



**CRIA**

**Programa Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria**



**CRIA Norte**

**Cadena de Cardamomo**

**Desarrollo e innovación tecnológica-mecánica en el deshidratado eficiente del cardamomo en Alta Verapaz, para el incremento de la productividad rural**

*Investigador principal:*

*Dr. Sc. Gustavo Adolfo García Macz Ph. D.*

*Investigador auxiliar:*

*Erik Ronaldo Colman Leal*

Cobán Alta Verapaz, noviembre de 2021



**CRIA**

**Programa Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria**





**CRIA**

**Programa Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria**



## **INSTITUTO TECNOLÓGICO MAYA DE ESTUDIOS SUPERIORES**

Unidad Académica No. 31 de la Universidad de San Carlos de Guatemala

### **Administración y ejecución (CRIA – IICA)**

Programa Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura

Inga. María Febres, coordinadora de programa

Inga. Claudia Lucía Calderón, monitoreo y evaluación

### **Equipo de Investigación**

Investigador principal:

Dr. Sc. Gustavo Adolfo García Macz Ph. D

ITMES

Investigador auxiliar:

Erik Ronaldo Colman Leal

ITMES

### **Empresas y Cooperativas productores de Cardamomo, participantes en el estudio**

Productos esenciales de la montaña S.A -FRUMOSA-Cobán A.V.

FEDEAGRO servicios el amigo S.A. Aldea Cubilguitz.

Cooperativa Integral agrícola Chipolem Chiyó RL., Aldea Chiyó San Pedro Carchá.

Asesoría y Soluciones: Diseño y Construcción de los prototipos, Cobán Alta Verapaz.

Federación de Cooperativas de las Verapaces –FEDECOVERA- Cobán A.V.



**CRIA**

**Programa Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria**





**CRIA**

**Programa Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria**



Este proyecto fue ejecutado gracias al apoyo financiero del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés). El contenido de ésta publicación es responsabilidad de su(s) autor(es) y de la institución(es) a las que pertenecen. La mención de empresas o productos comerciales no implica la aprobación o preferencia sobre otros de naturaleza similar que no se mencionan.



**CRIA**

**Programa Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria**





**CRIA**

**Programa Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria**



## **Desarrollo e innovación tecnológica-mecánica en el deshidratado eficiente del cardamomo en Alta Verapaz, para el incremento de la productividad rural**

*Dr. Sc. Gustavo Adolfo García Macz Ph. D.<sup>1</sup>*

*Erik Ronaldo Colman Leal<sup>2</sup>*

### **RESUMEN**

De acuerdo con estadísticas del Banco Central de Guatemala, desde el año 2012 la producción e ingresos por exportación de cardamomo (*Elettaria cardamomum*; L. Maton) en Guatemala ha incrementado progresivamente alcanzando un valor aproximado de US \$789.95 millones en 2020<sup>3</sup>. Pese a este crecimiento Villatoro<sup>4</sup> indica que durante el mismo periodo se observaron reducciones en su valor comercial por disminución de la calidad de las capsulas de cardamomo principalmente debido al impacto de la plaga trips (*Sciothrips cardamomi*) y a prácticas incorrectas de manejo del cultivo, problemas para los cuales ya se cuenta con soluciones que se están implementando. También indica que parte de la disminución de calidad se deriva del proceso de deshidratado al que se someten las capsulas de cardamomo.

El presente estudio plantea modificar el diseño del equipo de deshidratación de cardamomo utilizado en la actualidad con el objetivo de reducir la pérdida de calidad de las capsulas de cardamomo relacionadas con el proceso de deshidratado y medida en base al porcentaje de cardamomo de primera y segunda calidad que se obtiene tras dicho proceso e incrementar la eco-eficiencia del mismo.

---

<sup>1</sup> Investigador principal, doctorado en ciencias naturales para el desarrollo, maestro en ciencias del desarrollo e ingeniero Agrónomo.

<sup>2</sup> Investigador auxiliar.

<sup>3</sup> Estadísticas del banco central de Guatemala; [www.banguat.gob.gt](http://www.banguat.gob.gt).

<sup>4</sup> Entrevista con: Ing. Agr. Juan Villatoro, FEDECOVERA.



**CRIA**

**Programa Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria**



Debido al elevado costo del cardamomo y al riesgo económico de experimentar con él se limitó el estudio a la ejecución de 16 corridas experimentales en las que se recopilaron datos de dos tratamientos (prototipo A y prototipo B con algunas diferencias de diseño entre sí) y un testigo (C, equipo de uso actual). En los prototipos se implementó un sistema de control electrónico de temperatura reduciendo su oscilación a un rango de  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  al utilizar gas licuado de petróleo (GLP,  $\text{C}_3\text{H}_8$ ) como fuente de energía calorífica mientras que el testigo presentó oscilaciones de  $\pm 15^{\circ}\text{C}$  debido a que genera su energía calorífica por la combustión de leña. El uso de GLP y el control electrónico de temperatura permiten una mayor eco-eficiencia coadyuvando a la ecología industrial del proceso de deshidratado puesto que el proceso de combustión en el equipo testigo es incapaz de aprovechar el 79.78% del poder calorífico contenido en la leña<sup>5</sup> y esto sin considerar el impacto ambiental que conlleva la deforestación causada para producirla.

Comparando el porcentaje de capsulas de cardamomo de primera y segunda calidad obtenidas tras el proceso de deshidratación se concluye que:

Los resultados observados entre ambos prototipos, siendo la única distinción entre ellos el diseño estructural de la pila de secado, fueron ligera y consistentemente superiores en el prototipo B. Sin embargo, esta diferencia no es significativa

Los resultados de los prototipos difieren significativamente<sup>6</sup> con los del testigo obteniéndose un porcentaje de cardamomo 2.3 y 1.21 veces mayor en cuanto a las capsulas de primera y segunda calidad respectivamente.

En una segunda fase del proyecto se construyó un equipo con capacidad productiva de 4,525 Kg de cardamomo por lote el cual fue capaz de reducir el tiempo de deshidratado en un

---

<sup>5</sup> Basado en el poder calorífico de la leña de encino según el Instituto Nacional de Bosques (INAB)

<sup>6</sup> La diferencia se considera significativa pues el valor  $p < 0.05$ ;  $p = 0.007$



**CRIA**

**Programa Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria**



25% y entregar 1.57 veces más cardamomo de primera que su contraparte de uso actual operada a base de leña<sup>7</sup>.

Palabras clave: Cardamomo, deshidratación, calidad, eco-eficiencia, ecología industrial

## **ABSTRACT**

According to statistics from the Central Bank of Guatemala, since the year 2012 the production and income generated by the exportation of cardamom (*Elettaria cardamomum*; (L.) Maton) in Guatemala has progressively increased reaching a value of approximately US \$789.95 millions in 2020<sup>8</sup>. In spite of this growth Villatoro<sup>9</sup> indicates that during the same period reductions in its commercial value were observed by decrease in quality of the cardamom capsules primarily due to the trips (*Sciothrips cardamomi*) plague impact and to incorrect practices of crop management, problems for which solutions are already available that are being implemented. He also indicates that part of the decrease in quality is derived from the dehydration process to which the cardamom capsules are subjected.

The present study proposes modifying the design of the cardamom dehydration equipment currently used in order to reduce the loss of quality of the cardamom capsules related to the dehydration process and measured based on the percentage of first and second quality cardamom obtained after said process and increase its eco-efficiency.

Due to the high cost of cardamom and the economic risk of experimenting with it, the study was limited to the execution of 16 experimental runs in which data from two treatments (prototype A and prototype B with some design differences between them) and a control (C, current equipment). An electronic temperature control system was implemented in the prototypes, reducing its oscillation to a range of +/- 5 ° C when using liquefied petroleum gas (LPG, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) as a source of heat energy, while the control (C) presented oscillations of +/- 15

<sup>7</sup> Datos generados en el estudio por la comparativa entre prototipos y testigo.

<sup>8</sup> Statistics from Guatemala's Central Bank; [www.banguat.gob.gt](http://www.banguat.gob.gt).

<sup>9</sup> Interview with: Agr. Juan Villatoro, FEDECOVERA.



**CRIA**

**Programa Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria**



° C due to the fact that it generates its heat energy from the combustion of firewood. The use of LPG and electronic temperature control allow greater eco-efficiency, contributing to the industrial ecology of the dehydration process since the combustion process in the control equipment is unable to take advantage of 79.78% of the calorific power contained in firewood<sup>10</sup> and this without considering the environmental impact that the deforestation caused to produce it entails.

Comparing the percentage of first and second quality cardamom capsules obtained after the dehydration process, it is concluded that:

The results observed between both prototypes, the only distinction between them being the structural design of the drying pile, were slightly and consistently superior in prototype B. However, this difference is not significant.<sup>11</sup>

The results of the prototypes differ significantly<sup>12</sup> with those of the control, obtaining a percentage of cardamom 2.3 and 1.21 times higher in terms of the first and second quality capsules respectively.

In a second phase of the project, an equipment with a production capacity of 4,525 Kg of cardamom per batch was built, which was able to reduce dehydration time by 25% and deliver 1.57 times more first-rate cardamom than its currently used counterpart operated with firewood.<sup>13</sup>

Key words: Cardamom, dehydration, quality, eco-efficiency, industrial ecology.

---

<sup>10</sup> Based of the calorific power from oak firewood according to the National Institute of forest (INAB by its acronym in spanish)

<sup>11</sup> These results are not considered statistically significant since the p-value > 0.05

<sup>12</sup> The difference is considered significant because the value  $p < 0.05$ ;  $p = 0.007$

<sup>13</sup> Data generated in the study by the comparison between prototypes and control.



**CONTENIDO**

1.	Introducción	1
1.1	Identificación Del Problema	2
1.2	Justificación	5
2.	Marco Teórico	7
2.1	Generalidades Del Cultivo	7
2.2	Generalidades De Producción	8
2.3	Generalidades De Transformación	9
	2.3.1 <i>La deshidratación como Operación Unitaria:</i> .....	9
	2.3.2 <i>Proceso de Deshidratación del cardamomo.</i> .....	10
	2.3.3 <i>Tecnología Actual</i>	13
2.4	Generalidades De Comercialización Y Economía	16
3.	Objetivos	21
3.1	General	21
3.2	Específicos	21
4.	Hipótesis	21
5.	Metodología	22
5.1	Localidad Y Época	22
5.2	Tratamientos	22
	5.2.1 <i>Tratamiento 1 – Prototipo A</i> .....	22
	5.2.2 <i>Tratamiento 2 – Prototipo B</i> .....	23
	5.2.3 <i>Tratamiento 3 – Testigo o Tratamiento C</i> .....	25
	5.2.4 <i>Los intercambiadores de calor para los prototipos A y B</i> .....	27
5.3	Diseño Experimental	27
5.4	Tamaño De La Unidad Experimental	29
5.5	Modelo Estadístico	29
5.6	Variables	30
	5.6.1 <i>Variables De Respuesta</i> .....	30
	5.6.2 <i>Variable Independiente</i> .....	30
	5.6.3 <i>Variables Secundarias</i> .....	30
	5.6.4 <i>Variables Controladas</i> .....	31
5.7	Análisis De La Información	32
	5.7.1 <i>Respecto al control de temperatura:</i> .....	33
5.8	Manejo Del Experimento	33
	5.8.1 <i>En cuanto a las unidades experimentales</i> .....	33
	5.8.2 <i>En cuanto al proceso de deshidratación y registro de datos</i> .....	34



**CRIA**

# **Programa Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria**



6.	Resultados	35
6.1	Datos Recolectados	35
6.2	Duración Del Proceso	35
6.3	rendimiento Del Producto Pos-procesado	40
6.4	Porcentaje De Cardamomo De Primera Calidad	43
6.5	Porcentaje De Cardamomo De Segunda Calidad	47
6.6	Costo De Operación	51
6.7	Control Sobre La Regulación De Temperatura	54
7.	Objetivos De La Segunda Fase	57
7.1	General	57
7.2	Específicos	57
8.	Metodología De La Segunda Fase	57
8.1	localidad Y Época	57
8.2	Cambios De Diseño En Relación A Los Prototipos	58
8.3	Costo Estimado De Fabricación	58
8.4	Equipo Terminado	59
8.5	Datos Recopilados Del Funcionamiento	59
8.6	Consumo De Gas Propano	61
8.7	Calidad Del Producto Deshidratado	61
9.	Conclusiones	71
10.	Recomendaciones	75
	Referencias	77
9	Anexos	79
9.1	Costo de materiales utilizados para la fabricación del tratamiento A	79
9.2	Costo de materiales utilizados para la fabricación del tratamiento B	80

## **INDICE DE FIGURAS, ILUSTRACIONES, FOTOGRAFÍAS Y TABLAS**

Figura 1.	Diagrama general del proceso de beneficiado de cardamomo.	12
Ilustración 1.	Deshidratador de pila circular, diseño utilizado en la actualidad.	14
Ilustración 2.	Tratamiento 1 correspondiente al prototipo A.	23
Fotografía 1.	Tratamiento 1, prototipo A.	23
Ilustración 3.	Tratamiento 2, prototipo B.	24



