

# DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE UN PROTOTIPO DE SECADOR DE CARDAMOMO A BASE DE GAS PARA PEQUEÑOS Y MEDIANOS PRODUCTORES

Edgar Alfredo Chamo Calderón,  
eachamo@uvg.edu.gt

Luis Andrés Arévalo-Rodríguez<sup>1</sup>,  
laarevalo@uvg.edu.gt

Ana Silvia Colmenares de Ruiz<sup>1,2</sup>,  
asruiz@uvg.edu.gt

Isabel Alonzo Flores<sup>1</sup>  
ialonzo@uvg.edu.gt

Edwinth Rodríguez Mendoza<sup>1</sup>  
eerodriguez@uvg.edu.gt

<sup>1</sup> Centro de Estudios Agrícolas y Alimentarios,  
Instituto de Investigaciones.

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería en Ciencias de  
Alimentos, Facultad de Ingeniería.

## RESUMEN

A pesar de la importancia social y económica del cardamomo para el país, y para más de 400 mil familias de pequeños y medianos productores, el proceso de secado se ha mantenido sin innovaciones tecnológicas desde la introducción del cultivo, hace unos 100 años. Este proceso es realizado por intermediarios en la cadena de valor, quienes compran cardamomo cereza a los productores, y luego venden cardamomo pergamino a las empresas exportadoras. Debido a que la mayoría de los secadores son de gran capacidad (~50 qq), los pequeños y medianos productores, no alcanzan a cubrir el volumen necesario para su funcionamiento, y tampoco cuentan con una alternativa acorde a su capacidad productiva. En la actualidad, la mayoría de los secadores funcionan con una fuente de calor a partir de leña, y en menor cantidad con calor generado a partir de gas. Para lograr el desarrollo del prototipo fue necesario estudiar las propiedades físicas de la cápsula y analizar la caída de presión generada en una columna de cardamomo cereza. Estos datos permitieron el diseño y selección de cada uno de los componentes del sistema. El secador está conformado de tres componentes principales, la cámara de secado compuesta de 12 bandejas con una capacidad individual de hasta 40 libras de cardamomo cereza, cámara de calefacción de aire con un quemador a base de gas y un ventilador. Una vez construido el prototipo se procedió a evaluar su funcionamiento y efectividad, para lo cual se analizó el comportamiento de la temperatura y la curva de pérdida de la humedad dentro de la cámara de secado, así como la cantidad de masa de agua removida de las cápsulas durante el proceso de secado. Se logró secar con éxito, hasta 360 libras de cardamomo cereza en 29 horas, reduciendo el contenido de humedad a menos de 10%. Con este prototipo se busca dar respuesta a la necesidad de los pequeños y medianos productores de poder procesar su cardamomo, alcanzando las características de calidad que demanda el mercado, y mejorando la economía familiar por el aumento de ingresos

**PALABRAS CLAVE:** cardamomo, prototipo, secador, propiedades físicas.

## ABSTRACT

### DEVELOPMENT AND EVALUATION OF A CARDAMOM DRYER PROTOTYPE FOR SMALL AND MEDIUM SCALE PRODUCERS

Despite the social and economic importance of cardamom for the country, and for more than 400 thousand families of small and medium scale producers, the drying process has remained without technological innovations since the introduction of the crop, about 100 years ago. This process is carried out by intermediaries who buy the cardamom from farmers and then sell it dried to exporting companies. Due to the fact that most dryers in the country have a large capacity (~ 50 qq), small and medium

scale producers aren't able to meet the required mass to operate them, and they don't have any alternative that is adequate for their volume of production. Nowadays most of the dryers work with wood as their source of heat, and a minority use gas. In order to achieve the development of the prototype, it was necessary to study the physical properties of the seed and analyze the pressure drop generated by a column of damp cardamom. By the obtained data the design and selection of each of the system components was allowed. The dryer is composed by three systems, the drying chamber which has 12 trays with capacity for 40 pounds of damp cardamom each, air heating chamber with a gas-based burner, and finally an industrial fan. Once the prototype was built the evaluation of its operation and effectiveness began. This task was accomplished by analyzing the temperature's behavior and the moisture loss across the trays inside the drying chamber, as well as the mass of water removed from the seed during the drying process. Up to 360 pound of cardamom were successfully dried in 29 hours, reducing moisture content to less than 10%. This prototype seeks to satisfy the need of drying cardamom, for small and medium-sized producers, achieving the quality characteristics demanded by the market, and improving the family economy by increasing their income.

**KEYWORDS:** cardamom, tray dryer, pressure drop, moisture content, drying time, grain physical properties.

## INTRODUCCIÓN

El cardamomo es una de las tres especias con mayor valor a nivel mundial, únicamente superado por el azafrán y la vainilla. Guatemala cuenta con ventajas climáticas que favorecen su establecimiento y producción, en comparación a otros países productores como la India. Por lo general en el país se puede cosechar el cardamomo a lo largo de todo el año, sin embargo, los mayores volúmenes se cosechan entre septiembre y marzo. Así mismo Guatemala es uno de los principales países que exportan dicha especia a nivel mundial (MAGA, 2014). El 98% de las exportaciones nacionales es producido por cerca de 300,000 pequeños productores (ICEX, 2020). Dicho dato evidencia que los pequeños productores son vitales en el volumen de producción nacional. Sin embargo, dichas personas ven reducidos sus ingresos debido a que venden su cosecha según el valor de mercado del día de corte, y al valor que el intermediario está dispuesto a pagar. Esto debido a que el cardamomo sufre una acelerada pérdida de calidad, si no se procesa en un tiempo corto posterior a la cosecha, además, que no cuentan con un secador que se adapte a su capacidad y necesidad de proceso. Por ejemplo, según Wellmann (2015) los secadores actuales cuentan con capacidades de 45 a 60 quintales, siendo esta cantidad muy difícil de suplir por un pequeño productor en una cosecha. Si se toma en consideración que el precio del cardamomo se incrementa considerablemente al estar deshidratado, resulta evidente que un equipo de secado especializado para este sector de productores brindaría un aumento en sus ingresos.

Guatemala es uno de los principales exportadores de cardamomo en el mundo, alcanzado el primer lugar en los últimos años. En el año 2019 se alcanzó la máxima cifra de exportación de cardamomo con un valor de 648 millones de dólares. Siendo esta cifra un aumento del 50% respecto

al valor del año anterior. Estas cifras poseen una alta relevancia nacional, ya que representan cerca del 1% del PIB y un 5.8% de las exportaciones nacionales. Del total de las exportaciones nacionales el 75% corresponde al mundo árabe (ICEX, 2020), donde Arabia Saudita es el principal mercado, con un 27.81% de las exportaciones totales en 2016, seguido por Emiratos Árabes Unidos, Siria y Jordania. En el contexto nacional, los principales departamentos productores son Alta Verapaz, Quiché, Huehuetenango, Izabal y Baja Verapaz. El 82% de la producción nacional se concentra en los departamentos de Alta Verapaz y Quiché, siendo el primero el principal productor con un 67.8% (MAGA, 2016).

