo las dos configuraciones de estudio, capacidad plena (26 tarimas) y capacidad media (13 tarimas). Los datos de temperatura del centro geométrico de la fruta, registrados en cada posición, fueron procesados a través de las ecuaciones 1, 2, 3, y 4, anteriormente presentadas,

de forma que se analizó el rendimiento del proceso de enfriamiento a través del cambio adimensional de temperatura (Y) y la heterogeneidad del mismo en base al ΔY y al $\Delta Y_{\text{máx}}$.

Tabla 5. Condiciones de operación de los túneles de aire forzado

Condiciones	N° tarimas	
	26 (Capacidad plena)	13 (Capacidad media)
T _{aire (descarga)} [°C]†	7,5 ± 0,5	7,5 ± 0,5
T _{aire (succión)} [°C]†	11,4 ± 1,5	9,8 ± 1,5
HR [%]†	89,9 ± 1,8	93,0 ± 3,7
T _{fruta (inicial)} [°C]	26,1 ± 1,4	27,5 ± 1,8
t _{enf} [min]	210	210

Notas: † a partir de estabilización después de 40 min de iniciado el subproceso. ± Indica la desviación estándar. T: Temperatura, HR: Humedad Relativa, t: tiempo.

3.6.3.3 Modelación del enfriamiento en los túneles de aire forzado

Se realizó el ajuste exponencial de las curvas de cambio adimensional, Y, según la ecuación 6 ($Y=je^{-kt}$), para cada posición y configuración, mediante el método de mínimos cuadrados no lineales utilizando el algoritmo de región de confianza de la caja de herramientas de optimización de MATLAB[®]. El modelo se estratificó en dos fases, la inicial del minuto 0 al 45 y la fase final del minuto 45 al 210, intervalos donde se encontraron las ecuaciones con mejor ajuste, según el valor del coeficiente de determinación r^2 .

Una vez generado el modelo exponencial, se extrapolaron los tiempos para que el enfriamiento alcanzara el $t_{1/2}$ ($Y = 0,5$), $t_{3/4}$ ($Y = 0,25$) y el $t_{7/8}$ ($Y = 0,125$) de acuerdo a las ecuaciones 7, 8 y 9, $t_{1/2}=\ln(2j) \cdot k_f^{-1}$, $t_{3/4}=\ln(4j) \cdot k_f^{-1}$ y $t_{7/8}=\ln(8j) \cdot k_f^{-1}$, respectivamente.

Como una forma de estimar el coeficiente de transferencia de calor convectivo “h”, se utilizó la ecuación 10 ($h=m \cdot C_p \cdot k_f \cdot A^{-1}$). En esta ecuación, la masa de la piña utilizada fue 1,75 kg, el calor específico, C_p , fue $3,85 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ °C}^{-1}$, el coeficiente de velocidad del enfriamiento, expresado en s^{-1} , fue el correspondiente a la fase final (k_f) para cada posición dentro del túnel de aire forzado y el área de la fruta, A, fue aproximada como un cilindro, con radio igual a 0,056 m y una altura de 0,159 m, que corresponden al radio promedio de la fruta. La altura del cilindro corresponde a la longitud promedio de las frutas calibre número 7.

Por último, para modelar la conducción de calor dentro de la piña, se asumió: que ésta se puede representar como un cilindro corto formado por la intersección de un cilindro largo, de radio 0,056 m y una pared plana de espesor $2L = 0,159$ m; que la transferencia de calor es bidimensional y entonces varía tanto en la dirección “x” axial como en la “r” radial; que las propiedades térmicas de la fruta son constantes; que el coeficiente de transferencia de calor convectivo es constante e igual al coeficiente de transferencia de calor promedio estimado con la ecuación 10; y que el número de Fourier es mayor a 0,2, así que pueden aplicarse las soluciones aproximadas de un término [22].

Se utilizó el principio de superposición llamado “solución producto” para construir la solución de la conducción de calor bidimensional en régimen transitorio en el interior del producto. El procedimiento tuvo como fin, determinar la temperatura en el centro geométrico de la piña después de 3,5 h y 5,5 h de enfriamiento.

3.6.4 Análisis del flujo de aire y caída de presión del aire durante el enfriamiento con aire forzado

Las mediciones de velocidad del aire, fueron realizadas para describir el flujo de aire según el área de las ventilaciones de las cajas en el túnel de aire forzado, con un anemómetro de alambre caliente VelociCalc marca TSI modelo 8346, que tiene un rango de 0 a $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y una precisión de $0,015 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Las mediciones fueron llevadas a cabo en 5 tarimas a lo largo del túnel, a tres diferentes alturas (nivel 1, 9 y 15 desde la base de la tarima, figura 4). Las tarimas donde se midió el flujo de aire al atravesar las cajas, en la antecámara de succión, fueron las tarimas número 1, 2, 7, 10 y 13 tal como lo muestran las figuras 5 y 6, donde se encuentran señaladas con flechas de color azul. Se multiplicaron los valores de las velocidades registradas por el área de ventilación (lateral de $0,0086 \text{ m}^2$ y frontal de $0,0023 \text{ m}^2$), para obtener el flujo de aire a través de las mismas. Estos registros fueron realizados para la condición de operación a capacidad media y plena y para la condición de la base de las tarimas (sin bloqueo del paso del aire y con bloqueo).

Además, se calcularon los valores de caudal por unidad de masa de piña ($L \cdot s^{-1} \cdot kg^{-1}$); asumiendo que el caudal de la tarima de producto, es 16 veces el caudal promedio registrado en un nivel de la tarima. Por lo tanto, este caudal atraviesa todas las 80 cajas de producto (982 kg de piña) para la capacidad media y 160 cajas (1964 kg de piña) a capacidad plena, ya que el aire en esta condición debe a travesar dos tarimas de producto.

La caída de presión se midió utilizando un manómetro construido con un tubo plástico en forma de “U”. Se registró la diferencia de altura de la columna de agua entre el terminal posicionado en el área de descarga de los evaporadores y el terminal en la antecámara de succión. Las mediciones se hicieron en los mismos puntos donde se midió la velocidad del aire (figuras 4, 5 y 6).

Tanto los datos de caída de presión como de flujo de aire fueron analizados mediante un análisis de varianza utilizando la prueba Tukey con una confianza del 95 %, tomando como variables de clasificación el tipo de ventilación (lateral o frontal), la condición de la base de la tarima (sin bloqueo o con bloqueo), la posición de la tarima a lo largo del túnel (tarima 2, 7, 10 y 14), el nivel de la tarima (nivel 1, 9 y 15, a partir de la base de la tarima) y la condición de operación de los túneles (capacidad media y plena).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterización del producto

La tabla 6, muestra las propiedades determinadas experimentalmente de la piña.

Tabla 6. Propiedades físicas de la piña de cultivar MD2^a.

Propiedad	Magnitud	σ^b	C.V ^b
Masa [g]	1753,0	190,9	10,9 %
Altura (sin corona) [cm]	15,9	1,3	8,0 %
Diámetro cerca de la corona [cm]	10,9	0,2	2,3 %
Diámetro en el medio de la fruta [cm]	11,8	0,3	2,5 %
Diámetro cerca de la base [cm]	11,1	0,2	2,2 %

^a Fruta variedad dorada extra dulce (MD2) calibre 7 de la empresa Tropical Paradise Fruits Co (enero 2017). ^b σ : Desviación estándar y CV: coeficiente de variación

Las frutas del cultivar MD2 usadas en esta investigación (calibre número 7) tienen una masa promedio de 1753,0 g y una forma cilíndrica con diámetros entre 10,9 cm y 11,8 cm y una altura de 15,9 cm, con una relación altura diámetro aproximadamente de 1,4.

El número Biot para la piña es de 1,14 a 2,30. Cuando $0,1 < Bi < 10$, se dice que la resistencia a la conducción del calor dentro del producto es mayor que la resistencia a la convección entre el fluido y el producto [27,30], por lo que el factor que limita la transferencia de calor es la conducción interna [7], así que, es de esperarse que la superficie expuesta al flujo de aire se enfríe más rápidamente que la pulpa de la fruta, situación que provoca diferencias de temperatura dentro de la fruta y un retraso en el tiempo de enfriamiento. Esta condición hace que el centro geométrico de la fruta sea el punto más caliente durante el enfriamiento, por lo que la gestión de la temperatura debería hacerse en base a éste, para no sobreestimar la operación

4.2 Caracterización del proceso

4.2.1 Descripción del proceso

La figura 9 muestra el diagrama de flujo que caracteriza los distintos niveles del sistema de producción de piña, como primer nivel se encuentra el macroproceso de producción de piña,

que incluye el segundo nivel del sistema, descrito por el proceso de producción de fruta en campo, el proceso de preparación y empaque de fruta fresca para exportación y el proceso de preparación de jugos, concentrados y congelados (IQF). Dentro del proceso de preparación y empaque de fruta fresca, se encuentra el tercer nivel del sistema, comprendido por cada uno de los subprocesos que llevan la piña desde el recibo hasta su carga dentro de los contenedores marítimos para exportación.

El macroproceso, inicia con la producción de la fruta en las fincas localizadas en Los Chiles de Alajuela, aproximadamente a 60 km de la planta de empaque que se ubica en Muelle de San Carlos. La fruta se cosecha durante la mañana, iniciando a las 7:00 am, para ser posteriormente transportada, vía terrestre, en contenedores metálicos hacia la planta de empaque (figura 10), que poseen un ancho de 2,4 m, un largo de 2,6 m y una altura de 1 m y que tienen una capacidad aproximada de 993 ± 15 frutas.

El proceso estudiado en este trabajo corresponde a las operaciones de preparación y empaque de la fruta para mercado fresco, que se caracterizan por ser subprocesos semicontinuos. Si bien es cierto se realizan por lotes, una vez iniciado el proceso éstos se comportan como un flujo continuo, en una línea en serie, a través del muestreo de aceptación, lavado y desinfección de la fruta. La selección, aplicación de fungicida, encerado, secado e ingreso a la sala de empaque, donde se realiza la clasificación, encolillado de la corona, empaque, entarimado y etiquetado, son subprocesos que se llevan a cabo en dos líneas en paralelo, que posteriormente, se acumulan a la espera del llenado de los túneles de aire forzado con 13 o 26 tarimas. Conforme se completa la carga de los túneles, se encienden los equipos de refrigeración, por lo que se forman 4 líneas paralelas de enfriamiento con aire forzado. Posteriormente la fruta se almacena temporalmente y se despacha en el andén de carga en una línea en serie.

Los días de cosecha, la fruta se transporta a la planta de empaque y se acumula en el área de recibo a la espera del inicio de las operaciones de empaque, que inician a la 1:00 pm. En esta área, la fruta se almacena en los contenedores metálicos acomodados en uno o dos niveles de

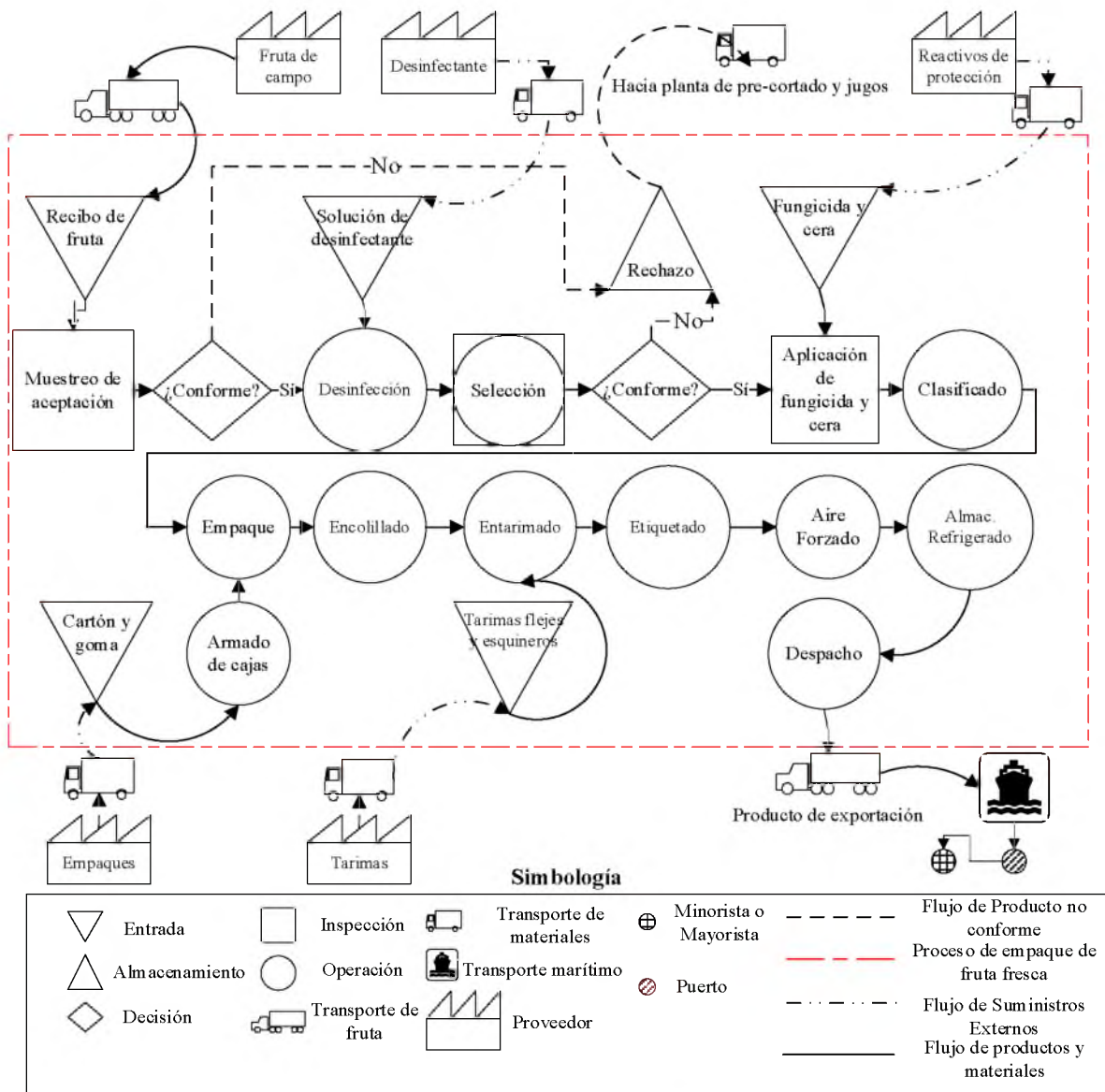
altura, y colocados bajo la sombra. Durante las visitas realizadas en el mes de enero (a partir de la 1:00 pm), se registraron temperaturas y humedades relativas del aire, de $33,2\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $65,7\% \pm 3,0\%$ respectivamente y temperaturas de la fruta de $33,4\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, la cual puede variar a lo largo del día, debido a que continuamente está ingresando producto de campo. La temperatura usualmente es el factor externo más importante que afecta la vida poscosecha de las frutas y vegetales, por lo que reducir la temperatura del producto con prontitud, es una forma efectiva de mantener una alta calidad después del almacenamiento [56].

El muestreo de aceptación de calidad de exportación, se realiza como primer paso. Se toma una muestra de 5 frutas por contenedor metálico, para una cantidad de contenedores determinada por el departamento de calidad (durante la visita realizada se observó un total de 12 contenedores muestreados para aceptación).

A las muestras se les clasifica por tamaño (calibres establecidos del número 5 al 9, de acuerdo a la cantidad de frutas que pueden colocarse en la caja de cartón), color externo (escala de 0 a 6 [57], que debe estar entre 0 y 1 para fruta de exportación), condición interna, presencia de golpes, contenido de sólidos solubles (grados Brix, de al menos 12° para exportación) y presencia de defectos (corona desviada, corona múltiple, deformaciones, etcétera.). El lote puede ser aceptado o rechazado, en caso de ser aceptado, pasa directamente al siguiente subproceso y en caso contrario pasa a los procesos de preparación de jugos, concentrados y congelados, ubicados al lado de la planta de empaque.

Para el lavado y desinfección, el contenedor se sumerge en una pila con una solución del desinfectante Tsunami 200[®], para el control y reducción de residuos de campo y microorganismos. La fruta sale del contenedor metálico por flotación y permanece aproximadamente 2 min en la pila, se desplaza con la ayuda de boquillas a presión de agua, hacia un elevador compuesto por una banda de rodillos, que conduce el producto a la banda de transporte para la selección manual. Allí se selecciona el producto que cumple con los criterios de calidad de exportación, el cual continúa en las líneas y el producto no conforme

se coloca sobre bandas que lo sacan de la planta de empaque para ser enviado a la planta de jugos, concentrados y de congelados.



La línea alterna delimita el proceso de empaque que fue estudiado en este trabajo.

Figura 9. Diagrama del macroproceso de piña fresca para la planta de la empresa Tropical Paradise Fruits Co, ubicada en Muelle de San Carlos.

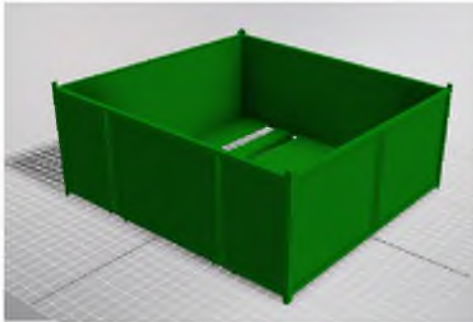


Figura 10. Cajones metálicos de transporte de la fruta desde las fincas hasta la planta de empaque.

Después de que la fruta pasa por el proceso de selección manual en la banda, se realiza la aplicación del encerado a la fruta por cascada, seguida de la aplicación del fungicida por aspersión al pedúnculo y posteriormente el secado de la superficie de la fruta. Este secado se realiza por medio de una serie de ventiladores colocados sobre la banda de transporte con aire a temperatura ambiente.

Una vez secada la superficie de la fruta, ésta continúa por la banda transportadora que ingresa el producto dentro de espacios refrigerados de empaque para iniciar con la clasificación. La clasificación se realiza de forma automática según la masa de la fruta, en dos líneas paralelas de proceso, mediante básculas y copas giratorias, con una precisión de 30 g, que depositan el producto en las 11 bandas transportadoras que conducen la fruta hacia las estaciones de trabajo de empaque por calibre, según el balanceo de las líneas, de acuerdo a la distribución de tamaños de la fruta, reportada al inicio de las operaciones.

La preparación de los materiales de empaque se realiza en una línea paralela situada en un área externa a la sala de empaque. Las cajas armadas se transportan vía aérea por toboganes y bandas de rodillos hasta la zona de empaque. Los colaboradores de empaque, toman una caja a la vez y empaquetan la fruta en la cantidad y acomodo según el calibre. Posteriormente, se colocan etiquetas en las coronas de las frutas con una encolilladora neumática y se transportan a través de dos bandas, hacia la estación de preparación de tarimas.

Para ello, se acomodan 80 cajas con fruta sobre una tarima de madera de 1,0 x 1,2 m², colocando 5 cajas por nivel para un total de 16 niveles. La preparación de las tarimas de producto se realiza de dos formas posibles, manual y automática y en ambos casos, se estabilizan por medio de esquineros y flejes de plástico tensados. Cada tarima se etiqueta con la información de trazabilidad como finca, número de lote, peso, calibre, origen, etcétera. De allí se trasladan con montacargas eléctricos hacia los túneles de enfriamiento con aire forzado.

El subproceso de enfriamiento con aire forzado es realizado dentro de 4 cámaras, de 14,0 m de largo y 4,5 m de ancho, aproximadamente. Las tarimas de producto se colocan una junto a la otra contra una ventana de 12,9 x 2,2 m², que debe quedar totalmente cubierta por las tarimas (13 o 26) antes de iniciar el enfriamiento, de modo que se hace pasar el aire forzado a través de las cajas, para un mejor contacto aire-fruta. Al completar la carga de enfriamiento de cada cámara, ya sea a capacidad media (13 tarimas) o a capacidad plena (26 tarimas), se encienden los evaporadores durante un tiempo preestablecido de 3,5 h (210 min). Debido a que el proceso inicia vacío, es decir, sin producto empacado previamente, el primer túnel requiere aproximadamente 109,10 min \pm 36 min para completarse con una carga de 26 tarimas y a medida que se va llenando cada túnel, se enciende su evaporador respectivo. Cuando se completa la carga de los 4 túneles, funcionan en paralelo a una capacidad máxima de 104 tarimas y al cumplir las 3,5 h de enfriamiento se apaga el evaporador respectivo y las tarimas se trasladan a la cámara de refrigeración adyacente, para el almacenamiento temporal de la fruta, acomodadas según la planificación logística.

Posteriormente las tarimas se cargan en los contenedores de transporte marítimo pasando a través del andén de carga. Los periodos de almacenamiento varían desde 0 h, en el caso que se requiera algún calibre específico para completar el contenedor, hasta 24 h. El andén de carga es una sala refrigerada, que tiene dos plataformas de acople que forman un espacio continuo y refrigerado entre la planta y los contenedores de transporte, para facilitar la carga de los contenedores con las 21 tarimas de producto cada uno.

4.2.1.1 Medición de tiempos del proceso

Los resultados de las mediciones de tiempos que requiere la fruta para las distintas operaciones de la planta empacadora y las reducciones de temperatura que se alcanzan en distintas secciones, se muestran en la figura 11a y 11b. En la primera, se presentan como, un diagrama de Pareto de tiempos del proceso, en el que se desglosa la contribución relativa de sus subprocesos [58] en el tiempo total del proceso y en la segunda (11b), se muestra el diagrama de Pareto de reducción de la temperatura del proceso.

La regla de Pareto, se enfoca en observaciones comunes de que un gran porcentaje de los problemas se deben a un pequeño porcentaje de las causas, usualmente se considera, que en una relación 80-20 [59]. Los diagramas de Pareto permiten, identificar los pocos vitales (ese 20 % de posibles causas del 80 % de los resultados), en los cuales se presentan oportunidades de mejora de mayor impacto y por ende muestran dónde situar los esfuerzos iniciales para obtener mayores beneficios [59].

Según la regla 80-20 y la figura 11a, los subprocesos de enfriamiento con aire forzado y en almacenamiento refrigerado son los que consumen el 80 % (450 min) del tiempo total del proceso (560 min), donde los tiempos de los subprocesos de recibo, lavado y desinfección, encerado, aplicación de fungicida y clasificación, en conjunto, toman aproximadamente 13 min, mientras que las operaciones de empaque y entarimado toman 96,1 min. Por lo tanto, desde el punto de vista de tiempos, es justificable que se le concentren esfuerzos al análisis de la refrigeración en los túneles de aire forzado y en las cámaras de almacenamiento. Las mejoras que se hagan en esos subprocesos tendrían un mayor impacto en la mejora del proceso y hacia ellos es recomendable dirigir los recursos disponibles. Específicamente el enfriamiento dentro de los túneles de aire forzado consume el 37,6 % del tiempo total del proceso.

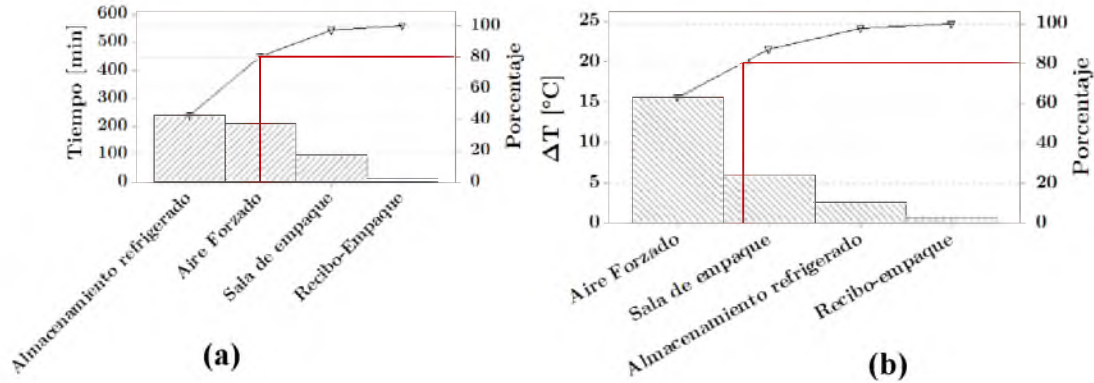


Figura 11. Diagrama de Pareto de tiempos del proceso en (a) y de reducción de temperatura del proceso. ΔT : reducción de temperatura.

Con respecto al enfriamiento, la figura 11b (que se ampliará en la siguiente sección), muestra que, el enfriamiento con aire forzado es el subproceso cuya reducción de temperatura, representa la mayor contribución relativa de toda la reducción de la temperatura de la fruta en el proceso. Dentro de estos túneles la reducción de temperatura de las frutas muestreadas fue de 15,6 °C, es decir un 63,2 %, seguido de la sala de empaque con 5,9 °C (23,9 %), almacenamiento refrigerado con 2,6 °C (10,5 %) y los otros subprocesos comprendidos entre el recibo y los tratamientos postcosecha con 0,6 °C (2,4 %).

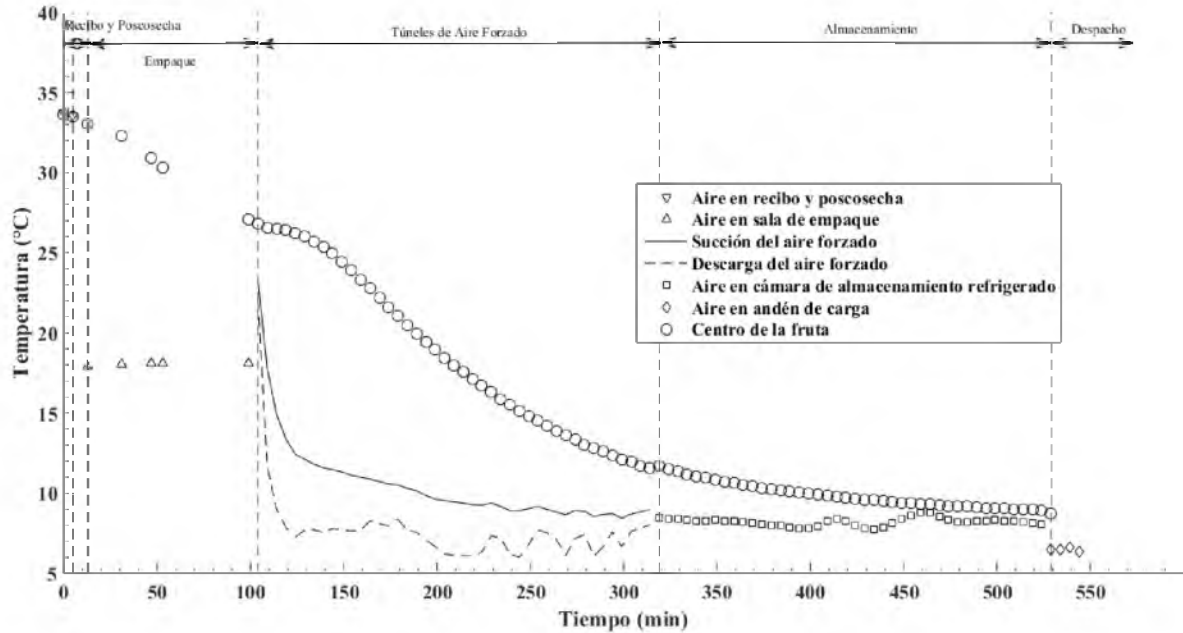
Tomando en cuenta el tiempo de operación y la reducción de temperatura de la fruta, es justificable que se concentre el análisis y los esfuerzos de mejoras en el subproceso de enfriamiento con aire forzado, que si bien es muy eficiente para enfriar la fruta [60], requiere que se alcance el 87,5 % de la reducción total de temperatura ($t_{7/8}$); además, el análisis para minimizar fugas y pasos libres (bypass) y caídas de presión excesivas, contribuirán significativamente en el manejo de la piña a la temperatura óptima y esto a su vez, contribuirá a reducir los tiempos y diferenciales de temperatura en los subprocesos de enfriamiento posteriores al aire forzado, que son utilizados como complemento para no incurrir en costos excesivos en los túneles de aire forzado [43].

4.3 Condiciones de temperatura de la fruta y de temperatura y humedad relativa del aire, desde el recibo hasta el despacho

La figura 12 muestra el descenso de la temperatura de la fruta (en el centro geométrico), a lo largo de la línea de proceso de empaque de una muestra de frutas. Además, se muestran las condiciones de temperatura del aire en cada espacio de la planta, iniciando en la zona de recibo, sala de empaque (EM), túnel de aire forzado (AF), cámara de almacenamiento refrigerado (AR) y andén de carga (AN).

En la zona de recibo, que es un espacio techado pero abierto al ambiente, la temperatura de la muestra de frutas fue de $33,4\text{ °C} \pm 0,3\text{ °C}$, expuestas a una temperatura del aire de $33,2\text{ °C} \pm 1,4\text{ °C}$ y una humedad relativa de $67,5\% \pm 3,0\%$. Después del lavado y desinfección con la solución desinfectante y luego de pasar por el subproceso de selección, aplicación de cera, fungicida y secado, su temperatura se redujo aproximadamente $0,4\text{ °C}$ ($33,0\text{ °C} \pm 0,4\text{ °C}$). En la sala de empaque, mantenida a $18,0\text{ °C} \pm 0,1\text{ °C}$ y una humedad relativa de $81,2\% \pm 0,6\%$, se encontró que las frutas muestreadas, redujeron su temperatura hasta $27,1\text{ °C} \pm 0,2\text{ °C}$, después de 100 min. Este tiempo corresponde aproximadamente, al periodo que se requiere para llenar el primer túnel de aire forzado con 26 tarimas ya que hasta entonces el proceso se encuentra vacío de producto. Los túneles permanecieron apagados, con las puertas abiertas hacia la zona de empaque, donde se registró una temperatura del aire de 20 °C y $79,3\%$ de humedad relativa, mientras se llenaban.