**CRIA**

**Programa Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria**



Fotografía 2. Tratamiento 2, prototipo B.	24
Ilustración 4. Tratamiento 3, testigo C.	26
Fotografía 3. Tratamiento 3, testigo C.	26
Ilustración 5. Intercambiador de calor implementado en los prototipos A y B.	27
Ilustración 6. Ejemplificación de tratamientos experimentales, cada tratamiento corresponde a un equipo distinto de deshidratado.	28
Tabla 1 Ejemplificación del diseño experimental.	28
Tabla 2. Estadísticas Descriptivas de la variable "Duración del Proceso" en los tres tratamientos.	35
Figura 2. Gráfico de cajas comparativa de la duración del proceso - tratamiento.	36
Tabla 3. Prueba ANOVA de la variable "Duración del proceso".	36
Tabla 4. Homogeneidad de varianzas de Levene para la "Duración del proceso".	37
Figura 3. Gráfica tipo Q-Q de la variable "Duración del proceso".	38
Tabla 5. Resumen de estadísticas descriptivas para la variable "Duración del proceso".	38
Tabla 6. Comparación a posteriori entre tratamientos- variable "Duración del proceso".	39
Figura 4. Duración del proceso vs Prototipo/Tratamiento.	39
Tabla 7. Estadísticas descriptivas de la variable "Rendimiento" para los tres tratamientos.	40
Figura 5. Gráfico de Cajas, comparación de rendimiento entre tratamientos.	41
Tabla 8. Prueba ANOVA para la variable "Rendimiento".	41
Tabla 9. Homogeneidad de varianza de Levene para la variable Rendimiento.	42
Figura 6. Gráfico tipo Q-Q de la variable "Rendimiento".	42
Tabla 10. Resumen de estadísticas descriptivas para la variable Rendimiento.	43
Tabla 11. Estadística descriptiva de la variable "Porcentaje de producto de primera calidad" obtenida en los tratamientos.	44
Figura 7. Gráfico de cajas comparativas del porcentaje de cardamomo de primera calidad obtenido entre tratamientos.	44



**CRIA**

# **Programa Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria**



Tabla 12. Prueba ANOVA aplicada a la variable "Porcentaje de cardamomo de primera calidad".	45
Tabla 13. Homogeneidad de varianza de la variable "Porcentaje de cardamomo de primera calidad".	45
Figura 8. Distribución de datos de la variable "Porcentaje de cardamomo de primera calidad".	46
Tabla 14. Comparativa a posteriori del porcentaje de cardamomo de primera calidad.	46
Figura 9. Porcentaje de cardamomo de primera calidad vs Tratamiento.	47
Tabla 15. Estadística descriptiva de la variable "Porcentaje de cardamomo de segunda calidad".	47
Figura 20. Gráfico de cajas del Porcentaje de cardamomo de segunda calidad vs Prototipo/Tratamiento.	48
Tabla 16. Prueba ANOVA para el Porcentaje de cardamomo de segunda calidad.	49
Tabla 17. Homogeneidad de varianza en la variable "Porcentaje de cardamomo de segunda calidad".	49
Figura 3. Distribución de datos de la variable Porcentaje de cardamomo de segunda calidad.	49
Tabla 18. Comparativa a posteriori del porcentaje de cardamomo de segunda calidad entre tratamientos.	50
Figura 14. Porcentaje de cardamomo de segunda calidad vs Tratamiento.	50
Tabla 19. Estadística descriptiva del costo de operación en cada tratamiento.	51
Figura 5. Gráfico de cajas - Costo de operación vs Tratamiento/Prototipo.	52
Tabla 20. Prueba ANOVA para el costo de operación de los tratamientos.	52
Tabla 21. Prueba a posteriori del costo de operación en los tres tratamientos.	53
Figura 6. Gráfica de caja del costo de operación por tratamiento.	53
Tabla 22. Consumo promedio por tipo de combustible.	54
Figura 14. Gráfica de control de la oscilación de temperatura, Prototipos vs Testigo.	54



**CRIA**

**Programa Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria**



Fotografía 4. Equipo con capacidad de 4,425 Kg, recámara de deshidratado cerrada.	59
Fotografía 5. Equipo con capacidad de 4,435 Kg, recámara de deshidratado abierta.	59
Tabla 23. Datos de la corrida de prueba del Equipo con capacidad de 4,435 Kg.	60
Figura 15. Gráfica de control de la oscilación de temperatura.	61
Fotografía 6. Deshidratador de chile Cahabonero con 270kg de capacidad	68
Fotografía 7. Deshidratador de chile Cahabonero, sistema de bandejas	69

## SIGLAS Y ACRÓNIMOS

**AGEXPORT** = Asociación Guatemalteca de Exportadores.

**BANGUAT** = Banco Central de Guatemala.

**CRIA** = Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria.

**FEDEAGRO** = Federación Nacional de Asociaciones de Productores Agropecuarios.

**FRUMOSA** = FRUTOS ESENCIALES DE LA MONTAÑA S.A.

**GLP** = Gas licuado de petróleo.

**HP** = Horse power (Caballos de Fuerza).

**Hz.** = Hertzios.

**IICA** = Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.

**Kcal** = una kilocaloría es una unidad de energía térmica y equivale a mil calorías o 4.184 Kj.

**Kg** = Kilogramo.

**Kj** = kilojulio, unidad del sistema internacional utilizada para medir energía, trabajo y calor equivale a mil julios.

**MAGA** = Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación.

**rpm** = Revoluciones por minuto.

**USDA** = Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, por sus siglas en ingles.

**V** = Voltios.



**CRIA**

**Programa Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria**





**CRIA**

**Programa Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria**



Representación Guatemala

1

## 1. Introducción

De acuerdo con la Asociación Guatemalteca de Exportadores (AGEXPORT) (2018) en un estudio sobre la importancia economía del cardamomo en Guatemala, el cultivo y exportación de este producto impacta directamente la economía de unas 350 mil familias en 2,600 comunidades al norte y oriente del país, el 86.6% de la producción de cardamomo proviene de Alta Verapaz.

Eguizábal (2017) indica que el cardamomo es un cultivo no tradicional que destaca en ciertos microclimas del país, especialmente en el corredor geográfico donde se produce que va desde: parte del departamento de Izabal, Alta y Baja Verapaz y Chicaman en Quiché hasta Barillas Huehuetenango.

Para AGEXPORT (2018) su importancia económica es notable, en 2016 aportó más de US\$229 millones ocupando el quinto lugar de aporte de divisas para el país. Sin embargo, para Eguizábal (2017) y Espinoza H., et al. (2016) a partir del 2012 la calidad del cardamomo cultivado se redujo en más de 30% tanto por factores propios de la etapa de cultivo como la de transformación.

Respecto a la etapa de transformación la deshidratación de las capsulas de cardamomo es un eslabón muy importante en la cadena de valor agregado, consiste en circular aire caliente alrededor de las capsulas que son dispuestas en pilas de deshidratación; que no son más que recamaras metálicas que facilitan la circulación de aire de deshidratado con el propósito de reducir la humedad relativa contenida en estas capsulas; en un proceso que según Castro (2015) dura entre 40 y 48 horas y cuyo éxito depende de la experiencia y atención de operarios humanos. Por lo se evidencia la oportunidad de estandarizar el control del proceso de deshidratado mediante el rediseño de los equipos empleados.



Un punto importante a tomar en cuenta al considerar un rediseño del equipo deshidratador es que la principal fuente de calor empleada en los equipos convencionales proviene de la combustión de leña y en menor medida de otros combustibles como: aceite-diésel, cascarilla de café, gas kerosene y GLP. Por lo que también se ve la oportunidad de implementar un combustible más eco-eficiente para mitigar la producción desmedida de leña de la cual no se posee datos completos. Aunque de manera exploratoria y de acuerdo con Fuentes (2016) en un estudio sobre el consumo de leña de 27 agroindustrias cardamomeras durante el periodo 2012-2013 tan solo en el municipio de Santa Catalina la Tinta, el 56.86% de la leña consumida se obtuvo sin licencia, correspondiendo a 20.35 hectáreas deforestadas en áreas sin compromiso de reforestación y de las cuales 34.18% se obtuvo de áreas protegidas.

Es por esto que se plantea diseñar, fabricar y probar dos prototipos enfocados en controlar eficazmente la temperatura de deshidratado y reducir el tiempo del proceso para coadyuvar a la ecología industrial y su eco-eficiencia al mitigar el impacto ambiental derivado de la combustión de leña.

Al mitigar la reducción en la proporción de cardamomo de calidad exportable obtenido tras la deshidratación en equipos convencionales se buscaría incrementar el valor del producto y proporcionar un beneficio económico a los pequeños y medianos productores que elijan implementar la tecnología.

### **1.1 Identificación Del Problema**

Según estadísticas de exportaciones del Banco Central de Guatemala (BANGUAT, 2011- 2020). El aporte económico por concepto de exportación de cardamomo derivado de su transformación en el proceso de beneficiado<sup>14</sup> alcanzó un máximo histórico en el año 2011 con US\$308 millones, a partir de ese año el valor de esas exportaciones mostró una tendencia

---

<sup>14</sup> Beneficiado: se refiere al proceso de transformación del cardamomo en las instalaciones de una planta de producción.



**CRIA**

**Programa Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria**



Representación Guatemala

3

descendente llegando en el año 2017 a US\$229 millones, 25% menos que en 2011, por diversas causas en la cadena productiva desde problemas climáticos, plagas, transporte hasta problemas de transformación. De 2017 a la fecha el valor de exportaciones ha incrementado considerablemente debido a un incremento en el volumen de la producción y a que se han mitigado efectos climáticos y problemas de plagas. Sin embargo, no se ha intentado mitigar la pérdida de calidad que sufre el cardamomo durante la operación de deshidratado.

De acuerdo con datos de AGEXPORT (2018) la demanda del mercado internacional de cardamomo incrementó en la última década, la participación de Guatemala en este se redujo desde 80% en el año 2005 hasta 61% en 2015 - 2017. Esta reducción en la participación del mercado internacional, causada principalmente por una reducción de la calidad en el proceso de producción, ha sido aprovechada por los demás países productores de cardamomo cerrando año con año la brecha que coloca a Guatemala como el primer exportador de cardamomo a nivel mundial.

Dicha reducción de la calidad en la producción se puede atribuir, en un alto porcentaje a dos factores:

Según Villatoro (2018)<sup>15</sup> a nivel de cultivo en campo: por el impacto de la plaga del *Trips* sp. (*Sciothrips cardamomi*) se ha reducido anualmente a un ritmo de hasta 20% con la implementación de un manejo integrado del cultivo de forma apropiada.

A nivel de la transformación: por la carencia del control preciso y estandarizado durante el proceso de deshidratado, Villatoro (2018) indica que no se han alcanzado mejoras significativas durante más de 30 años.

En el área de Alta Verapaz, que aporta aproximadamente el 86% de la producción nacional de cardamomo es común encontrar diferencias marcadas en los rendimientos de

---

<sup>15</sup> Entrevista al Agr. Juan Villatoro gerente técnico agrícola de la Federación de Cooperativas de las Verapaces (FEDECOVERA) (2018)



transformación y en la calidad del producto debido a que en el proceso de deshidratado no se cuenta con un sistema de control efectivo y eficiente.

Este problema se ve reflejado en el rendimiento tras el proceso de transformación que normalmente se presume se encuentre entre 40 y 60% de la calidad de primera y que en la actualidad se haya observado en alguna ocasión en niveles tan bajos como 7%. (Villatoro, 2018).

En los beneficios<sup>16</sup> de cardamomo se utilizan como variables de control el tiempo y la temperatura de deshidratado, los cuales son controlados a discreción de un operador denominado “puntheador” para determinar el momento en el cual el Cardamomo se encuentra en el punto óptimo del proceso de deshidratación, por lo que el éxito del proceso depende de la capacidad, experiencia y habilidad del puntheador quien en muchas ocasiones ve afectada su función por cansancio físico u otros distractores.

En lo que respecta a la capacidad de los equipos deshidratadores, los más utilizados comercialmente son los de 50 quintales, sin embargo, una práctica frecuente por parte de los beneficiadores<sup>17</sup> consiste en sobrepasar hasta en un 25% la capacidad recomendada.

En conjunto, estas deficiencias durante el proceso de deshidratación sumadas a la carente actualización de los sistemas involucrados afectan la eficiencia del proceso y por consiguiente la calidad del producto final y una reducción de los ingresos netos a las familias productoras.

---

<sup>16</sup> Beneficios: llámesele a las unidades transformadoras de cardamomo, nombre utilizado en la región.

<sup>17</sup> Beneficiadores: operadores y propietarios del proceso de beneficiado.



## 1.2 Justificación

El cultivo en Guatemala data desde hace más de 100 años de historia, inicialmente era procesado en patios de concreto igual que el café, posteriormente surgieron las deshidratadoras; coloquialmente llamadas “secadoras”, de tipo pila elaboradas de block de concreto y una fuente de calor las cuales se transformaron años después en pilas circulares de metal conservando la misma fuente de calor en su diseño. Con el tiempo y la experiencia se dieron otros cambios en la fuente de calor; uno de ellos fue al implementar el intercambiador de calor, conocido como “panal”, para eliminar la contaminación por antraquinona<sup>18</sup>, otro de los cambios que se implementó fue el diseño de los ventiladores, incrementando así la potencia del flujo del aire. Desde entonces, han pasado más de 30 años sin cambios sustanciales en el diseño de los equipos de deshidratado.

La incursión de nuevos países como productores de cardamomo constituye una fuerte amenaza para la economía cardamomera de Guatemala por lo que se deben investigar y desarrollar nuevas alternativas tecnológicas que permitan la mejora de la cadena verde de transformación y la inserción eficiente de la ecología industrial en el proceso actual de deshidratado de cardamomo, lo cual se puede implementar con soluciones parciales a corto plazo siguiendo una filosofía de mejora continua a través de iteraciones consecutivas de la tecnología y el proceso.

Se tiene la oportunidad de tecnificar el proceso de beneficiado con una mejor tecnología, rediseñando los equipos deshidratadores de cardamomo de Guatemala e incorporando un sistema de control eficiente con el objetivo de mantener la calidad del fruto que viene del campo y así evitar su degradación durante el proceso por manejo inapropiado que repercute directamente en el precio de venta, afectando la competitividad de la industria nacional e impactando directamente a la economía de las cooperativas y de los pequeños

---

<sup>18</sup> Antraquinona: Compuesto natural de las plantas que funciona como repelente activo contra las aves, que se libera durante la combustión de la leña y que no es permitido en concentraciones superiores a 0.02 mg/kg en granos según la regulación de residuos de pesticidas de la comisión europea.



productores que dependen del cardamomo, pues a través de éste cultivo muchas familias del área rural logran el sustento diario. Por lo tanto, es necesario urgentemente demostrar los beneficios del rediseño.