A pesar de la importancia de este sector para la economía nacional, pocos avances tecnológicos se han hecho en los procesos agrícolas y del secado de la cápsula. Hoy en día, la mayoría de los secadores cuentan con una capacidad de 40 a 50 quintales de cardamomo cereza, para su funcionamiento; poseen poca o nula posibilidad de monitoreo del proceso, utilizan leña como combustible para generar calor y motores diésel para mover los ventiladores del sistema. El uso de leña no permite mantener la temperatura constante en el proceso de secado, y depende de la supervisión permanente del sistema para evitar que se quede sin combustible; en procesos de más de 24 horas (Colmenares y Morales, 2021). Por su parte, los motores diésel generan contaminación sonora del entorno de trabajo, así como la contaminación del ambiente y del producto si no se extraen eficientemente los gases de escape. Dichas características hacen que el proceso de secado sea complejo y pone en riesgo la calidad del producto final (Wellmann, 2015), presentando oportunidades de mejora para los secadores utilizados en el país. En los últimos años se han realizado esfuerzos por mejorar esta área y se han implementado

sistemas eléctricos y con gas. Algunos de estos cambios han consistido en realizar adaptaciones de quemadores de gas en los sistemas tradicionales, cambiado la fuente de calor de leña por gas (Colmenares y Morales, 2021). Otras secadoras a base de gas han sido importadas desde India y cuentan con tecnología más avanzada que permite el control automático del sistema. Sin embargo, todos son diseñados para volúmenes grandes, lo que limita la oportunidad de pequeños y medianos productores de implementar este proceso.

A nivel mundial, existen otros tipos de proceso de secado de cardamomo, entre los que están el secado al sol; el de calor

generado con electricidad, con radiación solar, o gas. De estos procesos el menos eficiente es el secado al sol, y de los que mejor calidad de producto se obtiene es del secado eléctrico o de gas, ya que permite una mejor calidad en el producto final. El secado con leña puede incurrir en sabores no deseados en el producto final, disminuyendo así su calidad y su precio (Practical Action, 2007).

En este estudio se buscó desarrollar un prototipo de secador, a base de gas, de bajos volúmenes para pequeños y medianos productores, tomando en consideración las características físicas de la cápsula, la demanda de presión del sistema y el aseguramiento de la calidad del producto final.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Las características físicas de las cápsulas son de gran importancia en el proceso de diseño de un secador, ya que por medio de estas se pueden elaborar modelos matemáticos que permiten estimar algunos parámetros del sistema. Por ejemplo, para poder seleccionar de manera adecuada un ventilador, es necesario conocer la caída de presión que se genera en una columna de cápsulas, a partir de su geometría, la porosidad, la altura de la columna y la velocidad del flujo del aire a través de esta.

### Caracterización de la cápsula (cardamomo cereza)

La caracterización del cardamomo cereza se realizó en julio de 2020, utilizando 25 cápsulas que se obtuvieron de un sitio de producción en el departamento de Alta Verapaz. Esta consistió en la medición de sus tres dimensiones: largo (L), ancho (W) y grosor (T), con el uso de un vernier digital marca Insize modelo 1108-300, la cual se realizó a temperatura ambiente, 48 horas después de cosechadas.

Una vez obtenidos los valores del largo, ancho y grosor de cada cápsula, se calculó el diámetro medio aritmético (DMA), el diámetro medio geométrico (DMG), el diámetro medio cuadrático (DMC), el diámetro equivalente (DEQ) y la esfericidad ( $\phi$ ).

Estos valores fueron calculados por medio de las siguientes ecuaciones (Mohsenin, 1986):

$$DMA = \frac{L + W + T}{3}$$

$$DMG = (LWT)^{1/3}$$

$$DMS = (LW + WT + TL)^{1/2}$$

$$DEQ = \frac{DMA + DMG + DMC}{3}$$

$$\Phi = \frac{(LWT)^{1/3}}{L}$$

### • Densidad real y aparente

El análisis de la densidad real y aparente se realizó con muestras de cardamomo cereza, que fueron conservadas en refrigeración por 48 horas, para evitar su descomposición. Se determinaron ambos parámetros para cápsulas con colilla y sin colilla.

Para el cálculo de la densidad aparente ( $\rho_b$ ) se pesaron  $40 \pm 0.9$  gramos de cápsulas, y se colocaron en una probeta de 250 mL (Kimble / Kimax 20025-H) para determinar el

volumen que ocupaban ( $V$ ). Este proceso se repitió cinco veces con grupos aleatorios de cápsulas, y se calculó a partir de la ecuación

$$\rho_b = \frac{M(g)}{V (mL)}$$

Para calcular la densidad real ( $\rho_t$ ), se determinó el volumen desplazado ( $V_d$ ) por una cápsula de cardamomo ( $M$ ). Se midió la masa de una cápsula de cardamomo en una balanza (Mettler-Toledo modelo ML3002T), y se colocó en una probeta de 25 mL (Kimble / Kimax 20025-H) con 10 mL de tolueno. Se determinó el volumen del fluido desplazado, para un total de 20 cápsulas. El cálculo se realizó por medio de la siguiente ecuación (Mohsenin, 1986):

$$\rho_t = \frac{M(g)}{V_d (mL)}$$

#### • Porosidad de la cápsula

La porosidad ( $\epsilon$ ) se calculó con los datos promedio de la densidad real y aparente, de la cápsula con colilla y sin colilla, con la siguiente fórmula (Mohsenin, 1986):

$$\epsilon = (1 - \frac{\rho_b}{\rho_t}) * 100$$

### Modelo presión del cardamomo

Existen diversos modelos teóricos y empíricos para poder relacionar la caída de presión ( $\Delta P$ ) con el flujo del aire. Por ejemplo, el modelo de Ergun (1952), el de Hukill e Ives (1955), el de Shedd (1953), entre otros. La diferencia entre ellos es la capacidad de obtener una aproximación utilizando únicamente datos teóricos o bien datos obtenidos por medio de experimentación. Uno de los modelos teóricos más conocidos es el modelo de Ergun, el cual se basa en principios de la dinámica de fluidos. Según Górnicki y Kaleta (2015), este modelo asume que la pérdida de presión se puede modelar como la suma pérdidas de energía viscosas y cinéticas. Para determinar el valor de presión generado por el cardamomo se utilizó el modelo de Ergun; este permitió obtener una estimación únicamente con datos teóricos y propiedades físicas de la cápsula.