Los ciclos de enfriamiento de 3,5 h (210 min) en los túneles de aire forzado, iniciaban a medida que se completaba el acomodo de las 13 o 26 tarimas. En la figura 12 se observa que, al activar los evaporadores, la temperatura del aire en la descarga (salida de los evaporadores e ingreso a las tarimas con fruta) bajó rápidamente y se estabilizó en $7,2\text{ °C} \pm 0,7\text{ °C}$ después de 20 min. Por su parte, la temperatura de la succión se mantuvo más alta durante todo el ciclo, debido al calor extraído de la fruta en su paso a través de las tarimas. Esta se redujo rápidamente en los primeros minutos y se estabilizó, en $8,8\text{ °C} \pm 0,1\text{ °C}$ después de 210 min de iniciado el subproceso.



Estudio realizado en enero de 2017, de 1:00 pm a 10:00 pm.

Figura 12. Caracterización de la temperatura de la fruta y el aire desde el recibo hasta el despacho de la piña, en la planta empacadora.

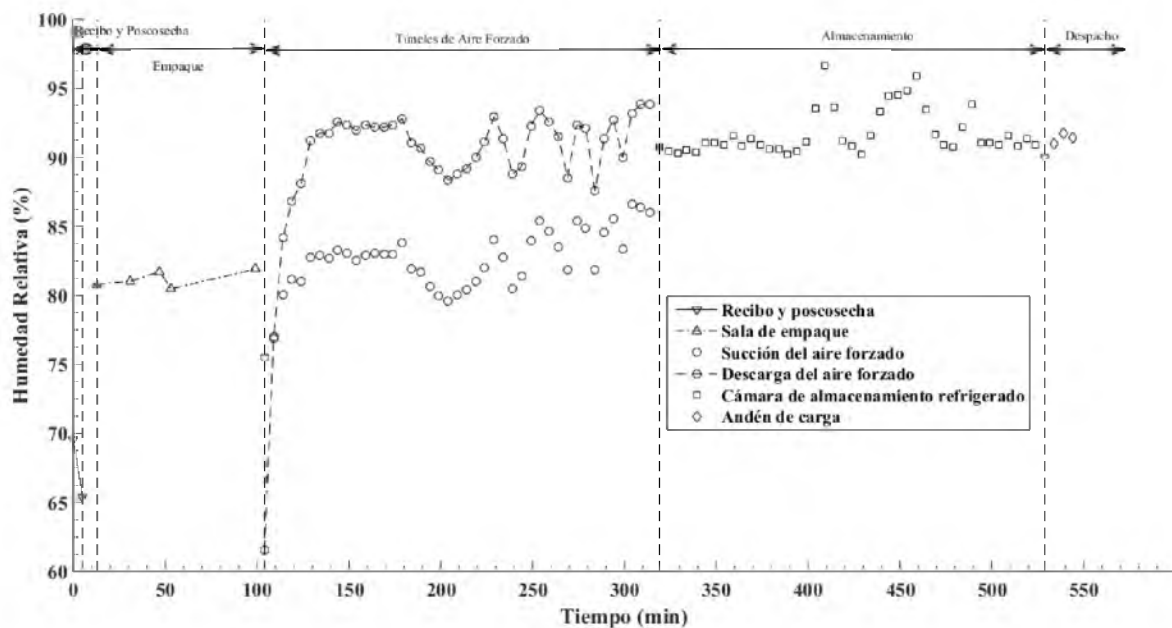
Las frutas a las que se les dio seguimiento durante el proceso, se colocaron en una de las cajas del nivel superior de una tarima, colocada en el centro del túnel de aire forzado. Después de 210 min de operación, la temperatura en el centro de la fruta se redujo hasta $11,5\text{ °C} \pm 0,2\text{ °C}$, según se aprecia en la figura 12.

Esta temperatura es superior a la recomendada para sistemas de enfriamiento, en los cuales el enfriamiento se lleva hasta alcanzar los $t_{7/8}$ (87,5 %), que, para una temperatura inicial de la fruta de $27,1\text{ °C}$ y una temperatura del aire de $7,2\text{ °C}$, correspondería a una temperatura final de la fruta de $9,7\text{ °C}$. La temperatura de la fruta de $11,5\text{ °C}$, corresponde a un 78 % del enfriamiento completo y sería necesario extender el tiempo de los ciclos de operación de los túneles para reducir la temperatura hasta $9,7\text{ °C}$.

La tarima con las frutas utilizadas para este análisis del perfil de temperatura, se trasladaron a la cámara de refrigeración (AR) donde se mantuvieron por 240 min (4 h). Su temperatura descendió de $11,5\text{ °C} \pm 0,2\text{ °C}$ a $8,9\text{ °C} \pm 0,1\text{ °C}$ en ese periodo, donde se registró una

temperatura del aire de $8,2\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ con $91,8\% \pm 1,6\%$ de humedad relativa. Esto muestra que el enfriamiento continúa, pero no alcanza la temperatura óptima de almacenamiento de $7\text{ }^{\circ}\text{C}$, aún después de 4 horas. Seguidamente, la fruta se reubicó en el andén de carga (AN), donde se mantuvo por 20 min. En esta área la temperatura del aire fue de $6,5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ con una humedad relativa de $91,1\% \pm 0,7\%$ y no se registraron cambios en la temperatura de la fruta (centro geométrico).

En la figura 13, se muestran las condiciones de humedad relativa del aire, en los distintos subprocesos por los que pasa la piña.



Estudio realizado en enero de 2017, de 1:00 pm a 10:00 pm.

Figura 13. Caracterización de la humedad relativa del aire desde el recibo hasta el despacho de la piña, en la planta empacadora.

En el área de recibo y los subprocesos de lavado y desinfección, selección y aplicación de cera y de fungicida, realizados en una zona techada y expuesta la ambiente, la humedad relativa se mantuvo en $67,5\% \pm 3,0\%$, mientras que en la sala de empaque (EM) se mantuvo en $81,2\% \pm 0,6\%$, que se encuentra en el rango recomendado para piña ($70\% - 90\%$) [15]. Dentro de los túneles de aire forzado (AF), se mantuvo entre $89,9\% \pm 5,3\%$ y

82,5 % \pm 2,3 %, en la descarga y en la succión de los evaporadores, respectivamente. En la cámara de almacenamiento refrigerado (AR) y al andén de carga (AN-1), la humedad relativa del aire fue de 91,8 % \pm 1,6 % y 91,1 % \pm 0,7 % respectivamente, por lo que una vez que el producto ingresa a las áreas refrigeradas, se provee una humedad relativa adecuada para la fruta.

Los resultados mostrados en las figuras 12 y 13, son una muestra para ilustrar los cambios de temperatura de la fruta y de los ambientes en los que se mantiene y cabe destacar que la temperatura de la fruta medida, corresponde al centro geométrico de la piña, que es el punto más caliente y la que se recomienda utilizar para estudiar el comportamiento del enfriamiento de las frutas [46], ya que la temperatura en la superficie de la fruta, rápidamente se aproxima a la del aire, por el contacto directo entre ambos.

Sin embargo, puede haber variaciones significativas, por ejemplo, el perfil de temperatura corresponde al de una muestra de tres frutas seleccionadas al azar, a la 1:00 pm, por lo que es de esperar que estas temperaturas varíen a lo largo del día, así como es de esperar que, al inicio de las operaciones de empaque, las primeras frutas se enfríen más rápidamente, pero conforme ingresa una mayor cantidad de fruta, la carga de refrigeración requerida aumente y es probable que el enfriamiento de la fruta, al pasar por la sala de empaque, sea más lento. Esto a su vez, provoca que la temperatura de la fruta al inicio del proceso de enfriamiento con aire forzado, puede también variar.

Los resultados muestran que el sistema global, permite una reducción de la temperatura de la fruta de 33,4 °C hasta 8,9 °C (24,5 °C). Según algunos autores, esta reducción puede reducir la actividad metabólica de la fruta en aproximadamente 4 a 7 veces [32], por ser procesos dependientes de la temperatura que se ajustan a la ecuación de Arrhenius [61]. Una reducción adicional de la temperatura de la fruta, podría contribuir a reducir aún más la actividad metabólica de la fruta y con ello maximizar su vida útil.

La operación actual, con 78 % del enfriamiento completado y tiempos variables dentro de las cámaras de refrigeración (AR), de cero minutos a varias horas según la programación por

tamaños de fruta establecida para el llenado de los contenedores, no permite predecir la temperatura de la fruta en el momento de cargar los contenedores. Dentro de ellos, podría haber fruta con temperatura cercana a los 8,9 °C, cuando ha permanecido por más de 4 h en la cámara de almacenamiento (AR) y fruta con temperatura del orden de 11,5 °C, cuando se carga directamente de los túneles de aire forzado (AF) a los contenedores.

Esto incrementa la carga de refrigeración del contenedor, diseñado para mantener la temperatura del producto y compensar las fuentes de calor del ambiente exterior, por lo que este podría no tener suficiente capacidad de refrigeración para continuar con el enfriamiento de la fruta hasta 7 °C y mantenerla durante el transporte hacia el mercado meta. De hecho, Defraeye et al. [47], estudiaron el enfriamiento de frutas de naranja en contenedores refrigerados. Consideraron condiciones idealizadas utilizando dinámica de fluidos computacional para el enfriamiento de naranja empacada (*Citrus senenses L Osb*) dentro de contenedores marítimos típicos de exportación (Maersk, de 12,2 m de largo, es decir 40 ft), encontraron que, se requieren tres días para lograr el $t_{7/8}$ sin uso del aire forzado, con una temperatura inicial de la fruta de 20 °C y una temperatura del aire de enfriamiento de -0,5 °C, con lo cual esperaban que la temperatura de la fruta bajara cerca de 18 °C. Compararon la capacidad de refrigeración requerida con la capacidad instalada en estos contenedores y determinaron, teóricamente, que el sistema era capaz de enfriar la carga completa de tarimas de naranja variedad Valencia, en aproximadamente cinco días [48]. Estos resultados contrastan la velocidad de enfriamiento con aire forzado previo a la carga de los contenedores (unas pocas horas), con la que puede darse dentro de los contenedores refrigerados durante el transporte. Adicionalmente, se debe tomar en cuenta, que la circulación de aire dentro de los contenedores es limitada, por lo que aun con suficiente capacidad de refrigeración, el enfriamiento de la fruta puede ser más lento y pueden darse problemas de focos calientes en distintas partes de la carga. Estos problemas se pueden minimizar enfriando la fruta hasta la temperatura óptima de almacenamiento antes de cargarla dentro de los contenedores refrigerados.

4.3.1 Monitoreo de temperatura de la fruta en las cámaras de almacenamiento y despacho

Después de que la fruta pasó por el subproceso de enfriamiento con aire forzado (AF), se almacenó de forma temporal (con una temperatura inicial de 13,1 °C aproximadamente) en las cámaras de almacenamiento refrigerado (AR) durante 240 min, con una temperatura promedio del aire de 8,3 °C ± 0,2 °C y una humedad relativa de 91,8 % ± 1,6 %, tal como lo muestra la figura 14. El perfil de enfriamiento se muestra en la figura 14a, mientras que el cambio adimensional de la temperatura Y, se presenta en la figura 14b.

La temperatura de la fruta a los 240 min (4 h) de iniciado su almacenamiento en las cámaras, fue de 8,9 °C alcanzando un 86,9 % del enfriamiento completo. El cambio adimensional de la temperatura, Y, de este monitoreo, puede ser modelado por la ecuación exponencial, $Y=0,974e^{-0,008898t}$, con un r^2 de 0,9973.

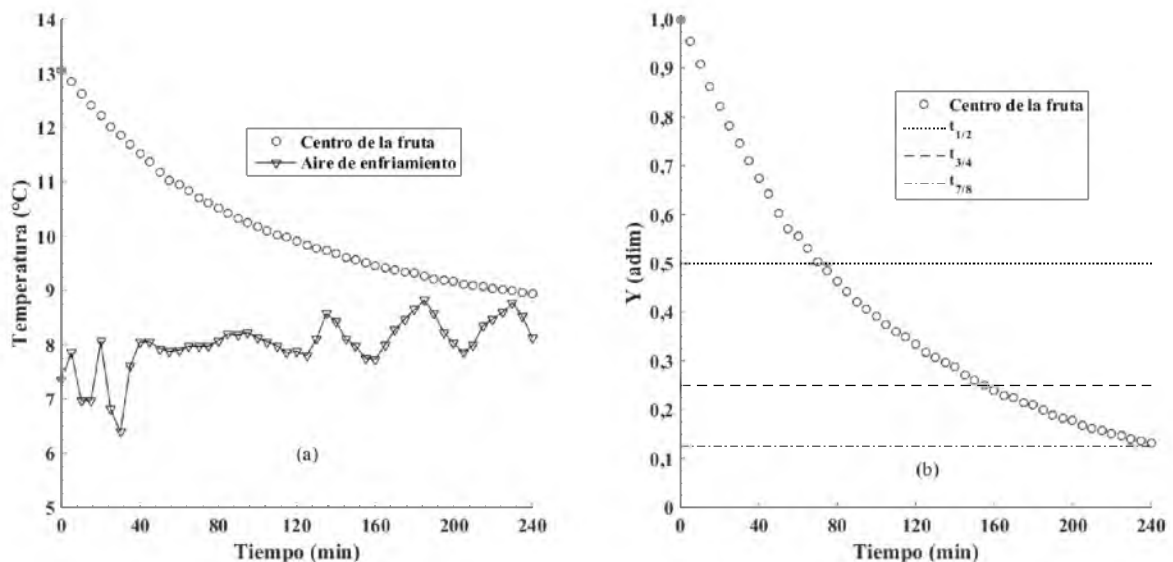


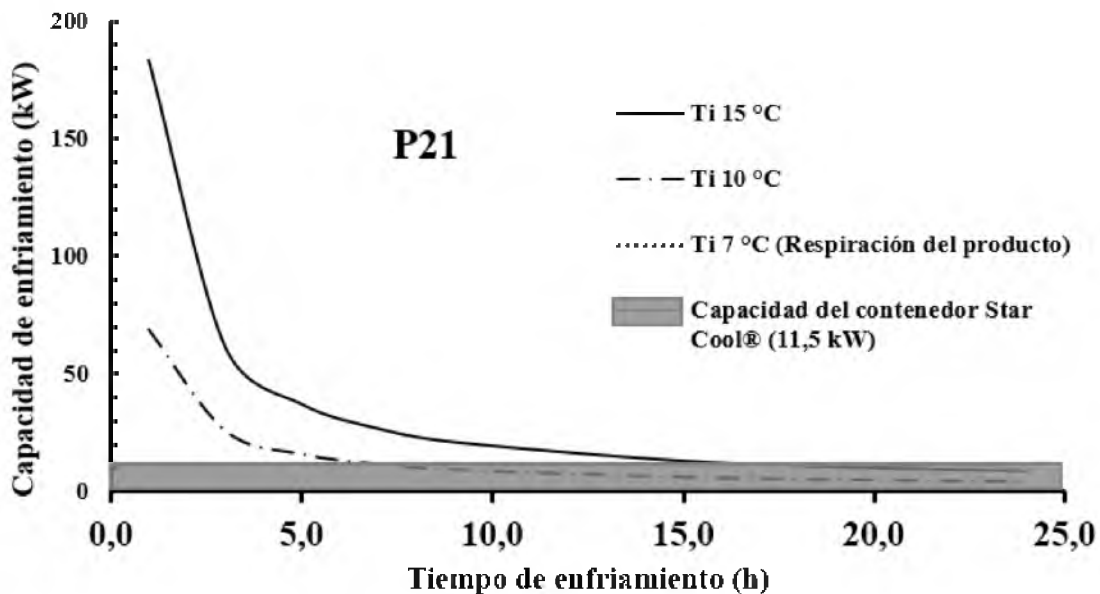
Figura 14. Perfil de enfriamiento de la piña dentro de la cámara de almacenamiento refrigerado en (a) y cambio adimensional de la temperatura, Y, en (b).

Este resultado permite destacar la necesidad de almacenar la fruta de forma temporal después de haber salido de los túneles de aire forzado, con el fin de reducir la temperatura lo máximo posible, ya que se encontraron frutas con temperaturas de hasta 15,2 °C y 14,3 °C justo al

salir del aire forzado. Esto permite disminuir el tiempo para llegar a una temperatura lo más cercana a la óptima de almacenamiento y entonces maximizar la vida útil de la fruta, ya que como se mencionó, podría tomar mucho tiempo para lograr la temperatura óptima de almacenamiento dentro de los andenes de carga y más aún dentro de los contenedores de carga marítima.

4.3.1.1 Simulación del enfriamiento dentro de un contenedor de carga marítima

En la figura 15 se presenta una proyección del tiempo de enfriamiento necesario, si la fruta ingresa con 15 °C, 10 °C y 7 °C a los contenedores de transporte, para lograr la temperatura óptima de almacenamiento (7 °C), dentro de un contenedor Maersk Mark Q con unidad de enfriamiento Star Cool ® que cuenta con una capacidad de 11,5 kW y una pérdida de calor de 3,5 W·°C⁻¹·h⁻¹ según las especificaciones técnicas del fabricante [62].



T_i: Temperatura inicial, Temperatura final 7 °C, P_i: número de tarimas.

Figura 15. Estimación del tiempo requerido para obtener una temperatura de 7 °C dentro de los contenedores de transporte marítimos con unidad de enfriamiento Star Cool ®.

De esta forma, bajo el 100 % de eficiencia del enfriamiento en el contenedor, se requiere aproximadamente cerca de 18 h y 7 h para lograr una temperatura de 7 °C, cuando la

temperatura inicial de la fruta sea de 15 °C y 10 °C, respectivamente. Mientras que, este sistema tiene la capacidad suficiente para amortiguar el calor emitido por la respiración de la fruta, en el escenario donde se mantiene la temperatura de la fruta en 7 °C, que no se visualiza en la figura 15 debido a que tan solo representa el 5,8 % de la capacidad instalada. Por tanto, esta simulación deja en evidencia, la necesidad de establecer un protocolo que asegure que toda la fruta preenfriada dentro de los túneles de aire forzado, se almacene de forma temporal en las cámaras de refrigeración para continuar con un adecuado enfriamiento de la fruta.

4.4 Capacidad de refrigeración instalada

4.4.1 Capacidad nominal de los espacios refrigerados de la planta de empaque

La figura 16 muestra la distribución en planta del equipo de refrigeración instalado, dicha configuración está básicamente orientada al proceso, es decir provee el espacio físico refrigerado para la secuencia de los subprocesos, del diagrama de flujo presentado en la figura 9, una vez que la fruta ingresa a la sala de empaque. El equipo de refrigeración consiste de 8 unidades evaporadoras dentro de la sala de empaque, 2 unidades evaporadores dentro de cada uno de los 4 túneles de aire forzado (AF), 4 evaporadores dentro de la cámara de almacenamiento refrigerado (AR), 1 unidad dentro del andén de carga número 2 (AN-2) (este andén es utilizado como un acceso hacia las cámaras de refrigeración e ingreso de materiales de empaque) y 2 unidades dentro del andén de carga 1 (AN-1), donde se despacha el producto (figura 16).

En la tabla 7 se presenta la información sobre los equipos de refrigeración de la figura 16. Los evaporadores dentro de un mismo espacio refrigerado son iguales, pero difieren de los que hay en otros espacios. El sistema de refrigeración, es un sistema de refrigeración cuyos evaporadores son controlados por inundación, es decir, los controles del flujo refrigerante son tipo flotador, que constan de un miembro boyante el cual regula el nivel de líquido refrigerante. Se ajustan para abrir o cerrar válvulas con el objetivo de admitir una mayor o menor cantidad de refrigerante, en función de los cambios en el nivel del líquido dentro de la cámara del flotador, que es un sistema de control típico en grandes instalaciones [40].

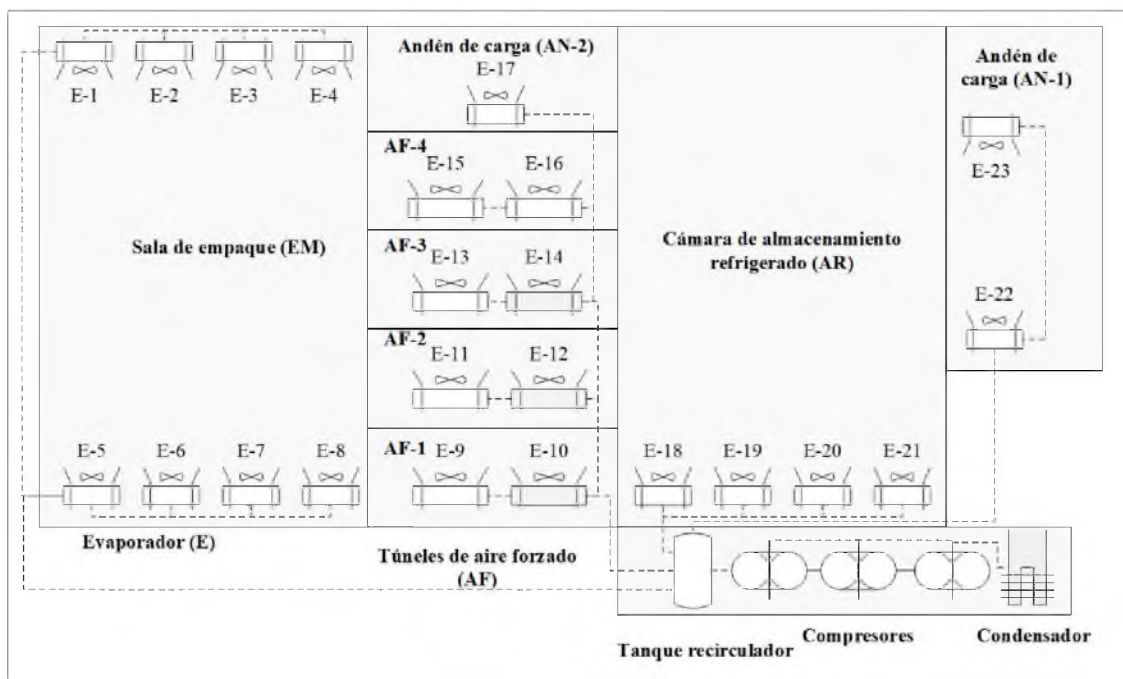
Tabla 7. Capacidad nominal del sistema de refrigeración instalado.

Características	(EM)	(AF)	(AR)	(AN-1)	Condensador
	E-1 a E-8	E-9 a E-16	E-18 a E-21	E-17, E-23, E-24	
Q^1 [W]	14.067,4	84.404,5	29.307,1	14.067,4	1.736.739,0
Caudal ¹ , V [m ³ ·s ⁻¹]	1,7	16,7	5,5	3,8	-
Tiro ¹ [m]	3,0	3,0	22,0	3,0	-
T _{evaporación} ¹ [°C]	7,2	1,7	1,7	1,7	-
T _{condensación} ¹ [°C]	-	-	-	-	35,0
Espacios refrigerados	(EM)	(AF) ²	(AR)	(AN)	
Q^1 [W]	112.539,2	168.809,0	117.228,4	28.134,8	-
Q_{fija} [W]	56.340	16.170	22.300	10.850	-

Compresores: Una unidad de 24.319,6 W y dos unidades de 46.550,4 W. E: Evaporador. Q: Capacidad de refrigeración. T: Temperatura. EM: Sala de empaque, AF: Aire forzado, AR: Almacenamiento refrigerado, AN: Andén de carga. Q_{fija} : Carga fija

¹ las propiedades reportadas corresponden a cada unidad evaporadora o condensadora.

² corresponde a 1 túnel de aire forzado.



E-i: evaporador número i, EM: Sala de empaque, AF-i: túnel de aire forzado i AR: cámara de almacenamiento refrigerado y AN-i: andén de carga i.

Figura 16. Diagrama del sistema de refrigeración instalado.

El sistema cuenta con una unidad centralizada de condensación responsable del funcionamiento del sistema global, tanto para los evaporadores del proceso como los evaporadores de los servicios auxiliares de la empresa (oficinas).

En la tabla 7, también se muestran las características de cada uno de los evaporadores y la capacidad de refrigeración de cada una de las salas, junto con la carga fija, que es aquella debida a emisión de calor de motores, personas e iluminación, transmisión de calor a través de paredes e infiltración de aire. Los resultados muestran que la sala de empaque (EM) tiene una capacidad instalada de 112,5 kW, la de almacenamiento (AR) de 117,2 kW, el andén de 28,1 kW y cada túnel de aire forzado (AF) tiene una capacidad instalada de 168,8 kW. La carga fija de la sala de empaque es un 50 % de la capacidad instalada, utilizada para compensar las condiciones externas, el calor generado por los motores, la emisión de calor de las personas y la infiltración de aire. Para el andén corresponde al 39 %, mientras que cada túnel de aire forzado y la cámara de almacenamiento refrigerado tienen una carga fija que corresponde al 9,6 % y 19 % de la capacidad de refrigeración instalada, respectivamente.

En este estudio, se analiza la operación y capacidad de los sistemas de aire forzado, con el fin de mejorar su eficacia. El enfriamiento con aire forzado hace pasar el aire a través de las cajas con producto, al establecer un diferencial de presiones con la ayuda de los ventiladores, para un mejor contacto entre la piña y el aire de enfriamiento. El aire extrae calor de la fruta y continúa su movimiento hasta abandonar las tarimas con fruta, para regresar al sistema de refrigeración (por la succión), donde se vuelve a enfriar. El enfriamiento es más rápido que cuando se hace en cámaras de refrigeración, porque el contacto aire fruta es mejor en los túneles de aire forzado [63].

Debido a esta razón el caudal suministrado al producto, por cada evaporador, dentro del túnel de aire forzado es mayor al abastecido en los otros espacios refrigerados, tal como lo muestra la tabla 7. Según sus datos nominales, cada evaporador de los túneles de aire forzado tiene la capacidad de suministrar $16,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, es decir cada túnel puede abastecer $33,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Si se asume que toda esta corriente de aire pasa eficientemente a través de las cajas de producto, ya sea a capacidad media (13 tarimas, con aproximadamente 12.761,8 kg de fruta calibre 7) o a capacidad plena (26 tarimas, con alrededor de 25.523,7 kg de fruta), el caudal suministrado dentro del túnel, sería equivalente a $2,6 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ y $1,3 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,

respectivamente. Este flujo de aire es un valor teórico (no considera pérdidas) y es ligeramente superior al rango recomendado para el enfriamiento con aire forzado de producto agrícola, $0,5 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ y $2,0 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ [8].

4.4.2 Análisis de sensibilidad técnica de los subprocesos llevados a cabo dentro de los espacios refrigerados

El análisis de sensibilidad se hizo contrastando la información sobre la capacidad de refrigeración instalada en cada sala (tabla 7) y la capacidad de refrigeración requerida para diversos escenarios, según la cantidad de producto a enfriar, la temperatura inicial y final de la fruta, de acuerdo a la tabla 3. La intersección entre la curva de carga de refrigeración requerida con la capacidad neta de enfriamiento disponible, teóricamente, permite determinar el tiempo de enfriamiento del sistema [48].

Para todos los escenarios, se utilizó la carga fija que aparece en la tabla 7, que incluye el calor generado por motores, pérdidas de calor a través de las paredes, techo y piso, emisión de calor de las personas e iluminación, y es independiente de la cantidad de producto a enfriar, de la temperatura del producto y para todos los espacios, con excepción de los túneles de aire forzado, también se consideró la carga por infiltración de aire al abrir y cerrar las puertas.