Debe emerger de manera gradual, pero con urgencia, un cambio en la cultura de deshidratado que permita tener el control estandarizado y eficiente del proceso para preservar la calidad, que además minimice el impacto ambiental reduciendo el consumo de los altos volúmenes de leña.

La deshidratación como operación unitaria<sup>19</sup> estandarizada debe generar la calidad que demandan los mercados internacionales, la rentabilidad para los productores y comercializadoras, resaltando el estándar de la industria con visión en el futuro comercial de Guatemala, que es el mayor productor y proveedor de cardamomo del mundo con el fin de alcanzar la eco-eficiencia del proceso de deshidratación con un mejor aprovechamiento de la energía que ingresa al sistema.

De acuerdo con Ibarz y Barbosa-Cánovas (2011). La deshidratación se define como la eliminación de sustancias volátiles, humedad o agua libre, con el fin de disminuir la actividad de agua contenida en el alimento. Al someter el cardamomo a deshidratación, el proceso ocurre en dos fases: primero; se transfiere energía al fruto en forma de calor para evaporar la humedad contenida en su superficie y segundo; la humedad interna del fruto se transporta a su superficie, según su estructura física, por difusión, flujo capilar o presión interna. La velocidad en que dichas fases se desarrollan depende del mecanismo de deshidratado y del control correcto de los parámetros del proceso, influyendo directamente en la velocidad del mismo y en la preservación de sus características de calidad como: textura, sabor, color, gusto y valor nutricional entre otros.

---

<sup>19</sup> Operación unitaria: se le llama así a una parte indivisible de cualquier proceso de transformación donde hay un intercambio de energía del tipo físico.



## 2. Marco Teórico

### 2.1 Generalidades Del Cultivo

Según Nair (2020) el cardamomo (*Elettaria cardamomum* L. Maton) es una planta de la especie fanerógama perteneciente a la familia de las zingiberáceas. Es originaria del sudeste del continente asiático, particularmente de la India, Sri Lanka, Malasia e Indonesia, donde crece en bosques perennes húmedos. La planta es del tipo herbáceo perenne, alta con raíz subterránea ramificada y características aromáticas. Sus dimensiones alcanzan los 2 a 4 metros de altura con hojas alternas y lanceoladas de 40 a 60 centímetros de largo, el color de sus flores va de blanco a violeta pálido y su fruto es una vaina ovalada de color amarillo verdoso de 1 a 2 centímetros de largo que contiene semillas de color café oscuro caracterizadas por su fuerte olor aromático y sabor.

Para Villatoro (2018) en Guatemala se encuentran “3 variedades de cardamomo las cuales cuentan con su caracterización genotípica y cuyo cultivo es indistinto para fines de producción, estas son: *misuri*, *malabar* y *bazuca*”. Presentan diferentes cualidades como el tamaño, calidad y color entre otras, derivado de las variaciones genéticas que han obtenido a lo largo de los años.

De acuerdo con Sosa (1983) el cardamomo constituye un cultivo perenne no tradicional, es una planta de sombra que prefiere los suelos de bosque con pendientes entre 5% y 25% para un mejor drenaje, requiere alta humedad y su temperatura óptima va de los 18 a los 22 °C.

Por esta razón es que su cultivo se ve mayormente favorecido en las zonas boscosas de Alta Verapaz.

Su propagación hoy en día se da por plantación de semillas o secciones de rizomas maduros. A las plantas se les da una separación aproximada de 3 metros entre sombra y luz. La



planta de cardamomo comienza a producir al cuarto año y continúan su producción entre 15 y 20 años antes de requerir reemplazo.

Según Granados (2014) en los últimos 10 años, los cultivos se han visto afectados cada vez más por las plagas, el cardamomo es afectado por más de 29 plagas entre las cuales se encuentra el trips. Esto ha ocasionado pérdidas de rendimiento económico de hasta 65%, debido a que a la vez que reduce el rendimiento del cardamomo de una proporción de 5:1 a 6.25:1 también se reduce el precio por pérdida de calidad.

## **2.2 Generalidades De Producción**

De acuerdo con AGEXPORT (2018) la producción de cardamomo a nivel nacional se concentra en 6 departamentos: Alta Verapaz con el 86.6% de la producción nacional seguido de Huehuetenango con 8.3%, Quiché con 2.9%, Escuintla con 1.7%, Baja Verapaz con el 0.3%, y Petén 0.2%.

Para Ruano (2002) la cosecha se inicia entre los meses de junio y julio y finaliza entre marzo y abril del siguiente año, se recomienda recolectar el fruto antes de la maduración completa, generalmente a  $\frac{3}{4}$  partes del proceso de maduración, cuando el color verde comienza a tornarse amarillento para favorecer su desprendimiento; la producción estimada por planta depende de la variedad, región, edad y manejo, sin embargo se generaliza que el rendimiento puede ir de los 300 a 900 kg/Ha de fruto pergamino.

La producción está dominada por pequeños agricultores que siembran extensiones que van desde las 2 cuerdas hasta 1.5 hectáreas de terreno para cultivar cardamomo.

Villatoro (2018) indica que en el año 2001 se observaba en las partidas de producción entre un 25% y 35% de primera, llegando hasta 40% únicamente en el aspecto de color. Durante el último periodo de producción se observaron partidas con rendimiento de 12% a 15% de primera descendiendo hasta un 4%, mientras se consideran optimas las proporciones: 60% de primera y 40% de otras calidades. En relación al tamaño de las capsulas de cardamomo según AGEXPORT (2018) en 2017 no se obtuvo calidad Jumbo.



Este deterioro en la calidad y rendimientos del proceso por lo general es atribuido a una combinación de factores entre los cuales los más importantes parecen ser el deterioro de la calidad genética de las plantas y la falta de control en el proceso de deshidratado.

Para Villatoro (2018) en cuanto al producto de baja calidad: frutos picados, manchados, dañados por trips, dañados durante el proceso de beneficiado y frutos podridos entre otros defectos; se estimó que en el periodo de producción 2016-2017 representó 13% de la cosecha, comparado con el año anterior que rondaba el 18% y en promedio de los últimos 5 años supera el 20%.

## **2.3 Generalidades De Transformación**

### **2.3.1 La deshidratación como Operación Unitaria**

De acuerdo con Vanaclocha y Requena (2003) la deshidratación se utiliza como método para lograr la estabilización de alimentos, se basa en la reducción de la actividad del agua para ralentizar los procesos de deterioro que experimenta un alimento. Su distinción ante la concentración o evaporación es clara, porque, aunque ambas operaciones se basan en disminuir la actividad del agua, la concentración de productos líquidos aún contiene cantidades de agua del orden de hasta el 50%. Los productos de la deshidratación son sólidos con un contenido de agua inferior al 10%.

Se utiliza el término genérico “Deshidratación” porque durante esta operación no solo se retira el agua que actúa como disolvente o inerte que diluye el alimento, sino que se retira agua que entra en la constitución de las estructuras y tejidos del alimento. Esta es la razón por la cual la deshidratación provoca a menudo profundos cambios en las cualidades organolépticas de los alimentos, por lo que no es adecuada para muchos alimentos. Todas las operaciones de Deshidratación tienen en común la pérdida de agua. Esta pérdida se puede realizar de diversas formas, sin embargo, en el beneficiado del cardamomo la forma de deshidratación utilizada es la que se realiza por arrastre de aire caliente.



Según el departamento de agricultura de la Universidad de Minnesota (2017) e Ibarz y Barbosa-Cánovas (2011) en el deshidratado por arrastre la retirada de agua se realiza poniendo el alimento en contacto con un medio, normalmente aire, relativamente seco. Este medio se renueva lo suficientemente a menudo para que el deshidratado prosiga hasta el grado deseado. Puesto que para una misma humedad absoluta el aire resulta relativamente más seco cuanto más se incrementa la temperatura, el deshidratado por arrastre es a menudo realizado con un chorro de aire caliente.

Esta operación tiene unos requerimientos energéticos de unas 600 Kcal/kg de agua evaporada. En el deshidratado por arrastre, esta energía es transportada normalmente por el agente de arrastre (aire seco y caliente normalmente) que cede su calor sensible a la vez que se carga de humedad. Cuando el agente de arrastre aporta todo el calor necesario para la vaporización tenemos un secadero adiabático, en otras palabras, que extrae la humedad del producto por contacto del medio de arrastre llevándola lejos del mismo.

### **2.3.2 Proceso de Deshidratación del cardamomo.**

La transformación del cardamomo inicia con la recepción del cardamomo en costales y a granel, no se realiza ningún procedimiento de preselección por lo que la transformación consiste en someter las capsulas del cardamomo; que en este punto del proceso se denominan como “cereza”; a un proceso de deshidratado tras el cual se pretende reducir su humedad hasta el 9%, sin embargo, en la práctica se obtienen resultados de entre 10 y 12%.

Finalizado el proceso de deshidratado, las capsulas de cardamomo pasan a conocerse como “pergamino” y se somete al proceso denominado “descolado” que consiste en eliminar el pedúnculo adherido al ápice del fruto, este proceso debe realizarse con el fruto en caliente, recién salido del deshidratador, con el fin de facilitar el desprendimiento, este procedimiento puede realizarse a mano, pero en la actualidad se favorece el uso de maquinaria especializada.



**CRIA**

**Programa Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria**



11

Posteriormente se procede al envasado habiendo tomando muestras para determinar el porcentaje de cada calidad de producto que el lote contiene. Como última etapa se considera el almacenaje adecuado evitando que vuelva a absorber humedad.

Lo anteriormente descrito se observa gráficamente en la siguiente figura.



Figura 7. Diagrama general del proceso de beneficiado de cardamomo (Nota: Elaboración propia 2018).



Existen ciertos parámetros de clasificación para determinar la calidad del cardamomo, para esto durante el proceso de investigación se construyó conocimiento a base de la observación en la cual se abren sacos con el producto terminado y se muestrea a diferentes alturas del contenido del saco, las características de clasificación se analizan en laboratorio por personal calificado y se evalúa de la siguiente manera:

**Primera:** cardamomo color verde intenso, con hasta 5 tamaños aceptados.

**Segunda:** cardamomo color verde pálido, con 2 tamaños aceptados.

**Tercera:** cardamomo color café, amarillo, podrido, con daño de plagas, capsulas abiertas, entre otros.

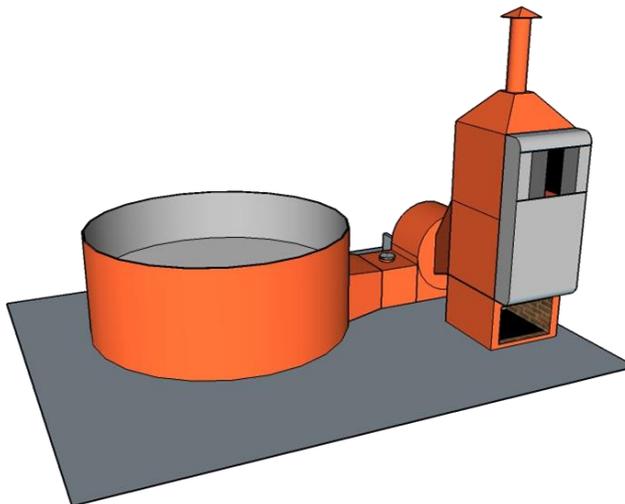
**Oro:** semilla deshidratada del cardamomo descapsulado y de apariencia oscura.

La caracterización de la calidad del cardamomo suele simplificarse de la siguiente manera: a mayor tamaño y coloración homogénea verde oscuro, se considera de mejor calidad.

### ***2.3.3 Tecnología Actual***

Durante el proceso de investigación se observó el proceso de deshidratado usado actualmente, en base a estas observaciones fue posible construir conocimiento para describir los equipos empleados en campo.

El deshidratado se realiza en equipos tipo pila, que son cilindros circulares con una base de lámina perforada, que permite el ingreso de aire caliente desde abajo con el objeto de que se distribuya a través del fruto apilado en su interior, a continuación, se observa una representación gráfica de este tipo de deshidratador.



**Ilustración 8. Deshidratador de pila circular, diseño utilizado en la actualidad (Nota: Elaboración propia 2018, con el programa de diseño Sketchup)**

Actualmente la mayoría de beneficios en el país obtiene su energía calorífica de la combustión de leña y utilizan diésel para el funcionamiento del ventilador que alimenta de aire caliente a la pila de deshidratado. Algunos beneficios han intentado sustituir las fuentes de energía por electricidad o gas propano, sin embargo, estos representan la minoría.

En el caso de la leña, se estima que se requiere consumir un promedio de 4 metros estéreos de madera dura de alto valor calorífico para deshidratar una partida de 50 quintales. Mientras que para energizar el ventilador se requieren 8 a 10 galones de combustible diésel.

El calor generado por la combustión de la leña se utiliza para calentar el aire que ingresa al deshidratador por medio de un intercambiador de calor para ser dirigido hacia la cámara de distribución de la pila de deshidratado por medio de tolvas y conductos utilizando ventiladores de alta potencia que con la ayuda de un caracol dirigido hacia una cámara de distribución, eleva el aire de forma homogénea hacia la cama de 60cm de cardamomo ubicada en la parte superior de la pila de deshidratado, arrastrando de esta manera la humedad del grano.



La distribución del aire es un factor sumamente importante en el diseño de un deshidratador, independientemente del producto que se desee trabajar, pero es sumamente importante en un diseño para deshidratado de cardamomo, debido a la sensibilidad del producto. Si bien el caudal y temperatura del aire son esenciales para extraer la humedad del fruto resultan inútiles si no se combinan con un diseño que permita la correcta distribución de un caudal de aire apropiado.