Para obtener la caída de presión se utilizó el valor del diámetro equivalente (DEQ) y la porosidad ( $\epsilon$ ) de la cápsula, obtenidas en el proceso de caracterización para cápsulas con y sin colilla. Se realizaron dos modelos de caída de presión para cada escenario. Los valores teóricos del aire utilizados en el modelo fueron: viscosidad dinámica del aire ( $\mu$ )  $18.25 \times 10^{-6}$  Pa\*s y densidad del aire ( $\rho$ )  $1.2041$  (kg/m<sup>3</sup>). Ambos contemplados en condiciones de 1 atm y 20 °C. Finalmente,

el modelo se realizó en un rango de velocidades superficiales de flujo ( $V$ ) de 0 a 1.8 m/s.

### Modelo de Ergun

$$\Delta P = 150 \left( \frac{\mu(1-\epsilon)^2}{DEQ^2 * \epsilon^3} \right) V + 1.75 \left( \frac{\rho(1-\epsilon)}{DEQ * \epsilon^3} \right) V^2$$

### Prototipo de secador

El prototipo de secador se diseñó y construyó con la finalidad de brindar la posibilidad de secar lotes de cardamomo de varios agricultores, manteniendo los lotes individuales de 35 a 40 libras, y una capacidad máxima total de 500 libras.

A partir de los valores obtenidos en los parámetros físicos y la caída de presión se estimaron las dimensiones máximas de la cámara de secado, y los requisitos mínimos del ventilador.

El secador está compuesto por una cámara de secado, un sistema de ventilación y uno de calefacción. La construcción del prototipo final se realizó a través de empresas con experiencia en cada componente del sistema. Una empresa se encargó de fabricar la estructura del secador y sus bandejas, otra de proveer e instalar el sistema de calefacción y la tercera encargada de validar y proveer el ventilador industrial.

La cámara de secado se dividió en varios niveles, por medio de bandejas, con la finalidad de mantener la trazabilidad del cardamomo. Para la construcción de las bandejas se utilizó acero inoxidable calidad alimenticia, ya que estarán en contacto directo con las cápsulas, y serán expuestas a un medio húmedo y caliente. El diseño de la disposición de las bandejas se realizó de manera que formaran una torre, y existiera el mínimo espacio entre niveles, para reducir las fugas de aire caliente entre los costados. En total se cuenta con doce bandejas con una capacidad máxima aproximada de 40 libras.

Para el sistema de ventilación se utilizó un ventilador centrífugo de alto caudal y presión, dadas las dimensiones del secador y la altura de las capas de cápsulas de cardamomo en la totalidad de bandejas. En cuanto al calefactor del aire se evaluaron dos propuestas, quemadores de gas y resistencias eléctricas. Ambos sistemas tuvieron sus ventajas y desventajas, sin embargo, la decisión final fue la selección del quemador de gas.

### Ensayo de validación del prototipo

El último paso en el desarrollo del proyecto fue evaluar el funcionamiento del secador, y su capacidad de deshidratar cardamomo cereza a los requerimientos de humedad. El objetivo principal en estas evaluaciones fue determinar el tiempo de secado de cierta cantidad de masa de cápsulas



de cardamomo. Además, al ser un prototipo nuevo, fue de gran interés conocer el comportamiento en general del sistema. Por lo cual se evaluaron propiedades como la temperatura y humedad dentro de la cámara de secado, y la pérdida de masa de las cápsulas durante el proceso de secado.

Se realizaron cuatro pruebas, las primeras dos se llevaron a cabo con un total de 240 lb, la tercera con 360 lb y la última con 130 lb. Las masas anteriores son el total ingresado en la cámara de secado, dicho valor se distribuyó en doce bandejas del secador para las primeras tres pruebas. En la última prueba la masa se distribuyó únicamente en las primeras cinco bandejas, colocando 28 lb en las primeras cuatro bandejas y 18 lb en la quinta. Todas las pruebas mencionadas se llevaron a cabo en un ambiente bajo techo, en el campus central de la Universidad del Valle de Guatemala.

La metodología empleada fue la misma para todas las pruebas. El primer paso consistió en pesar la cantidad de masa deseada por bandeja. Una vez llenas las bandejas, se colocó una bitácora de registro de temperatura y humedad

sobre la capa de cardamomo. La bitácora utilizada fue la Log Tag modelo HAXO-8. A partir de la segunda prueba, se colocó una bitácora en el exterior del secador para registrar las condiciones del aire que ingresaba al sistema, y otra en la entrada de la cámara de secado, por debajo de la primera bandeja. Las bitácoras de registro fueron programadas para realizar mediciones cada 5 minutos.

Para poder registrar la pérdida de la humedad de las cápsulas, se colocaron 150 gramos de cardamomo dentro de una bolsa de malla de poliéster en cada bandeja. Esta masa aislada fue el grupo de control para evaluar la pérdida de masa de agua durante el proceso de secado. Para la medición de masa se utilizó una balanza Mettler-Toledo, modelo ML3002T con 0.01 gramos de exactitud. Luego de colocar las bitácoras y el grupo control en todas las bandejas se procedió a llenar el secador y encender el sistema de ventilación y calefacción. La temperatura máxima permitida durante el proceso fue de 60 °C. El muestreo de las masas de control se realizó en horas de la mañana y tarde, y se dejó sin toma de mediciones el lapso de 6:00 PM a 7:00 AM.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Propiedades físicas del cardamomo