En cada gráfica (figura 17 a figura 20) aparecen las curvas correspondientes a la carga térmica requerida según el tiempo de enfriamiento para los tres escenarios dados en la tabla 3. También aparece una línea horizontal de puntos, que corresponde a la carga fija de refrigeración y una zona gris, que representa la capacidad nominal instalada de los equipos para cada espacio refrigerado. Estas gráficas permiten determinar si es posible el enfriamiento de una determinada cantidad de producto en un tiempo dado, dentro de cada espacio refrigerado, como se ilustra seguidamente, bajo el supuesto de que los evaporadores operan bajo su capacidad nominal (100 % de eficiencia). De modo, que, si se quisiera enfriar producto en determinado tiempo, de las gráficas se puede estimar cual sería la capacidad de refrigeración necesaria para que la fruta se enfríe en ese tiempo y a la vez se podría determinar si la capacidad instalada es suficiente para tal carga. Las gráficas también permiten contrastar

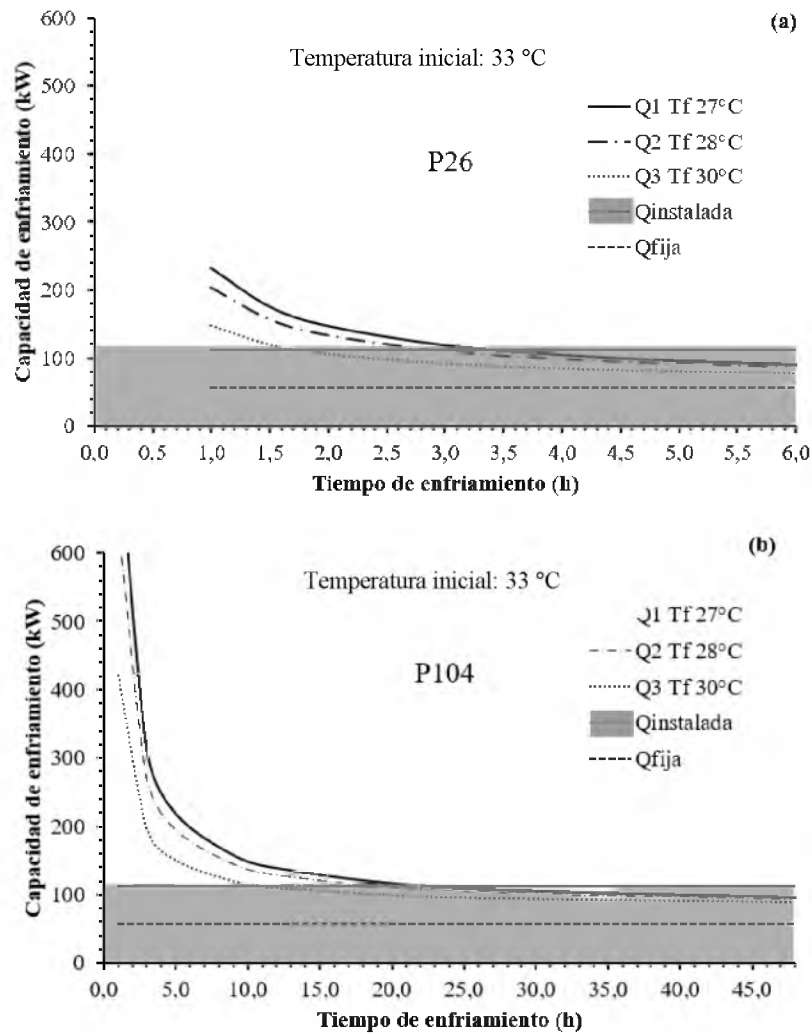
la carga requerida total con la carga fija de cada espacio refrigerado y la intersección entre las curvas de carga requerida y la capacidad instalada, permite determinar el tiempo teórico que los equipos instalados necesitarían para enfriar los productos, para las condiciones de cada escenario.

Sala de empaque (EM): la figura 17 muestra las curvas de carga de refrigeración requerida para 26 y 104 tarimas de producto, en la sala de empaque, considerando que ingresan a la sala a 33 °C y reducen su temperatura en 6 °C, 5 °C y 3 °C, hasta 27 °C, 28 °C y 30 °C, respectivamente. Los resultados muestran que, para reducir la temperatura de la fruta de las 26 tarimas en 3 °C, se requieren 1,7 h. Este cálculo, corresponde a las primeras 26 tarimas del lote de producción, cuando comienzan a ingresar a la sala de empaque, ya que posteriormente, se acumulará en la sala de empaque una mayor cantidad de fruta, lo cual incrementará la carga de refrigeración requerida, pues además de enfriar las 26 tarimas, se requerirá enfriar parcialmente otra cantidad de producto dentro del mismo espacio refrigerado.

En este punto, cabe destacar, que las observaciones realizadas en la planta de empaque, mostraron que la reducción de temperatura de 6 °C se logró aproximadamente en 100 min para una muestra de piñas al inicio del turno de empaque, que se considera que se logró en tiempo reducido por tratarse de los primeros grupos de frutas que ingresaba a la zona de empaque. Si se quisiera que la fruta se redujera 6 °C (de 33 °C a 27 °C), se requerirían 3,5 h aproximadamente, según se aprecia en la figura 17a. Por su parte, cuando la sala de empaque funciona a capacidad plena, con 104 tarimas, la carga de refrigeración es muy alta y se requerirían más de 10 h, para reducir la temperatura de la fruta en 3 °C (figura 17b). Por lo tanto, se esperaría que la reducción de la temperatura de la fruta, durante su paso por la sala de empaque sea menor y en consecuencia su temperatura, al ingresar a los túneles de aire forzado, podría variar.

Para este estudio, se tomaron como temperaturas de referencia, las del perfil de temperaturas medidas a una muestra de fruta a lo largo del proceso, para lo cual se usaron frutas a una

temperatura inicial de 33 °C, que correspondía a las frutas más calientes que se tenían y que recién llegaban del campo, cerca del mediodía. Sin embargo, la temperatura de la fruta que viene del campo puede presentar cambios a través del día y dependiendo del tiempo que permanezca en el campo y transporte a la planta, así como del tiempo de reposo bajo la sombra en la zona de recibo, en espera del inicio de las operaciones, lo cual quedó fuera del alcance de este estudio.



Q_i: carga de refrigeración del escenario i, T_f: Temperatura final, Temperatura inicial: 33 °C, P_i: número de tarimas.

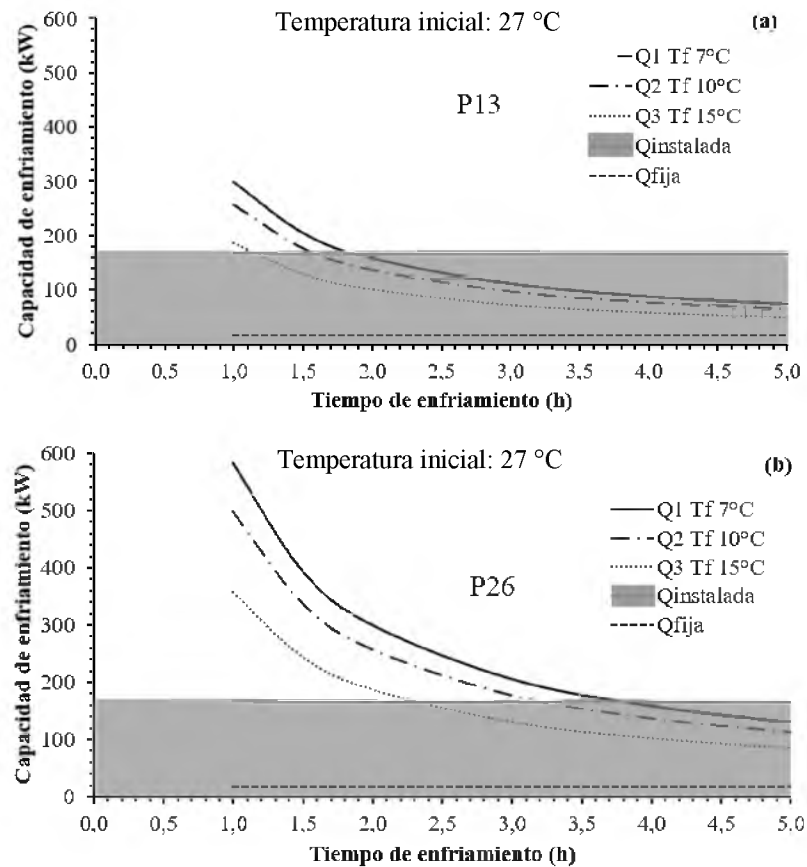
Figura 17. Análisis de sensibilidad técnica para la sala de empaque con 26 tarimas en (a) y con 104 tarimas en (b).

También en la figura 17, se observa que la carga fija corresponde a cerca del 50 % de la capacidad instalada, principalmente porque en esta sala hay 45 motores (que representan un 40 % de la carga fija). Así, solamente el 50 % de la capacidad instalada, está disponible para el enfriamiento de la fruta lo que limita su reducción de temperatura, pero ayuda al proceso como preparación para los túneles de aire forzado, para iniciar el enfriamiento.

Al comparar las figuras 17 a y b, cuanto menor sea la cantidad de la fruta en la sala, es posible una mayor reducción de temperatura en un menor tiempo, pues para 104 tarimas, se requerirían más de 10 h para reducir la temperatura en 3 °C. Para un mejor aprovechamiento de la sala de empaque se necesita minimizar la cantidad de fruta que se mantenga en la zona de empaque, por lo que si se agilizan los subprocesos de empaque, entarimado y traslado a las cámaras de aire forzado (AF), se podrá iniciar con los ciclos de enfriamiento con aire forzado más rápidamente y se quitará parte de la carga térmica requerida en la sala de empaque. El tiempo de ciclo o conocido como tasa de procesamiento [64], debe ser tal que no se genere producto en espera para el ingreso a los túneles de aire forzado, sino que pueda iniciar otro ciclo tan pronto se traslade el producto enfriado hacia las cámaras de almacenamiento refrigerado (AR). Para el llenado del primer túnel de aire forzado, que requiere un tiempo de 109,1 min \pm 36 min, se esperaría una reducción en la temperatura de la fruta de 3 °C en su paso por la sala de empaque (EM).

Túneles de aire forzado (AF): la figura 18 muestra los resultados de la simulación para uno de los cuatro túneles de aire forzado, que tienen la misma capacidad instalada. Para esta área, se observa que la capacidad instalada es más alta y que la proporción que corresponde a la carga fija es mucho menor (9,6 %), por lo tanto, se utiliza un 90,4 % de la capacidad instalada, para enfriar el producto. Esta carga de producto representa el 75 % de la carga de refrigeración total requerida, tal como se ha definido para las operaciones de preenfriamiento con aire forzado [21]. También cabe resaltar, que algunos autores señalan que de la carga fija en los túneles, un 90 % corresponde al calor emitido por los motores de los ventiladores, que se traduce en costos considerables, razón por la cual se ha determinado que la operación directa de los ventiladores representa la mayor parte del consumo eléctrico en los subprocesos

de enfriamiento de frutas [65]. Para la figura 18, se consideró una temperatura inicial de la fruta de 27 °C y temperaturas finales de 7 °C, 10 °C y 15 °C, para carga media y plena (13 y 26 tarimas, respectivamente). Para una carga de 13 tarimas (figura 18a), se determinó que el sistema de aire forzado tiene suficiente capacidad para reducir la temperatura de 27 °C a 7 °C, 10 °C y 15 °C, en 1,9 h, 1,6 h y 1,3 h, respectivamente, lo cual corresponde a entre el 37 % y 54 % del tiempo de enfriamiento utilizado actualmente por la empresa (3,5 h), sin embargo, estos resultados se contrastarán más adelante con las mediciones experimentales. Lo anterior se explica por la eficacia de los subprocesos de enfriamiento.



Q_i : carga de refrigeración del escenario i , T_f : Temperatura final, Temperatura inicial: 27 °C, P_i : número de tarimas.

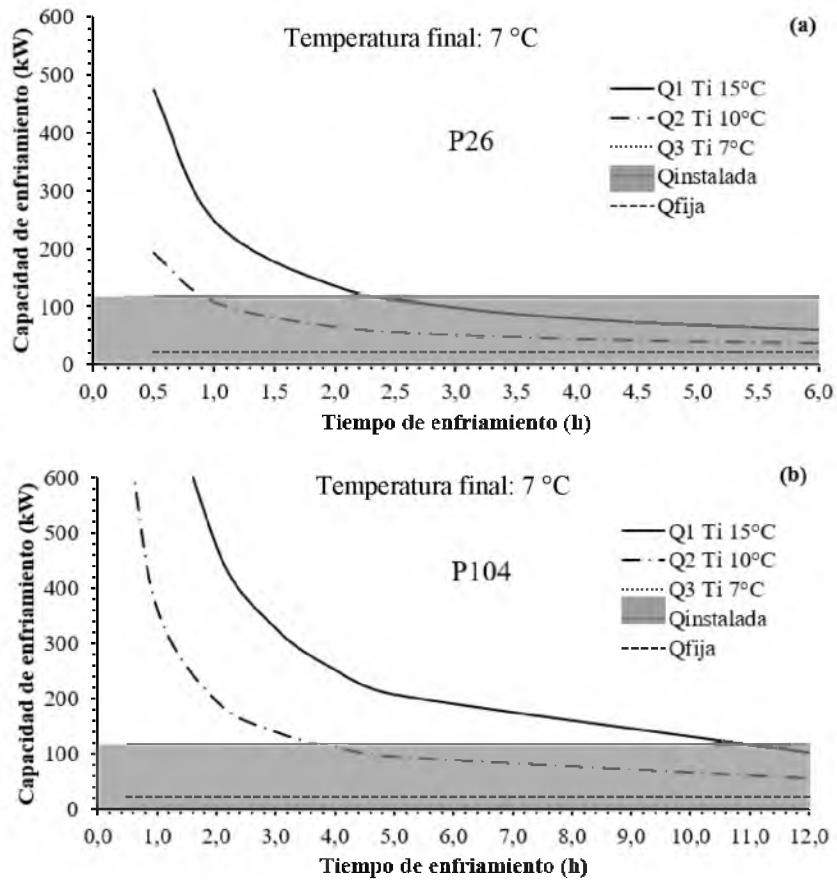
Figura 18. Análisis de sensibilidad técnica para el túnel de aire forzado con 26 tarimas en (a) y con 13 tarimas en (b).

Aunque el sistema tenga suficiente capacidad instalada, otros factores pueden afectar su eficacia, tales como las propiedades térmicas de la fruta y los materiales de empaque, diseño de las cajas, el acomodo del producto y las cajas en las tarimas, el área de ventilaciones y disposición de las ventilaciones, que podrían ocasionar caídas de presión excesivas para el aire al pasar por las cajas y espacios libres que se dejen entre tarimas, la resistencia que ofrecen los materiales de empaque a la transferencia de calor y otros. De manera que si el sistema tiene suficiente capacidad de refrigeración se hace necesario estudiar a fondo los factores que pueden estar limitando el proceso de enfriamiento.

Al aumentar la cantidad de tarimas a enfriar con aire forzado, de 13 a 26, se encontró que, el sistema instalado no posee la capacidad para lograr la reducción completa de la temperatura inicial de 27 °C hasta 7 °C, durante las 3,5 h utilizadas comercialmente en la planta (figura 18b), sino que requeriría 3,8 h para lograr dicha reducción. Mientras que, reducir la temperatura de la fruta de 27 °C hasta 10 °C y 15 °C tomaría 3,2 h y 2,3 h, respectivamente, considerando un 100 % de eficiencia.

Cámara de almacenamiento refrigerado (AR): las figuras 19a y 19b muestran los resultados de cada escenario para una carga de 26 y 104 tarimas de producto dentro de la cámara de refrigeración. La simulación muestra que el sistema es capaz de amortiguar las cargas térmicas fijas (19 % de la capacidad instalada), así como la carga térmica asociada a la respiración del producto (0,7 % de la capacidad instalada), si se quisiera mantener constante una temperatura de 7 °C en el mismo, ya sea para 26 o 104 tarimas.

Según la figura 19a, si las 26 tarimas de producto ingresan a 15 °C, es posible reducir su temperatura hasta 7 °C en aproximadamente 2,3 h y si, la temperatura inicial de la fruta fuera de 10 °C, en menos de 1 h, se obtendría una temperatura de 7 °C. Si se almacena la carga de todos los 4 túneles (104 tarimas) se requeriría entre 3,5 h y 10,7 h, para reducir en 3 °C y 8 °C la temperatura inicial de la fruta (10 °C y 15 °C, respectivamente), tal como lo muestra la figura 19b.



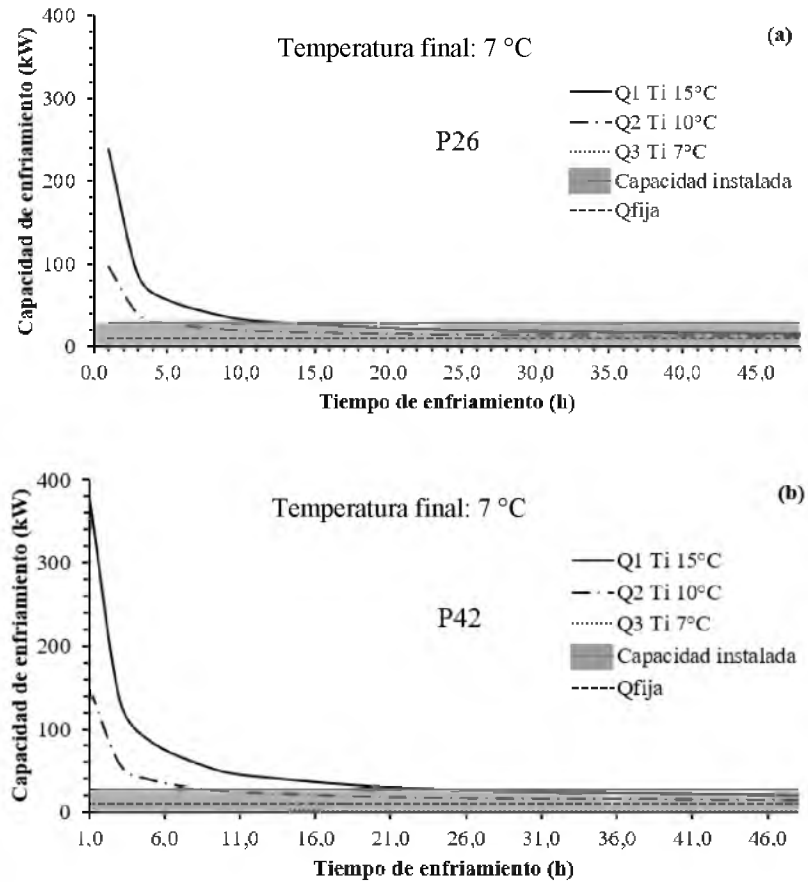
Q_i : carga de refrigeración del escenario i , T_i : Temperatura inicial, Temperatura final: 7 °C, P_i : número de tarimas.

Figura 19. Análisis de sensibilidad técnica para la cámara de almacenamiento refrigerado con 26 tarimas en (a) y con 104 tarimas en (b).

Andén de carga (AN-1): la figura 20 muestra el resultado de la simulación dentro del andén de carga 1, que según se observa, tiene la capacidad para amortiguar las cargas fijas (39 % de la capacidad de refrigeración), así como la emisión de calor como efecto de la respiración del producto (2,9 % de la capacidad instalada), ya sea de 26 tarimas o 42 tarimas, en caso de que se requiera mantener una temperatura en la fruta de 7 °C.

Si, por el contrario, las 26 tarimas no pasaran por la cámara de refrigeración, sino que se trasladen directamente desde los túneles de aire forzado hacia los contenedores de transporte, lograr una temperatura de 7 °C en la fruta, dentro del andén, tomaría cerca de 12 h, si la

temperatura inicial de la fruta fuera de 15 °C. Mientras que, si el producto ingresara a 10 °C, se requerían cerca de 5 h.



Q_i : carga de refrigeración del escenario i , T_i : Temperatura inicial, Temperatura final: 7 °C, P_i : número de tarimas.

Figura 20. Análisis de sensibilidad técnica para el andén de carga 1 con 26 tarimas en (a) y con 42 tarimas es (b).

A una capacidad plena del andén de carga (42 tarimas), estos escenarios corresponderían a un tiempo necesario de 24 h y 9 h, respectivamente, lo que confirma lo discutido anteriormente, en cuanto a que este espacio no es eficaz para reducir la temperatura de la fruta, por el poco tiempo en que permanece y las características propias del equipo de refrigeración y que consecuentemente, si la fruta no se enfría adecuadamente en las etapas anteriores, no se alcanzaría la temperatura óptima de almacenamiento en este punto.

4.5 Estudio del enfriamiento en los túneles de aire forzado

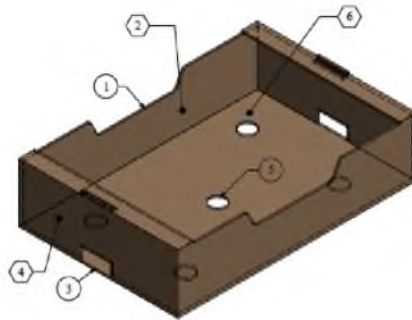
4.5.1 Configuración de las tarimas de producto en el túnel de aire forzado

La figura 21 muestra el tipo de caja en el que se empaca la piña según su calibre (7 piñas en una caja para fruta calibre número 7). Se utilizan cajas de 60 cm x 40 cm x 14 cm, colocadas sobre tarimas de 1,2 x 1,0 m², de 16 niveles por tarima con 5 cajas por nivel (figura 22), las cuales se estabilizan con esquineros y flejes plásticos. La circulación del aire a través de las tarimas durante el enfriamiento se da, siguiendo líneas de corriente horizontales, sobre un área total de ventilación de 7,4 % del área expuesta al flujo de aire. Este aire pasa a través de las cajas de cada nivel, atravesando las ventilaciones laterales de las cajas (9,7 % del área expuesta al flujo) y las ventilaciones frontales (lado corto de la caja con 3,9 % del área expuesta), según el acomodo de las cajas y la colocación dentro de los túneles. Algunos autores recomiendan áreas de ventilación del 5 % [46], para el enfriamiento con aire forzado. Los empaques utilizados para piña superan este valor, cuando el aire pasa a través de las ventilaciones laterales (9,7 %), pero tienen una menor área expuesta, cuando este pasa por las frontales (3,9 %).

Los empaques cuentan con cinco ventilaciones en el fondo de las cajas (2,6 % del área expuesta) y cuando la tarima de producto está completa, en el nivel 16, se coloca una tapa de cartón con las mismas cinco ventilaciones en la parte superior (figura 22) por donde pasa el flujo de aire durante el transporte en contenedores marítimos, donde la línea de flujo del aire es vertical, desde la parte inferior del contenedor hacia la parte superior [48].

En la figura 22 se aprecia la colocación de los empaques dentro de la tarima, así como la disposición de las ventilaciones a través de las cuales circula el flujo de aire durante el enfriamiento. A las cajas colocadas en los cinco niveles inferiores, se les coloca una lámina de cartón doblada en sus extremos, para reforzar la resistencia mecánica de las cajas (figura 23). Esta lámina contribuye al soporte estructural de las cajas en la base de la tarima que soportan una carga mayor, sin embargo, también obstruyen parcialmente el flujo de aire en distintas proporciones, ya que la lámina se coloca según el acomodo de la fruta dentro de

las cajas. Las tarimas completas y estabilizadas con los esquineros y flejes se trasladan a los túneles de aire forzado.



Sección	Área [m ²]	Proporción sobre el área expuesta al flujo
1. Ventilación lateral	$8,6 \times 10^{-3}$	9,7 %
2. Cara lateral	$8,9 \times 10^{-2}$	-
3. Ventilación frontal	$2,3 \times 10^{-3}$	3,9 %
4. Cara frontal	$5,9 \times 10^{-2}$	-
5. Ventilación circular (5 ventilaciones)	$6,3 \times 10^{-3}$	2,6 %
6. Cara inferior	$2,4 \times 10^{-1}$	-
Cara superior	$2,1 \times 10^{-1}$	-

Figura 21. Caja para empaque de fruta fresca de exportación.

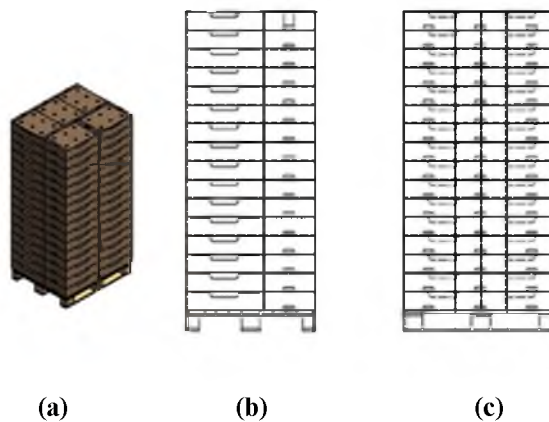


Figura 22. Vista isométrica de la tarima de producto empacado en (a), vista frontal de la tarima de producto por el lado corto de la tarima (1 m de ancho) en (b) y vista lateral de la tarima de producto por el lado largo de la tarima (1,2 m de lado) en (c).



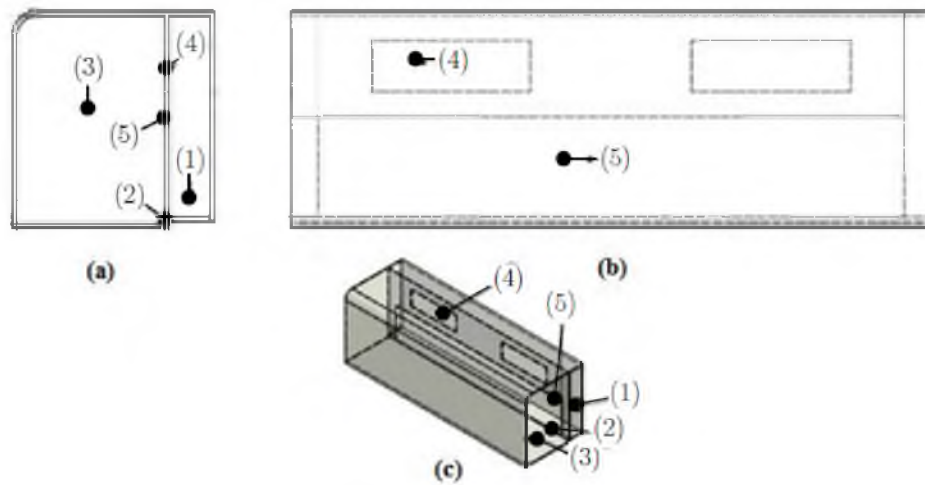
Figura 23. Refuerzo de cartón en todas las cajas de los primeros 5 niveles de la tarima de producto.

La figura 24 muestra tres vistas de uno de los túneles de aire forzado de la planta empacadora: frontal (desde la puerta del lado de la sala de empaque), lateral (a lo largo del espacio refrigerado del túnel) y uno isométrico, en el que se señalan los componentes del sistema de enfriamiento y guías para la colocación de las tarimas de fruta. Cada túnel cuenta con dos evaporadores y una ventana contra la cual se colocan las tarimas.

Cada túnel tiene aproximadamente 14,1 m de largo, 4,5 m de alto y 4,2 m de ancho y cuenta con una ventana de retorno del aire, de 12,9 m de largo y 2,2 m de alto, hacia la antecámara de succión, de 0,9 m de ancho, que recibe el aire que pasa por las tarimas y lo dirige hacia los dos evaporadores. El acomodo de las tarimas para el enfriamiento con aire forzado a capacidad media (13 tarimas) o plena (26 tarimas) se muestra en la figura 25. Las tarimas de producto terminado, nominalmente miden 1,0 m x 1,2 m x 2,4 m, sin embargo, sus dimensiones reales son 0,98 m x 1,18 m x 2,4 m. Éstas, se acomodan dentro del túnel, colocándolas contra el borde (cambio de nivel de 14 cm) de la antecámara de succión, tal como se observa en la figura 24 y 25, con el lado de 1,0 m de frente a la succión.

Sin embargo, las dimensiones de la ventana de la antecámara, son mayores que el área real de las 13 tarimas que se alinean contra ella, por lo que queda un espacio libre de aproximadamente 16 cm, que permitiría el paso directo del aire, y por esta razón, en la operación normal de los túneles, la primera tarima se coloca con el lado de 1,2 m contra la ventana (tarima 1, figura 25a).

En el caso de la operación de los túneles a capacidad plena (26 tarimas), las tarimas se colocan con el lado de 1,0 m hacia la succión (figura 25b), a excepción de la primera tarima de la primera fila (tarima 1 adyacente a la ventana de retorno del aire, figura 25b), que se coloca con el lado 1,2 m de frente a la succión, para compensar el espacio libre antes mencionado.



Sección
1. Antecámara de succión del evaporador
2. Cambio de nivel para situar tarimas
3. Ubicación de tarimas de producto (descarga de los evaporadores)
4. Evaporadores del túnel
5. Área de retorno del aire al enfriar el producto

Figura 24. Vista frontal del túnel en (a), vista lateral del túnel en (b) y vista isométrica del túnel en (c).

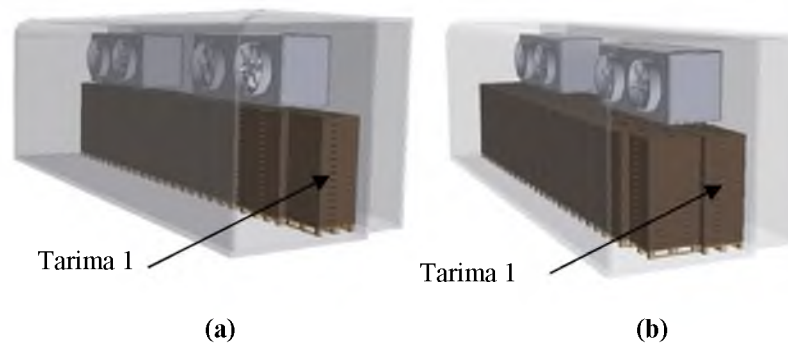


Figura 25. Distribución de las tarimas de producto dentro del túnel de aire forzado para la configuración a capacidad media en (a) y para la configuración a capacidad plena en (b).