Se ha determinado que para el proceso de deshidratado se debe operar el equipo a una temperatura de aire de 40 °C durante las primeras 20 horas las cuales son críticas para fijar el color característico del cardamomo. Pasadas las primeras 20 horas del proceso se puede incrementar la temperatura manteniéndola a 60 °C hasta finalizar el proceso, sin embargo, se recomienda utilizar una temperatura de 50°C.

En la actualidad el control de la temperatura en la industria del cardamomo aun depende enteramente de un elemento humano; tal como lo dice Villatoro (2018)<sup>20</sup> se indicó que “es común observar variaciones constantes que van desde una mínima de 40 °C hasta una máxima de 80 °C. Es importante mencionar que el termómetro con el cual se mide la temperatura del sistema suele estar ubicado antes de la pila de deshidratado en la tubería que sale del ventilador.

Según Castro (2015) el tiempo de deshidratado observado generalmente va de las 40 a las 48 horas en los equipos con capacidad para 50 quintales según se respete o no el límite recomendado de capacidad y lo favorable del clima. Esto indica una ausencia de estandarización en el proceso.

En el proceso de deshidratado actual se toma en cuenta como parámetros de medición y variables directas del estudio: la temperatura, porcentaje de humedad del cardamomo y el

---

<sup>20</sup> Entrevista al Agr. Juan Villatoro gerente técnico agrícola de la Federación de Cooperativas de las Verapaces (FEDECOVERA) (2018)



tiempo que dura la operación de deshidratado; sin embargo, en la práctica, el control de estos parámetros no se lleva a cabo con la rigurosidad necesaria.

Es importante establecer también que un buen proceso de deshidratación deberá tomar en consideración otros factores como la temperatura y humedad ambiente, curva de humedad del producto, saturación del aire de deshidratado, gradiente de temperaturas, humedad y caudal del aire.

## 2.4 Generalidades De Comercialización Y Economía

El valor del cardamomo como producto se encuentra en su semilla, debido a su intenso aroma. Su uso principal es como corrector de sabor en diferentes platillos y bebidas como el curri<sup>21</sup> y el Té (*Camellia sinensis*), aunque también se le atribuyen propiedades estimulantes y carminativas.

Según AGEXPORT (2018) la demanda a nivel mundial se concentra en el medio oriente y el sudeste asiático en los cuales Emiratos Árabes representa el 32% del mercado seguido por Arabia Saudita con el 29% e India con 12%. Con un volumen mundial cercano a las 50 mil toneladas métricas, Guatemala es el principal productor del mundo cubriendo un 61% del mercado en 2016, seguido por India con 18%, en el 2005 Guatemala alcanzo a cubrir el 80% del mercado mundial.

De acuerdo con estadísticas del Banco Central de Guatemala (2011-2017) el cardamomo tiene un fuerte impacto en la economía del país, al año se exportan cerca de 33 mil toneladas métricas de cardamomo que representan entre US\$220 y US\$300 millones en divisas para el país de acuerdo a su valor en el mercado. En el año 2016 ocupó el 13vo lugar como producto más exportado, representando un 2.5% del total de las exportaciones de Guatemala y cerca del 8% de las exportaciones agrícolas, así como el 0.6% del PIB nacional. La huella

---

<sup>21</sup> El curri es una mezcla de especias más o menos picantes, de origen asiático, que se utiliza como salsa para la preparación de platillos tipo guiso.



**CRIA**

## **Programa Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria**



17

económica durante ese año se estima fue de Q3, 171 millones. Y en el 2017 logró escalar al 6to lugar en las exportaciones del país, con la producción de 39 mil toneladas métricas, sin embargo, la baja en la calidad del producto y el incremento de la oferta por parte de los países competidores significó que el aporte en divisas para esa cantidad de producción correspondiera a US\$367 millones.

De acuerdo con AGEXPORT (2018) la producción de cardamomo se distribuye en pequeños agricultores, para el departamento de Alta Verapaz, donde se concentra el 81% de la producción nacional, su cultivo impacta directamente a 350,000 familias productoras que forman parte de más de 2,600 comunidades locales y se estima que 1.5 millones de guatemaltecos se benefician por la exportación de cardamomo, tiene impactos de primer orden que ascienden a Q1, 700 millones e impactos de segundo orden que rondan los Q1, 400 millones. Entre estos se incluyen: el consumo intermedio, salarios, consumo familiar, reinversión empresarial, impuestos, entre otros. Por lo que se considera un dinamizador de las economías locales.

Es el único producto en el que Guatemala domina el mercado a nivel mundial, al punto que:

*“De cada Q100 que circulan en la economía nacional, Q1 proviene del mercado del cardamomo”*  
(de León, 2017).



**CRIA**

**Programa Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria**





**CRIA**

**Programa Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria**



19

## **FASE 1**

**Desarrollo e innovación tecnológica-mecánica en el deshidratado eficiente del cardamomo en Alta Verapaz, para el incremento de la productividad rural**



**CRIA**

**Programa Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria**





### 3. Objetivos

#### 3.1 General

Desarrollar dos prototipos deshidratadores de cardamomo fundamentados en la implementación de un sistema de control semiautomatizado de energía calorífica y temperatura, que incide en la mejora del rendimiento de la calidad durante el proceso y la reducción del impacto ambiental, para la recuperación de la productividad agrícola rural del cardamomo.

#### 3.2 Específicos

- Construir dos prototipos de diferente diseño para evaluar la incidencia del diseño en la efectividad del proceso de deshidratado de cardamomo.
- Determinar el rendimiento del deshidratado, midiendo el % de cardamomo de primera que se preserva en cada prototipo, al final del proceso de transformación.
- Implementar una alternativa de fuente calorífica que incida en la reducción del uso de leña como principal fuente de energía.
- Impactar en la recuperación de la productividad agrícola rural.
- Determinar los costos del proceso en los prototipos del estudio.

### 4. Hipótesis

La eficiencia en relación a la duración del proceso y la efectividad en relación a la calidad del producto resultante, no varía significativamente entre prototipos y testigo.



## 5. Metodología

### 5.1 Localidad Y Época

La investigación se llevó a cabo durante el periodo de cosecha y beneficiado 2018 - 2020 en las localidades de Cobán, San Pedro Carcha y Cubilhuitz, Alta Verapaz. Los datos obtenidos fueron recopilados de primera mano en los beneficios FRUMOSA, FEDEAGRO SERVICIOS EL AMIGO S.A. y la cooperativa integral agrícola CHIPOLEM CHIYO mientras que el diseño y construcción de los prototipos se realizó en las oficinas de la empresa “Asesoría y Soluciones” ubicada en Cobán, Alta Verapaz donde también se realizaron las pruebas de funcionamiento incluidas las pruebas iniciales para verificar la correcta operación del equipo y las pruebas de ajuste y calibración.

### 5.2 Tratamientos

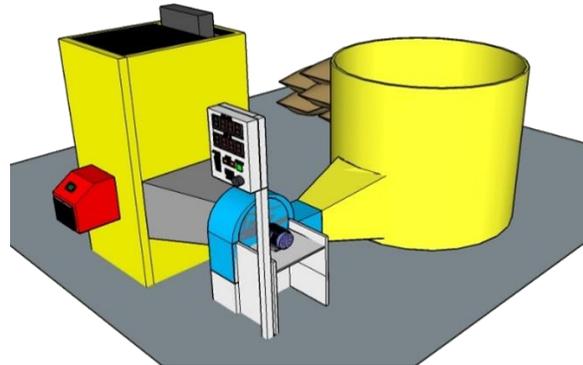
Se aplicaron tres tratamientos, dos de los cuales correspondieron con dos prototipos de máquinas deshidratadoras de cardamomo construidas a escala 1:20 ocupando una capacidad de carga de 226 kg. y un tercer tratamiento testigo con equipo tradicional a escala real y capacidad de carga de 4,545 kg.

#### 5.2.1 Tratamiento 1 – Prototipo A

Se fabricó a escala 1:20, compuesto de una cámara de deshidratado cilíndrica de 1.38 m de diámetro y 1.20 m. de altura, de un intercambiador de calor a gas propano. El cilindro fue construido en lámina de acero inoxidable 304 de 1 mm de grosor, la mitad inferior de su altura corresponde a la recámara de distribución de aire caliente y conecta, por medio de una lámina perforada de acero inoxidable con perforaciones de 4.0 mm de diámetro, con la mitad superior del cilindro que constituye la pila de deshidratación, en la que el vapor escapa libremente.



El sistema de distribución de aire caliente se compone de conductos metálicos cuadrados y de una turbina centrífuga movilizada a través de un motor eléctrico monofásico de 2 HP y de 1,700 RPM a 220 V y 60 Hz. En la siguiente ilustración se puede observar un bosquejo del prototipo.



**Ilustración 2. Tratamiento 1 correspondiente al prototipo A. (Nota: elaboración propia 2018, con el programa de diseño Sketchup).**



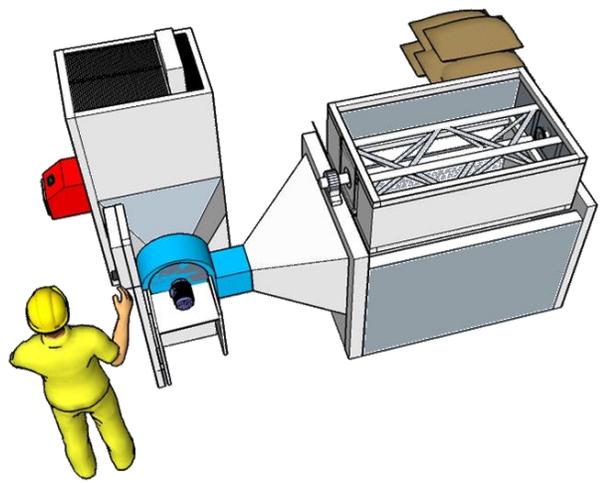
**Fotografía 1. Tratamiento 1, prototipo A. (Nota: elaboración propia 2020)**

### **5.2.2 Tratamiento 2 – Prototipo B**

Se fabricó a escala 1:20 en relación al equipo testigo, se compone de un intercambiador de calor a gas propano idéntico al del tratamiento 1.



La cámara de deshidratación tiene una estructura rectangular formada con lámina perforada de acero inoxidable, cuenta con dos compuertas cerradas con lámina perforada de 3mm de diámetro, dejando escapar el vapor lentamente y manteniendo el calor dentro de la cámara, la construcción también se realizó con lámina de acero inoxidable de 1.5mm de grosor y el sistema de distribución de aire caliente es idéntico al del tratamiento 1.



**Ilustración 3. Tratamiento 2, prototipo B. (Nota: elaboración propia 2018, con el programa de diseño Sketchup).**



**Fotografía 2. Tratamiento 2, prototipo B (Nota: elaboración propia 2020).**



### 5.2.3 Tratamiento 3 – Testigo o Tratamiento C

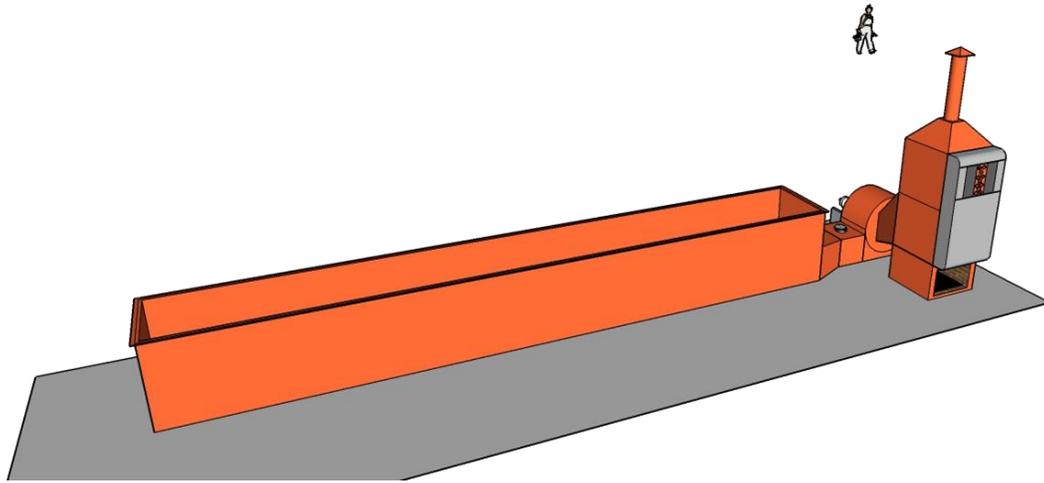
Este deshidratador es empleado por FEDECOVERA en el beneficio Ixcapec, está conformado por una cámara de deshidratado, un ventilador de aire centrífugo y un intercambiador de calor que funciona con leña. La cámara de deshidratado es rectangular, fabricada con lámina metálica de 1.58 mm de grosor, con un largo de 9.75 m, ancho de 1.22 m y altura de 1.22m. Con capacidad para 4,545.45 kg de cardamomo en cereza. Cuenta con un piso intermedio de lámina perforada que divide la cámara por la mitad horizontalmente y permite el paso de aire caliente hacia el producto. Ésta lámina separa la recámara de distribución de aire y la recámara de deshidratado donde se carga el cardamomo.

La recámara de distribución de aire se ubica directamente por debajo de la cámara de deshidratado. Tiene un piso sólido con declive de 15 grados que va desde el extremo donde ingresa el aire caliente hasta el extremo opuesto de la recámara, esto permite mantener la misma presión de aire a lo largo de toda la cámara de deshidratado.

El ventilador es de tipo centrífugo y produce un flujo de aire de 453 m<sup>3</sup>/minuto. Opera por medio de un motor eléctrico abierto, monofásico de jaula de ardilla y potencia de 7,350 watts, 10 HP, que la moviliza girando a 1725 rpm, velocidad que se reduce a 800 rpm por medio de poleas.

El intercambiador de calor usado fue fabricado con lámina negra de 3.175 mm de grosor, consiste en un horno de leña de 90 x 90 cm, en el panel se permite el intercambio del calor de la combustión al aire frío transportado a través de tubos de 3.175 mm de grosor y 50.8 mm de diámetro, el aire frío ingresa por una compuerta ajustable y sale por un conducto que conecta con el ventilador.