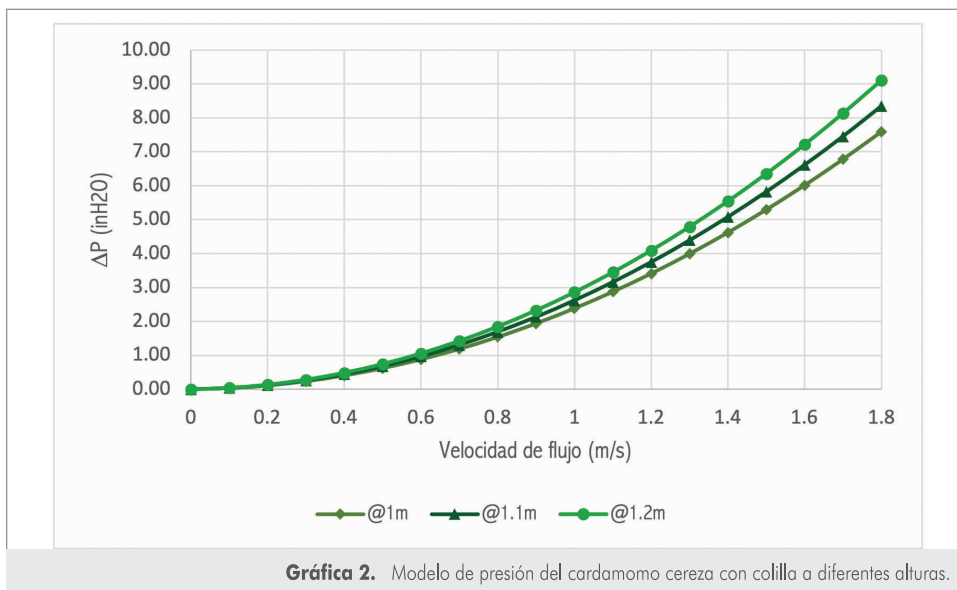
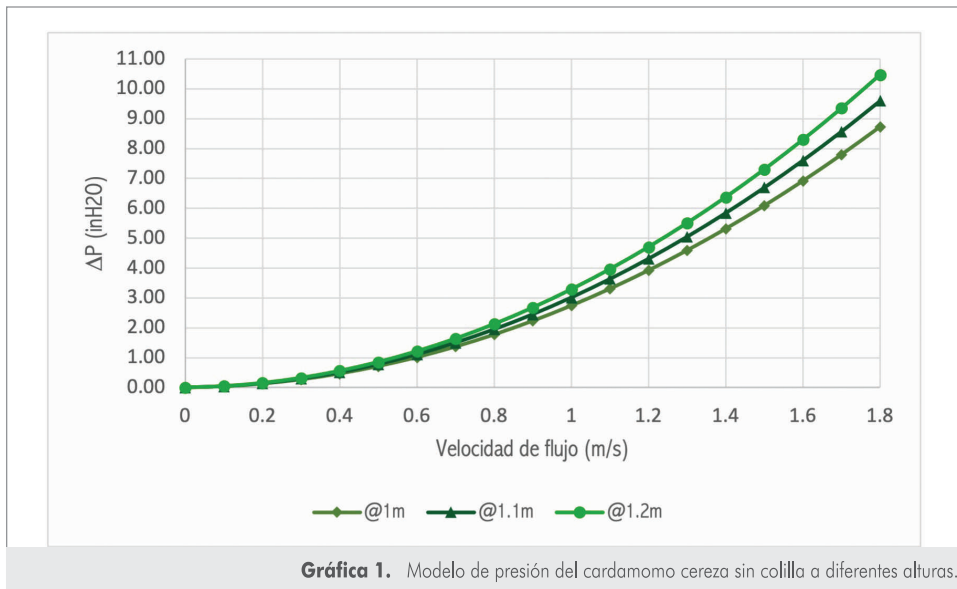
Las propiedades físicas del cardamomo se presentan en la Tabla 1. El largo, ancho y grosor promedio fue de  $22.61 \pm 1.31$  mm,  $14.85 \pm 0.95$  mm y  $13.54 \pm 1.18$  mm respectivamente. El valor promedio de los diámetros medio aritmético (DMA), geométrico (DMG), y cuadrático (DMC) fueron  $17.00 \pm 0.9$  mm,  $16.55 \pm 1.0$  mm y  $29.02 \pm 1.6$  mm respectivamente. El diámetro equivalente (DEQ) promedio y la esfericidad promedio fueron de  $20.86 \pm 1.2$  mm y  $0.73 \pm 0.04$ .

Respecto a la densidad real y aparente de las cápsulas los valores fueron para cardamomo con colilla de 0.78 g/mL y 0.41 g/mL, respectivamente, y para cardamomo sin colilla de 0.81 g/mL y 0.44 g/mL. De estos datos se observa que la presencia de la colilla en las cápsulas reduce las densidades del mismo. Este resultado se puede producir debido a que la colilla, es un parte con poca masa, pero su volumen si es considerable, por ende, al incrementar el volumen ocupado, pero no afectar su masa de manera drástica, la densidad se ve reducida en comparación a una cápsula sin la colilla. Este resultado fue relevante para el diseño del prototipo, ya que su dimensionamiento se llevó a cabo contemplando el escenario donde se requirió un volumen mayor para ocupar cierta cantidad de masa.

Finalmente se obtuvieron los valores de porosidad para el cardamomo con colilla (47.47%) y sin colilla (45.80%), donde se encontró que la colilla contribuye con la mejora del flujo del aire en el sistema, esto debido a que a medida que aumenta la porosidad la caída de presión se reduce.

**Tabla 1.** Propiedades físicas del cardamomo cereza.

Propiedades	Con colilla	Sin colilla
DMA (mm)	$17.00 \pm 0.9$	
DMG (mm)	$16.55 \pm 1.0$	
DMC (mm)	$29.02 \pm 1.6$	
DEQ (mm)	$20.86 \pm 1.2$	
Esfericidad	$0.73 \pm 0.0$	
Densidad aparente (g/mL)	$0.41 \pm 0.1$	$0.44 \pm 0.1$
Densidad real (g/mL)	$0.78 \pm 0.1$	$0.81 \pm 0.1$
Porosidad (%)	$47.47 \pm 7$	$45.80 \pm 6$

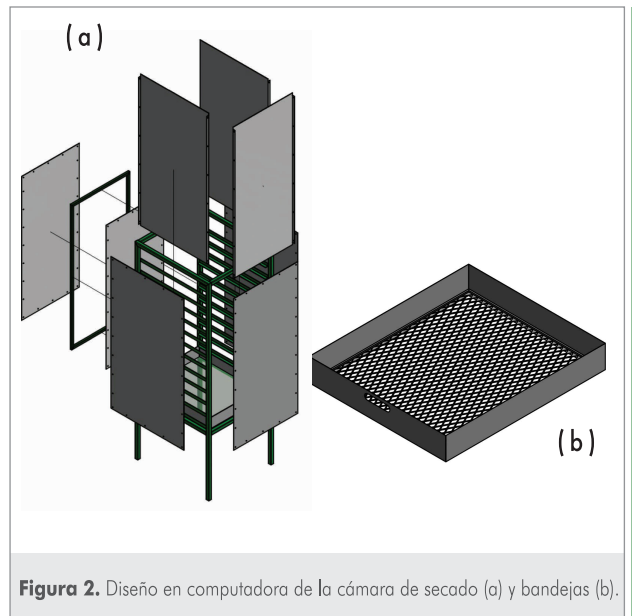
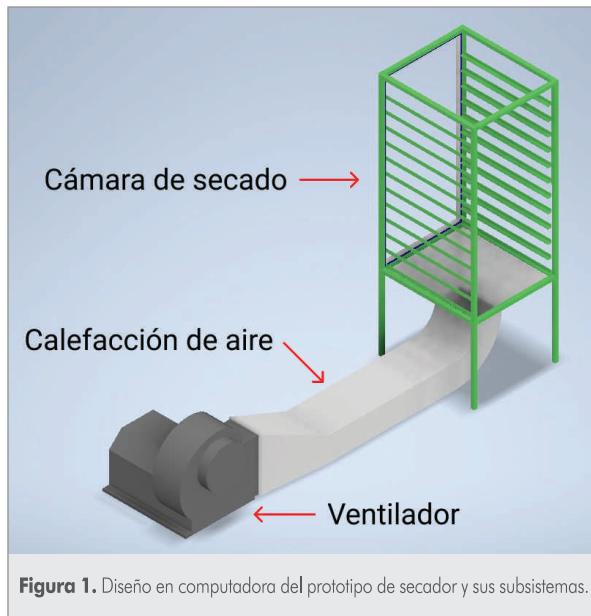


## Modelo presión del cardamomo

Los modelos teóricos de presión del cardamomo sin y con colilla se presentan en las gráficas 1 y 2. Se realizó el modelo para tres diferentes escenarios de altura de columna de cápsulas, desde 1 m hasta 1.2 m, con la finalidad de observar cuanto se incrementaba la presión requerida al sistema de ventilación. De los resultados presentados se pudo observar que en todos los escenarios el cardamomo sin colilla presenta valores de presión mayores a los del mismo con colilla. Esto se debe a que una columna con cápsulas sin colilla está más compactada por lo cual el flujo de aire se restringe más, generando así una mayor caída de presión.