La altura de la ventana de la succión, bloquea las ventilaciones de las cajas en el nivel superior de la tarima (nivel 16), ya que estas cajas sobrepasan la altura de la ventana por cerca de 11,5 cm, por lo que no permite que se establezca el flujo horizontal de aire (de la descarga a la succión de los evaporadores) en las cajas de este nivel, como lo hace en el resto de la tarima, sino que el enfriamiento dependerá, del intercambio de calor entre la fruta y el aire ubicado sobre las tarimas.

Con respecto a la tarima 1, a capacidad media o plena, su colocación interrumpe el flujo de aire a través de sí misma, ya que no hay una ruta clara para el paso de aire a través de las ventilaciones, como se analizará en el siguiente apartado.

Las dimensiones de la ventana de la antecámara de succión, también presentan una limitante, que es que el sistema no puede operar cuando el número de tarimas sea menor de 13, debido a que quedaría un espacio libre que no permitiría establecer el flujo de aire a través del producto. Esta situación se da con frecuencia al cierre de las operaciones de empaque, donde puede quedar un número inferior que no pueden enfriarse con el aire forzado. Este inconveniente, podría resolverse construyendo una pared removible que permita bloquear parte de la ventana, según la cantidad de tarimas que se requiera enfriar, de manera que el flujo de aire pueda dirigirse a través de las tarimas con piña. Esta modificación podría estudiarse según los requerimientos de la empresa, para uno o varios de los túneles, tomando en cuenta la cantidad de fruta y la posible operación independiente de los dos evaporadores de las cámaras.

4.5.2 Análisis conceptual de las principales rutas para el flujo de aire

En este apartado se analiza el paso del flujo de aire a través de las cajas de piña, durante el enfriamiento con aire forzado, tomando en cuenta el acomodo de las cajas, sus ventilaciones y el movimiento del aire a través de las tarimas.

Doce tarimas, se colocan con su lado de 1,0 m colocado frente a la ventana de retorno y la primera (la tarima número 1) con su lado de 1,2 m (que se rota 90°). La figura 26 ilustra el

paso del aire a través de cada nivel en el que se colocan 5 cajas. En la figura 26a, se observa que hay dos rutas principales en las tarimas que se colocan en la posición normal (con el lado de 1,0 m frente a la antecámara de succión), la primera a través de las ventilaciones frontales para las dos cajas colocadas a lo largo del lado de 1,2 m y la segunda, a través de las ventilaciones laterales de los tres empaques colocados transversalmente con su lado corto de frente al borde de 1,2 m de la tarima.

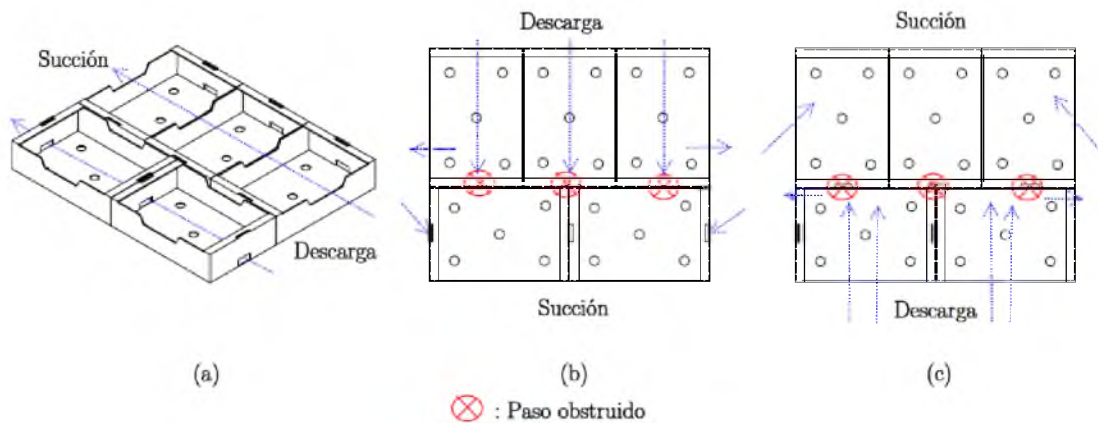


Figura 26. Esquema de las principales rutas para el flujo de aire a través del lado corto de la tarima (1,0 m), en cada nivel para una tarima.

Esta figura muestra un paso directo del flujo de aire, o bien como se recomienda, un canal continuo para el paso del aire desde los alrededores hacia el interior de la caja [66], el cual será parcialmente desviado por la presencia de las frutas y por los separadores de cartón en los cinco primeros niveles.

Por su parte, la disposición de la tarima número 1 (figura 26b), muestra que al girarla 90°, se restringe considerablemente el patrón de flujo de aire a través de la misma, independientemente de la dirección de rotación. En ambos casos (figura 26b y 26c), no hay un paso directo para el flujo de aire a través de las ventilaciones de las cajas de un mismo nivel, ya que las ventilaciones de las cajas no coinciden ni permiten un paso continuo de aire. La caída de presión para una ruta alterna hacia la ventana de retorno es muy alta por lo que el paso de aire a través de los empaques es limitado. Esta situación es más crítica en las cajas de la tarima 1 que se encuentran del lado interno (cerca de la tarima 2), puesto que las que se

encuentran en el otro extremo se exponen directamente al aire de la descarga, lo cual les favorece el intercambio de calor localizado en esa área.

Para el caso de la operación de los túneles a capacidad plena (26 tarimas), la figura 27a, muestra la trayectoria del flujo de aire a través de dos tarimas hasta la ventana de retorno. En este caso, cuando el lado corto de la tarima, se coloca contra la ventana de retorno, se establece un flujo de aire continuo a través de las cajas, por la alineación de las ventilaciones de las cajas, a través de 6 cajas (ventilaciones laterales) o de cuatro cajas (ventilaciones frontales), siempre y cuando ambas tarimas se coloquen debidamente alineadas. Esto permite mantener un diferencial de presión entre los extremos de la tarima que permitirá el flujo de aire continuo a través de ellas.

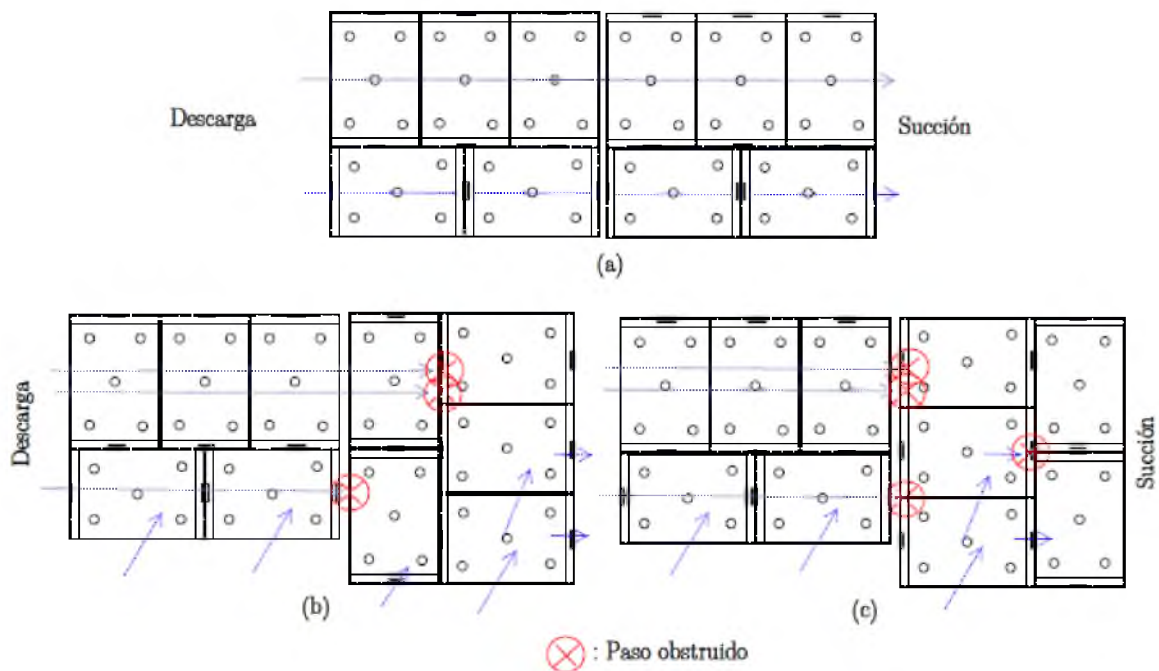


Figura 27. Esquema de las principales rutas para el flujo de aire a través de un nivel a capacidad plena por el lado corto de la tarima en (a), cuando la segunda tarima se coloca con una rotación de 90° respecto al lado corto en (b) y cuando la segunda tarima se coloca con una rotación de 270° respecto al lado corto en (c).

En contraste las figuras 27b y 27c (capacidad plena), muestran los problemas que encuentra el flujo de aire para los posibles patrones de acomodo de las tarimas número 1 y 14, ubicadas

en el extremo del túnel. En ambos casos, el flujo de aire se interrumpe porque las ventilaciones de las cajas no coinciden (no se encuentran alineadas), por lo que el aire no puede pasar y no permite que se establezca un diferencial de presiones entre el aire en la descarga y en la succión de los evaporadores. Es claro que el aire no puede pasar a lo largo de estas dos tarimas, de la manera que lo hace en las demás tarimas, sino que se interrumpe y por tanto interfiere en el enfriamiento de la fruta colocada en esas dos posiciones. Al igual que para la capacidad media, la tarima 1, al encontrarse en el extremo del túnel, tiene un mayor contacto con el aire de la cámara, lo cual permite cierta circulación de aire a través de las cajas, pero las restricciones de flujo no permitirán el paso del aire hacia la succión de los evaporadores.

La figura 28 ilustra el bloqueo del flujo de aire para la tarima 1, entre un nivel y su nivel superior. El desvío de la dirección del flujo del aire por el bloqueo de las ventilaciones genera una gran pérdida de presión, que reduce la eficacia del sistema de enfriamiento, a la vez, que el aire busca rutas para equilibrar las diferencias de presión.

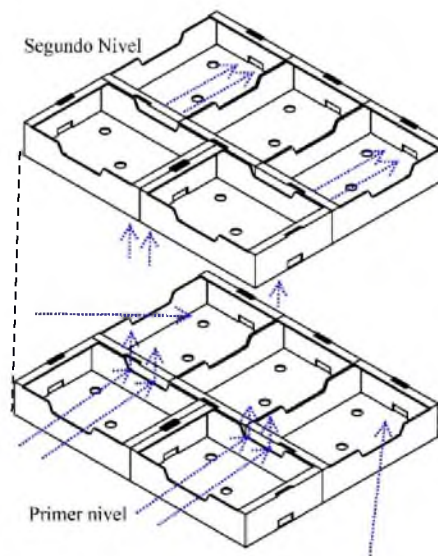


Figura 28. Esquema de las principales rutas para el flujo de aire a través del lado largo de la tarima (1,2 m), entre un nivel y su consecutivo superior en la configuración a capacidad media.

4.5.3 Diagnóstico de espacios vacíos (bypass) entre cajas y tarimas dentro del túnel de aire forzado

El subproceso de entarimado de la fruta, se hace de dos maneras, manual y automatizado. En el primer caso, colaboradores acomodan las cajas llenas de fruta sobre las tarimas, en el arreglo mostrado en el apartado anterior, en 16 niveles, a la vez que colocan los esquineros y flejes para la estabilización; en el segundo caso, hay un equipo de acomodo automático de las cajas por niveles, que incluye también la colocación manual de esquineros y flejes. Estos recursos físicos, así como los métodos de trabajo y los factores tecnológicos influyen de forma individual y combinada restringiendo la productividad de una empresa [67]. Durante las evaluaciones realizadas en este estudio, se observó que, dentro de las tarimas armadas y listas para el enfriamiento, algunas sufren desvíos con la altura (las paredes laterales no son totalmente verticales), por ligeros desfases en la alineación entre cajas. Las desviaciones presentan dos problemas principales: al no coincidir perfectamente las aristas de las cajas, la distribución de esfuerzos mecánicos en la caja (carga que soportan) cambia y es menos uniforme y esto les reduce su resistencia y los hace más propensos a colapsar, especialmente las cajas en los niveles inferiores de la tarima. Y el otro problema es que, pequeñas diferencias en la alineación, pueden bloquear parcialmente las ventilaciones durante el enfriamiento y dificultar la alineación de estas entre tarimas adyacentes, puesto que quedarán espacios vacíos entre tarimas; esto dificulta el paso del aire por los canales establecidos para ello y favorece el paso a través de los espacios libres (bypass), lo cual se verá reflejado en un aumento en los tiempos de enfriamiento de las frutas. Las figuras 29 y 30 muestran algunas de estas desviaciones observadas y los espacios libres que se forman entre las tarimas, que pueden provocar una disminución en el rendimiento del enfriamiento dentro de los túneles de aire forzado.

En la figura 29a, se observa que en algunas de las tarimas el ángulo de inclinación, medido con respecto a la línea vertical de una plomada, fue en promedio $2,3^\circ$, lo cual corresponde a una desviación entre la parte superior e inferior de la tarima de hasta 9,6 cm. Si estas tarimas se colocan junto a otra sin desviaciones, se presentaría un espacio libre de 1152 cm^2 , que

corresponde a un 4,8 % del área de una tarima expuesta al flujo de aire ($240 \times 100 \text{ cm}^2$), en contraste con las ventilaciones de dicha cara que corresponden a 1744 cm^2 (7,3 % del área de una tarima expuesta al flujo).

En la figura 29b, se observa que dos tarimas adyacentes no empataban entre sí, dejando un espacio libre (bypass) de 4,5 cm en la parte superior de la tarima, por donde el aire podría escaparse sin entrar en contacto con la fruta y por ende reduciría el rendimiento del enfriamiento de la fruta. En la misma figura se observa que las desviaciones no siempre son en línea recta de la base a la parte superior de la tarima, sino que muestran partes más estrechas en varios lugares, que con frecuencia coinciden con los flejes, que podrían estarse tensando más de la cuenta, provocando algunas deformaciones.

En algunos ciclos de enfriamiento con aire forzado, se observaron algunos espacios libres de forma triangular, con separaciones entre tarimas de 3,5 cm y 6 cm, con una altura promedio de 80 cm, que permiten áreas libres de 190 cm^2 en promedio, lo que representa un 10,9 % del área de ventilación de una tarima expuesta al flujo sobre la ventana de retorno del aire, tal como se muestra en la figura 30.

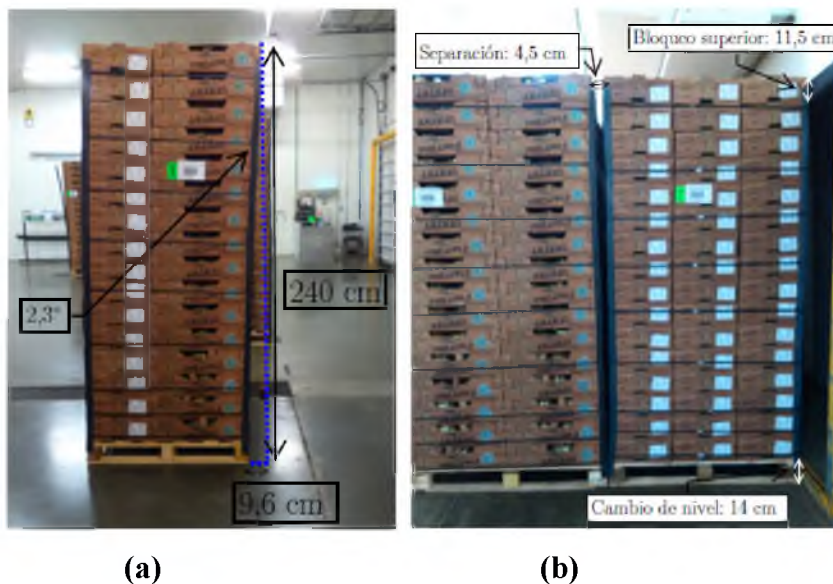


Figura 29. *Inclinación de las tarimas de producto en espera para ingresar al túnel en (a) e inclinación de las tarimas una vez ubicadas dentro de los túneles en (b).*

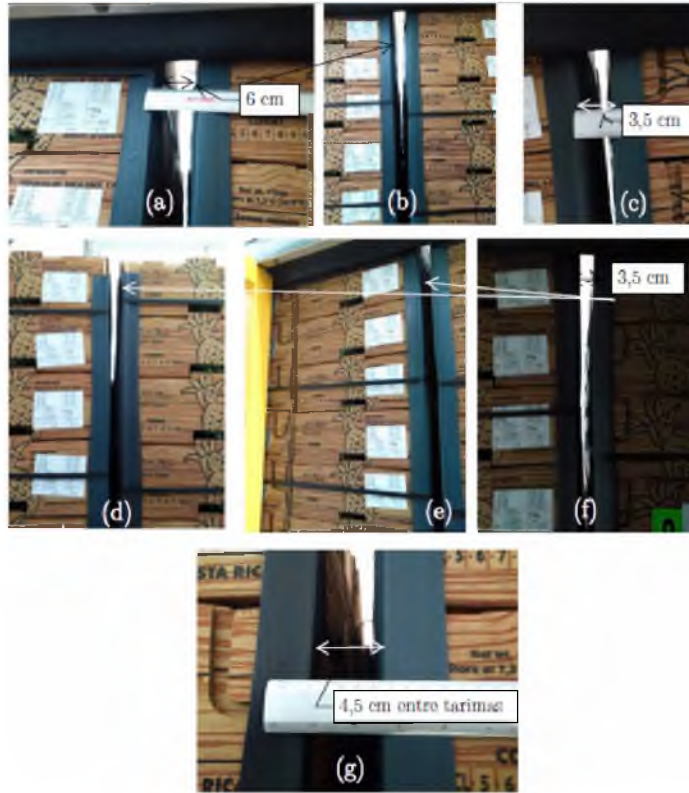


Figura 30. Regiones de paso libre del aire de enfriamiento a través de la ventana de retorno del aire de enfriamiento.

Otros espacios vacíos observados durante la operación de estos sistemas, fueron espacios entre la altura superior de la base de las tarimas de madera que no se encontraban completamente adyacentes a la junta del desnivel de la base ventana de retorno, sino que tenían separaciones de hasta por 2,5 cm, tal como se muestra en la figura 31, dejando un espacio libre para el paso del aire a través de la base de las tarimas. Estos espacios, permiten el paso directo del aire, restando eficacia al proceso de enfriamiento. De las observaciones expuestas, cabe destacar que se trata de espacios de formas y tamaños irregulares, difíciles de cuantificar con precisión, por los cuales el aire puede circular con una menor pérdida de presión que a través de las cajas, además, la forma irregular de las tarimas, no permite una alineación entre tarimas, cuando se utilizan dos filas (26 tarimas) y esto puede provocar reducciones del flujo de aire a través de la fruta. Si bien es cierto, los espacios libres pueden variar mucho entre ciclos de operación de los túneles, si se logran reducir o eliminar, el aire

pasaría a través de las cajas con un mayor contacto con las piñas con lo cual mejoraría el enfriamiento.

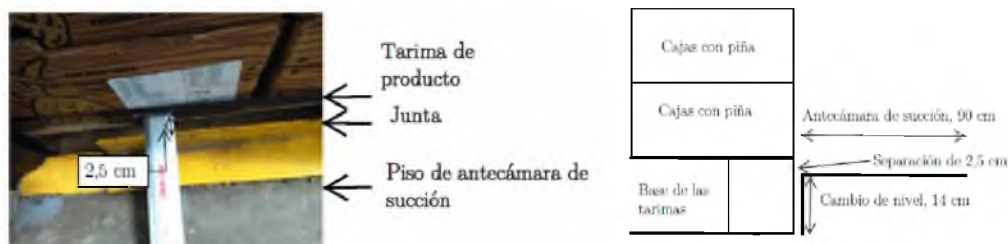


Figura 31. Regiones de paso libre del aire de enfriamiento a través de la ventana de retorno del aire de enfriamiento.

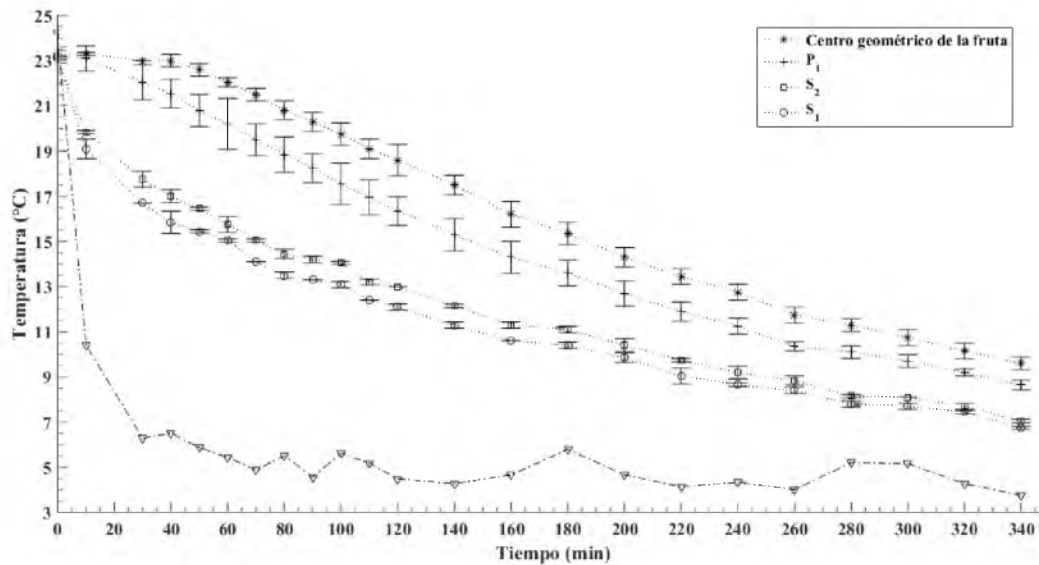
Sin embargo, cabe resaltar, que una buena y cuidadosa preparación y estabilización de las tarimas, así como una revisión y mejora de las operaciones de armado de cajas, permitiría reducir muchos de estos problemas, porque si se trabaja con tarimas regulares en forma y tamaño, su acomodo es más fácil y se puede controlar con mayor precisión el acomodo contra la ventana de retorno y entre tarimas.

4.5.4 Análisis de la temperatura durante el enfriamiento con aire forzado

4.5.4.1 Pruebas preliminares de enfriamiento

La figura 32 muestra el perfil de temperaturas de la fruta a lo largo de una sección transversal ubicada en el punto medio de la fruta, en cuatro puntos ubicados radialmente desde el centro geométrico de la misma.

Se determinó que, desde el principio del enfriamiento, se establece un perfil de temperaturas hacia la parte interna de la fruta, en el cual la temperatura en el centro se mantiene más alta y a medida que se aleja del centro hacia la superficie (lado interno de la cáscara), la temperatura disminuye. El gradiente a través de la pulpa de la piña se mantiene, incluso después de los 300 min, con una diferencia de temperaturas de 3 °C entre el centro de la fruta y cerca de la parte interna de la cáscara (8,3 cm), para las frutas utilizadas en estas pruebas (calibre número 5). En la misma figura se observa que también persiste la diferencia entre la temperatura del aire y la temperatura debajo de la cáscara, de 2 °C -3 °C.



C_c : centro geométrico de la fruta; P_1 : Pulpa a $4,0 \text{ cm} \pm 0,3 \text{ cm}$ del centro geométrico; S_2 : Pulpa a $7,0 \text{ cm} \pm 0,3 \text{ cm}$ del centro geométrico; S_1 : Pulpa a $8,3 \text{ cm} \pm 0,2 \text{ cm}$ del centro geométrico
 Figura 32. Perfil de temperatura promedio, en diferentes puntos ubicados radialmente desde el centro geométrico de la piña.

Las diferencias de temperatura a través de la pulpa y la cáscara, ante un diferencial de temperatura, se explican por las propiedades térmicas y físicas de la fruta, de modo que los resultados reflejan que la conducción de calor desde el centro de la fruta no ocurre instantáneamente, sino que es función del tiempo. Estos resultados son consistentes con un análisis previo sobre el comportamiento de la temperatura de la piña bajo refrigeración [38].

En la figura 33 se muestra la desviación promedio de la temperatura dentro de la fruta, con respecto a la temperatura promedio de la fruta de los cuatro puntos de medición, a lo largo del enfriamiento. Se encontró que la mayor desviación promedio de la temperatura, fue de casi $3 \text{ }^\circ\text{C}$ a los 70 min de iniciado el enfriamiento, a medida que se establece el perfil de temperaturas a través de la pulpa, con diferencias máximas de hasta $6 \text{ }^\circ\text{C}$ entre la temperatura del centro y de la cáscara de la piña y posteriormente, esta desviación disminuye, conforme avanza el enfriamiento hasta $1,1 \text{ }^\circ\text{C}$ al concluir la prueba, después de 340 min (5,7 h). Resultados similares han sido reportados para el enfriamiento de manzanas (*Malus domestica* Borkh cv. Golden Delicious) [26] y naranjas (*Citrus sinensis* cv. Valencia) [25], empacadas

en cajas ventiladas dentro de una cámara convencional de refrigeración, en los que según la posición de la fruta, se presentan desviaciones de temperatura.

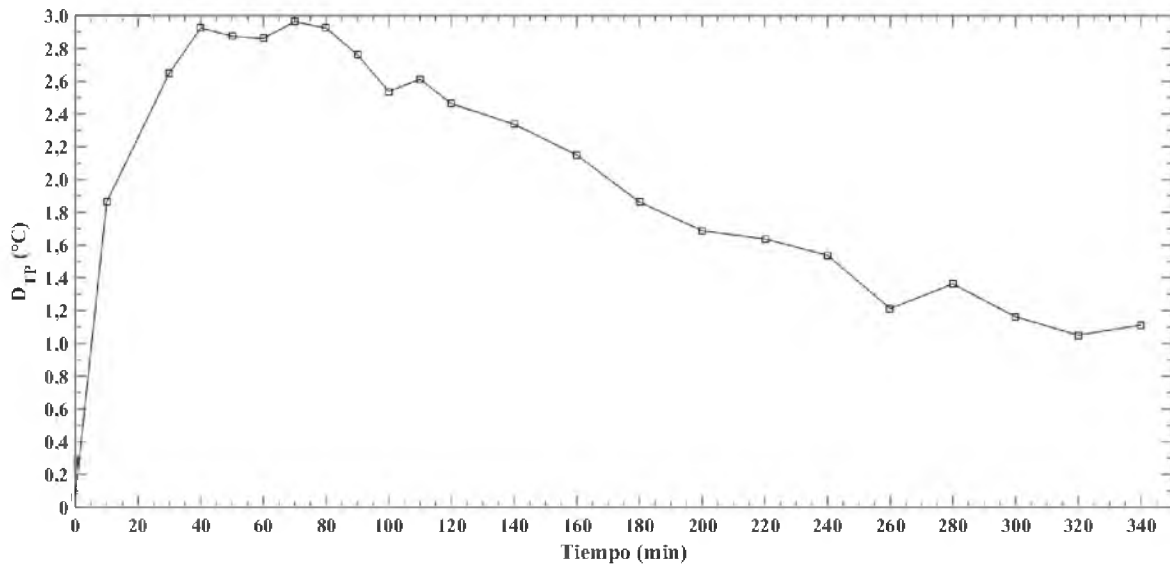
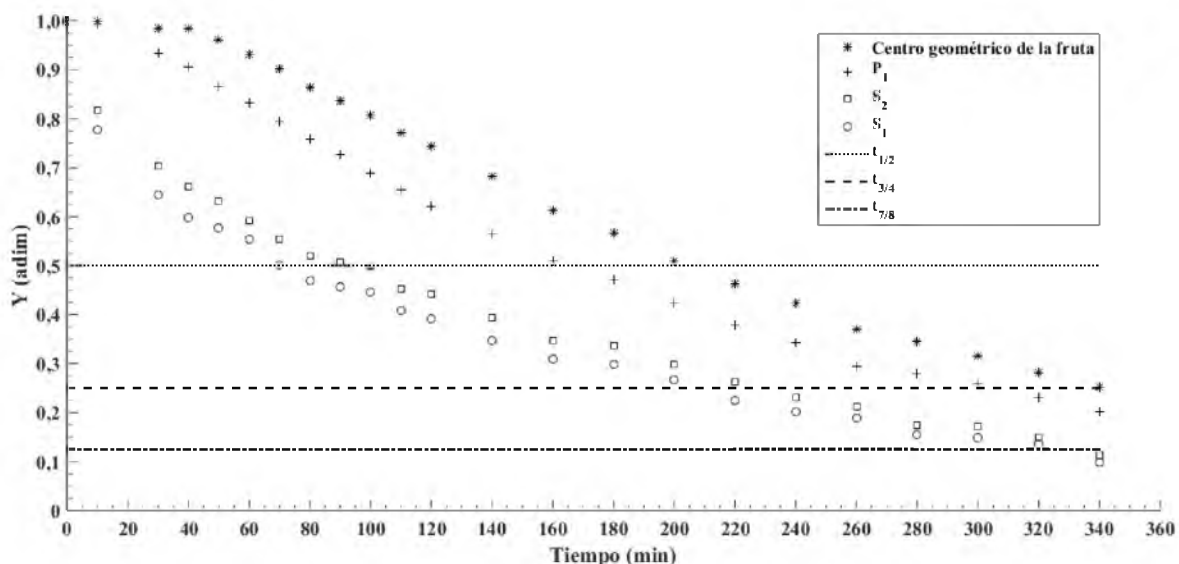


Figura 33. Desviación promedio de la temperatura dentro de la piña con respecto a la temperatura promedio de la fruta a lo largo del enfriamiento.