En el campo se observan otros diseños con las mismas características del intercambiador de calor y el sistema de ventilación. Marcando una diferencia en capacidad y en el diseño estructural de pila de deshidratación de rectangular a redonda con capacidad de 2,272.73kg



**Ilustración 4. Tratamiento 3, testigo C. (Nota: elaboración propia 2018, con el programa de diseño Sketchup).**

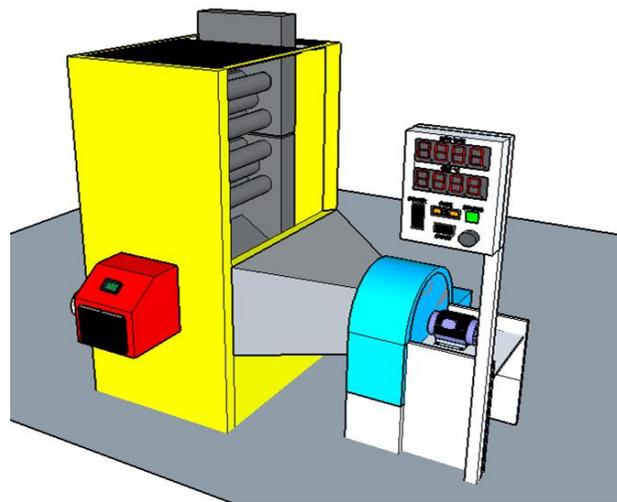


**Fotografía 3. Tratamiento 3, testigo C (Nota: Equipo propiedad de FEDECOVERA, fotografía propia 2020).**



### 5.2.4 Los intercambiadores de calor para los prototipos A y B

Comparten las mismas características y están fabricados en lámina de acero negro con grosor de 3.175 mm, consiste en un arreglo de tubos de acero de 50.8 mm de diámetro y chapa 16, contenidos en una estructura de hierro dulce. La combustión se realiza por medio de un quemador de gas GLP con control de seguridad de encendido y apagado y válvula de cierre de emergencia, capaz de entregar 263,764 KJ. Cuenta con un sistema de control de temperatura semiautomático en el que se puede fijar la temperatura deseada con una variabilidad de +/- 5°C, el sistema se encarga de controlar la combustión en el quemador.



**Ilustración 5. Intercambiador de calor implementado en los prototipos A y B. (Nota: elaboración propia 2018, con el programa de diseño Sketchup).**

La variación entre ambos tratamientos reside por lo tanto en las diferencias de diseño que existirán entre las dos cámaras de deshidratado, por la forma en que cada uno distribuye la energía calorífica y flujo de aire durante el proceso.

### 5.3 Diseño Experimental

Se pretendía determinar si existe o no diferencia significativa en la calidad del producto obtenido a través del proceso de deshidratado según el sistema de control de temperatura y el diseño estructural de la cámara de deshidratación. Así como la diferencia en eficiencia térmica



según la fuente de energía GLP o leña. Por simplicidad en el número de variables y análisis estadístico el “diseño de la cámara deshidratadora” ( $D_n$ ) se consideró como un factor cualitativo compuesto de tres niveles en el que cada nivel corresponde a un tratamiento diferente como se puede observar representado en la siguiente figura:

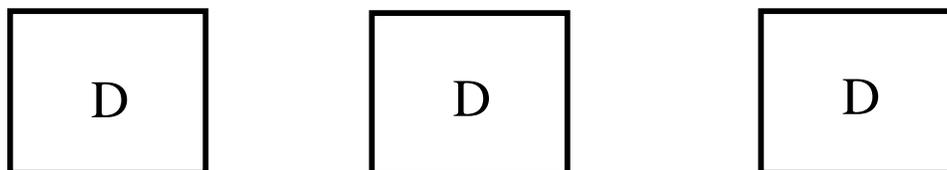


Ilustración 6. Ejemplificación de tratamientos experimentales, cada tratamiento corresponde a un equipo distinto de deshidratado (Nota: Elaboración Propia 2018).

Se lograron realizar 16 corridas paralelas entre los dos prototipos y se pudo recopilar muestras de 6 corridas en prototipos tradicionales operados con leña.

Debido a que los procesos de deshidratación pueden variar considerablemente en base a diversos factores como: variaciones en las características climáticas, disponibilidad, costo de la materia prima y variaciones en las mismas derivadas de la época de cosecha, origen y manejo del cultivo, entre otros. Se limitó su efecto en el experimento a través de un diseño de bloques completamente al azar en el que se bloqueó la frecuencia con que se realizó cada ensayo, a la vez que se ejecutaron en paralelo los tres tratamientos. El arreglo se puede observar gráficamente en el siguiente Cuadro:

Tabla 24 Ejemplificación del diseño experimental.

<u><math>R_1</math></u>	<u><math>R_2</math></u>	<u><math>R_3</math></u>	<u><math>R_n</math></u>
D <sub>1</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>n</sub>
D <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>n</sub>
D <sub>3</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>n</sub>

$R_n$  = Réplica del experimento, se espera poder completar una réplica cada 60 horas.

$D_n$  = Diseño de la cámara de deshidratación.

Nota: elaboración propia 2018.



Este diseño permitió que todos los prototipos fueran probados bajo las mismas condiciones eliminando la variabilidad entre réplicas. La asignación temporal en la que se inició la ejecución de cada bloque se seleccionó al azar y en concordancia con disponibilidad de producto, precio y distribución del mismo.

#### 5.4 Tamaño De La Unidad Experimental

La unidad experimental fue constituida por 226 kg de cardamomo con un 80% de humedad, medida con un medidor de humedad de granos. Lo que corresponde con la capacidad de las cámaras de deshidratación en los prototipos a escala por lo que es la cantidad mínima de cardamomo a la que se le puede aplicar un tratamiento.

#### 5.5 Modelo Estadístico

El modelo estadístico para un diseño de bloques al azar se expresa de la siguiente manera:

$$Y_{ij} = \mu + t_i + \rho_j + \varepsilon_{ij}$$

En donde:

$Y_{ij}$  = Variable respuesta medida en la ij-ésima unidad experimental.

$\mu$  = Media general.

$t_i$  = Efecto del i-ésimo prototipo.

$\rho_j$  = Efecto de la j-ésima corrida.

$\varepsilon_{ij}$  = Error experimental asociado a la i-ésima unidad experimental



## 5.6 Variables

### 5.6.1 Variables de respuesta

Estas son las variables con las que se pretende medir el efecto que puede causar un tratamiento:

#### 5.6.1.1 Derivadas del diseño de la cámara de deshidratación:

- Tiempo de deshidratado: es el tiempo en el cual se mide desde que se activa la fuente calorífica en un prototipo hasta que la unidad experimental de cardamomo contenida en este alcance una humedad de 9% partiendo de una humedad inicial de 80%.
- Calidad de cardamomo: clasificada en categorías definidas por FEDECOVERA y expresada en porcentaje de cada categoría en relación al tamaño total de la unidad experimental.

#### 5.6.1.2 Derivadas del proceso de producción:

- Consumo de Combustible durante el lapso de tiempo que tarda el deshidratado en llevar el cardamomo desde una humedad de 80% hasta una de 9%. Medido en m<sup>3</sup>/hora de gas propano, por medio de un medidor de flujo másico, para los tratamientos A y B y como metros estéreos de leña para el tratamiento C.

### 5.6.2 Variable independiente

- Tratamiento aplicado: Especifica que equipo de deshidratación se utilizó, Tratamientos A y B para los prototipos y Tratamiento C para el testigo.

### 5.6.3 Variables secundarias

Estas no son esenciales para llevar a cabo el análisis estadístico principal, sin embargo, podrían ser de utilidad para otros análisis de datos:

- Temperatura ambiente: En la ubicación del experimento, fue medida con la ayuda de un psicómetro de mano de respuesta rápida marca Fieldpiece modelo ARH5 con sonda telescópica, cada hora hasta finalizar la corrida.
- Humedad ambiente: En la ubicación del experimento, medida con el higrómetro incorporado en el mismo medidor Fieldpiece ARH5 mencionado anteriormente, cada hora hasta finalizar la corrida.



- Saturación de aire: En porcentaje de humedad medida en la salida de aire de cada prototipo cada hora por la duración del ensayo. Esta medición se realizó con el mismo psicómetro Fieldpiece ARH5.
- Densidad de la muestra: Esta fue medida en  $\text{g/cm}^3$  de cardamomo antes y después de someter la muestra al proceso de deshidratación.

#### 5.6.4 Variables controladas

- Temperatura del aire de deshidratado: Controlada en un rango de  $\pm 5^\circ\text{C}$  en los prototipos a escala. Comprobada con termómetro digital y anemómetro Fieldpiece AAV3.
- Humedad final del cardamomo: Es el valor al cual debe disminuir la humedad de la capsula de cardamomo para considerar que una corrida experimental ha finalizado pues indica que se ha completado el proceso de deshidratación, el valor medido deberá ser idéntico tres veces consecutivas en intervalos de cinco minutos para evitar lecturas erróneas. El equipo empleado es un medidor electrónico de humedad en granos de la marca Wile. El valor a medir es 9% según Nair (2020), esto fue corroborada en campo por observaciones de primera mano comparando los resultados del equipo de medición con la experiencia empírica de los punteadores de FRUMOSA, FEDEAGRO y Cooperativa Chipolem quienes toman como base de juicio para determinar si el producto a alcanzado su punto óptimo de deshidratado, la dureza de la vaina ante la penetración con una uña de la mano<sup>22</sup>, sonido seco sin opacidad al tomar un puñado de granos y agitarlo, facilidad para fracturar o cizallar el grano con los dedos, aroma a aceite esencial y color.<sup>23</sup>

<sup>22</sup> La dureza de una uña humana según la escala de dureza de Mohs tiene un valor de 2.5

<sup>23</sup> En entrevista con los punteadores estos indican que de no cumplirse estas características se reduce el tiempo de vida del cardamomo pues se da la aparición de hongos y mohos.



## 5.7 Análisis de la información

Para evaluar la significancia de las diversas comparaciones entre los datos obtenidos de cada tratamiento se optó por realizar dichas comparaciones individualmente para cada variable. Debido a la cantidad de datos validos recopilados al final de la fase experimental para cada prototipo y de la limitada y discrepante cantidad de datos disponibles del equipo testigo, se realizaron las comparaciones estadísticas por medio de pruebas ANOVA<sup>24</sup> para muestras independientes y en las instancias donde se hallaron diferencias significativas se completó el análisis con pruebas a posteriori<sup>25</sup> con corrección de Scheffe.<sup>2627</sup>

El análisis se llevó a cabo tabulando la información necesaria en el programa estadístico JASP<sup>28</sup> Team (2020) en su versión 0.14.1. que facilitó correr las comparaciones.

Se plantearon conclusiones basadas tanto en observaciones de la estadística descriptiva como en la verificación estadística antes mencionada.

Cabe mencionar que se consideró más efectivo un tratamiento cuya duración del proceso y consumo energético son menores y que el rendimiento fue medido como el porcentaje de cardamomo de primera y segunda calidad que se obtuvo de cada tratamiento tras la operación de deshidratado.

---

<sup>24</sup> Esta prueba estadística se utiliza cuando se desea comparar las medias de dos o más grupos con el fin de estudiar los posibles efectos de los factores sobre la media de una variable y su varianza.

<sup>25</sup> Conocidas como Post-hoc en inglés, se realizan después de determinar que existen diferencias significativas a través de una prueba ANOVA para más de dos tratamientos, son útiles para realizar comparaciones pareadas de los tratamientos y determinar en qué pares difieren las medias

<sup>26</sup> Este método empleado para comparaciones múltiples en donde los tamaños de muestra difieren.

<sup>27</sup> La selección de análisis estadístico se presentó en entrevista ante la autoridad estadística del comité de agronomía de la USAC; centro de telemática de la USAC. PhD. Ezequiel Abraham López Bautista quien expreso coincidir con la selección de metodología y análisis estadístico.

<sup>28</sup> JASP es el acrónimo de Jeffreys's Amazing Statistics Program. Este software libre, gratuito y de código abierto está respaldado por el concejo europeo de investigación, el centro de investigación abierta y varias universidades europeas. Pretende facilitar una interfaz gráfica capaz de preservar la reproducibilidad del análisis de datos basado en el lenguaje estadístico R tanto para métodos frecuentistas como bayesianos.



### *5.7.1 Respecto al control de temperatura:*

El sistema de control de temperatura fue el mismo para ambos prototipos, pero cabe destacar que la temperatura ideal utilizada en campo tiene dos valores recomendados. Para las primeras 20 horas de proceso se recomienda no sobrepasar los 40°C pasadas las 20 horas se recomienda mantener una temperatura de 50°C. Dado que el proceso en un equipo tradicional toma entre 40 y 60 horas se interpreta que el cambio sugerido de temperatura se da cuando se ha evaporado alrededor del 50% de la humedad del grano.

Por la razón anterior la varianza de los datos tomados para la temperatura se trabajó en dos segmentos separados analizando la capacidad del sistema de control de mantenerse con una variación no mayor a  $\pm 5$  °C en cualquiera de las dos etapas y establecer si el sistema de control semi-automatizado fue efectivo al momento de mantener la temperatura de deshidratación en el rango deseado.

## **5.8 Manejo Del Experimento**

El experimento se llevó a cabo bajo las mismas condiciones ambientales para cada bloque experimental, por lo que se anuló cualquier variación externa al sistema de deshidratado, así como cualquier variación en las muestras entre bloques causados por la época de cosecha o cualquier otro factor desconocido.

### **5.8.1 Unidades experimentales**

Para cada bloque experimental, antes de iniciar el procedimiento se recolectó cardamomo de una sola fuente de origen que luego fue distribuido al azar entre las unidades experimentales de cada prototipo.