También es importante observar que a medida que la velocidad del flujo de aire y la altura de la columna de cápsulas aumentan, el valor de la presión requerida se incrementa.

Por ende, para diseñar un secador eficaz es importante determinar una altura y un flujo de aire que permitan el secado de cápsulas sin requerir un ventilador sumamente especializado y caro. Con base en los resultados obtenidos de este modelo, se decidió que el secador propuesto tendría una altura máxima de 1.2 m de columna de cardamomo y operaría a una velocidad de flujo de aire de 1 m/s. Para obtener la presión requerida por el ventilador se utilizaron los datos del modelo del cardamomo sin colilla, ya que este presenta los valores más altos en cuanto a la presión requerida. Como se deseaba obtener un dato conservador y sobreestimado se utilizó este dato teórico más un porcentaje de incremento del 40%. Por lo cual la presión teórica contemplada fue de 3.29 pulgadas de agua (inH<sub>2</sub>O) y con el porcentaje de incremento el valor final fue 4.61 inH<sub>2</sub>O. Rango que diera holgura.



### Diseño del prototipo de secador

El prototipo final desarrollado se presenta en las figuras 1, 2 y 3. En la figura 1 se presenta el diseño general, generado en computadora, donde se visualizan los tres componentes principales, 1) Cámara de secado, 2) Cámara de calefacción de aire y 3). Ventilador

La cámara de secado está compuesta por una estructura, tipo clavijero, para sostener bandejas (figura 2a) y doce bandejas (figura 2b). Toda la cámara está recubierta por paneles aislantes para reducir la transferencia de energía térmica de la cámara hacia el ambiente. La máxima cantidad de masa que se puede secar es de 500 libras, distribuidas en un total de 12 bandejas.

La altura total de las bandejas fue de 1.2 m, y cada bandeja tiene 70 cm x 60 cm x 10 cm (largo, ancho y alto). La capacidad máxima aproximada de cardamomo por bandeja es de de 41.6 lb, lo cual es una cantidad adecuada para el manejo de la carga máxima permitida para adultos, tanto hombres como mujeres.

En cuanto al sistema de calefacción se evaluó el uso de quemador de gas, así como de resistencias eléctricas. Sin embargo, estas últimas fueron descartadas debido a su alto costo de operación y restricciones técnicas en el sistema eléctrico del secador. El sistema de gas utilizado cuenta con un sistema de control de temperatura, figura 3c, el cual permite mantener el sistema en operación de manera

autónoma, y evitar picos de temperatura durante el proceso de secado. El quemador de gas utilizado fue de tipo vena, cuyas características ayudan a reducir la cantidad de gas utilizado durante el proceso y mejorar la combustión del gas.

Finalmente, para el sistema de ventilación, se utilizó un ventilador de alta presión y caudal, para poder satisfacer las demandas del sistema de 890 CFM y 4.61 inH<sub>2</sub>O. El ventilador seleccionado fue el modelo CMI-315 de la marca Soler y Palau. Dicho ventilador fue de tipo eléctrico con la finalidad de reducir contaminación sonora en el ambiente en que opera el secador; así como también eliminar la contaminación ambiental producida por los gases de escape de motores diesel.

## Evaluación del secador

Los resultados de las pruebas de secado se presentan en las gráficas 3 a 5. En ellas se hace referencia a la prueba 1 a 4 (a-d) y el orden de las bandejas es de la 1 a la 12, de forma ascendente. De manera que la bandeja 1, que se encuentra en el nivel más bajo de la cámara de secado, es la más próxima a la entrada de aire caliente. Las pruebas fueron realizadas en diferentes horarios y fechas, según se detalla a continuación: La prueba A tuvo una duración de 24 horas, iniciando el 16 de febrero de 2021 a las 11:00 horas y concluyendo al día siguiente en el mismo horario. La prueba, B, se realizó el 17 de febrero a partir de las 15:30 horas y concluyó al día siguiente a las 11:30 horas, con una duración de 21 horas. La prueba C, tuvo una duración de 29 horas, dando inicio el 23 de febrero de 2021 a las 12:30 horas y concluyó al siguiente día a las 17:00 horas. Finalmente, la prueba D se realizó del 24 de febrero, dando inicio a las 18:00 horas, concluyendo al día siguiente a las 12:00 horas. Respecto a la humedad de las cápsulas, al inicio de cada prueba fue de 80.6% en la prueba A, 78.6% en la prueba B, 85.2% en la prueba C y 82.1% en la prueba D.