En la figura 34, los cambios en la temperatura de la fruta se transforman y se presentan como la variable Y, que mide el cambio adimensional de temperatura [43], ecuación 1, en el interior del producto. Los valores cercanos a la unidad, representan el inicio del enfriamiento y se reducen a lo largo del tiempo hasta completar el enfriamiento. En la misma figura se presentan tres líneas horizontales que indican el avance del enfriamiento a 1/2, 3/4 y 7/8 de enfriamiento (correspondientes a $t_{1/2} = 50\%$, $t_{3/4} = 75\%$ y $t_{7/8} = 87,5\%$ del enfriamiento, respectivamente). La representación gráfica de Y permite analizar el proceso de enfriamiento, eliminando el efecto de diferencias de temperatura de la fruta que ingresa a la operación. Se encontró que la mitad del enfriamiento ($t_{1/2}$) se alcanzó en 70 min, en las posiciones cercanas a la cáscara, pero requiere 200 min en el centro de la fruta; mientras que los $t_{3/4}$ de enfriamiento se alcanzaron en 210 min y 340 min, para las mismas posiciones respectivamente. El $t_{7/8}$ de enfriamiento se alcanzó en 330 min cerca de la cáscara, pero requerirían un tiempo mucho mayor en el centro de la fruta. Estas diferencias en los tiempos

de enfriamiento, deben tomarse en cuenta para definir los tiempos de operación de los sistemas de enfriamiento.

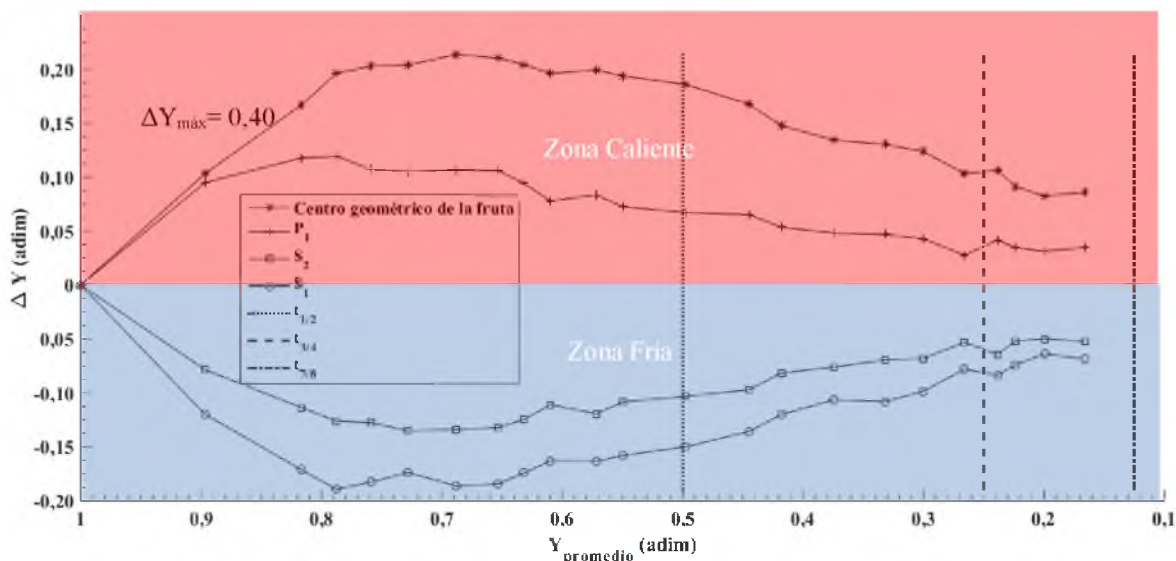


C_e: centro geométrico de la fruta; P₁: Pulpa a 4,0 cm ± 0,3 cm del centro geométrico; S₂: Pulpa a 7,0 cm ± 0,3 cm del centro geométrico; S₁: Pulpa a 8,3 cm ± 0,2 cm del centro geométrico
 Figura 34. Cambio adimensional de temperatura (Y) dentro de la piña.

Las diferencias en los tiempos de enfriamiento, según la posición dentro de la fruta, se explican por el número de Biot de la piña, que se estimó entre 1,14 y 2,30, suponiendo un coeficiente de transferencia de calor por convección de 11,2 W m⁻¹ °C⁻¹ a 20 W m⁻¹ °C⁻¹, determinado experimentalmente por Nicolai et al. [38], ya que esos valores indican que el producto tiene una mayor resistencia a la transferencia de calor por conducción que por convección, y por tanto, el tiempo de enfriamiento está limitado por los procesos de conducción de calor dentro de la fruta.

La heterogeneidad del enfriamiento en el interior de la fruta se muestra en la figura 35, que permite identificar los sitios dentro de la fruta, más calientes y los más fríos (ΔY positivos y negativos, respectivamente) con respecto al valor Y promedio, durante el enfriamiento, dada por la variable Y. Al inicio (Y=1), y conforme avanza el enfriamiento, las desviaciones (ΔY) aumentan, alcanzando su valor máximo ($\Delta Y_{\text{máx}} = 0,40$) entre 0,8 y 0,7 de avance del

enfriamiento, a partir de los cuales, la heterogeneidad se reduce hasta estabilizarse en los valores menores después de lograr los $t_{3/4}$ de enfriamiento.



C_c : centro geométrico de la fruta; P_1 : Pulpa a $4,0 \text{ cm} \pm 0,3 \text{ cm}$ del centro geométrico; S_2 : Pulpa a $7,0 \text{ cm} \pm 0,3 \text{ cm}$ del centro geométrico; S_1 : Pulpa a $8,3 \text{ cm} \pm 0,2 \text{ cm}$ del centro geométrico

Figura 35. Heterogeneidad de Y durante el enfriamiento de la piña

De esta forma, la temperatura de la pulpa es menor en las zonas localizadas cerca de la cáscara y se enfrían más lentamente en la parte central de la fruta.

Estudios de heterogeneidad en otros frutos se han hecho principalmente considerando unidades de producto colocadas en distintas posiciones de los sistemas de enfriamiento, pero no se han hecho dentro de los distintos productos, en cuyo caso la mayor heterogeneidad se ha reportado cerca del tiempo medio de enfriamiento ($t_{1/2}$) para manzanas, naranjas y kiwis [23-26]. Esto se explica por la diferencia en las condiciones de trabajo, ya que, en el caso del enfriamiento de este ensayo, las condiciones del aire en contacto con la fruta se mantuvieron constantes a lo largo del enfriamiento y la heterogeneidad se atribuye a las distancias entre la superficie y el centro del fruto, junto con la conductividad térmica de la fruta, mientras que, en los casos reportados por la literatura, las condiciones del aire cambian según la posición.

El aumento en la heterogeneidad y en la D_{TP} se debe a que, durante los primeros minutos del enfriamiento, la temperatura en el centro geométrico de la piña se mantiene constante (se retrasan los cambios) pero cerca de la superficie cambia rápidamente, lo cual hace que el ΔY aumente rápidamente hasta 0,40 y la desviación promedio de la temperatura alcance los 3 °C y conforme el centro se enfría, estos valores disminuyen.

4.5.4.2 Enfriamiento en los túneles de aire forzado

Los resultados de las evaluaciones de la operación de los sistemas de aire forzado aparecen en las figuras 36 a 40, en los que se incluye una muestra de las curvas típicas de enfriamiento y el análisis por separado de la operación de los túneles a capacidad media (una fila de 13 tarimas de producto) y a capacidad plena (dos filas de 13 tarimas de producto, para un total de 26 tarimas), con la base de las tarimas tapada (bloqueando el paso del aire) y sin tapar.

La figura 36 muestra un perfil de temperatura en el centro de la piña y para cuatro posiciones dentro del túnel durante el enfriamiento con aire forzado a capacidad media y plena. Por el diseño y protocolo de los cuatro túneles de aire forzado de la empresa, estos se mantienen con las puertas abiertas hacia la cámara de empaque, con el sistema de refrigeración apagado, donde se registraron temperaturas del aire entre 18 °C y 20 °C. El sistema de refrigeración de cada túnel se enciende una vez que se completa la carga de producto a enfriar (13 o 26 tarimas).

Es por ello, que la temperatura del aire (figura 36a y 36b) es de 20 °C antes de iniciar el ciclo de enfriamiento y tarda entre 20 min y 25 min en estabilizarse a la temperatura de operación requerida de 7,5 °C \pm 0,5 °C, independientemente del número de tarimas de producto y se mantiene estable hasta completar el enfriamiento durante 210 min (3,5 h). Paralelamente, se observa en ambas figuras, que el enfriamiento de la fruta tiende a ser más lento durante los primeros minutos y una vez que se estabiliza la temperatura del aire, la pendiente de las curvas aumenta, porque el enfriamiento es más rápido.

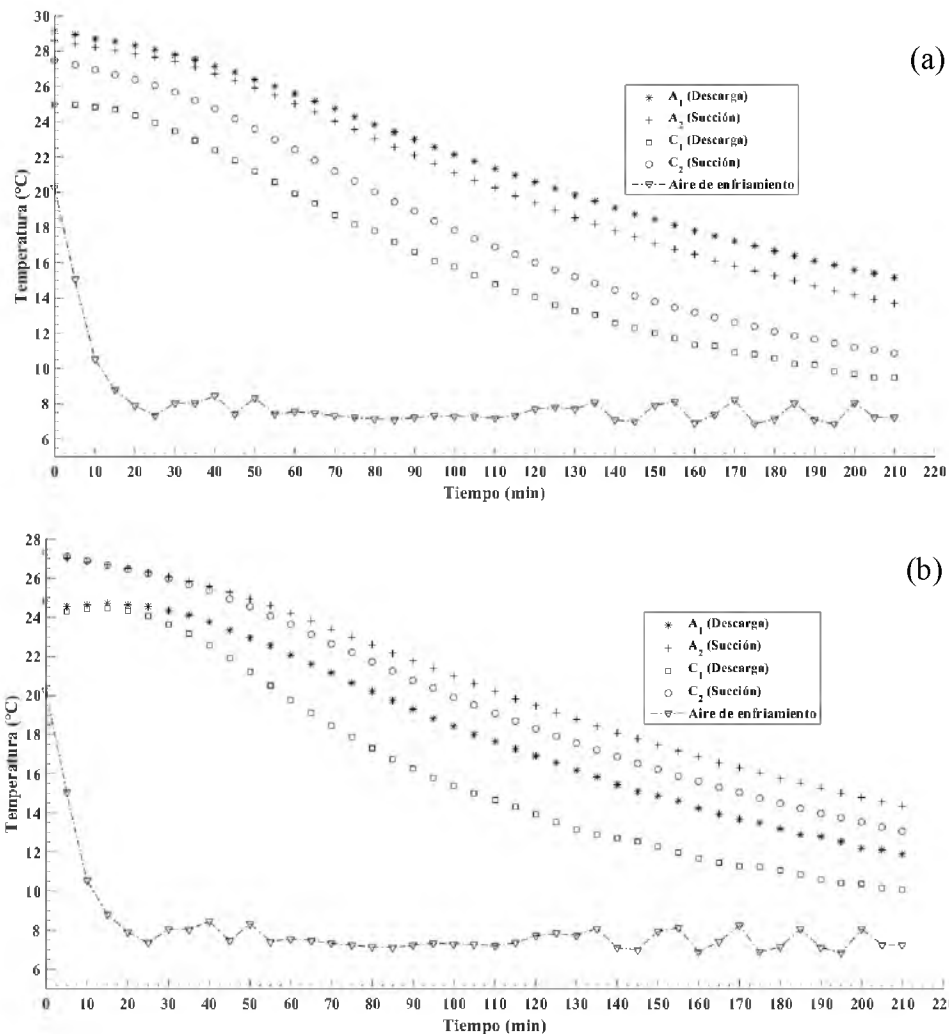


Figura 36. Perfil de enfriamiento de la piña dentro del túnel de aire forzado a capacidad media en las tarimas A y C en (a) y a capacidad plena en (b).

En esta figura, se puede apreciar que la reducción de temperatura de la fruta no es inmediata al encender el sistema de refrigeración, sino que requiere de un tiempo aproximado de 30 min, para observar una reducción más pronunciada. Esto se puede atribuir a que el sistema de refrigeración primeramente debe enfriar el aire dentro de la cámara y estabilizarlo a la temperatura de enfriamiento, así como a las propiedades térmicas de la fruta, que como se mencionó en el apartado anterior, presenta mayor resistencia a la conducción del calor dentro del producto que a la convección entre el fluido y la superficie de la fruta, por lo que es de

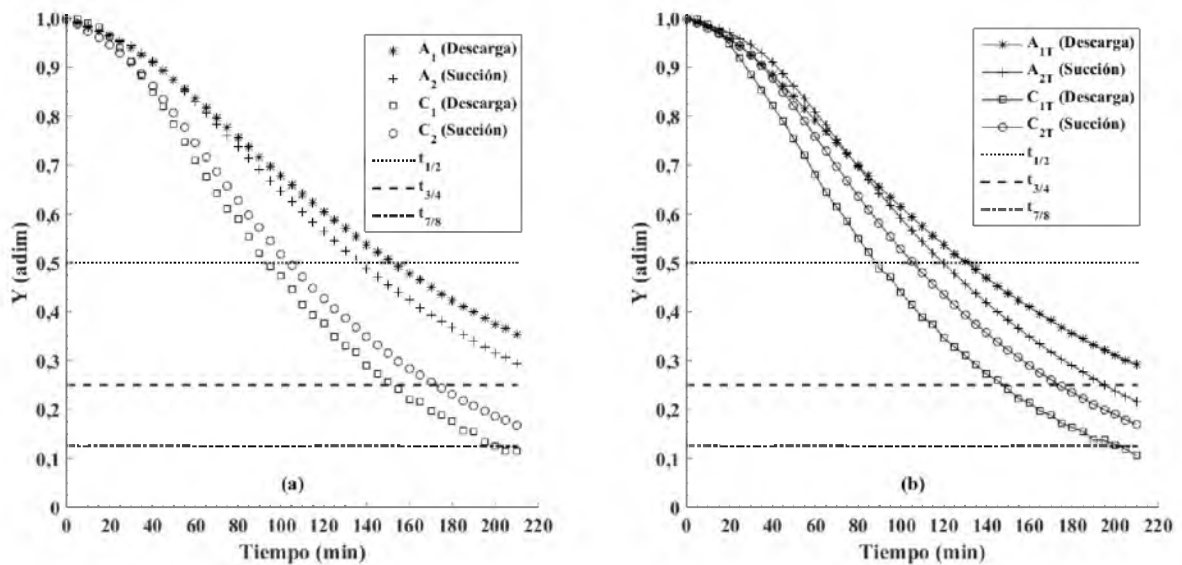
esperarse que en su centro, que fue el punto de medición, la reducción de temperatura tome más tiempo que en la superficie de la misma.

La temperatura del aire y de la fruta, antes de iniciar el enfriamiento con aire forzado varió entre corridas y según la posición dentro del túnel, por varias razones como el tiempo requerido para preparar las primeras 26 tarimas con fruta (109,1 min \pm 36 min), donde el gradiente de temperatura entre la fruta y el ambiente, hace que el aire tiende a calentarse y la fruta a enfriarse. En promedio, la temperatura de la fruta al inicio del enfriamiento fue de entre 25 °C y 29 °C, razón por la cual se utilizó el parámetro adimensional Y, para la evaluación del rendimiento del enfriamiento entre las posiciones de las tarimas de producto dentro de los túneles de aire forzado.

Esta temperatura inicial de la fruta, 27 °C en promedio, así como la temperatura promedio del aire en la descarga de los evaporadores, de 7,5 °C, producen un gradiente inicial de temperatura de 19,5 °C que hace posible la transferencia de calor y persiste hasta que se alcance el equilibrio térmico. Económica y comercialmente, las operaciones de enfriamiento con aire forzado se llevan hasta alcanzar 7/8 del enfriamiento completo, es decir hasta alcanzar un 87,5 % del gradiente inicial de temperatura (17,1 °C, para este caso). Bajo estas condiciones, la temperatura de la fruta podría reducirse teóricamente hasta un mínimo de 9,9 °C después de alcanzar el $t_{7/8}$.

4.5.4.2.1 Efecto de la posición de la fruta y el tapado del paso del aire a través de la base de las tarimas, para la operación del túnel de aire forzado a capacidad media (13 tarimas)

La figura 37 muestra las curvas de enfriamiento de la piña en términos del cambio adimensional de temperatura de la fruta para cuatro frutas, dos en la tarima central, C (número 7 según diagrama en la figura 5, que se consideró representativo de las 12 tarimas) y otras dos en la tarima inicial, A (número 1, colocada con un ángulo de 90° con respecto al resto de las tarimas).



A_i y C_i , A: tarima N° 1, 90° con respecto a las otras 12 tarimas; C: tarima central (N° 7); subíndice i: descarga: entrada de aire frío a la tarima, succión: salida del aire (antecámara de succión); subíndice T: paso de aire por la base de la tarima tapado con láminas de cartón; Líneas punteadas señalan el avance del enfriamiento ($t_{1/2}$, $t_{3/4}$ o $t_{7/8}$)

Figura 37. Cambio adimensional de temperatura Y, de la piña dentro del túnel de aire forzado a capacidad media en las tarimas A y C. Dejando libre el paso del aire en (a) y bloqueándolo en (b)

Las frutas se colocaron en el inicio y final del paso del aire por las tarimas, en cajas colocadas en la entrada del aire de enfriamiento (área de descarga, frutas C_1 y A_1) y a la salida hacia la ventana de retorno (antecámara de succión del aire, C_2 y A_2). También se muestran las curvas con y sin bloqueo del paso del aire a través de la base de las tarimas.

Se encontró que la fruta en la posición C_1 se enfría más rápidamente que la piña de la posición C_2 , lo cual se explica, por el hecho de que el aire frío ingresa a la tarima de producto por C_1 ($8,0\text{ °C} \pm 0,8\text{ °C}$) y al recorrer 1,2 m a través de las cajas con piñas, se calienta ($9,9\text{ °C} \pm 1,5\text{ °C}$), por lo que el gradiente de temperatura aire-producto al pasar por la posición 2 es menor, produciendo una transferencia de calor más lenta y prolongando los tiempos de enfriamiento.

Los resultados del enfriamiento de las frutas colocadas en la tarima 1, en el extremo de la fila de tarimas (A_1 y A_2), contrastan con los de la tarima central, porque el enfriamiento de la fruta cerca de la succión, A_2 , fue más rápido.

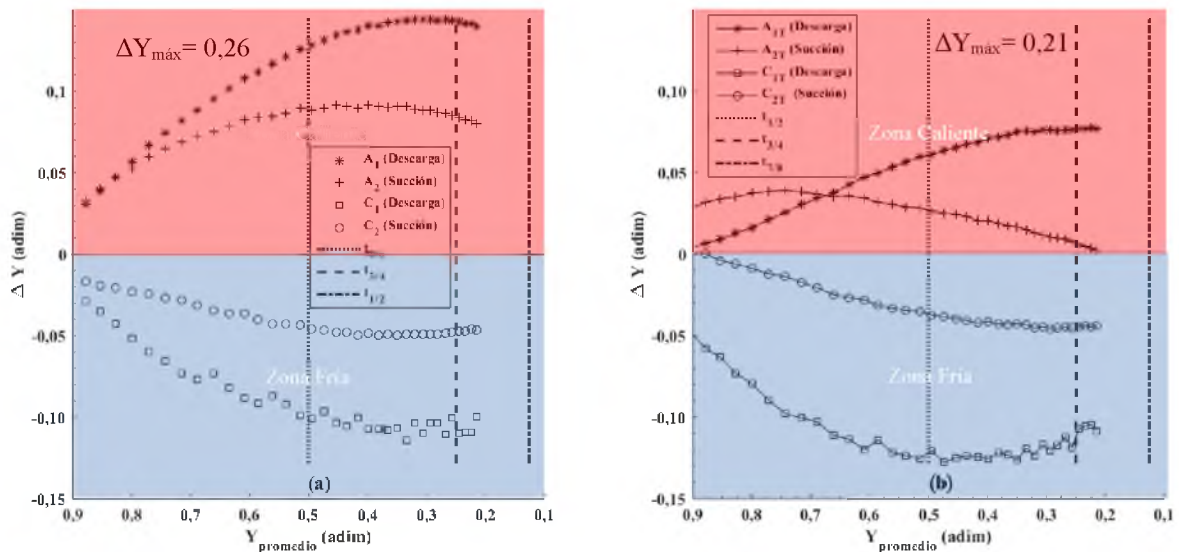
A pesar de que la temperatura promedio del aire registrada cerca de la fruta ubicada en la posición A_2 , fue mayor ($11,8\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$) a la registrada cerca de la fruta en A_1 ($10,5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$), fue la fruta en A_2 la que se enfrió más rápido, tal como se mencionó. Estos resultados se explican por el paso del aire a través de esta tarima, que difiere del resto, pues al colocarla con un ángulo de 90° , se bloquean las ventilaciones y no permite el paso directo del aire de la descarga, a través de las cajas, hacia la succión, sino que favorece rutas alternas, como el paso del aire de forma diagonal, desde la descarga hacia las cajas cercanas a la succión (A_2), tal como se aprecia en la figura 26b y 26c. En la posición A_1 , al no coincidir las ventilaciones con las cajas adyacentes, es posible que, aunque la temperatura del aire sea en promedio menor a la de la otra posición, la velocidad del aire es menor y por tanto el enfriamiento se extiende.

Por otro lado, el paso del aire directamente desde la descarga y a través de las cajas cercanas a la succión (A_2), hacia la antecámara, puede hacer que fluya un mayor caudal de aire en comparación con el caudal que circula por la posición A_1 , lo que resulta en un mayor enfriamiento en la fruta cercana a la succión.

Este comportamiento tiene dos consecuencias: se reduce la eficacia del enfriamiento y se promueve la desuniformidad de la temperatura de la fruta en el túnel, lo cual se hace evidente al comparar la temperatura de la fruta en la tarima central con la colocada en el extremo (A). Los resultados muestran que al final de los 210 min, la temperatura de la fruta a la salida de los túneles de aire forzado, en la tarima central, fue del orden de $9,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en C_1 , $10,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ en C_2 , pero tan alta, en la tarima 1, como $13,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ en A_2 y $15,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ en A_1 .

En la misma figura se observa que solamente la fruta en la posición C_1 logró alcanzar los $7/8$ del enfriamiento ($1-Y= 87,5\%$ del enfriamiento, punto recomendado para el término del enfriamiento de la fruta) después de 210 min de iniciada la operación del túnel de aire forzado, mientras que la posición C_2 , alcanzó $82,5\%$ del enfriamiento completo. Por su parte, las frutas en la tarima del extremo (A_1 y A_2), apenas alcanzaron el 65% y 70% del enfriamiento, respectivamente.

Según la figura 37b, se determinó que la obstrucción del paso del aire, tuvo poco efecto sobre el enfriamiento de la fruta en la tarima central, pero fue más rápido en la fruta colocada en el extremo de la fila de tarimas, lo cual contribuyó a reducir las diferencias en la temperatura de la fruta para las distintas posiciones. Esto se atribuyó a que, al cortar el paso del aire a través de la parte inferior de las tarimas, posiblemente se favoreció el paso del aire frío a través de las ventilaciones laterales de la tarima del extremo, por el diferencial de presiones entre la descarga y la succión. La figura 38, muestra los gráficos de heterogeneidad del enfriamiento con aire forzado y como se aprecia, se encontró que la fruta en las posiciones A_1 y A_2 , tienen valores positivos de ΔY , es decir se asocian como sitios calientes en el subproceso, mientras que las posiciones C_1 y C_2 , pueden describirse como sitios fríos del sistema, que serían los puntos en los cuales la fruta se enfría con mayor rapidez. Si se corrigiera la colocación de la tarima 1, sería de esperar que la heterogeneidad del sistema se redujera y la temperatura de la fruta fuera más uniforme.



A_i y C_i , A: tarima N° 1, 90° con respecto a las otras 12 tarimas; C: tarima central (N° 7); subíndice i: descarga: entrada de aire frío a la tarima, succión: salida del aire (antecámara de succión); subíndice T: paso de aire por la base de la tarima tapada con láminas de cartón; Líneas punteadas señalan el avance del enfriamiento ($t_{1/2}$, $t_{3/4}$ o $t_{7/8}$)

Figura 38. Heterogeneidad de Y durante el enfriamiento de la piña dentro del túnel de aire forzado a capacidad media para las tarimas A y C. Dejando libre el paso del aire en (a) y bloqueándolo en (b).

El bloqueo de la región inferior de las tarimas, parece reducir la amplitud de las curvas de heterogeneidad, cuyo $\Delta Y_{\text{máx}}$ se reduce de 0,26 a 0,21, permitiendo una mayor uniformidad en la velocidad de enfriamiento, específicamente mejorando el enfriamiento en la tarima A, que está colocada a 90° de rotación sobre el resto, pero no para la tarima C.

En ambas gráficas, se observa que los ΔY se encuentran cercanos a su máximo valor al llegar al término de la operación dentro del túnel. Esta condición indica que, el enfriamiento aún se encuentra incompleto cuando se apaga el sistema de refrigeración y se extrae el producto, ya que como Han et al. [24] y Olatunji et al. [23] indican, conforme el enfriamiento se acerca al $t_{7/8}$, la heterogeneidad disminuye y es entonces el momento recomendado para concluir el preenfriamiento con aire forzado [12], sin incurrir en costos adicionales por el funcionamiento de los túneles y entonces reducir el restante gradiente de temperatura a un menor costo en cámaras de almacenamiento refrigerado [21].

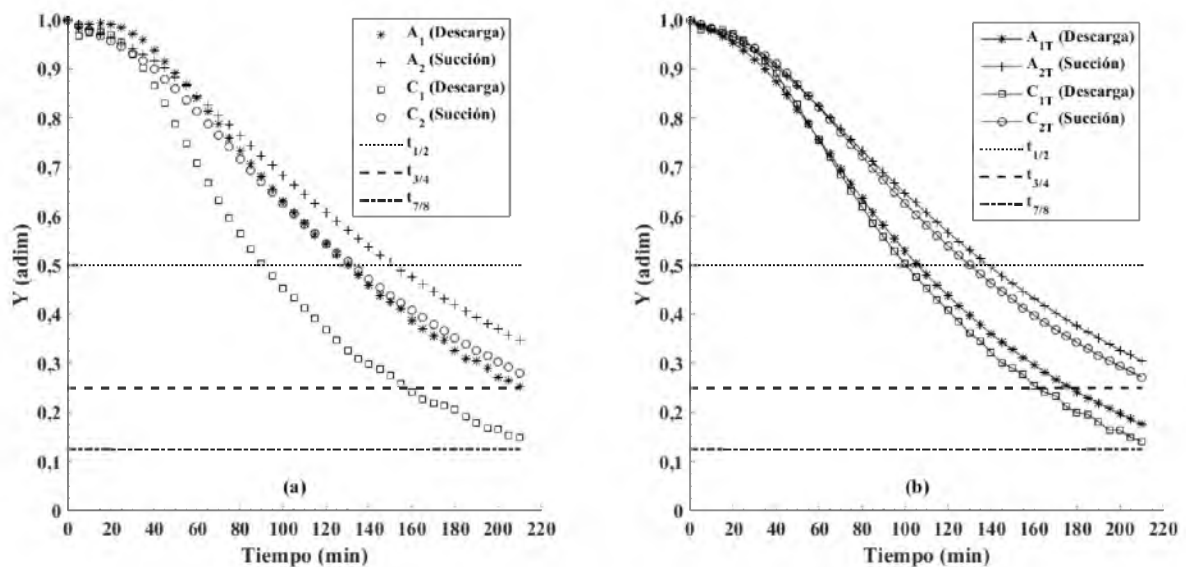
4.5.4.2.2 Efecto de la posición de la fruta y el tapado del paso del aire a través de la base de las tarimas, para la operación del túnel de aire forzado a capacidad plena (26 tarimas)

Al analizar el enfriamiento para capacidad plena, con dos filas de tarimas, cabe destacar que la distancia entre las frutas ubicadas cerca de la descarga y de la succión, están separadas por cerca de 2,4 m, que corresponde al paso del aire a través de dos tarimas de 1,2 m de lado, en contraste con el arreglo a capacidad media, en que la separación fue de 1,2 m. El paso del aire es a través de ambas tarimas, por lo que el acomodo de las dos filas de tarimas, reduciendo espacios vacíos y alineando para que las ventilaciones entre las tarimas coincidan, son de particular importancia.

La figura 39a muestra el cambio adimensional de temperatura de la fruta, Y , en la tarima central del túnel (tarima 7, C_1 y C_2) y el extremo (tarima 1, A_1 y A_2), a capacidad plena. Al igual que el enfriamiento a capacidad media, la fruta ubicada en la tarima central, cerca de la descarga fue la que presentó el enfriamiento más rápido, sin embargo, el tiempo fue insuficiente para alcanzar los $t_{7/8}$ de enfriamiento, pues al finalizar la operación (210 min),

apenas se alcanzó un 85 % de enfriamiento completo y menos de un 75 % para la fruta colocada cerca de la succión, en la tarima central.