### 5.8.2 Proceso de deshidratación y registro de datos

Durante cada corrida experimental se inició verificando la igualdad de configuraciones entre ambos prototipos, se colocó la carga correspondiente y se registró cada una de las variables dependientes y auxiliares con una frecuencia de una hora desde el inicio del proceso hasta que la humedad de la unidad experimental registró un valor de 9%, momento en el que el proceso se dio por terminado. Finalizando el proceso se anotaron los datos sobre consumo energético y también se tomaron muestras del producto final para evaluar la calidad.



## 6. RESULTADOS

### 6.1 Datos recolectados

Al finalizar la ejecución experimental del estudio se obtuvieron datos correspondientes a diez y seis corridas en los prototipos A y B, y seis corridas para el prototipo C o equipo testigo. Su análisis se realizó por medio de la prueba ANOVA que se emplea cuando se tienen más de dos grupos de datos independientes.

Para realizar los análisis estadísticos se empleó el programa JASP en su versión 0.14.1.

### 6.2 Duración del proceso

En la tabla No.2 se presentan los datos generales de la estadística descriptiva para cada tratamiento respecto a la duración del proceso.

**Tabla 25.**

**Estadísticas descriptivas de la variable "duración del proceso" para los tratamientos**

Estadísticas descriptivas	Duración		
	A	B	C
Promedio	29.313	28.813	40.333
Error estándar del promedio	1.203	1.397	0.760
Desviación estándar	4.813	5.588	1.862
Varianza	23.163	31.229	3.467
Mínimo	23.000	17.000	38.000
Máximo	37.000	37.000	43.000

Nota: Elaboración de datos para el estudio 2021



Como puede observarse en los datos recopilados en la tabla anterior existe una diferencia considerable entre el promedio de horas que duró el proceso de deshidratado de cardamomo en cada tratamiento, para el tratamiento C la duración mínima fue aún mayor que la duración máxima experimentada en los tratamientos A y B lo cual puede apreciarse claramente en el siguiente diagrama de caja.

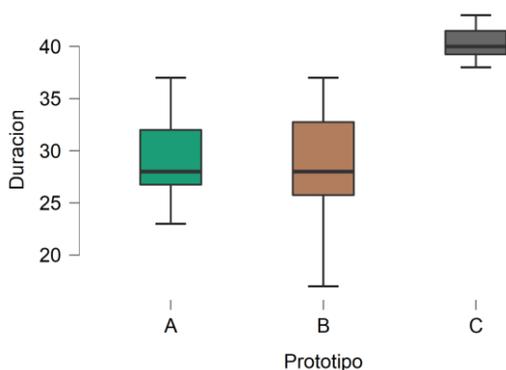


Figura 2. Diagrama de caja comparativa de la duración del proceso respecto al tratamiento. Elaboración de datos para el estudio, 2021.

La comparación estadística se realizó mediante una prueba ANOVA como se observa en la siguiente tabla en la que la diferencia se considera significativa si el p-valor es menor a 0.05:

Tabla 26.

Prueba ANOVA de la variable "duración del proceso"

Fuentes	Suma de cuadrados	gl	Cuadrado de la media	F	p	$\omega^2$
Prototipo	643.844	2	321.922	13.523	< .001	0.397
Residuales	833.208	35	23.806			

Si p-valor < 0.05 la diferencia es significativa.

gl = grados de libertad.

Nota: Elaboración de datos para el estudio, 2021



En la tabla de resultados de la prueba ANOVA se observa un valor alto para el estadístico F lo cual indica que las medias de las muestras difieren, al mismo tiempo el p-valor inferior a 0.05 indica que esta diferencia es significativa. El valor de  $w^2$  nos indica que el efecto que ejerce el tipo de tratamiento sobre la duración del proceso se considera de gran magnitud. Por lo tanto, existe una diferencia significativa en el promedio de duración del proceso de deshidratado entre los tres tratamientos.

Para validar el resultado de la prueba los datos deben cumplir con el requerimiento de homogeneidad de varianzas, esto se evaluó mediante el test de Levene para probar la hipótesis nula de que las varianzas en los diferentes grupos son iguales. EL resultado, como puede observarse en la tabla 4; es que no se observa diferencia significativa<sup>29</sup> entre las varianzas, respetando la homogeneidad de las mismas.

**Tabla 27.**

**Homogeneidad de varianzas de Levene para la “duración del proceso”**

<b>F</b>	<b>gl1</b>	<b>gl2</b>	<b>p</b>	<b>VS-MPR*</b>
2.092	2.000	35.000	0.139	1.343

gl = grados de libertad.

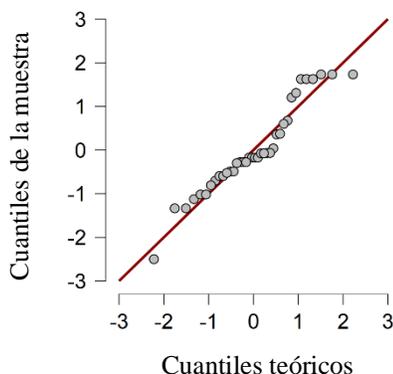
\* p-ratio maximo de Vovk-Sellke: Basado en el p-valor, las posibilidades maximas a favor de  $H_1$  por sobre  $H_0$  equivalen a  $1/(-e p \log( p ))$  para  $p \leq .37$  (Sellke, Bayarri, & Berger, 2001).

Nota: Elaboración de datos para el estudio, 2021

Otro requerimiento es que los datos posean una distribución normal, en la figura 3 para la gráfica Q-Q<sup>30</sup> se observa cómo se cumple con este requisito pues los cuantiles de la muestra y los cuantiles teóricos se agrupan alrededor de una línea recta.

<sup>29</sup> p-valor > 0.05.

<sup>30</sup> Gráfica Cuantil-Cuantil por su nombre en inglés, Quantile-Quantile.



**Figura 3. Grafica Q-Q de la variable “duración del proceso”. Elaboración de datos para el estudio, 2021**

Las estadísticas descriptivas en la tabla 5 sugieren que el tratamiento B presenta la menor duración del proceso entre los tres tratamientos evaluados, seguido del tratamiento A y por último el tratamiento C.

**Tabla 28.**

**Resumen de estadísticas descriptivas de la tabla 2 para la "duración del proceso"**

<b>Tratamiento</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Numero de datos</b>
A	29.313	4.813	16
B	28.813	5.588	16
C	40.333	1.862	6

Fuente: Elaboración de datos para el estudio, 2021

Dado que la prueba ANOVA indica una diferencia significativa en la duración del proceso respecto al tratamiento evaluado, pero no especifica entre que pares de tratamientos se da esta diferencia, se procedió a realizar una prueba a posteriori cuyo objetivo es evaluar a que pares de tratamientos aplica la diferencia encontrada. Esta prueba cuenta con una corrección de Scheffe debido a que el tamaño muestral de los tratamientos difiere, debido a las dificultades económicas de evaluar el equipo testigo C. El resultado se observa en la tabla 6.



Tabla 29.

Comparación a posteriori entre tratamientos y la variable “duración del proceso”

	Diferencia Media	Error estándar	t	D de Cohen	p scheffe
A B	0.500	1.725	0.290	0.096	0.959
C	-11.021	2.336	-4.718	-2.581	< .001 ***
B C	-11.521	2.336	-4.932	-2.338	< .001 ***

\*\*\* diferencia significativa,  $p < .05$

Nota. La prueba d de Cohen no corrige para múltiples comparaciones.

Nota. p-valor ajustado para comparar un grupo de 3

Fuente: Elaboración de datos para el estudio, 2021

La prueba a posteriori muestra que no existe diferencia significativa entre los tratamientos A y B, pero si existe entre los tratamientos A y C ( $p < 0.001$ ) y entre los tratamientos B y C ( $p < 0.001$ ) y el valor “d” de Cohen indica que el efecto del tratamiento sobre la duración del proceso en los últimos dos pares mencionados es grande como queda representado gráficamente en la figura 4.

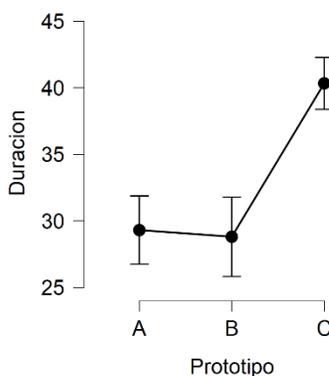


Figura 4. Duración del proceso vs Prototipo/Tratamiento. Elaboración de datos para el estudio, 2021



### 6.3 rendimiento del producto Pos-procesado

A continuación, se observa una tabla con los datos de estadística descriptiva para cada tratamiento evaluado respecto al rendimiento del producto obtenido posteriormente a su deshidratación.

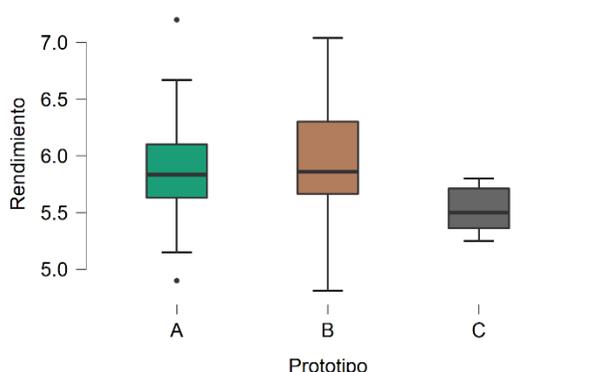
**Tabla 30.**

**Estadísticas descriptivas de la variable "rendimiento" para los tres tratamientos**

	Rendimiento		
	A	B	C
Validos	16	16	6
Faltantes	0	0	0
Promedio	5.883	5.915	5.525
Error estándar del promedio	0.142	0.155	0.092
Desviación estándar	0.570	0.619	0.225
Varianza	0.324	0.383	0.051
Mínimo	4.900	4.810	5.250
Máximo	7.200	7.040	5.800

Fuente: Elaboración de datos para el estudio, 2021

En la tabla anterior no se observan grandes diferencias en el promedio de rendimiento obtenido tras el proceso de deshidratado de cardamomo entre los tres tratamientos ni en sus valores máximo o mínimo. Lo cual se representa gráficamente en el diagrama de caja de la figura 5.



**Figura 5. Diagrama de caja, comparación de rendimiento entre tratamientos. Elaboración de datos para el estudio, 2021**

A continuación, se muestran los resultados de la comparación estadística del rendimiento de producto tras el proceso de deshidratado:

**Tabla 31.**

**Prueba ANOVA para la variable "Rendimiento"**

Fuentes	Suma de cuadrados	gl	Cuadrado de la media	F	p	$\omega^2$
Tratamiento	0.715	2	0.358	1.152	0.328	0.008
Residuales	10.865	35	0.310			

gl = grados de libertad

Si p-valor < 0.05 la diferencia es significativa

Fuente: Elaboración de datos para el estudio, 2021

Los resultados en la tabla de la prueba ANOVA, con el estadístico F cercano a uno; concuerdan con la observación de las estadísticas descriptivas pues no se perciben grandes diferencias entre los resultados obtenidos de cada tratamiento. El p-valor superior a 0.05 confirma la falta de significancia de la hipótesis de igualdad de medias por lo que se considera que no existe diferencia significativa en el rendimiento de producto obtenido tras el proceso de deshidratación con diferentes tratamientos. Por ultimo concuerda el efecto muy pequeño que el tipo de tratamiento evaluado ejerce sobre la variable rendimiento pues  $w^2 < 0.01$ .



Para validar el resultado de la prueba anterior los datos deben cumplir con los requerimientos de homogeneidad de varianzas evaluado con la prueba de Levene en la tabla 9 y distribución normal evaluada gráficamente en la figura 6.

**Tabla 32.**

**Homogeneidad de varianza de Levene para la variable Rendimiento**

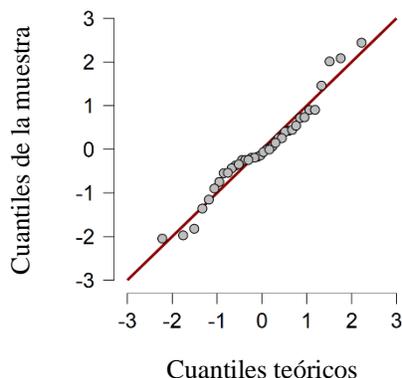
Prueba de Levene			
F	gl1	gl2	p
1.025	2.000	35.000	0.369

gl = grados de libertad.

Fuente: Elaboración de datos para el estudio, 2021

Un resultado cercano a uno en el estadístico F como en la tabla anterior indica varianzas iguales, lo cual se confirma con el p-valor superior a 0.05 que rechaza la existencia de diferencias significativas por lo que se cumple con el requisito de homogeneidad.

La grafica Q-Q de la variable rendimiento muestra normalidad en los datos ya que estos se distribuyen a lo largo de una línea recta.



**Figura 6. Grafica tipo Q-Q de la variable "rendimiento", elaboración de datos para el estudio 2021.**



Si bien estadísticamente no se observa diferencia significativa en la variable rendimiento según el tratamiento evaluado es interesante notar como al igual que con las dos variables anteriores en la tabla 10 se muestra que en promedio el tratamiento B presenta el mejor resultado con un mayor rendimiento seguido del tratamiento A y por último el tratamiento C.

**Tabla 33.****Resumen de estadísticas descriptivas para la variable Rendimiento**

<b>Tratamiento</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>N</b>
A	5.883	0.570	16
B	5.915	0.619	16
C	5.525	0.225	6

Fuente: Elaboración de datos para el estudio, 2021

**6.4 Porcentaje de cardamomo de primera calidad**

Cuanto mayor sea el resultado de esta variable mayor es la calidad del producto final, según los datos de la estadística descriptiva en la tabla 11. Se observa un mayor porcentaje de cardamomo de primera calidad en el tratamiento B seguido del tratamiento A y por último el tratamiento testigo C. Aunque la varianza del tratamiento B se asimila más a la del tratamiento C y ambas son mayores al tratamiento A el valor mínimo obtenido B sigue siendo mayor que el valor máximo obtenido del tratamiento C.