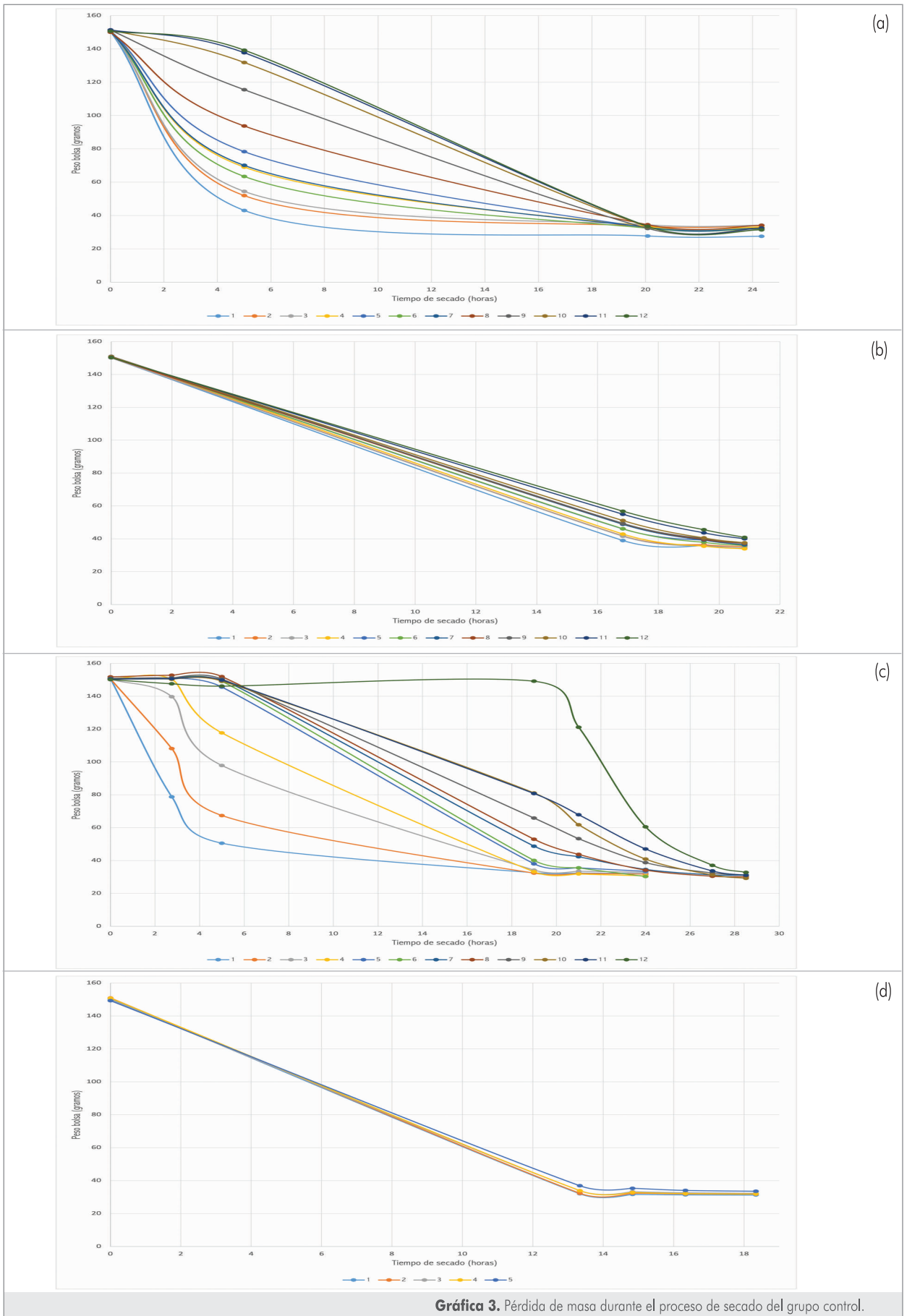
En la gráfica 3 se observa el comportamiento de la pérdida de peso, de las cápsulas de cardamomo, colocadas dentro de las bolsas de malla de poliéster. Las primeras pruebas de 240 libras demuestran que luego de 20 horas las cápsulas perdieron entre un 70% y 80% de masa de agua en todas las bandejas. Sin embargo, resulta importante destacar que en tan solo 5 horas, en las primeras 3 bandejas se extrae cerca del 66% de masa de agua. El comportamiento de la disminución de pesos resulta ser un comportamiento esperado, ya que como se observa en todas las pruebas de la gráfica 3, las reducciones en la masa de agua se producen de manera ordenada desde la parte baja hacia la parte superior. Esto se debe a que la humedad retirada en las primeras bandejas se traslada hacia los niveles superiores, por lo que las bandejas superiores llegan incluso a ganar masa de agua como se observa en la gráfica 3c. En dicha gráfica existe un periodo de tiempo en el que la bandeja superior (12) llega a ganar más masa de la que tenía inicialmente, debido a la saturación de humedad de las bandejas inferiores. Sin embargo, a pesar

de esta saturación de humedad se observó que la calidad del color del cardamomo no se afectó o degradó de manera perceptible. En cuanto a la prueba con mayor cantidad de masa utilizada (360 lb) se puede observar en la gráfica 3c que el tiempo que le toma al secador en llevar las últimas 6 bandejas a una masa de 30 g (17% humedad) fue de 29 horas, lo cual son 8 horas más que con las pruebas de 240 lb. En esta prueba se implementó una rotación de bandejas, en la cual luego de 24 horas se extrajeron las primeras 6 bandejas inferiores y las superiores se colocaron en los niveles inferiores libres. Sin embargo, no se puede concluir en que grado contribuyó esta rotación a la eficiencia del proceso. Se observó un mejor resultado en la eficiencia del tiempo del proceso al reducir la altura de la columna. Aunque la prueba duró 18 horas 30 minutos, los pesos llegaron a un punto estable de pérdida de humedad a las 16 horas 30 minutos (gráfica 3d). Se puede atribuir esta reducción de tiempo a que la cantidad de masa era menor. No obstante, la reducción de niveles superiores que obstaculizan el descarte de la humedad al ambiente también fue un factor importante.