Tal como se mencionó, el paso del aire de la descarga a la succión es de 2,4 m, con lo cual, la temperatura del aire se calienta mucho más en su paso a través de la fruta, registrándose valores de $7,9\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ en C_1 a $13,4\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ en C_2 . Esto hace que el enfriamiento sea más lento en la fruta cerca de la succión y que la heterogeneidad entre las frutas en las posiciones C_1 y C_2 sea mayor para la operación del túnel a capacidad plena que a capacidad media.



A_i y C_i , A: tarimas N° 1 (90° de rotación) y 14; C: tarimas centrales (N° 7 y 20); subíndice i: descarga: entrada de aire frío a la tarima, succión: salida del aire (antecámara de succión); subíndice T: paso de aire por la base de la tarima tapado con láminas de cartón; Líneas punteadas señalan el avance del enfriamiento ($t_{1/2}$, $t_{3/4}$ o $t_{7/8}$)

Figura 39. Cambio adimensional de temperatura Y , de la piña dentro del túnel de aire forzado a capacidad plena en las tarimas A y C. Dejando libre el paso del aire en (a) y bloqueándolo en (b)

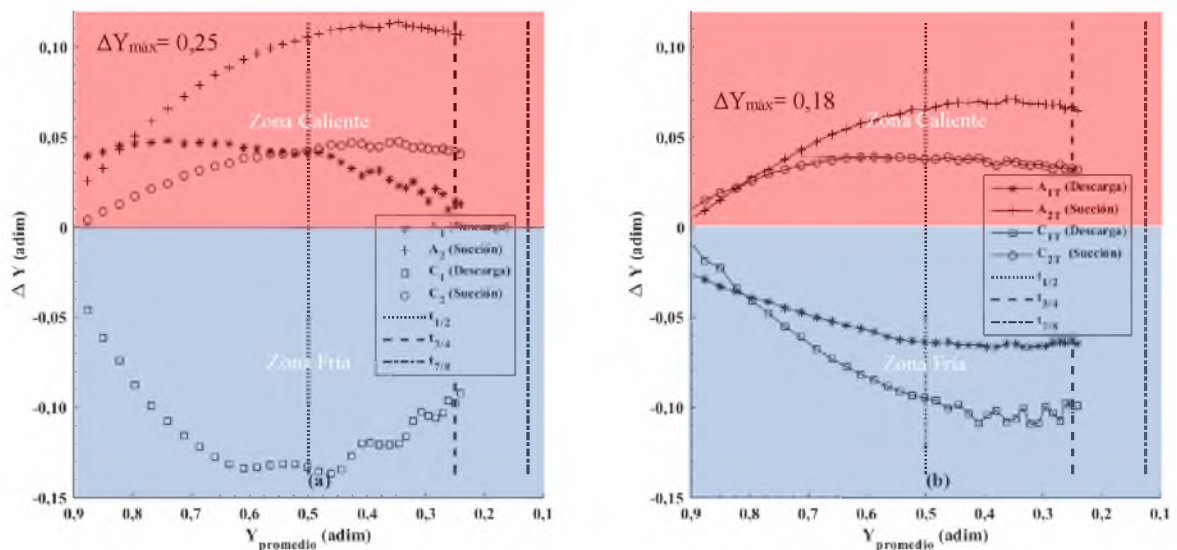
A diferencia del túnel a capacidad media, la fruta colocada cerca de la descarga en A_1 (figura 6, a capacidad plena), se enfrió más rápidamente (75 % del enfriamiento completo), que la fruta colocada cerca de la succión en la posición A_2 . Este resultado se puede deber a que, como se observa en las figuras 27b y 27c, la tarima A_1 (ubicada cerca de la descarga del evaporador) se encuentra en la posición normal de acomodo, favoreciendo las rutas

principales de flujo de aire a través de la caja donde se colocó la fruta, donde se registró una temperatura promedio del aire de $9,6\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tanto en la figura 27b como la 27c, se muestra que la segunda tarima (A_2), adyacente a la succión del evaporador, no permite un canal directo para el flujo de aire, al estar con una rotación de 90° respecto a las demás, por lo que era de esperarse que el enfriamiento de la fruta en esta posición fuera más lento, tal como lo muestra la figura 39a, que, para esta posición, alcanzó tan solo un 65 % del enfriamiento completo, con una temperatura promedio del aire de $12,8\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Es posible que esta temperatura promedio del aire, indique que una vez que el aire entra en contacto con la fruta y se calienta, permanezca circulando en esta zona debido a la falta de alineación entre las ventilaciones de las cajas, restando eficacia al enfriamiento de la fruta en esta posición. Al finalizar la operación, la temperatura de las frutas varió entre $10,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la fruta colocada en la posición C_1 , $13,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ en C_2 , $11,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la fruta ubicada en la posición A_1 y $14,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ en A_2 . El bloqueo del paso del aire por la base de las tarimas, tuvo poco efecto sobre el enfriamiento de la fruta cerca de la entrada del aire frío a las tarimas centrales, sin embargo, aceleró el enfriamiento de la fruta en la tarima A_1 (hasta completar un 82 % del enfriamiento), pero no así para la fruta en la posición A_2 . Esto confirma que el aire no pasa a través de las dos tarimas, sino que pasa por una ruta alterna, posiblemente ingresando por el costado de la tarima A_2 y saliendo por la succión. Este resultado era de esperar, porque por la posición de la tarima A_2 y la ubicación de las ventilaciones, no hay paso libre para el aire y debido a que, según las figuras 27b y 27c, una vez que el aire de la descarga atraviesa las ventilaciones de la primera tarima (A_1) se encuentra con un bloqueo del paso al intentar entrar a las ventilaciones de la tarima A_2 .

Por su parte la figura 40, muestra los gráficos de heterogeneidad de Y durante el enfriamiento de la piña con aire forzado. Se encontró, que las posiciones A_1 , A_2 y C_2 , poseen valores positivos de ΔY , asociados a sitios calientes en el subproceso, mientras que la posición C_1 , puede caracterizarse como un sitio frío dentro del sistema, y por ende la posición donde la fruta se enfría más rápidamente.

El bloqueo de la región inferior de las tarimas, al igual que a capacidad media, parece reducir la amplitud de las curvas de heterogeneidad, cuyo $\Delta Y_{\text{máx}}$ pasa de 0,25 a 0,18, reduciendo los sitios calientes del sistema y favoreciendo la uniformidad dentro del sistema, al mejorar el enfriamiento sobre las frutas de las posiciones A, pero no así para las de la posición central del túnel. Bajo las condiciones analizadas, la heterogeneidad del enfriamiento también alcanza su valor máximo al término de la operación, que como se indicó en el estudio del túnel a capacidad media, señala el hecho de que el proceso aún no se ha completado cuando se retiran las tarimas de piña del túnel.



A_i y C_i , A: tarimas N° 1 (90 ° de rotación) y 14; C: tarimas centrales (N° 7 y 20); subíndice i: descarga: entrada de aire frío a la tarima, succión: salida del aire (antecámara de succión); subíndice T: paso de aire por la base de la tarima tapada con láminas de cartón; Líneas punteadas señalan el avance del enfriamiento ($t_{1/2}$, $t_{3/4}$ o $t_{7/8}$)

Figura 40. Heterogeneidad de Y durante el enfriamiento de la piña dentro del túnel de aire forzado a capacidad plena para las tarimas A y C. Dejando libre el paso del aire en (a) y bloqueándolo en (b).

4.5.4.3 Modelación del enfriamiento en los túneles de aire forzado

Las tablas 8 y 9 muestran los modelos ajustados a las curvas de cambio adimensional del enfriamiento de la fruta, Y , dentro de los túneles de aire forzado a capacidad media y plena, respectivamente. Para la modelación, cada curva se segmentó en dos partes, una fase inicial

(0 min a 45 min) y una fase final (45 min a 210 min) y se ajustaron a modelos exponenciales de un solo término.

Este modelo exponencial es del tipo $Y=je^{-kt}$, donde, el coeficiente de la función exponencial corresponde al factor de retardo, j , con los subíndices i y f , para las fases inicial y final, respectivamente y el coeficiente del tiempo, t , corresponde a la constante de velocidad del enfriamiento, k en min^{-1} , con los mismos subíndices. El coeficiente de retardo, j , es un indicador de la variable Y al inicio de cada modelo, mientras que la velocidad del enfriamiento es un indicador de la velocidad con que la piña se enfría, así valores más negativos de k , señalan una mayor velocidad del enfriamiento. La fase inicial (primeros 45 min, correspondientes a valores de Y superiores a 0,85), se consideró como un periodo de ajuste del sistema, en el que la reducción de temperatura de la fruta no es inmediata como se mencionó anteriormente, por lo que, para efecto de comparación, se consideraron los resultados obtenidos con los modelos de la fase final (45 min en adelante, intervalo a partir del cual los modelos ofrecieron los mejores ajustes a los datos experimentales).

Tabla 8. Ajuste exponencial de las curvas de cambio adimensional (Y) dentro del túnel de aire forzado a capacidad media.*

	Tarima	Fase inicial (0-45 min)	r^2	Fase final (45-210 min)	r^2
Sin bloqueo	A ₁	$Y=1,006e^{-2,440 \times 10^{-3}t}$	0,9776	$Y=1,175e^{-5,611 \times 10^{-3}t}$	0,9984
	A ₂	$Y=1,007e^{-2,376 \times 10^{-3}t}$	0,9718	$Y=1,244e^{-6,696 \times 10^{-3}t}$	0,9979
	C ₁	$Y=1,029e^{-4,402 \times 10^{-3}t}$	0,9211	$Y=1,408e^{-1,129 \times 10^{-2}t}$	0,9963
	C ₂	$Y=1,012e^{-3,846 \times 10^{-3}t}$	0,9717	$Y=1,322e^{-9,525 \times 10^{-3}t}$	0,9981
Con bloqueo	A _{1T}	$Y=1,011e^{-3,185 \times 10^{-3}t}$	0,9670	$Y=1,178e^{-6,593 \times 10^{-3}t}$	0,9994
	A _{2T}	$Y=1,011e^{-2,497 \times 10^{-3}t}$	0,9450	$Y=1,338e^{-8,352 \times 10^{-3}t}$	0,9973
	C _{1T}	$Y=1,031e^{-5,317 \times 10^{-3}t}$	0,9480	$Y=1,362e^{-1,150 \times 10^{-2}t}$	0,9982
	C _{2T}	$Y=1,014e^{-3,409 \times 10^{-3}t}$	0,9525	$Y=1,345e^{-9,524 \times 10^{-3}t}$	0,9982

Temperatura inicial promedio de las frutas de 27 °C.

A_i y C_i, A: tarima N° 1, 90° con respecto a las otras 12 tarimas; C: tarima central (N° 7); subíndice i: descarga: entrada de aire frío a la tarima, succión: salida del aire (antecámara de succión)

Subíndice T: paso de aire por la base de la tarima tapado con láminas de cartón

*Modelos tipo, $Y=je^{-kt}$, Factor de retardo, j , con los subíndices i y f , para las fases inicial y final, respectivamente y la constante de velocidad del enfriamiento, k en min^{-1} , con los mismos subíndices

Respecto al factor de retardo, j , de forma general se observa que, para la fase final, este valor aumenta en comparación con la fase inicial, lo que indica un retraso en el decrecimiento de la curva exponencial, aun cuando los valores de k son más negativos para la fase final que para la fase inicial. Tal como se mencionó, a medida que la constante de velocidad del enfriamiento es menor (más negativa) la curva exponencial decrece más rápidamente, lo que físicamente significa que la fruta se enfría más rápido, sin embargo este factor de retardo indica que, a pesar de que la fase final posee una velocidad de enfriamiento mayor, el cambio adimensional de temperatura, Y , avanza con un retraso determinado por j , que explica la existencia de una resistencia del producto a la transferencia de calor con el flujo de aire [27], que para la piña es debida a la conducción de calor en el interior de la fruta. Bloquear el paso del aire por la base de las tarimas no tiene efecto sobre los valores del factor de retardo, tanto para la capacidad media como plena.

En este trabajo se utilizó la velocidad del enfriamiento, k , para realizar las comparaciones entre las configuraciones estudiadas, tal como fue utilizado por Shim et al. [27]. Los resultados para los túneles operando a capacidad media, mostrados en la tabla 8, señalan que, en todos los casos, las ecuaciones tuvieron un coeficiente de determinación, r^2 , de al menos 0,92 en la fase inicial y 0,99 en la fase final, para los dos arreglos estudiados, con y sin bloqueo del paso del aire por la base de la tarima. Se encontró que, el cambio adimensional de la temperatura es menor durante los primeros 45 min, ya que el término k_i , al inicio del enfriamiento, del orden de $-2,376 \times 10^{-03}$ a $-4,404 \times 10^{-03}$, difiere hasta 182 % con la fase final, k_f , que variaron entre $-5,611 \times 10^{-03}$ a $-1,129 \times 10^{-02}$, diferencia que muestra un periodo inicial de puesta en marcha del equipo de refrigeración y de resistencia del producto a enfriarse y otro posterior, cuando la temperatura del aire a la salida de los evaporadores se estabiliza en $7,5 \text{ }^\circ\text{C}$ y aumenta el enfriamiento de las frutas a medida que se vence la resistencia a la conducción de calor en el interior del producto. En los modelos se puede apreciar que las constantes de velocidad de enfriamiento, k_i y k_f , fueron menores (más negativos) para la fruta colocada en las tarimas en las posiciones C_1 y C_2 , correspondiente a las frutas que se enfrían

más rápidamente, en comparación a las de la tarima A. Además, se observa que en la posición C₁ (cerca de la descarga de los evaporadores), la fruta se enfría más rápidamente que en C₂.

Para la operación de los túneles de aire forzado a capacidad plena (tabla 9) la diferencia entre los valores de la constante de velocidad del subproceso, entre la fase inicial ($-1,627 \times 10^{-03}$ a $-3,504 \times 10^{-03}$) y la fase final, k_f ($-5,786 \times 10^{-03}$ a $-1,068 \times 10^{-02}$), fue aún mayor, hasta 372 %. Al igual que la capacidad media, las constantes de velocidad de enfriamiento son más negativas para las frutas ubicadas en las posiciones C que para las de A y por ende el enfriamiento ocurre más rápidamente sobre la parte central del túnel que para el extremo.

Tabla 9. Ajuste exponencial de las curvas de cambio adimensional (Y) dentro del túnel de aire forzado a capacidad plena*

	Tarima	Fase inicial (0-45 min)	r ²	Fase final (45-210 min)	r ²
Sin bloqueo	A ₁	$Y=1,006e^{-1,627 \times 10^{-03}t}$	0,7732	$Y=1,336e^{-7,672 \times 10^{-03}t}$	0,9972
	A ₂	$Y=1,009e^{-2,240 \times 10^{-03}t}$	0,9895	$Y=1,201e^{-5,786 \times 10^{-03}t}$	0,9976
	C ₁	$Y=1,003e^{-3,504 \times 10^{-03}t}$	0,8378	$Y=1,335e^{-1,068 \times 10^{-02}t}$	0,9994
	C ₂	$Y=1,012e^{-2,709 \times 10^{-03}t}$	0,9819	$Y=1,229e^{-6,869 \times 10^{-03}t}$	0,9984
Con bloqueo	A _{1T}	$Y=1,005e^{-3,510 \times 10^{-03}t}$	0,9640	$Y=1,321e^{-9,297 \times 10^{-03}t}$	0,9986
	A _{2T}	$Y=1,012e^{-2,597 \times 10^{-03}t}$	0,9836	$Y=1,213e^{-6,427 \times 10^{-03}t}$	0,9981
	C _{1T}	$Y=1,006e^{-2,965 \times 10^{-03}t}$	0,8704	$Y=1,426e^{-1,062 \times 10^{-02}t}$	0,9981
	C _{2T}	$Y=1,012e^{-2,453 \times 10^{-03}t}$	0,9683	$Y=1,265e^{-7,183 \times 10^{-03}t}$	0,9983

Temperatura inicial promedio de las frutas de 27 °C.

A_i y C_i, A: tarimas N° 1 (90 ° de rotación) y 14; C: tarimas centrales (N° 7 y 20); subíndice i: descarga: entrada de aire frío a la tarima, succión: salida del aire (antecámara de succión)

Subíndice T: paso de aire por la base de la tarima tapado con láminas de cartón

*Modelos tipo, $Y=je^{-kt}$. Factor de retardo, j, con los subíndices i y f, para las fases inicial y final, respectivamente y la constante de velocidad del enfriamiento, k en min⁻¹, con los mismos subíndices

Tanto en la tabla 8 a capacidad media, como en la tabla 9 a capacidad plena, bloquear la base de las tarimas, parece afectar la forma de las curvas de Y, ya que disminuye el valor de la constante k de velocidad del enfriamiento para la fase final.

La alta correlación de los modelos, a partir del minuto 45, permiten su utilización para predecir el comportamiento de la fruta durante el enfriamiento en los sistemas de aire forzado y los tiempos de enfriamiento necesarios para alcanzar 7/8 de enfriamiento o la proporción

que se requiera. Para comparar el enfriamiento según la posición y el efecto del bloqueo del paso del aire por la base de las tarimas, en las tablas 10 y 11 se muestran la estimación de los tiempos $t_{1/2}$, $t_{3/4}$ y $t_{7/8}$, para las frutas en las tarimas A y C, para la operación de los túneles a capacidad media y plena, respectivamente.

En la tabla 10 se observa que en el centro del túnel (C_1 y C_2 , con y sin bloqueo) el tiempo de enfriamiento requerido para alcanzar los 7/8 de enfriamiento está entre 207 min y 250 min, en contraste con el tiempo requerido para la fruta colocada en las posiciones A_1 y A_2 , que requiere entre 284 min y 400 min. Un comportamiento similar se observa para los túneles de aire forzado cuando se cargan a capacidad plena (tabla 11).

Tabla 10. Tiempos de enfriamiento experimentales y modelados, de la piña dentro del túnel de aire forzado a capacidad media (13 tarimas)

Posición	$t_{1/2}$ [min]	$t_{1/2}^+$ [min]	e [%]	$t_{3/4}$ [min]	$t_{3/4}^+$ [min]	e (%)	$t_{7/8}$ [min]	$t_{7/8}^+$ [min]	e (%)
A_1	150	152,3	1,5%	nd	275,8	nd	nd	399,3	nd
A_2	135	136,1	0,8%	nd	239,6	nd	nd	343,2	nd
C_1	95	91,7	3,5%	150	153,1	2,1 %	200	214,5	7,2%
C_2	105	102,1	2,8%	170	174,8	2,8 %	nd	247,6	nd
A_{1T}	130	130,0	0,0%	nd	235,1	nd	nd	340,2	nd
A_{2T}	120	117,9	1,8%	195	200,8	3,0 %	nd	283,8	nd
C_{1T}	90	87,1	3,2%	145	147,4	1,7 %	200	207,7	3,8%
C_{2T}	105	103,9	1,1%	175	176,7	1,0 %	nd	249,5	nd

Temperatura inicial promedio de las frutas de 27 °C.

⁺tiempo de enfriamiento calculado con los modelos incluidos en la tabla 8 a partir del modelo exponencial en la fase final. e: Error relativo porcentual respecto a los datos experimentales. nd: no disponible.

Subíndice T: paso de aire por la base de la tarima tapado con láminas de cartón

Al comparar estas proyecciones, con las condiciones de operación de los túneles de aire forzado de la empresa con 13 tarimas (capacidad media) se observa, que el tiempo de enfriamiento usado de 210 min, solamente es adecuado para las frutas en la posición C_1 , que son las que se enfrían más rápidamente. Como el aire se calienta al pasar a través de las cajas con piña, la fruta en la posición C_2 requiere cerca de 38 min adicionales para alcanzar los 7/8 de enfriamiento y para la fruta colocada en la tarima A (colocada 90° con respecto a las otras), se requerirían hasta 190 min adicionales, por lo que el tiempo de operación de los sistemas de aire forzado debería casi que duplicarse si se quisiera que esta fruta alcanzara los 7/8.

Cuando los túneles operan a capacidad plena (26 tarimas), el paso del aire frío a través de las cajas se duplica en longitud, por tratarse de la alineación de dos filas de tarimas. En este caso, los resultados de la proyección de los tiempos de enfriamiento, calculados con los modelos, muestran que el tiempo requerido aumenta ligeramente para la fruta colocada en la posición C₁, cerca de la descarga de los evaporadores, (10 min), pero la diferencia más grande se ve cerca de la antecámara de succión, donde los tiempos de enfriamiento para alcanzar la misma temperatura, son de 333 min, que corresponde a casi dos horas de diferencia, con respecto al tiempo en que la fruta más fría (posición C₁) alcanza la temperatura de los 7/8 de enfriamiento.

Tabla 11. Tiempos de enfriamiento experimentales y modelados, de la piña dentro del túnel de aire forzado a capacidad plena (26 tarimas)

Posición	t _{1/2} [min]	t _{1/2} ⁺ [min]	e [%]	t _{3/4} [min]	t _{3/4} ⁺ [min]	e [%]	t _{7/8} [min]	t _{7/8} ⁺ [min]	e [%]
A ₁	130	128,1	1,5%	210	218,4	4,0%	nd	308,8	nd
A ₂	150	151,4	1,0%	nd	271,2	nd	nd	391,0	nd
C ₁	90	91,9	2,2%	155	156,9	1,2%	nd	221,7	nd
C ₂	130	130,9	0,7%	nd	231,8	nd	nd	332,7	nd
A _{1T}	105	104,5	0,5%	175	179,1	2,3%	nd	253,6	nd
A _{2T}	140	137,9	1,5%	nd	245,7	nd	nd	353,6	nd
C _{1T}	100	98,7	1,3%	160	163,9	2,5%	nd	229,2	nd
C _{2T}	130	129,2	0,6%	nd	225,7	nd	nd	322,2	nd

Temperatura inicial promedio de las frutas de 27 °C.

⁺tiempo de enfriamiento calculado con los modelos incluidos en la tabla 9 a partir del modelo exponencial en la fase final. e: Error relativo porcentual respecto a los datos experimentales. nd: no disponible.

Subíndice T: paso de aire por la base de la tarima tapado con láminas de cartón.

En el sistema de enfriamiento estudiado, doce tarimas fueron colocadas de la misma forma que las tarimas C y una sola se giraba 90° al extremo (A, tarima 1), por limitaciones por el tamaño de la ventana hacia la antecámara de retorno (succión). Tomando en cuenta que la colocación de estas 12 tarimas, es la misma, con los mismos patrones de flujo y posición relativa de las ventilaciones, se puede hacer un supuesto general de que el patrón de flujo de aire es similar a través de todas estas tarimas, y que los tiempos de enfriamiento son similares. Esto permite utilizar la posición C₂, como la posición más caliente dentro del sistema de enfriamiento, con el fin de analizar el comportamiento del sistema operando a capacidad media o plena, con y sin bloquear el aire que pasa a través de la base de las tarimas. En la

figura 41 se muestra el enfriamiento de la piña en la posición C_2 , modelado con las ecuaciones exponenciales, para los túneles de enfriamiento trabajando a capacidad media y capacidad plena.

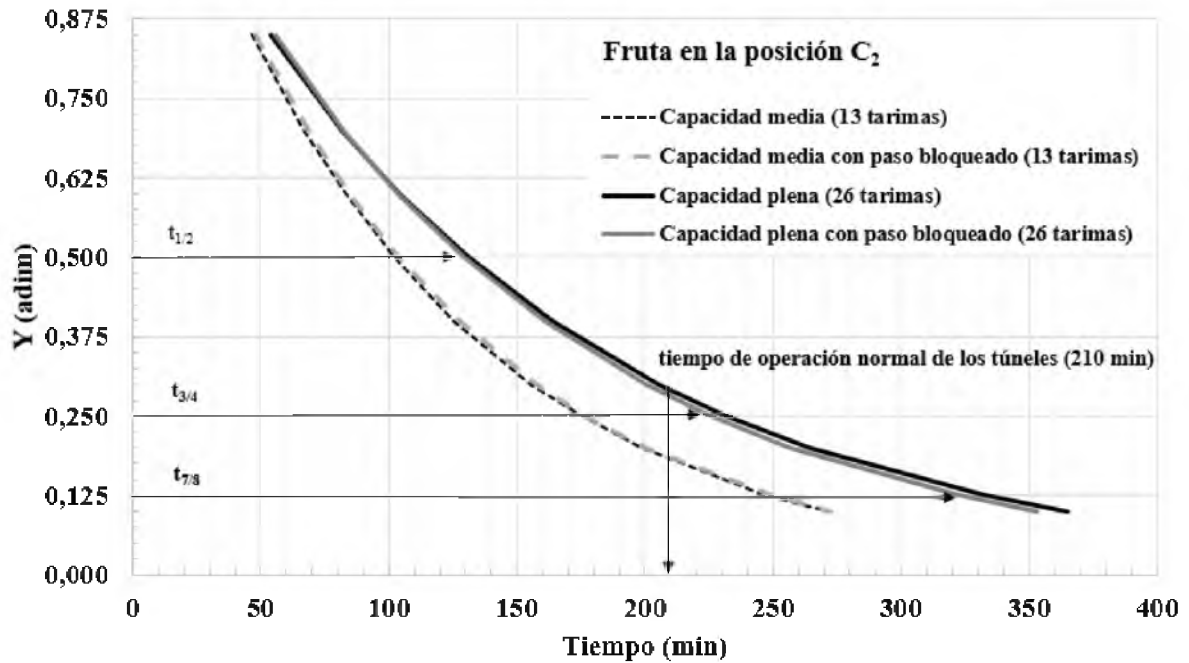


Figura 41. Modelación del enfriamiento de la fruta ubicada en la tarima central del túnel cerca de la succión (C_2).

La flecha vertical señala el tiempo de enfriamiento que se utiliza actualmente (210 min) y las flechas horizontales muestran el avance del enfriamiento ($1/2$, $3/4$ y $7/8$) para los correspondientes valores de Y .

Tal como se mencionó, después de 210 min de enfriamiento a capacidad media, la fruta en la posición C_2 alcanzó una temperatura de $10,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ y según la figura 41, tendría que dejarse 38 minutos adicionales para alcanzar los $7/8$ de enfriamiento, lo que correspondería a una temperatura final aproximada de $9,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, independientemente de si se bloquea o no el paso del aire a través de la base de las tarimas.

Al usar los túneles a capacidad plena, se registró una temperatura final de la fruta en C_2 , de $13,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, por lo que el tiempo (para alcanzar el $7/8$ de enfriamiento) de acuerdo a la figura 41,

aumenta considerablemente, hasta 5,4 h a 5,6 h (322 min a 333 min), cuando se bloquea el paso y cuando se deja libre, respectivamente, por lo que se requeriría aumentar el tiempo de operación de los túneles en más de dos horas para que la fruta ubicada en C₂ alcance el enfriamiento requerido, es decir hasta 9,9 °C. Se observa que el bloqueo de la base de las tarimas no contribuye en gran medida a reducir tal tiempo.

Por su parte, la figura 42 muestra los resultados obtenidos con la modelación de Y, durante el enfriamiento de las frutas ubicadas en las tarimas A, tanto a capacidad media como a capacidad plena, que se incluyen aquí para resaltar el efecto de la colocación con 90° de rotación respecto a las demás tarimas.

Los resultados obtenidos con los modelos (figura 42a), muestran que, para la fruta ubicada en la posición A₁ (cerca de la descarga), el tiempo requerido para alcanzar los 7/8 del enfriamiento a capacidad media, es 23 % mayor al tiempo requerido de la misma posición a capacidad plena, resultado se explica por el hecho de que a capacidad media, esta tarima es la que se rota 90° mientras que a capacidad plena está en la posición adecuada de acomodo, con el lado corto de frente a la antecámara de succión.

La figura 42b, muestra que la posición A₂, correspondiente a la tarima que se rota (tanto a capacidad media como plena), incrementa el tiempo requerido para alcanzar los 7/8 del enfriamiento, en comparación con la fruta en la posición A₁, de la figura 42a.

Si bien es cierto, el bloqueo del paso del aire por la base de las tarimas parece mejorar el tiempo de enfriamiento de la posición A₁ y A₂, tanto a capacidad media como plena, hay que considerar que esta práctica sería correctiva del inconveniente de colocar la tarima 1 con 90° de rotación y que colocarla en la posición normal de acomodo, con el lado de 1,0 m de frente a la antecámara de succión, produciría mejores resultados al permitir un canal directo para el paso del aire a través de las ventilaciones de las cajas.