La representación gráfica de lo descrito anteriormente se observa en la figura 7 con un Diagrama de caja.



Tabla 34.

Estadística descriptiva de la variable "Porcentaje de producto de primera calidad" obtenida en los tratamientos.

Estadística descriptiva	% de 1era.		
	A	B	C
Validos	16	16	6
Faltantes	0	0	0
Promedio	39.971	42.543	17.847
Error estándar del promedio	0.945	1.212	2.206
Desviación estándar	3.780	4.850	5.405
Varianza	14.291	23.519	29.210
Mínimo	32.550	33.050	12.400
Máximo	48.610	54.670	28.200

Fuente: Elaboración de datos para el estudio, 2021

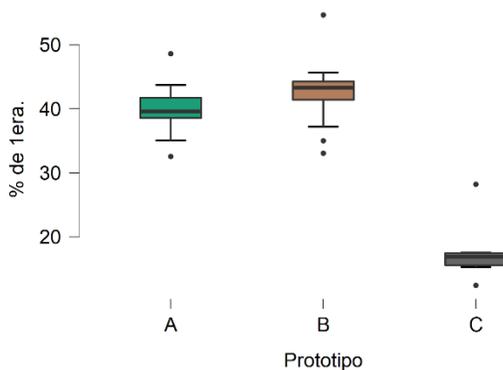


Figura 7. Gráfico de cajas comparativa del porcentaje de cardamomo de primera calidad obtenido entre tratamientos. Elaboración de datos para el estudio, 2021.

Por las diferencias observadas a continuación en la tabla 12 se presentan los resultados del análisis ANOVA con la que se determina estadísticamente si existe o no diferencia significativa.



Tabla 35.

**Prueba ANOVA aplicada a la variable "Porcentaje de cardamomo de primera calidad"**

Fuentes	Suma de cuadrados	gl	Cuadrado de la Media	F	p	$\omega^2$
Prototipo	2821.975	2	1410.988	69.243	< .001	0.782
Residuals	713.209	35	20.377			

*gl = grados de libertad.*

*Diferencia significativa si p-valor < 0.05*

Fuente: Elaboración de datos para el estudio, 2021

Se observa un estadístico F muy por encima del valor de uno lo cual indica una gran diferencia en las medias de los tres tratamientos y se comprueba con la significancia del p-valor. Además de esto el efecto  $w^2$  que ejerce el tratamiento seleccionado sobre la variable evaluada es grande.

La validación de la prueba ANOVA se da por el cumplimiento de homogeneidad de varianza con la prueba de Levene en la tabla 13 pues su p-valor no presenta significancia al ser mayor a 0.05 y por la normalidad de los datos que se distribuyen alrededor de una línea recta en el diagrama Q-Q de la figura 8.

Tabla 36.

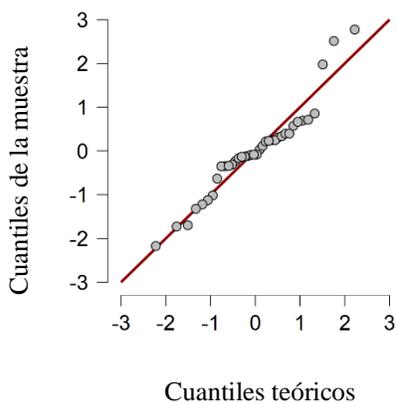
**Homogeneidad de varianza de la variable "Porcentaje de cardamomo de primera calidad"**

Prueba de Levene			
F	gl1	gl2	p
0.146	2.000	35.000	0.865

*gl = grados de libertad.*

*Diferencia significativa si p-valor < 0.05*

Fuente: Elaboración de datos para el estudio, 2021



**Figura 8. Distribución de datos de la variable "Porcentaje de cardamomo de primera calidad".  
Elaboración de datos para el estudio, 2021**

Dada la confirmación de diferencia significativa entre los tres tratamientos se presentan los resultados de una prueba a posteriori con corrección Scheffe para determinar en qué pares de tratamientos existe la diferencia.

**Tabla 37.**

**Comparativa a posteriori del porcentaje de cardamomo de primera calidad**

**Comparación a posteriori**

		Diferencia media	Error estándar	t	D de Cohen	p scheffe
A	B	-2.573	1.596	-1.612	-0.592	0.286
	C	22.124	2.161	10.238	5.212	< .001 ***
B	C	24.696	2.161	11.428	4.945	< .001 ***

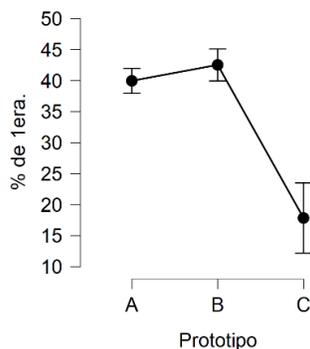
\*\*\* diferencia significativa si p-valor < .05

Nota. La d de Cohen no corrige para multiples comparaciones.

Nota. El p-valor fue ajustado para comparar un grupo de 3

Fuente: Elaboración de datos para el estudio, 2021

No se observa diferencia entre los tratamientos A y B, pero si existe entre cada prototipo y el tratamiento testigo C. El valor “d” indica el tratamiento empleado en las últimas dos comparaciones tiene un gran efecto en el porcentaje de cardamomo de primera que se obtiene. En la figura 9 se representan estos datos gráficamente.



**Figura 9. Porcentaje de cardamomo de primera calidad vs tratamiento. Elaboración de datos para el estudio, 2021.**

### 6.5 Porcentaje de cardamomo de segunda calidad

Como con la variable anterior la estadística de la tabla 15 muestra que el porcentaje de cardamomo de segunda calidad es mayor en los tratamientos A y B que en el C, sin embargo, los primeros dos muestran mucha más varianza.

**Tabla 38.**

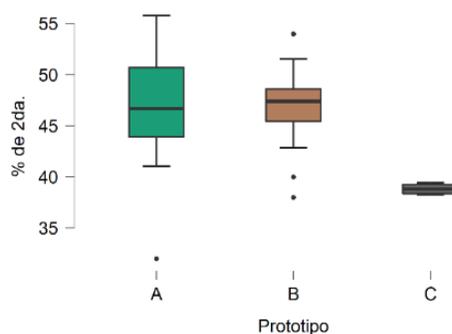
**Estadística descriptiva de la variable "Porcentaje de cardamomo de segunda calidad"**

Estadística descriptiva	% de 2da.		
	A	B	C
Valido	16	16	6
Faltante	0	0	0
Promedio	46.879	46.932	38.828
Error estándar del promedio	1.540	1.093	0.222
Desviación estándar	6.161	4.371	0.543
Varianza	37.961	19.102	0.295
Mínimo	32.000	38.000	38.250
Máximo	55.810	54.000	39.450

Fuente: Elaboración de datos para el estudio, 2021



En la tabla anterior, los valores mínimos de los tres tratamientos parecen estar más igualados que con las variables anteriores, sin embargo, el diagrama de caja de la figura 10 permite apreciar que realmente esto solo se debe a algunos valores atípicos dentro del conjunto de datos evaluado y como en las variables anteriores los valores máximos discrepan entre los prototipos y el testigo.



**Figura 90. Diagrama de caja del porcentaje de cardamomo de segunda calidad vs prototipo/tratamiento. Elaboración de datos para el estudio, 2021.**

Para esta variable la prueba ANOVA presento diferencia significativa en los resultados de la variable según los resultados de la tabla 16, sin embargo, según los resultados de la tabla 17 en esta ocasión no se cumplió el supuesto de homogeneidad de varianza por lo que se aplicó una corrección de Welch que también se incluye en la tabla 16 y que verifica junto a la confirmación de distribución normal de la figura 11 que la diferencia en los resultados es significativa y que el efecto del tratamiento ( $w^2$ ) es grande.



Tabla 39.

**Prueba ANOVA para el porcentaje de cardamomo de segunda calidad**

Corrección de homogeneidad	Fuentes	Suma de cuadrados	gl	Cuadrado de la media	F	p	$\omega^2$
Ninguna	Tratamiento	329.670	2.000	164.835	6.729	0.003	0.232
	Residuales	857.423	35.000	24.498			
Welch	Tratamiento	329.670	2.000	164.835	37.577	< .001	0.232
	Residuales	857.423	21.103	40.631			

gl = grados de libertad; si p-valor < 0.05 existe diferencia significativa.

Fuente: Elaboración de datos para el estudio, 2021

Tabla 40.

**Homogeneidad de varianza en la variable "Porcentaje de cardamomo de segunda calidad"**

**Prueba de Levene**

F	gl1	gl2	p
4.360	2.000	35.000	0.020

gl = grados de libertad

si p<0.05 existe diferencia.

Fuente: Elaboración de datos para el estudio, 2021

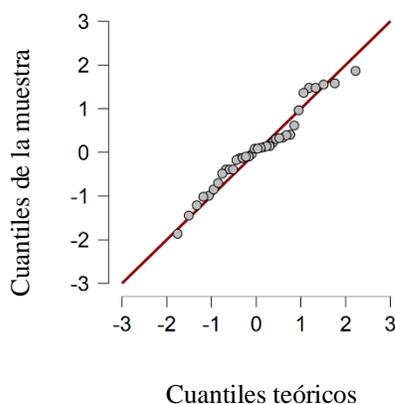


Figura 10. Distribución de datos de la variable porcentaje de cardamomo de segunda calidad. Elaboración de datos para el estudio, 2021.



La prueba a posteriori con corrección de Scheffe de la tabla 18 revela que la diferencia significativa se observa únicamente entre los tratamientos A-C ( $p < 0.007$ ) y B-C ( $p < 0.006$ ) como se puede apreciar gráficamente en la figura 12.

Tabla 41.

Comparativa a posteriori del porcentaje de cardamomo de segunda calidad entre tratamientos

	Diferencia media	Error estándar	t	D de Cohen	p scheffe
A B	-0.054	1.750	-0.031	-0.010	1.000
C	8.050	2.369	3.398	1.507	0.007**
B C	8.104	2.369	3.420	2.136	0.006**

\*\*  $p < .05$

Nota. La D de Cohen no corrige para comparaciones multiples.

Nota. P-valor ajustado para comparar un grupo de 3.

Fuente: Elaboración de datos para el estudio, 2021

Estos resultados se presentan gráficamente en la siguiente figura:

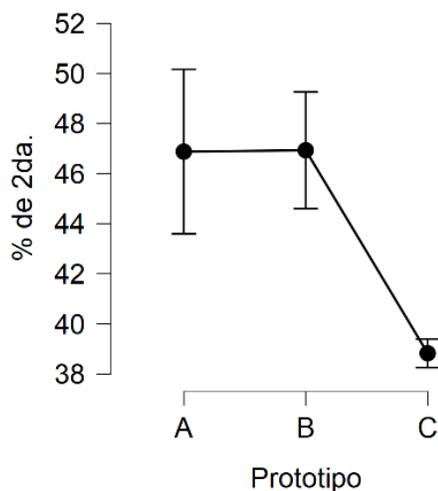


Figura 111. Porcentaje de cardamomo de segunda calidad vs Tratamiento. Elaboración de datos para el estudio, 2021.



## 6.6 Costo De Operación

El análisis de costo de operación se basa en las corridas experimentales realizadas siendo representativo de los tratamientos evaluados mas no de un equipo comercial terminado, sin embargo, presenta una oportunidad para establecer un punto de referencia de dichos costos para una futura implementación comercial de los hallazgos de este estudio.

De acuerdo con la estadística descriptiva de la tabla 19, en promedio el tratamiento A tiene el mayor costo de operación seguido de los tratamientos B y C respectivamente. Cabe señalar que los datos del tratamiento C no reflejan las variaciones climáticas que reflejan los tratamientos A y B debido al reducido tamaño de la muestra y a que los datos testigo provienen de una misma localidad, esto se refleja en las recurrentes variaciones de desviación estándar en el conjunto de variables evaluadas y la figura 12 muestra gráficamente como corresponden los costos con cada tratamiento.

**Tabla 42.**

**Estadística descriptiva del costo de operación en cada tratamiento**

Estadística descriptiva	Costo de operación		
	A	B	C
Valido	16	16	6
Faltante	0	0	0
Promedio	593.676	554.209	398.833
Error estándar del promedio	27.528	29.484	15.959
Desviación estándar	110.112	117.935	39.092
Varianza	12124.684	13908.690	1528.167
Mínimo	435.000	362.500	350.000
Máximo	851.300	816.930	450.000

Fuente: Elaboración de datos para el estudio, 2021

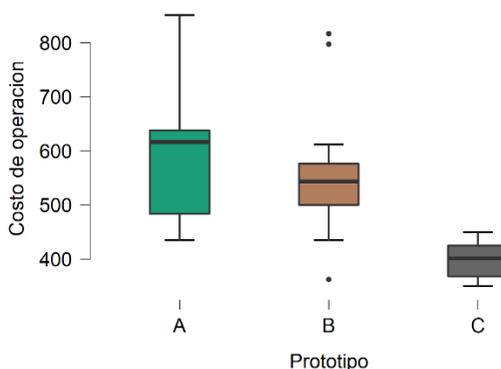


Figura 12. Gráfico de cajas - Costo de operación vs Tratamiento/Prototipo. Elaboración de datos para el estudio, 2021.

La prueba ANOVA para los costos de operación que se resume en la tabla 20 indica que se observa una diferencia significativa inespecífica que se profundiza con el resultado de la prueba posteriori en la tabla 21.

Tabla 43.

Prueba ANOVA para el costo de operación de los tratamientos

ANOVA - Costo de operación

Fuentes	Suma de cuadrados	gl	Cuadrado de la media	F	p	$\omega^2$
Prototipo	167391.423	2	83695.712	7.358	0.002	0.251
Residuales	398141.435	35	11375.470			

gl = grados de libertad; si p-valor < 0.05 existe diferencia significativa.