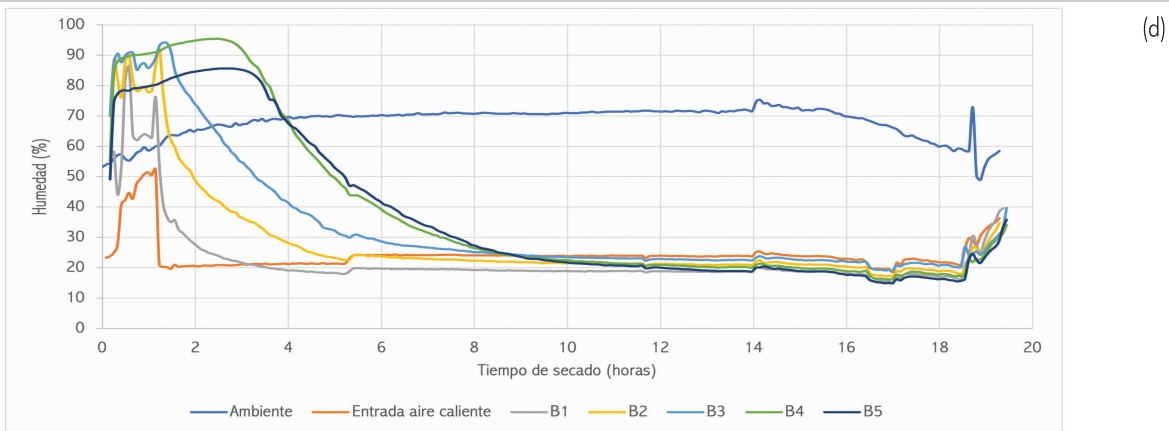
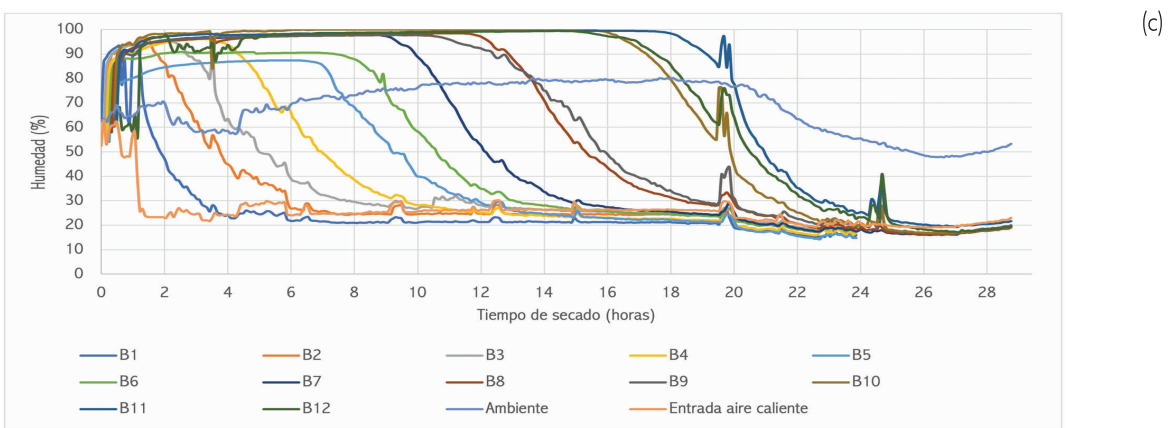
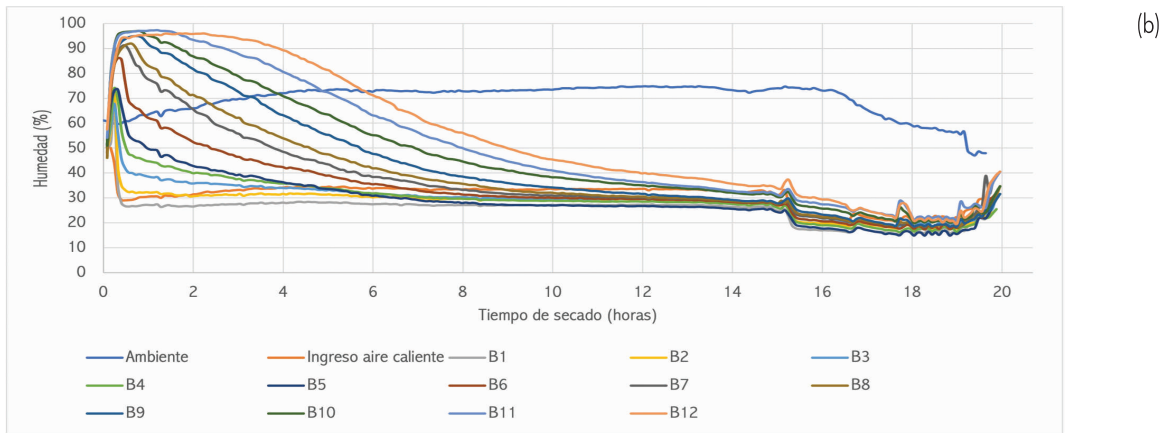
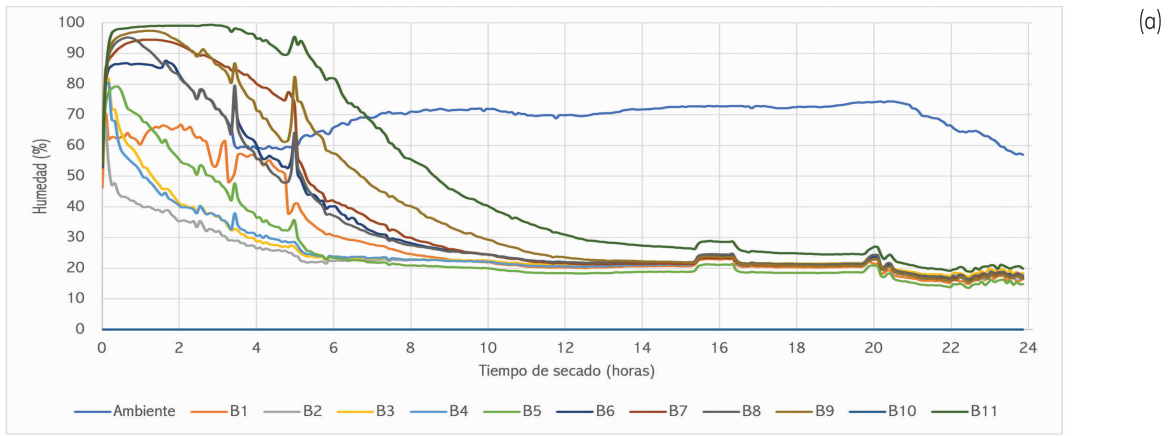
En las gráficas 4 y 5 se muestran los datos de temperaturas y humedades de las bandejas respectivamente. De estas gráficas se pudo observar un comportamiento similar en todas las pruebas. En las humedades se observó que las 6 bandejas superiores tienden a saturarse durante las primeras etapas del proceso. Lo cual tiene concordancia con lo observado en los pesos de las cápsulas, ya que se notó que la humedad perdida en las bandejas inferiores se traslada a los niveles superiores. Sin embargo, en la prueba 3 (gráfica 4c) se observa que el tiempo de saturación de humedad se incrementa de manera considerable. Esto se debe a que la cantidad de masa utilizada por bandeja fue mayor a las demás pruebas. Lo contrario se observa en la gráfica 4d, en donde a pesar de que las bandejas tenían únicamente 2 lb menos que en la prueba 3 (gráfica 4c), las humedades saturadas se reducen en un tiempo más corto. Lo cual respalda que disminuir la altura de la columna de cardamomo puede ser beneficioso para reducir los tiempos de secado.

En cuanto a los datos de las temperaturas se observó que a medida que la bandeja se encuentra en un nivel superior, el tiempo en llegar a la temperatura control (entrada de aire caliente) aumenta. Es decir que la pendiente de la curva de temperatura es menos pronunciada en las bandejas superiores. De manera que el incremento lento de temperatura en dichas bandejas explica por qué la humedad aumenta y se tarda más en reducir su valor. A pesar de las variaciones en las primeras etapas del proceso, se pudo observar que tanto las temperaturas como las humedades convergían en un valor muy similar en todos los niveles. Con estas observaciones y la cercanía en los valores de las masas registradas, se validó el funcionamiento del prototipo. Ya que, aunque las bandejas superiores demoraran mayor tiempo en converger al mismo valor de humedad, temperatura y masa; en todas las pruebas se logró llegar a un punto similar con poca variación.