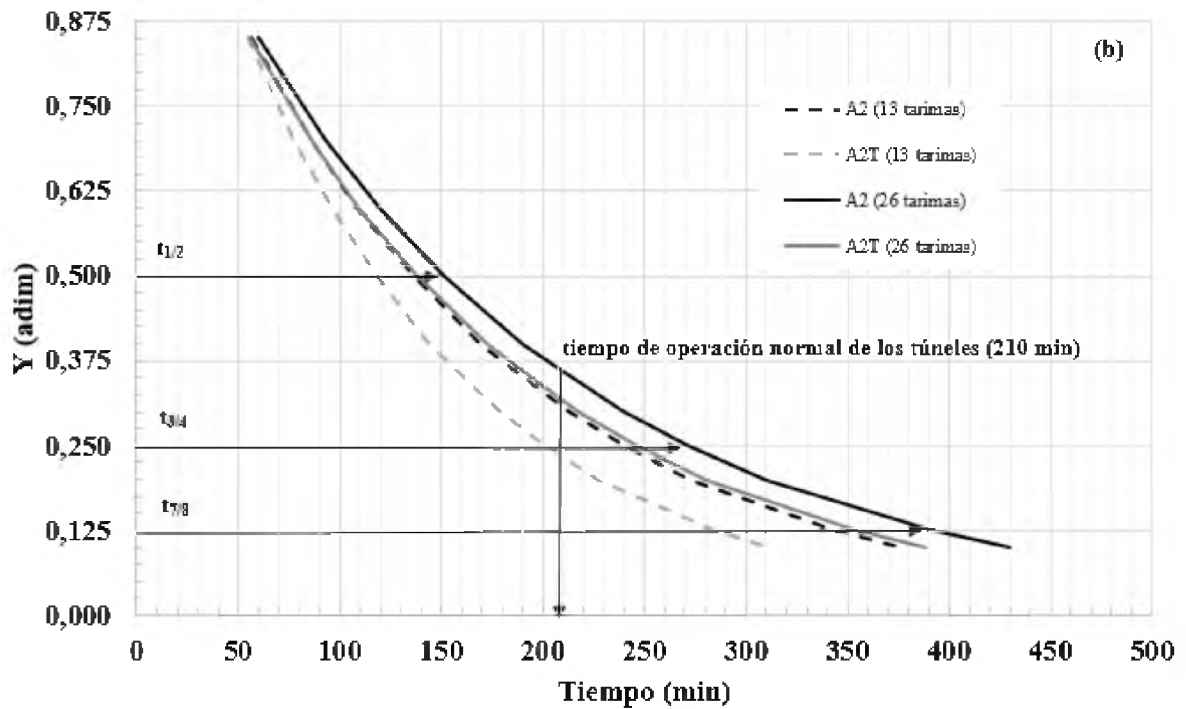
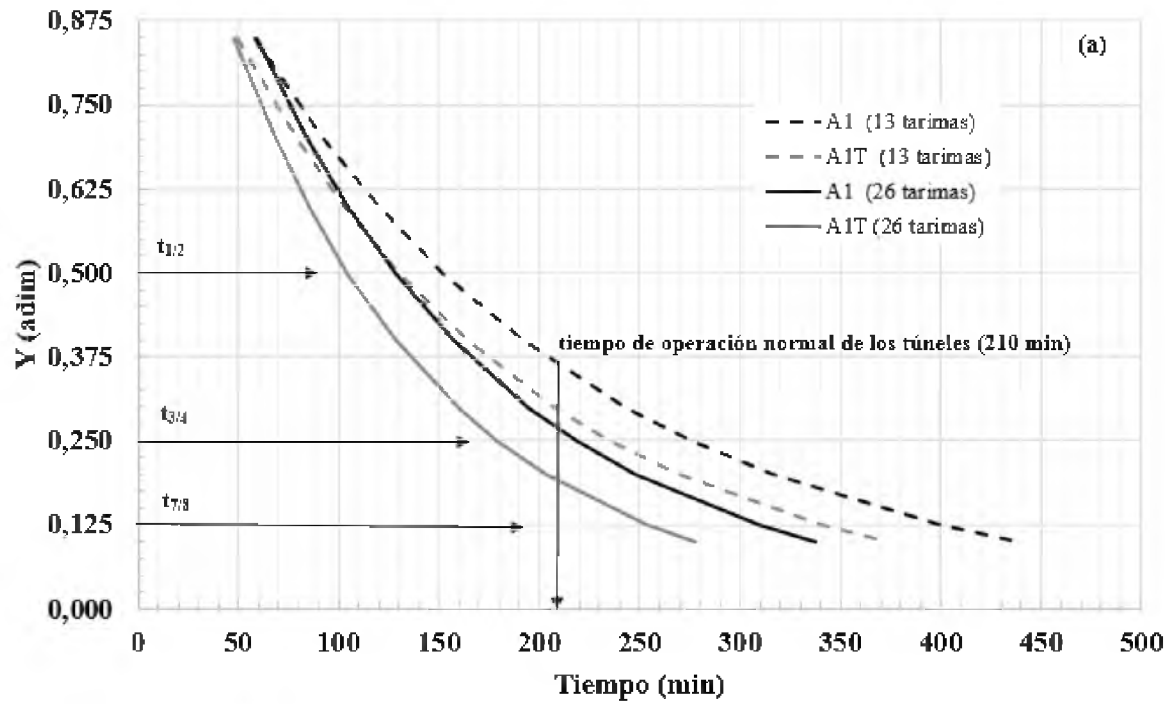


Figura 42. Modelación del enfriamiento de la fruta ubicada en la tarima extrema, cerca de la descarga (A_1) en (a) y cerca de la succión, A_2 , en (b).

El punto crítico identificado (C_2), en la operación normal de los túneles (210 min), con los resultados de las pruebas de enfriamiento y la modelación de las curvas de cambio adimensional, Y , permite tener un panorama del enfriamiento que se obtendría al realizar las modificaciones de la infraestructura para que todas las tarimas se coloquen en la misma dirección, de forma tal que se asegure que las ventilaciones no queden bloqueadas ni que existan pasos libres para el aire.

Fijar los tiempos de enfriamiento en 248 min para capacidad media y 333 min para capacidad plena, permitiría llegar hasta los $7/8$ del enfriamiento en el punto crítico, por lo que el producto se llevaría hasta la temperatura óptima. A pesar de que estos nuevos tiempos de enfriamiento significan aumentar la operación normal en 38 min para la capacidad media y 123 min para la capacidad plena, con el eventual aumento en los tiempos de flujo del proceso y los costos de la operación, la elección del momento de salida de la fruta del sistema de aire forzado, se reduce a las consecuencias de tal elección.

Esta elección recae a: la posibilidad de que el sistema pueda enfriar más la fruta y como se discutió anteriormente, a excepción de los ciclos a capacidad media, los evaporadores no tienen la capacidad para reducir la temperatura de 26 tarimas de producto, hasta la temperatura óptima de almacenamiento en 3,5 h, por lo tanto es evidente que se requiere de un mayor tiempo de operación; que también existen costos de calidad de la fruta por no enfriarla apropiadamente, referentes a quejas y/o devoluciones; que si no se enfría adecuadamente la fruta, se limita la vida útil del producto, que es un factor importante para satisfacer las necesidades de los clientes; y que, otros productos, incluso más pequeños que la piña, se mantienen en enfriamiento por tiempos comerciales mucho más prolongados (por ejemplo 10 h para el kiwi [8]), a pesar de que en ellos la conducción de calor interna no representa un factor que limita la velocidad de enfriamiento, como si ocurre para la piña. Por lo tanto, considerar este tiempo de funcionamiento de los túneles de aire forzado, junto con las mejoras a la infraestructura y un estudio más profundo del enfriamiento dentro de las cámaras de almacenamiento refrigerado considerando la cantidad de tarimas, la posición de las tarimas y el tiempo de residencia, permitiría evaluar la decisión de extender los tiempos

de enfriamiento en los túneles de aire forzado o bien estudiar la posibilidad de operar el sistema a capacidad media.

Otra posibilidad, es que al cierre de las operaciones de empaque (cuando quede una cantidad de tarimas de producto inferior a la capacidad de los túneles), se realice una modificación en la infraestructura de al menos un túnel, tal que se pueda disponer una cantidad de tarimas inferior a 13, con la construcción de una pared corrediza que bloquee parte de la ventana de retorno y evaluar la opción de operar una unidad evaporadora de forma independiente y entonces enfriar por completo el flujo de trabajo diario sin tener que almacenar parte de éste para el día siguiente.

4.5.4.3.1 Modelación de la transferencia de calor en el interior de la piña

Con el fin de caracterizar la transferencia de calor entre el aire y la matriz de frutas-empaques, las tablas 12 y 13 muestran la estimación del coeficiente de transferencia de calor convectivo para cada configuración y posición.

Debido a que anteriormente se discutió el efecto de la posición y el bloqueo de la base de las tarimas, de las tablas 12 y 13 se puede señalar que el coeficiente de transferencia de calor convectivo promedio de los sistemas, fue de $16,85 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1} \pm 4,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1}$ que se encuentra entre los resultados reportados en estudios previos para la piña ($11,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1}$ y $20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1}$) [38].

Tabla 12. Estimación del coeficiente de transferencia de calor por cada posición dentro del túnel de aire forzado a capacidad media.

Posición	$k_f [\text{min}^{-1}]$	$k_f [\text{s}^{-1}]$	$h [\text{W m}^{-2} \text{°C}^{-1}]$
A ₁	$-5,611 \times 10^{-3}$	$-9,35 \times 10^{-5}$	11,322
A ₂	$-6,696 \times 10^{-3}$	$-1,12 \times 10^{-4}$	13,511
C ₁	$-1,129 \times 10^{-2}$	$-1,88 \times 10^{-4}$	22,780
C ₂	$-9,525 \times 10^{-3}$	$-1,59 \times 10^{-4}$	19,219
A _{1T}	$-6,593 \times 10^{-3}$	$-1,10 \times 10^{-4}$	13,303
A _{2T}	$-8,352 \times 10^{-3}$	$-1,39 \times 10^{-4}$	16,852
C _{1T}	$-1,150 \times 10^{-2}$	$-1,92 \times 10^{-4}$	23,204
C _{2T}	$-9,524 \times 10^{-3}$	$-1,59 \times 10^{-4}$	19,217

C_p : $3850 \text{ J kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$. m : 1,753 kg. A : $0,056 \text{ m}^2$, aproximado a un cilindro con radio: 0,056 m y altura: 0,159 m

Tabla 13. Estimación del coeficiente de transferencia de calor por cada posición dentro del túnel de aire forzado a capacidad plena.

Posición	k_f [min^{-1}]	k_f [s^{-1}]	h [$\text{W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$]
A ₁	$-7,67 \times 10^{-03}$	$-1,28 \times 10^{-04}$	15,480
A ₂	$-5,79 \times 10^{-03}$	$-9,64 \times 10^{-05}$	11,675
C ₁	$-1,07 \times 10^{-02}$	$-1,78 \times 10^{-04}$	21,549
C ₂	$-6,87 \times 10^{-03}$	$-1,14 \times 10^{-04}$	13,860
A _{1T}	$-9,30 \times 10^{-03}$	$-1,55 \times 10^{-04}$	18,759
A _{2T}	$-6,43 \times 10^{-03}$	$-1,07 \times 10^{-04}$	12,968
C _{1T}	$-1,06 \times 10^{-02}$	$-1,77 \times 10^{-04}$	21,428
C _{2T}	$-7,18 \times 10^{-03}$	$-1,20 \times 10^{-04}$	14,493

C_p : $3850 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. m : 1,753 kg. A : $0,056 \text{ m}^2$, aproximado a un cilindro con radio: 0,056 m y altura: 0,159 m

Estos resultados se utilizaron para modelar la transferencia de calor por conducción dentro de la fruta, tal como se detalla en la figura 43. Se determinó que, a las 3,5 h de enfriamiento dentro de los túneles de aire forzado, es de esperar que, en promedio, la temperatura aproximada en el centro geométrico de la fruta sea de $13,48 \text{ }^\circ\text{C}$. Esta estimación es 8,7 % mayor a la temperatura promedio registrada en las frutas al final de la operación de los túneles a capacidad media ($12,3 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2,6 \text{ }^\circ\text{C}$) y plena ($12,3 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1,8 \text{ }^\circ\text{C}$).

Esta modelación refuerza el hecho de que al término de las operaciones normales de los túneles de aire forzado (3,5 h), la temperatura promedio en el centro de la fruta está lejos de la temperatura óptima de almacenamiento, que podría producir costos de calidad al no enfriar la fruta adecuadamente y limitar la vida útil del producto, que por ejemplo, con piñas del cultivar “Smooth Cayenne”, a $7 \text{ }^\circ\text{C}$ se determinó que la vida máxima de almacenamiento es de 4 semanas mientras que entre $7,5 \text{ }^\circ\text{C}$ y $12,5 \text{ }^\circ\text{C}$ la fruta se puede mantener cerca de 2 semanas [15].

Al extender el tiempo de funcionamiento de los túneles de aire forzado al $t_{7/8}$ modelado (5,5 h), es de esperarse que la temperatura aproximada en el centro geométrico de la fruta sea de $9,87 \text{ }^\circ\text{C}$, según el procedimiento de la figura 44, con lo que la fruta estaría más cerca de las condiciones óptimas, para continuar con su enfriamiento dentro de las cámaras de almacenamiento refrigerado. Al almacenar este producto en las cámaras de refrigeración durante 4 h (cuyo monitoreo mostró que se alcanza cerca del 7/8 de enfriamiento), es de

esperar que se pueda alcanzar una temperatura aproximada, en el centro geométrico de la fruta de $8,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, ya que la temperatura promedio del aire de estas cámaras es de $8,3\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Si bien es cierto, éstas son las condiciones máximas a la que la fruta podría enfriarse bajo las características operativas del sistema de refrigeración instalado, las mejoras planteadas al sistema de aire forzado, podrían favorecer el flujo de aire a través del producto con lo que se aumentaría el coeficiente de transferencia de calor por convección y entonces se incrementaría el enfriamiento interno de la fruta.

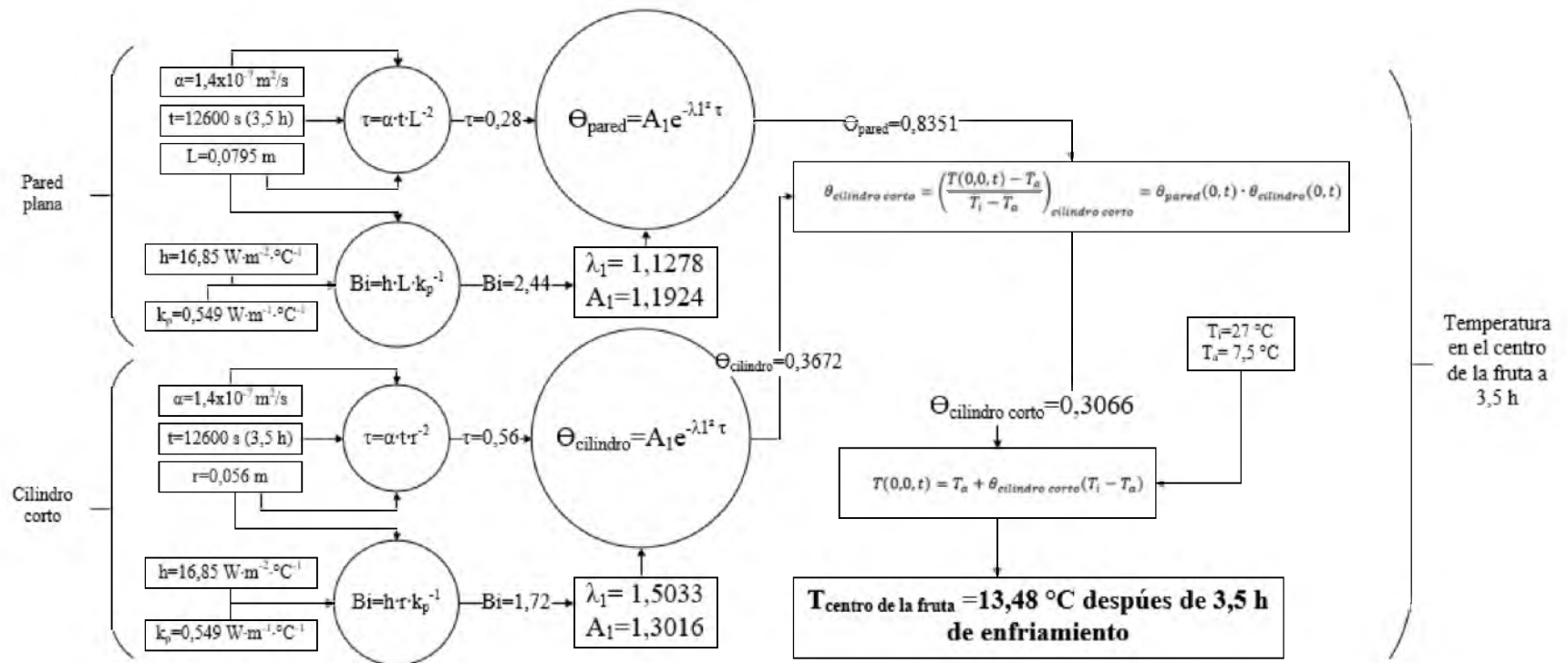


Figura 43. Diagrama de procedimiento de cálculo de la transferencia de calor multidimensional por conducción interna dentro de la fruta, para un tiempo de 3,5 h. λ_1 y A_1 , interpolados a partir del número de Biot (Bi) [22]

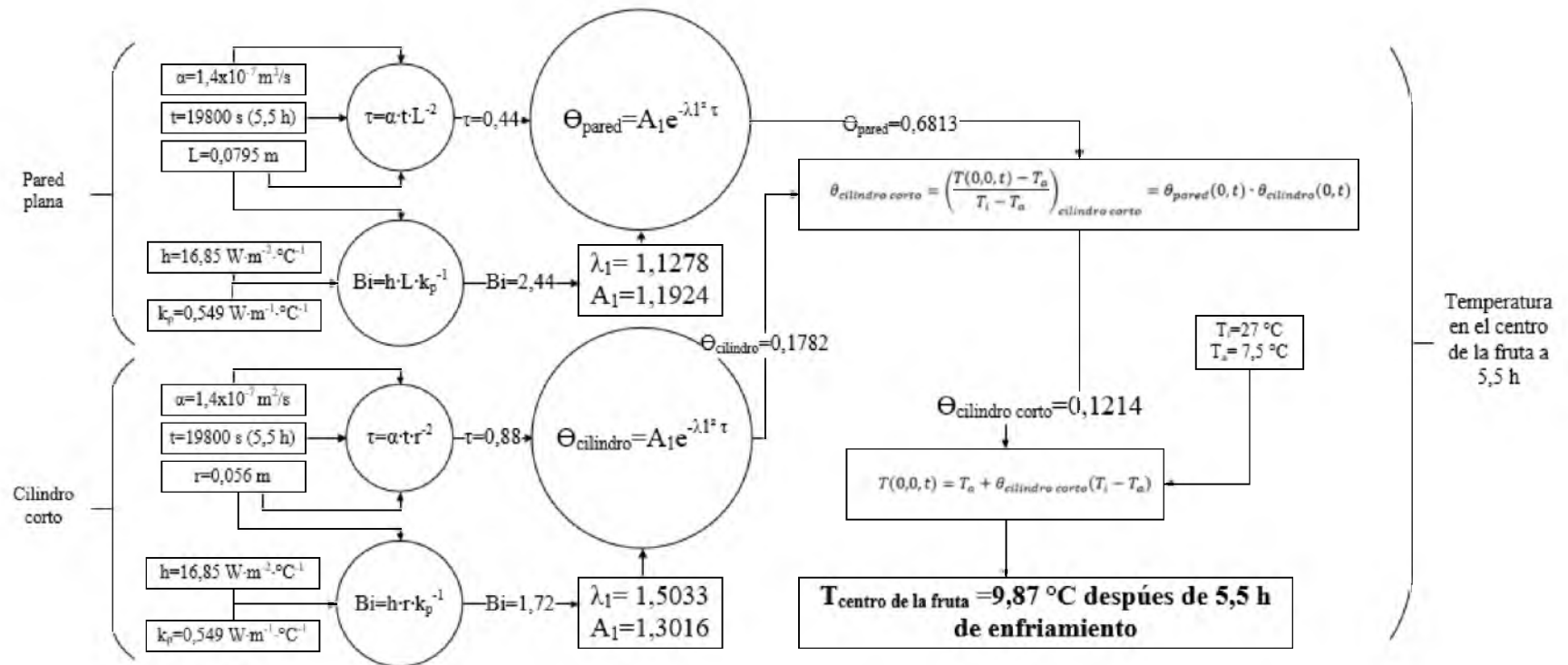


Figura 44. Diagrama de procedimiento de cálculo de la transferencia de calor multidimensional por conducción interna dentro de la fruta, para un tiempo de 5,5 h. λ_1 y A_1 , interpolados a partir del número de Biot (Bi) [22]

4.5.5 Análisis del flujo de aire y caída de presión del aire durante el enfriamiento con aire forzado

La tabla 14 muestra la separación de medias (Tukey $p < 0,05$) de las evaluaciones del flujo de aire y de la caída de presión del aire, entre la entrada y la salida (succión) del aire de las tarimas. Se evaluó el efecto del bloqueo de la base de la tarima, del tipo de ventilación de las cajas (lateral y frontal), de la operación del sistema de aire forzado (capacidad media y plena), de la posición de la tarima a lo largo del túnel (tarima 2, 7, 10 y 13) y de la altura (nivel 1, 9 y 15). En este análisis no se tomaron en cuenta las velocidades y diferencias de presión en la primera tarima del túnel (A) debido a que el patrón de acomodo es diferente, lo que implica un comportamiento distinto del flujo de aire respecto al resto de tarimas, por la disposición relativa de las cajas dentro de la tarima

Tabla 14. Separación de medias de las evaluaciones del flujo y caída de presión del aire durante el enfriamiento de la piña dentro de los túneles de aire forzado

Flujo de aire ($L \cdot s^{-1}$)			Caída de presión estática (Pa)		
Efecto del tipo de ventilación			Efecto del tipo de ventilación		
Frontales	42,5	a	Frontales	302,3	a
Laterales	128,6	b	Laterales	354,8	b
Efecto de la operación			Efecto de la operación		
13 tarimas	86,4		13 tarimas	308,8	a
26 tarimas	84,7		26 tarimas	348,3	b
Efecto del bloqueo			Efecto del bloqueo		
Sin bloqueo	93,9	a	Sin bloqueo	306,8	a
Con bloqueo	77,2	b	Con bloqueo	350,3	b
Efecto de la posición a lo largo del túnel			Efecto de la posición a lo largo del túnel		
Tarima 2	85,0		Tarima 2	339,9	a
Tarima 7	87,7		Tarima 7	333,4	ab
Tarima 10	76,8		Tarima 10	342,5	a
Tarima 13	92,8		Tarima 13	298,4	b
Efecto del nivel (altura) de la tarima			Efecto del nivel (altura) de la tarima		
Nivel 15	114,9	a	Nivel 15	268,6	a
Nivel 9	67,8	b	Nivel 9	359,0	b
Nivel 1	73,9	b	Nivel 1	358,1	b

Letras distintas indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0,05$)

No hubo diferencia significativa entre las interacciones de todos los pares de variables respecto al flujo de aire, pero si para la interacción bloqueo-tipo de ventilación, para la caída de presión estática.

Se encontró que el flujo a través de las cajas que atraviesan las ventilaciones frontales ($2,3 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$) fue significativamente menor que a través de las ventilaciones laterales ($8,6 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$). A pesar de que la caída de presión a través de las ventilaciones laterales resultó mayor que la caída de presión a través de las frontales, el flujo de aire fue mayor por las laterales. Esto se puede explicar por dos razones: en el acomodo normal de las tarimas, con el lado de 1,0 m de frente a la antecámara de succión, el aire que pasa a través de las ventilaciones laterales, teóricamente lo hace a través de tres cajas de producto (figura 26a) mientras que cuando pasa por las frontales lo hace a través de dos cajas, lo que posiblemente implica una mayor resistencia al paso y que, al ser mayor el área de ventilación lateral (en un 73 %), se permite un mayor paso de flujo de aire y entonces es posible que la caída de presión provocada por el paso por tres cajas de producto, sea en cierta medida compensada al contar con una mayor área de paso, lo que produce el resultado anteriormente discutido.

También fue significativo el efecto de la ventilación en la diferencia de las presiones estáticas a través de las cajas, pero con un menor efecto, así, esta diferencia fue un 15 % mayor para las ventilaciones laterales, mientras que el flujo promedio fue tres veces mayor. Este resultado sugiere realizar un estudio comparativo del enfriamiento de la piña entre las cajas según su posición respecto al flujo del aire, pues para el presente estudio, las pruebas de enfriamiento se realizaron todas con frutas sobre las ventilaciones laterales.

Por su parte, no se registraron diferencias significativas en el flujo de aire a través de las cajas para los túneles operando a capacidad media (13 tarimas) y plena (26 tarimas). Esta observación permite deducir, que, a pesar de la colocación de las tarimas, inclinaciones y falta de coincidencia entre las ventilaciones, el flujo parece no haberse visto afectado. Sin embargo, la caída de presión estática a capacidad plena, fue significativamente mayor, por lo debería haber menor flujo de aire a través de las dos tarimas de la capacidad plena en comparación con la capacidad media. Que el flujo de aire a través de ambas capacidades no sea significativamente diferente, puede ser explicado porque las mediciones de flujo fueron realizadas en la antecámara de succión, por lo que es posible que el caudal de aire no se vea

afectado debido a que de alguna manera existen rutas alternas de flujo, parte superior, inferior o lateral, que hacen posible que ingrese aire hacia la tarima cercana a la succión, sin pasar por la tarima cercana a la descarga; de hecho, algunas mediciones del flujo de aire sobre la cara expuesta al flujo de la tarima de la descarga (ingreso del aire a la tarima) fueron registradas en $15,4 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} \pm 12,4 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ y $25,4 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} \pm 6,1 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$, para capacidad plena y media respectivamente, lo que sugiere el aporte de aire de otras zonas hacia la tarima adyacente a la ventana de retorno y entonces salir por las ventilaciones u otras rutas, hacia la antecámara de succión.

Como se observa en la tabla 14, al bloquear el paso del aire por la base de las tarimas, se disminuye el flujo a través de las cajas de producto y se aumenta la caída de presión estática entre la descarga de los evaporadores y la antecámara de succión, resultado que se puede explicar por el hecho de que este bloqueo, funciona como una restricción del sistema, es decir aumenta la caída de presión y por ende afecta el rendimiento de los ventiladores, desplazando el punto de operación hacia una entrega menor de caudal [68].

El efecto de la posición de la fruta dentro del túnel se midió a lo largo del mismo (tarimas 2 a 13) y de la altura (niveles 1 a 15). Se encontró que la posición a lo largo del túnel no tuvo efecto significativo sobre el flujo del aire. Estos resultados permiten concluir, que el criterio de realizar las pruebas de enfriamiento con la fruta colocada en la tarima central, y en el nivel central (nivel 9), fue acertado para describir el proceso de enfriamiento de estos túneles de aire forzado. En contraste, la altura sí mostró un efecto significativo, siendo las cajas en el nivel superior (nivel 15) las que presentaron un flujo de aire mayor (hasta 41 % mayor), sin diferencias significativas entre los niveles medios (tarima 9) e inferior (tarima 1). El hecho de que el flujo de aire sea mayor, cuando pasa a través del nivel superior de la tarima (nivel 15) en comparación con el nivel medio y bajo (9 y 1, respectivamente) se explica por la caída de presión en el nivel 15 que fue significativamente menor a la de los otros dos niveles, por lo que el aire cuenta con una menor restricción al paso. En efecto esta posición es la que se encuentra con una mayor exposición a la descarga del aire de los ventiladores,

tal como se muestra en la figura 25, donde existe un espacio libre entre el nivel superior de la tarima (nivel 16) y la base de los evaporadores.

Los resultados de la caída de presión del aire entre ambos lados de las tarimas a lo largo del túnel, resultaron significativamente mayores, y se explica por el paso del aire a través de las cajas, que no ocurre exclusivamente horizontalmente a través de un solo nivel de cajas de la tarima, sino que también ingresa por la parte superior de las cajas. Estos resultados permiten sugerir que, para homogenizar el enfriamiento de la fruta, sería necesario tomar las siguientes medidas: dirigir el paso del aire frío exclusivamente a través de las tarimas, por cada nivel, mediante la colocación de una barrera sobre el nivel superior de las tarimas; un buen acomodo de las cajas (evitando desfases en la colocación de las cajas e inclinaciones de las tarimas), lo que permitiría un mejor acomodo de las tarimas, sin dejar espacios vacíos para el paso del aire frío.

Finalmente, tomando como referencia los valores promedio de flujo de aire de la tabla 14, para la capacidad media ($86,4 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$) y para la capacidad plena ($84,7 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$), se asumió que el flujo de aire que pasa por una tarima completa, corresponde a 16 veces estos valores, ya que las mediciones fueron realizadas por nivel. De esta forma se tienen, $1382,4 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ a capacidad media y $1355,2 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ a capacidad plena. En términos de flujo de aire por unidad de masa de producto en una tarima, estos caudales corresponden a $1,4 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ a capacidad media y $0,7 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ a capacidad plena, con una densidad producto-empaque de $365 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, que se encuentran dentro del rango $0,5 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ - $2 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ recomendado para el enfriamiento con aire forzado [8,46]. De forma similar, la caída de presión tanto a capacidad media ($308,08 \text{ Pa}$) como a capacidad plena ($348,3 \text{ Pa}$), no sobrepasan las recomendaciones de operación de los ventiladores para entregar un flujo de aire adecuado en los sistemas de aire forzado, reportadas entre 60 Pa y 750 Pa [8,46].