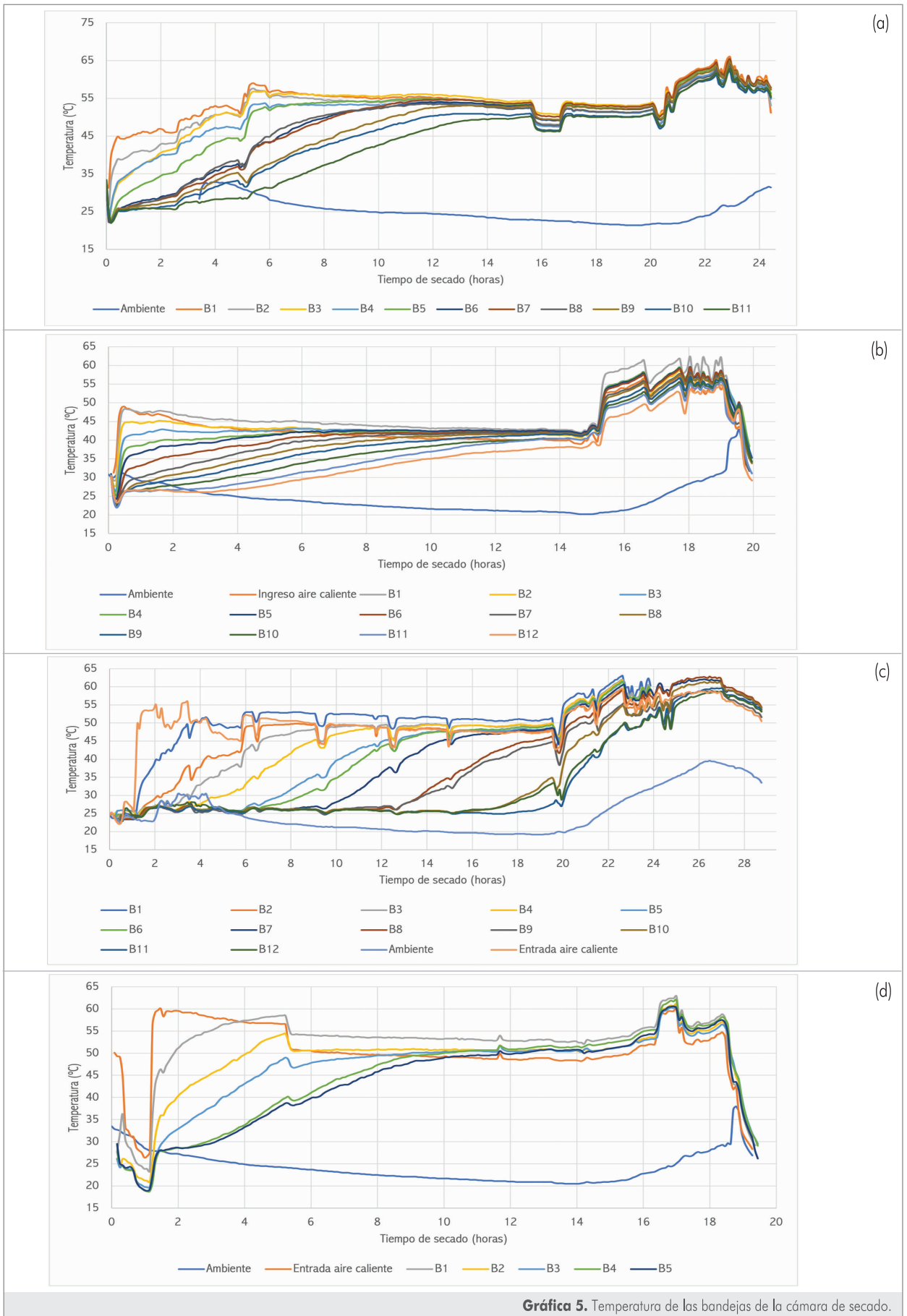




Gráfica 3. Pérdida de masa durante el proceso de secado del grupo control.



Gráfica 4. Humedad de las bandejas en la cámara de secado.



Gráfica 5. Temperatura de las bandejas de la cámara de secado.

## CONCLUSIONES

- El prototipo desarrollado fue capaz de secar con éxito hasta 360 lb de cardamomo cereza, logrando reducir la humedad inicial de 85% a menos de 10%, en 29 horas.
- El prototipo fue capaz de reducir la masa de agua de las cápsulas en un promedio de 77.9%, reduciendo la masa de agua en un promedio de 78%.
- Se determinó teóricamente una columna de cardamomo cereza de 1.2 m produce una caída de presión de 3.29 inH<sub>2</sub>O.
- Se observó que reducir la altura de la columna de cápsulas ayuda a reducir el tiempo del proceso de secado, por lo cual se sugiere evaluar un nuevo diseño para apilar las bandejas.
- El prototipo posee características útiles para los centros de acopio o cooperativas en donde convergen pequeños y medianos productores, ya que fue capaz de secar hasta 360 lb de forma modular, garantizando la trazabilidad y manteniendo espacios pequeños de secado para diversos usuarios.

## RECOMENDACIONES

A pesar del funcionamiento exitoso del prototipo se evidenciaron algunos puntos de mejora. Debe de evaluarse reducir la altura de la cámara de secado a la mitad, dejando dos columnas de 6 bandejas, de manera que se puedan reducir los tiempos del proceso de secado de manera considerable. También se recomienda que se analicen muestras

del cardamomo pergamino para determinar si existen contaminantes y residuos de la combustión, ya que en el presente proyecto no fue posible realizar dichos estudios, y son relevantes para poder garantizar la inocuidad del cardamomo pergamino.

## AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue desarrollado como parte del proyecto Programa integral para el incremento de la calidad, productividad y sostenibilidad del sistema CARDAMOMO en el norte de Guatemala y fue ejecutado gracias al apoyo financiero del Departamento de Agricultura de

los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés).

Al Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, por todo el apoyo, acompañamiento y seguimiento brindado durante la ejecución de este estudio.

## BIBLIOGRAFÍA

- Colmenares, A; Morales, M. (2021) *Evaluación del sistema de secado tradicional de cardamomo en dos comunidades de la región norte de Guatemala* Revista de la Universidad del Valle de Guatemala 41: 171-178.
- Ergun, S. (1952) *Fluid flow through packed columns* Chemical Engineering Progress 48(2): 89-94.
- Górnicki, K; Kaleta, A. (2015) *Resistance of bulk grain to airflow - a review. Part I: Equations for airflow resistance* Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW, Agriculture (Agricultural and Forest Engineering) 65: 31-41.
- Hukill, W. V.; Ives, N. C. (1955) *Radial airflow resistance of grains* Agricultural Engineering 35(5): 332-335.
- Khura, T. K. et al (2013) *Physical properties of large cardamom cultivated in north eastern Himalayan region of Sikkim, India* Agricultural Engineering International: CIGR Journal 15(4): 194-201.
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA) (2016) *El Agro en Cifras Primera Edición Anual, Guatemala.*
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA) (2014) *Perfil Comercial Cardamomo* Recuperado de: <https://www.maga.gob.gt/download/Perfil%20cardamomo.pdf>
- Mohsenin, N.N. (1986) *Physical properties of plant animal material - II.* Gordon and Breach Science Publishers, Nueva York, Estados Unidos de América.
- Oficina Comercial de España en Guatemala (ICEX) (2020) *Informe económico y comercial. Guatemala 2020, Guatemala.*
- Practical Action (2007) *Cardamom Processing* Practical Action Publishing, Rugby, Reino Unido.
- Wellmann, W. L. (2015) *Estudio para mejorar el diseño de secadoras para cardamomo* Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Shedd, C. K. (1953) *Resistance of grains and seeds to air flow* Agricultural Engineering 34(9): 616-619.