Seguidamente se brinda una síntesis de los resultados de este estudio, con el fin de facilitar la integración de los mismos en el análisis del sistema de enfriamiento con aire forzado de la piña fresca para exportación. Este análisis integral, tuvo un enfoque de sistema, que tiene

como propósito identificar y entender los procesos involucrados, sus secuencias e interacciones [69-71]. Se elaboró un diagrama de flujo general, que permitió describir la primera subdivisión del sistema productivo, integrada por los procesos de producción de piña en campo, de preparación y empaque de fruta fresca (propósito de este estudio) y de preparación de jugos, concentrados y congelados, que en conjunto forman el macroproceso productivo de piña. El proceso de preparación y empaque de fruta fresca, se descompuso en subprocesos, que incluyeron aquellos que intervienen en llevar la fruta desde el área de recibo de la planta empacadora hasta el área de despacho, donde la fruta está lista para cargar en los contenedores marítimos. En la mayor parte de estos subprocesos, intervienen fenómenos de intercambio de calor, y a través de ellos se registraron datos sobre el tiempo de residencia (duración), cambios de la temperatura de la fruta y el ambiente, condiciones de operación y mediciones de flujo y caída de presión estática del aire durante el enfriamiento con aire forzado.

Posteriormente se estudió la capacidad de refrigeración instalada y se evaluó la sensibilidad de los equipos de refrigeración instalados en contraste con las condiciones de temperatura y cantidad de fruta a enfriar.

Se realizó un estudio detallado del subproceso de enfriamiento de la piña con aire forzado y de su relación con el número de Biot, que permitió identificar la conducción de calor dentro de la piña como el factor que limita el enfriamiento, ya que opone una mayor resistencia que la ofrecida por la transferencia de calor por convección entre el aire y la fruta. También se estudiaron los diseños de empaques y el acomodo en las tarimas y su relación con la posición dentro de los túneles de enfriamiento, que permitieron identificar deficiencias críticas como la falta de alineación entre ventilaciones y los espacios libres entre tarimas. Se generaron curvas de enfriamiento de la piña y se evaluó el efecto de la operación a capacidad media y plena, la posición dentro del túnel (tarimas A y C, analizando el enfriamiento en una fruta dentro de una caja cerca de la descarga del aire y otra en una cerca de la succión del aire) y con y sin bloqueo del paso del aire por la base de las tarimas. Los datos fueron analizados de acuerdo a los resultados de temperatura de la fruta, así como a través de los resultados de

transformar los datos de temperatura a las variables adimensionales, Y , (cambio adimensional de temperatura o bien, fracción del cambio de temperatura faltante para completar el enfriamiento), con la cual, las diferencias entre las temperaturas iniciales de la fruta no afectan la interpretación de los resultados y se analizó la heterogeneidad del enfriamiento a través de las variables ΔY , D_{TP} y $\Delta Y_{m\acute{a}x}$. Tanto la D_{TP} como la ΔY , son variables que dan un vistazo interno al sistema, ya que asocian la variación de la heterogeneidad, en el tiempo o conforme avanza el enfriamiento promedio (\bar{Y}), entre posiciones dentro de la fruta o dentro del túnel. Por su parte, la variable $\Delta Y_{m\acute{a}x}$, es una métrica que permite cuantificar de forma más global, la heterogeneidad máxima del enfriamiento, dando un parámetro general para comparar sistemas sometidos a condiciones o configuraciones distintas. También, se incluyó la evaluación del enfriamiento interno de la fruta, usando la D_{TP} , que permite cuantificar en promedio la diferencia de temperatura ya sea entre posiciones dentro de la fruta o entre frutas ubicadas en distintas posiciones dentro de una cámara, respecto a la temperatura promedio respectiva, pero con uso limitado, porque requiere que la temperatura inicial de la(s) fruta(s) sea igual al momento de iniciar el enfriamiento (tiempo igual a cero) y además al ser un valor absoluto, no provee información si la heterogeneidad es debida a que la(s) fruta(s) se enfrían más o se enfrían menos que el enfriamiento promedio. La modelación del enfriamiento de la(s) fruta(s), tanto desde la perspectiva de la convección forzada utilizando modelos de ajuste exponencial, como desde la perspectiva de la conducción interna usando la metodología de conducción de calor multidimensional por el principio de superposición solución producto, permitió estimar el tiempo de enfriamiento y la temperatura de las frutas, al alcanzar el 7/8 de enfriamiento.

Este enfoque integral permitió analizar y destacar las oportunidades de mejora para realizar un rediseño y optimización del proceso de preparación y empaque de fruta fresca de exportación, como la mejora de las operaciones de preparación de tarimas, rediseño del túnel de aire forzado, aumento del tiempo de enfriamiento de las frutas y la necesidad por asegurar el almacenamiento temporal de las frutas dentro de las cámaras de refrigeración previo a su carga en los contenedores para transporte marítimo. Esto constituye una herramienta de

análisis que se ilustra en la figura 45, utilizable en los procesos poscosecha de otras frutas y vegetales y también extensible a la industria de alimentos en la que haya operaciones de enfriamiento y hasta de congelación.



Figura 45. Herramienta para la evaluación integral del enfriamiento de productos frescos.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Herramienta

1. El enfoque integral permitió realizar un análisis exhaustivo del proceso enfriamiento con aire forzado de la piña en una planta de empaque comercial, cuantificar y visualizar la heterogeneidad del enfriamiento de las frutas, contrastar la capacidad de refrigeración instalada con la requerida e identificar el efecto de los factores que inciden sobre la velocidad de enfriamiento.
2. Se desarrolló una herramienta para evaluación de los procesos de enfriamiento de plantas de procesos poscosecha y otras que incluyan sistemas de refrigeración.

Enfriamiento interno

3. La transferencia de calor por conducción, es el factor que limita el enfriamiento de las piñas de la variedad MD2 calibre número 7, según resultados experimentales y el número de Biot (1,14 - 2,30).

Monitoreo del proceso

4. El enfriamiento con aire forzado (AF) consume el 37,6 % del tiempo total del proceso y contribuye con el 63,2 % de la reducción total de la temperatura de la fruta en el proceso.
5. Los diversos componentes del sistema de enfriamiento estudiado, protegen a la fruta de la pérdida de peso al mantener una humedad relativa del aire por arriba del 80% dentro de los espacios refrigerados.
6. Las cargas térmicas fijas consumen el 50 %, 9,6 %, 19 % y 39 % de la capacidad instalada en las salas de empaque (EM), aire forzado (AF), almacenamiento refrigerado (AR) y andén de carga para despacho (AN), respectivamente.

7. Bajo un 100 % de eficiencia en los túneles de aire forzado (AF), la temperatura de la fruta puede reducirse de 27 °C a 10 °C en 1,6 h y 3,2 h, a capacidad media (13 tarimas) y plena (26 tarimas) respectivamente.

Acomodo de cajas

8. La colocación de una tarima con el lado de 1,2 m de frente a la ventana de retorno, no permite el paso directo del aire a través de las ventilaciones de las cajas con piña y resta eficacia al proceso de enfriamiento.
9. La ventana de retorno contra la que se colocan las tarimas requiere modificaciones en el largo (reducirla 16 cm), en la base (incrementarla 2,5 cm) y en la altura (aumentarla 11,5 cm).
10. El acomodo de las cajas dentro de la tarima y de las tarimas dentro de los túneles deja espacios libres indeseables para el paso del aire, sin que entre en contacto con la fruta (bypass), del orden del 10,9 % del área de ventilación de una tarima expuesta al flujo.

Enfriamiento con aire forzado

11. La normalización de las curvas de enfriamiento mediante la transformación de los datos de temperatura a la variable, Y (cambio adimensional de temperatura), facilitó el análisis del efecto de las variables de operación del sistema de enfriamiento con aire forzado de la piña, de la heterogeneidad del sistema y la modelación exponencial para la predicción de los tiempos de enfriamiento de la fruta.
12. El aumento de 13 a 26 tarimas de producto empacado, aumenta el tiempo de enfriamiento de las frutas.
13. El bloqueo del paso del aire por la base de las tarimas no redujo el tiempo de enfriamiento de la fruta con aire forzado.
14. El tiempo de enfriamiento utilizado para la operación de los túneles de aire forzado de esta planta empacadora (3,5 h), es insuficiente para alcanzar los 7/8 de enfriamiento para fruta que ingresa a los túneles a 27 °C. Se requiere aumentar estos tiempos en 38 min y 123 min, para 13 y 26 tarimas con fruta, respectivamente.

15. El caudal de aire a través de las ventilaciones laterales ($128,6 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$) es 3 veces mayor que el caudal de aire a través de las ventilaciones frontales ($42,5 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$).

Heterogeneidad

16. La fruta colocada cerca de la antecámara de succión es la que se enfría más lentamente que la fruta ubicada cerca de la descarga de los evaporadores (hasta $3 \text{ }^\circ\text{C}$ de diferencia después de 3,5 h) y el centro geométrico de la piña es el punto más caliente durante el enfriamiento.
17. El grado de heterogeneidad del enfriamiento en los túneles al finalizar la operación (3,5 h), mostró que el enfriamiento de las frutas fue incompleto.

5.2 *Recomendaciones*

1. Determinar experimentalmente las propiedades térmicas de la piña MD2, para las distintas condiciones de producción y regiones en Costa Rica.
2. Ampliar el ámbito de estudio de la temperatura de la fruta en distintos puntos del proceso, desde el área de recibo hasta el área de despacho, para diferentes épocas del año y horas del día.
3. Rediseñar las cajas de cartón corrugado de piña, de modo que se incremente el área de la ventilación frontal hasta $5\% - 9,7\%$ de la cara frontal expuesta al flujo de aire y evaluar el efecto sobre la resistencia mecánica de la caja.
4. Rediseñar los subprocesos de acomodo de cajas y estabilización de tarimas para asegurar verticalidad, alineación de ventilaciones y minimizar bypass de aire.
5. Reducir el ancho de la ventana de retorno, colocando una pared fija de aproximadamente 16 cm, para que se puedan colocar las filas de 13 tarimas con el lado de 1,0 m de frente a la ventana de retorno, por lo que el ancho de la ventana debería ser de aproximadamente 12,7 m.
6. Restringir la entrada de aire de forma vertical, a través de las cajas del nivel superior con un material de bloqueo (como una lámina de plástico delgado), para que el paso del aire sea horizontal a lo largo del lado de 1,2 m de la tarima.

7. Colocar una almohadilla en la base de la antecámara de succión de aproximadamente 2,5 cm de alto, contra la que se coloquen las tarimas, para no permitir el paso directo del aire por la base de las tarimas.
8. Evaluar el efecto sobre la caída de presión y el caudal de aire y sobre el enfriamiento de la fruta (Y), al realizar el rediseño propuesto de la infraestructura de los túneles de aire forzado (recomendaciones 5-7).
9. Validar los modelos exponenciales de predicción de los tiempos de enfriamiento, estudiar su heterogeneidad, identificar los puntos críticos y proponer las modificaciones para uniformizar el enfriamiento.
10. Desarrollar un protocolo con el registro de tiempos de permanencia y temperatura de la fruta al ingresar y salir de los subprocesos de empaque (EM), enfriamiento con aire forzado (AF), almacenamiento refrigerado (AR) y andén de carga para despacho (AN), para un mejor control de las condiciones de la fruta.

Bibliografía

1. Cámara Nacional de Productores y Exportadores de Piña. Estadísticas [Internet]. San José (CR). [citado el 11 de agosto de 2017]. Recuperado a partir de: <https://canapep.com/estadisticas/>
2. Cámara Nacional de Productores y Exportadores de Piña. Costa Rica exporta las primeras cajas de piña a China [Internet]. San José (CR). [citado el 11 de agosto de 2017]. Recuperado a partir de: <https://canapep.com/costa-rica-exporta-las-primeras-cajas-pina-china/>
3. Adikaram N, Abayasekara C. Pineapple. En: Rees D, Farrell G, Orchard J, editores. Crop post-harvest: science and technology: perishables. Chichester: Blackwell Publishing; 2012. p. 143–58.
4. Cerdas M, Montero-Calderón M. Guías técnicas del manejo de poscosecha de la piña en el mercado fresco [Internet]. San José: Ministerio de Agricultura y Ganadería (CR); 2005 [citado el 22 de mayo de 2016]. 46 p. Recuperado a partir de: http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual_ciencia/tec-pina-pre-pos.pdf
5. Gloria-Lobo M, Siddiq M. Overview of pineapple production, postharvest physiology, processing and nutrition. En: Gloria-Lobo M, Paull RE, editores. Handbook of Pineapple Technology: Production, Postharvest Science, Processing and Nutrition. 1a ed. Chichester: Wiley Blackwell; 2017. p. 1–15.
6. Horabik J, Molenda M. Encyclopedia of Agrophysics [Internet]. Gliński J, Horabik J, Lipiec J, editores. Encyclopedia of agrophysics. Dordrecht: Springer Netherlands; 2011 [citado el 1 de julio de 2017]. 407-409 p. (Encyclopedia of Earth Sciences Series). Recuperado a partir de: <http://link.springer.com/10.1007/978-90-481-3585-1>
7. Redding GP, Yang A, Shim YM, Olatunji J, East A. A review of the use and design of produce simulators for horticultural forced-air cooling studies. J Food Eng [Internet]. diciembre de 2016 [citado el 1 de agosto de 2017];190:80–93. Recuperado a partir de: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0260877416302217>

8. O'Sullivan JL, Ferrua MJ, Love R, Verboven P, Nicolaï B, East A. Forced-air cooling of polylined horticultural produce: Optimal cooling conditions and package design. *Postharvest Biol Technol* [Internet]. abril de 2017 [citado el 1 de agosto de 2017];126:67–75. Recuperado a partir de: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925521416306676>
9. Lurie S. What to measure and how to measure. En: Zude M, editor. *Optical monitoring of fresh and processed agricultural crops*. Boca Raton: CRC Press; 2009. p. 2–78.
10. Barman K, Ahmad MS, Siddiqui MW. Factors affecting the quality of fruits and vegetables: recent understandings. En: Siddiqui MW, editor. *Postharvest biology and technology of horticultural crops: principles and practices for quality maintenance*. Boca Raton: CRC Press & Apple Academic Press; 2015. p. 1–50.
11. Hewajulige IGN, Wijesundera RLC. *Thielaviopsis paradoxa*, *Thielaviopsis basicola* (Black Rot, Black Root Rot). En: Bautista-Baños S, editor. *Postharvest decay: control strategies*. San Diego: Academic Press Elsevier; 2014. p. 287–304.
12. Gopala Rao C. *Engineering for storage of fruits and vegetables: cold storage, controlled atmosphere storage, modified atmosphere storage*. San Diego: Academic Press Elsevier; 2015. 859 p.
13. Thompson AK. *Fruit and Vegetable Storage* [Internet]. Cham: Springer International Publishing; 2016 [citado el 1 de agosto de 2017]. p. 137. (SpringerBriefs in Food, Health, and Nutrition). Recuperado a partir de: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-23591-2>
14. Yahia EM, Ornelas-Paz J de J, Elansari A. Postharvest technologies to maintain the quality of tropical and subtropical fruits. En: Yahia EM, editor. *Postharvest biology and technology of tropical and subtropical fruits: fundamental issues*. Cambridge: Woodhead Publishing; 2011. p. 142–93.
15. Paull RE, Chen NJ, Saradhulhat P. Pineapple harvesting and postharvest handling. En: Gloria-Lobo M, E. Paull R, editores. *Handbook of pineapple technology: production, postharvest science, processing and nutrition*. 1a ed. Chichester: Wiley Blackwell; 2017. p. 89–107.

16. Florkowski W, Shewfelt R, Brueckner B, Prussia S, editores. Postharvest handling: a systems approach. 3a ed. San Diego: Academic Press Elsevier; 2014. 564 p.
17. Rosenthal A, Torrezan R, Schmidt FL, Narain N. Preservation and processing of tropical and subtropical fruits. En: Yahia E, editor. Postharvest biology and technology of tropical and subtropical fruits: fundamental issues. Cambridge: Woodhead Publishing; 2011. p. 419–84.
18. Bar-Yam Y. Introduction to the study of complex systems. En: Mitleton-Kelly E, Parashevas A, Day C, editores. Handbook of Research Methods in Complexity Science: Theory and Applications. Edward Elgar; Forthcoming 2018.
19. Hertog MLATM, Rudell DR, Pedreschi R, Schaffer RJ, Geeraerd AH, Nicolai BM, et al. Where systems biology meets postharvest. Postharvest Biol Technol [Internet]. diciembre de 2011 [citado el 1 de agosto de 2017];62(3):223–37. Recuperado a partir de: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925521411001244>
20. van Mil HGJ, Foegeding EA, Windhab EJ, Perrot N, van der Linden E. A complex system approach to address world challenges in food and agriculture. Trends Food Sci Technol [Internet]. noviembre de 2014 [citado el 1 de agosto de 2017];40(1):20–32. Recuperado a partir de: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924224414001575>
21. Brosnan T, Sun D-W. Precooling techniques and applications for horticultural products - a review. Int J Refrig [Internet]. marzo de 2001 [citado el 1 de agosto de 2017];24(2):154–70. Recuperado a partir de: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140700700000177>
22. Cengel Y, Ghajar A. Transferencia de calor y masa: fundamentos y aplicaciones. 4a ed. México D.F: McGraw-Hill; 2011. 944 p.
23. Olatunji JR, Love RJ, Shim YM, Ferrua MJ, East AR. Quantifying and visualising variation in batch operations: A new heterogeneity index. J Food Eng [Internet]. marzo de 2017 [citado el 3 de agosto de 2017];196:81–93. Recuperado a partir de: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0260877416303648>
24. Han J-W, Qian J-P, Zhao C-J, Yang X-T, Fan B-L. Mathematical modelling of cooling

- efficiency of ventilated packaging: Integral performance evaluation. *Int J Heat Mass Transf* [Internet]. agosto de 2017 [citado el 3 de agosto de 2017];111:386–97. Recuperado a partir de: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0017931016342120>
25. Sajadiye SM, Zolfaghari M. Simulation of in-line versus staggered arrays of vented pallet boxes for assessing cooling performance of orange in cool storage. *Appl Therm Eng* [Internet]. marzo de 2017 [citado el 4 de agosto de 2017];115:337–49. Recuperado a partir de: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431116341321>
 26. Sajadiye SM, Ahmadi H, Zolfaghari M, Mohtasebi SS, Mostofi Y, Raja A. A Multi-Scale Three-Dimensional CFD Model of a Full Loaded Cool Storage. *Int J Food Eng* [Internet]. el 10 de enero de 2013 [citado el 4 de agosto de 2017];9(2):163–178. Recuperado a partir de: <http://www.degruyter.com/view/j/ijfe.2013.9.issue-2/ijfe-2012-0015/ijfe-2012-0015.xml>
 27. Shim Y-M, Tan Y-T, Olantunji J, O’Sullivan JL, Love RJ, Ferrua MJ, et al. A new method to describe the cooling process of packaged horticulture produce. En: *Proceedings of the 24th IIR International Congress of Refrigeration*. Yokohama; 2015. p. 7.
 28. Han J-W, Badía-Melis R, Yang X-T, Ruiz-Garcia L, Qian J-P, Zhao C-J. CFD Simulation of Airflow and Heat Transfer During Forced-Air Precooling of Apples. *J Food Process Eng* [Internet]. abril de 2017 [citado el 4 de agosto de 2017];40(2). Recuperado a partir de: <http://doi.wiley.com/10.1111/jfpe.12390>
 29. Duret S, Hoang H-M, Flick D, Laguerre O. Experimental characterization of airflow, heat and mass transfer in a cold room filled with food products. *Int J Refrig* [Internet]. octubre de 2014 [citado el 4 de agosto de 2017];46:17–25. Recuperado a partir de: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140700714001868>
 30. Bergman TL, Lavine AS, Incropera FP, Dewitt DP. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 7a ed. Danvers: Jhon Wiley & Sons; 2011. 712 p.
 31. Montero-Calderón M, Rojas-Grau MA, Martín-Belloso O. Mechanical and chemical properties of Gold cultivar pineapple flesh (*Ananas comosus*). *Eur Food Res Technol* [Internet]. febrero de 2010 [citado el 10 de agosto de 2017];230(4):675–86. Recuperado a

partir de: <http://link.springer.com/10.1007/s00217-009-1207-9>

32. Kader AA. Postharvest Technology of Horticultural Crops - An Overview from Farm to Fork. *Ethiop J Sci Technol* [Internet]. 2013 [citado el 16 de agosto de 2017];(1):1–8. Recuperado a partir de: <http://ucce.ucdavis.edu/files/datastore/234-2531.pdf>
33. Wardy W, Kwesi-Saalia F, Steiner-Asiedu M, Budu AS, Sefa-Dedeh S. A comparison of some physical, chemical and sensory attributes of three pineapple (*Ananas comosus*) varieties grown in Ghana. *African J Food Sci*. 2009;3(1):22–5.
34. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Thermal Properties of Foods. En: *ASHRAE Handbook Refrigeration*. Atlanta; 2014. p. 19.1-19.13.
35. Morris SA. *Food and Package Engineering*. Chichester: Wiley-Blackwell; 2011. 466 p.
36. Cevoli C, Fabbri A. Heat transfer finite element model of fresh fruit salad insulating packages in non-refrigerated conditions. *Biosyst Eng* [Internet]. enero de 2017 [citado el 15 de agosto de 2017];153:89–98. Recuperado a partir de: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1537511016303324>
37. Lewicki PP. Data and Models of Water Activity. II: Solid Foods. En: Rahman MS, editor. *Food Properties Handbook*. 2a ed. Boca Raton; 2009.
38. Nicolai BM, Verlinden B, Beuselinck A, Jancsok P, Valéry Quenon, Scheerlinck N, et al. Propagation of stochastic temperature fluctuations in refrigerated fruits. *Int J Refrig* [Internet]. marzo de 1999 [citado el 4 de agosto de 2017];22(2):81–90. Recuperado a partir de: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140700798000516>
39. Singh RP, Heldman DR. *Introduction to Food Engineering*. 5a ed. San Diego: Elsevier; 2014. 892 p.
40. Dossat R. *Principios de Refrigeración*. 2a ed. México D.F.: Compañía Editorial Continental S.A; 2002. 595 p.
41. Ibarz A, Barbosa-Cánovas G V. *Unit operations in food engineering*. Boca Raton: CRC Press;

2003. 873 p.

42. Ikegwu OJ, Ekwu F. Thermal and Physical Properties of Some Tropical Fruits and Their Juices in Nigeria. *J Food Technol*. 2009;7(2):38–42.
43. Ambaw A, Mukama M, Opara UL. Analysis of the effects of package design on the rate and uniformity of cooling of stacked pomegranates: Numerical and experimental studies. *Comput Electron Agric [Internet]*. abril de 2017 [citado el 6 de agosto de 2017];136:13–24. Recuperado a partir de: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S016816991630878X>
44. Kurozawa LE, Hubinger MD, Park KJ, Xidieh FE, Moreira P. Thermal conductivity and thermal diffusivity of papaya (*Carica papaya* L.) and cashew apple (*Anacardium occidentale* L.). *Brazilian J Food Technol*. 2008;11(1):78–85.
45. Ferrua MJ, Singh RP. Modeling the forced-air cooling process of fresh strawberry packages, Part I: Numerical model. *Int J Refrig [Internet]*. marzo de 2009 [citado el 10 de agosto de 2017];32(2):335–48. Recuperado a partir de: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140700708000819>
46. Thompson JF, Mitchell FG, Rumsey TR, Kasmire RF, Crisosto CH. Commercial cooling of fruits, vegetables, and flowers. Publication 21567. Oakland (CA): University of California; 1998. 59 p.
47. Defraeye T, Cronjé P, Verboven P, Opara UL, Nicolai B. Exploring ambient loading of citrus fruit into reefer containers for cooling during marine transport using computational fluid dynamics. *Postharvest Biol Technol [Internet]*. octubre de 2015 [citado el 4 de agosto de 2017];108:91–101. Recuperado a partir de: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092552141530034X>
48. Defraeye T, Verboven P, Opara UL, Nicolai B, Cronjé P. Feasibility of ambient loading of citrus fruit into refrigerated containers for cooling during marine transport. *Biosyst Eng [Internet]*. junio de 2015 [citado el 4 de agosto de 2017];134:20–30. Recuperado a partir de: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1537511015000549>

49. Zhao C-J, Han J-W, Yang X-T, Qian J-P, Fan B-L. A review of computational fluid dynamics for forced-air cooling process. *Appl Energy* [Internet]. abril de 2016 [citado el 8 de agosto de 2017];168:314–31. Recuperado a partir de: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261916300897>
50. Ferrua MJ, Singh RP. Design guidelines for the forced-air cooling process of strawberries. *Int J Refrig* [Internet]. diciembre de 2009 [citado el 10 de agosto de 2017];32(8):1932–43. Recuperado a partir de: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S014070070900173X>
51. Ferrua MJ, Singh RP. Modeling the forced-air cooling process of fresh strawberry packages, Part III: Experimental validation of the energy model. *Int J Refrig* [Internet]. marzo de 2009 [citado el 10 de agosto de 2017];32(2):359–68. Recuperado a partir de: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140700708000807>
52. Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica. Guía para la elaboración de diagramas de flujo [Internet]. San José (CR); 2009 [citado el 10 de agosto de 2017]. Recuperado a partir de: <https://documentos.mideplan.go.cr/alfresco/d/d/workspace/SpacesStore/6a88ebe4-da9f-4b6a-b366-425dd6371a97/guia-elaboracion-diagramas-flujo-2009.pdf>
53. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Refrigerated Facility Loads. En: *ASHRAE Handbook Refrigeration*. Atlanta; 2014. p. 24.1-24.9.
54. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Psychrometric Calculator [Internet]. [citado el 10 de agosto de 2016]. Recuperado a partir de: <http://www.daytonashrae.org/psychrometrics.shtml>
55. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Nonresidential Cooling and Heating Load Calculations. En: *ASHRAE Handbook Fundamentals*. Atlanta; 2013. p. 18.1-18.52.
56. Hong K, Xu H, Wang J, Zhang L, Hu H, Jia Z, et al. Quality changes and internal browning developments of summer pineapple fruit during storage at different temperatures. *Sci Hortic (Amsterdam)* [Internet]. febrero de 2013 [citado el 25 de agosto de 2017];151:68–74.

Recuperado a partir de: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304423812005936>

57. Ulloa L, Sáenz MV, Castro J. Efecto del almacenamiento a diferentes temperaturas sobre el desarrollo de color externo y la calidad de frutos de piña CV. Dorada Extra Dulce. *Agron Costarric*. 2015;39(3):9–20.
58. Chase RB, Jacobs FR, Aquilano NJ. *Administración de operaciones: producción y cadena de suministros*. 12a ed. México D.F.: McGraw-Hill Interamericana; 2009. 776 p.
59. American Society for Quality. *The ASQ Quality Improvement Pocket Guide*. Duffy GL, editor. Wisconsin: ASQ Quality Press; 2013. 144 p.
60. Deuchande T, Larrigaudière C, Carvalho SMP, Vasconcelos MW. Advances in Refrigerated and Controlled Atmosphere Storage of Fruits and Vegetables. En: Gaspar PD, da Silva PD, editores. *Handbook of Research on Advances and Applications in Refrigeration Systems and Technologies*. Hershey: IGI Global; 2015. p. 457–89.
61. Ozilgen M. *Handbook of food process modeling and statistical quality control with extensive MATLAB applications*. 2a ed. Boca Raton: CRC Press; 2011. 704 p.
62. Maersk Container Industry. Star Cool Specifications [Internet]. [citado el 22 de agosto de 2017]. Recuperado a partir de: <http://www.maicontainers.com/Products/ReeferMachines/Pages/StarCoolTechnicalSpecifications.aspx>
63. Thompson AK. *Fruit and vegetables harvesting, handling and storage: introduction & fruit*. 3a ed. Chichester: Willey Blackwell; 2015. 1008 p.
64. Meyers FE, Stephens MP. *Diseño de instalaciones de manufactura y manejo de materiales*. 3a ed. México D.F: PEARSON Educación; 2005. 528 p.
65. Thompson JF, Mejia D., Singh R. Energy use of commercial forced-air coolers for fruit. *Appl Eng Agric*. 2010;26(5):919–24.
66. Pathare PB, Opara UL. Structural design of corrugated boxes for horticultural produce: A

- review. *Biosyst Eng* [Internet]. septiembre de 2014 [citado el 30 de agosto de 2017];125:128–40. Recuperado a partir de: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1537511014001135>
67. García-Criollo R. *Estudio del trabajo. Ingeniería de métodos y medición del trabajo*. 2a ed. México D.F: McGraw-Hill; 2005. 459 p.
 68. Legg R. Fans. En: *Air Conditioning System Design* [Internet]. Oxford: Elsevier; 2017 [citado el 30 de agosto de 2017]. p. 297–318. Recuperado a partir de: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081011232000157>
 69. Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica. *INTE/ISO 9000:2005: Sistemas de gestión de la calidad- Fundamentos y vocabulario*. San José (CR); 2005.
 70. Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica. *INTE/ISO 9001:2008: Sistemas de gestión de calidad-Requisitos*. San José (CR), Costa Rica; 2008.
 71. Guillén A. *Congreso de Ingeniería y de Arquitectura. La descripción de los procesos. Lo que los ingenieros no hacen bien*. San José (CR): CFIA; 2009.