La prueba a posteriori con corrección de Sheffe muestra que la diferencia es significativa en los pares A-C (p=0.002) y B-C (p=0.016) únicamente y esto se observa también en forma gráfica en la figura 13.



Tabla 44.

**Prueba a posteriori del costo de operación en los tres tratamientos**

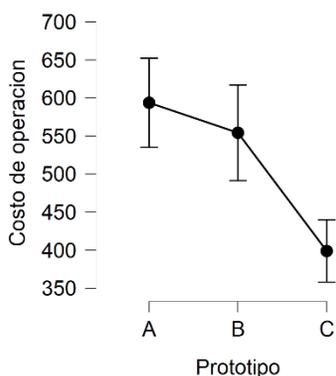
	Diferencia media	Error estándar	t	D de Cohen	p scheffe
A B	39.468	37.709	1.047	0.346	0.583
C	194.843	51.058	3.816	2.002	0.002 **
B C	155.375	51.058	3.043	1.494	0.016 *

Diferencias significativas si \* p-valor < .05, \*\* mayor significancia para p-valor < .01

Nota. La D de Cohen no corrige para comparaciones multiples.

Nota. P-valor ajustado para comparar un grupo de 3

Fuente: Elaboración de datos para el estudio, 2021



**Figura 13. Costo de operación por tratamiento. Elaboración de datos para el estudio, 2021.**

La tabla 22 muestra una comparativa del consumo energético entre las fuentes de energía: combustión de gas propano y combustión de leña de encino. Estos fueron los dos combustibles empleados durante la fase experimental de este estudio. La comparativa incluye una variedad de unidades de medida para facilitar la comprensión del lector, así como una aproximación del costo según precios actuales del mercado.



Tabla 45.

Consumo promedio por tipo de combustible

Fuente de energía	Consumo promedio por corrida	Duración promedio de una corrida	En Kg	Valor Calorífico KJ/Kg	Energía total por corrida en KJ	Toneladas equivalentes de petróleo (TEP)	En Galones de GLP	Precio por unidad comercial	Costo por corrida
GLP	43.57 metros cúbicos	29.063 horas	94.5469	48.43	4578.906367	1.09E-04	49.24	Q14.5/ Galón	Q 714.03
Leña de Encino	4 metros estéreos	40.33 horas	1396.36	16840.6	23515540.22	5.62E-01	243.58	Q100/ Metro Estero	Q 400.00

Fuente: Elaboración de datos para el estudio, 2021

### 6.7 Control Sobre La Regulación De Temperatura

Debido al sistema de combustión de GLP que se instaló en los prototipos fue posible reducir considerablemente la oscilación de las temperaturas por medio de un sistema electrónico para obtener un proceso más estable y energéticamente más eficiente. La grafica 14 muestra una comparación de la estabilidad de temperatura observada entre el sistema GLP y el testigo que funciona por combustión de leña.

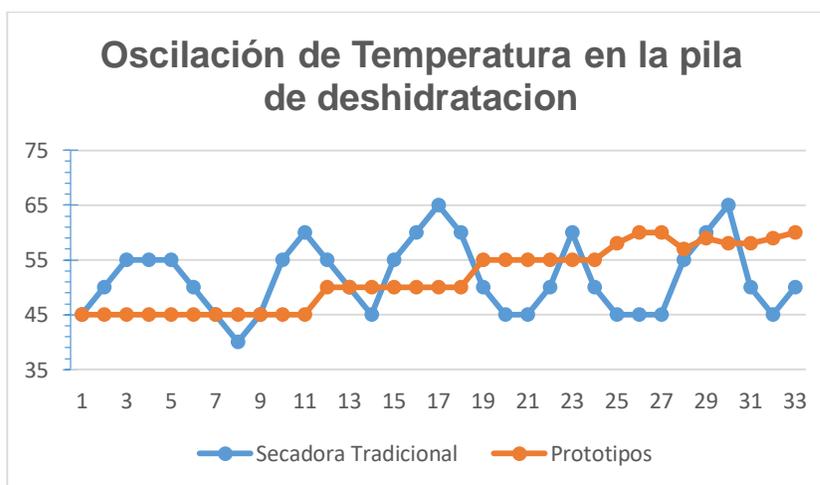


Figura 14. Grafica de control de la Oscilación de temperatura, Prototipos vs Testigo. Elaboración de datos para el estudio, 2021.



**CRIA**

**Programa Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria**



**FASE 2**

**Desarrollo e innovación tecnológica-mecánica en el deshidratado eficiente del cardamomo en Alta Verapaz, para el incremento de la productividad rural**



**CRIA**

**Programa Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria**





## **7. Objetivos De La Segunda Fase**

### **7.1 General**

Aplicar los conocimientos y tecnología generados en la fase 1 del presente proyecto “Desarrollo e innovación tecnológica-mecánica en el deshidratado eficiente del cardamomo en Alta Verapaz, para el incremento de la productividad rural” a la construcción de un deshidratador de cardamomo con una capacidad de procesamiento de 4,525 kg.

### **7.2 Específicos**

- Aplicar la tecnología de la fase 1 en un equipo de mayor escala.
- Proveer una capacidad de procesamiento de 4,525 kg por lote.
- Verificar su correcto funcionamiento y si es capaz de mantener la temperatura regulada y el consumo de GLP bajo tras el incremento en la capacidad.

## **8. Metodología De La Segunda Fase**

### **8.1 localidad Y Época**

Esta fase tuvo una duración de 5 meses iniciando el mes de enero de 2021 y finalizando en el mes de mayo del mismo año.

El diseño, análisis y construcción del equipo se llevó a cabo en las oficinas de la empresa “Asesoría y Soluciones” y en el taller de construcción “Indunix” ambos ubicados en Cobán, Alta Verapaz.



## 8.2 Cambios De Diseño En Relación A Los Prototipos

Para cumplir con el objetivo de la segunda fase se debía construir un equipo de mayores dimensiones, por sí mismo esto implica costos de fabricación más elevados y dado que los resultados de la primera fase no establecieron una diferencia significativa entre los diseños de las recamaras de deshidratación se optó por utilizar un diseño rectangular similar al que se utiliza actualmente en los equipos tradicionales.

La ventaja de este diseño de recámara de deshidratación es que permite un mejor aprovechamiento de los materiales evitando incrementar demasiado los costos de fabricación, especialmente en cuanto a las planchas perforadas se refiere ya que suele ser uno de los materiales de mayor precio.

El intercambiador de calor mantiene el diseño empleado en los prototipos a excepción de sus dimensiones que también fue necesario incrementar para cubrir la demanda del volumen, de aire caliente requerido por el incremento de capacidad.

El quemador de GLP utilizado en los prototipos que contaba con una potencia calorífica de 25 kilowatts no fue capaz de proporcionar suficiente energía térmica para mantener un mayor volumen de aire a la temperatura establecida por esto fue necesario compensar instalando uno de 60 kilowatts que entrega suficiente potencia calorífica para no permanecer encendido el cien por ciento del tiempo que dura el deshidratado de un lote, este nuevo quemador cuenta con un diseño de cámara de combustión más abierta hacia el intercambiador de calor y cerrando en un 33% el conducto de escape de gases de combustión.

## 8.3 Costo Estimado De Fabricación

El costo de fabricación del equipo, únicamente en materiales, se estima en Q71,258.11 de acuerdo con los costos de materiales cotizados a principios de 2021. Esto representa un incremento del 220% en costos de fabricación comparado con un incremento de 2,000% en la



capacidad de producción al comparar contra el costo estimado de uno de los prototipos de la primera fase.

### 8.4 Equipo Terminado

A continuación, se incluyen algunas fotografías del equipo a gran escala.



**Fotografía 4. Equipo con capacidad de 4,425 Kg, recamara de deshidratada cerrada, 2021.**



**Fotografía 5. Equipo con capacidad de 4,435 Kg, recamara de deshidratado abierta, 2021**

### 8.5 Datos Recopilados Del Funcionamiento

En la tabla 23 se incluyen los datos recolectados durante la única corrida experimental a la cual se sometió el equipo de la segunda fase, estos datos corresponden a las mediciones de temperatura durante la duración del proceso. En la figura 15 se presenta una representación gráfica de estos datos.

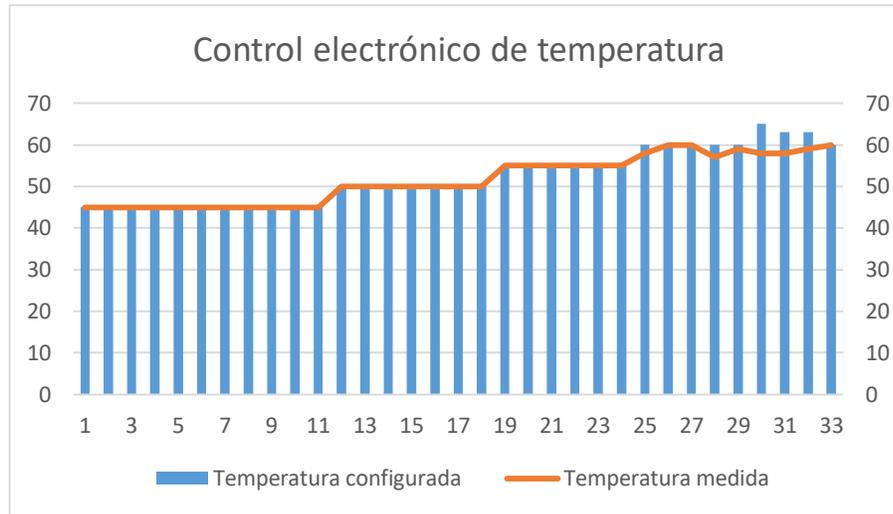


Tabla 46.

Datos de la corrida de prueba del equipo con capacidad de 4,435 Kg

<i>Horas</i>	Temperatura configurada	Temperatura medida
1	45	45
2	45	45
3	45	45
4	45	45
5	45	45
6	45	45
7	45	45
8	45	45
9	45	45
10	45	45
11	45	45
12	50	50
13	50	50
14	50	50
15	50	50
16	50	50
17	50	50
18	50	50
19	55	55
20	55	55
21	55	55
22	55	55
23	55	55
24	55	55
25	60	58
26	60	60
27	60	60
28	60	57
29	60	59
30	65	58
31	63	58
32	63	59
33	60	60

Fuente: Elaboración de datos para el estudio, 2021



**Figura 15. Gráfica de control de la oscilación de temperatura. Elaboración de datos para el estudio, 2021.**

Como se puede observar en la gráfica de control, el desempeño del sistema es el esperado, siendo capaz de mantener la temperatura de deshidratado estable en un rango de +/- 5°C.

### **8.6 Consumo De Gas Propano**

Al inicio de las pruebas se observó un consumo de 2 galones por hora, después de ajustes y cambios en el sistema de combustión el consumo se redujo a un rango de 1.5 y 1.6 galones por hora.

### **8.7 Calidad Del Producto Deshidratado**

Se tomó una muestra de la corrida experimental y se obtuvo un porcentaje de primera calidad de 28% y uno de segunda calidad de 38%, estos resultados son inferiores a los mostrados por los prototipos, sin ser menores a los que se observa en los equipos tradicionales. Es importante señalar que el producto empleado en esta corrida era de menor calidad por provenir del último corte de la cosecha habiendo sido cortado tres días antes de la prueba cuando normalmente se operan el mismo día del corte.



**CRIA**

**Programa Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria**





**CRIA**

**Programa Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria**



### **FASE 3**

**Desarrollo e innovación tecnológica-mecánica en el deshidratado eficiente del cardamomo en Alta Verapaz, para el incremento de la productividad rural**



**CRIA**

**Programa Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria**





### 9. Resumen de la fase 3

La segunda fase del proyecto se finalizó con resultados positivos, los cuales fueron publicados en la página oficial del programa IICA/CRIA, dando a conocer las características principales, ventajas de la nueva tecnología para el deshidratado de cardamomo, medio por el cual miembros de la asociación chabil ik del caserío Canihor Santa María Cahabón, Municipio de Cobán A. V. solicitaron el apoyo para solucionar problemas de secado que se presentan en una época del año en la cual las condiciones climáticas como la lluvia, les interrumpe el proceso de secado al sol, afectando así el tiempo del proceso, la calidad del producto, capacidad de producción, y por consecuencia reduce su ingreso económico, por dicha razón en respuesta a su solicitud formal, se realizó un análisis de pre factibilidad en el acondicionamiento del prototipo B de deshidratado de cardamomo a deshidratador para chile Cahabonero, en el análisis se consideró que para el acondicionamiento era necesario conocer las características del producto, el proceso tradicional de secado, la temperatura a la cual se somete, características organolépticas que debe mantener el producto al final del proceso, como color, aroma, textura, porcentaje de humedad, posterior a la evaluación se determinó que para lograr los requisitos anteriormente mencionados era necesario hacer cambios en el equipo, tales como cambiar el diseño de la cámara de deshidratado, acondicionar el producto en bandejas con el fin de airear o distribuir el calor de manera homogénea, recircular el calor para reducir el tiempo y mejorar la eficiencia del proceso.

En el rediseño se reutilizó el 80% del prototipo, usando el mismo quemador industrial marca Bairan, el intercambiador de calor, el ventilador, la tolva de distribución, del prototipo de deshidratado de cardamomo, panel de control de encendido y temperatura digital y paro de emergencia, agregando al nuevo diseño una base para incrementar la altura del prototipo, un motor diésel de 8 HP para generar el movimiento del ventilador, una tolva para distribución de calor, una tolva para succión del calor y humedad, tubería de conducto con dos codos a 90 grados para el retorno del calor, una nueva cámara para el alojamiento de ochenta bandejas de



aluminio perforadas, cuatro clavijeros con capacidad de veinte bandejas cada uno, sin embargo la cámara cuenta con capacidad de ocho clavijeros para el crecimiento futuro.

## **10. Objetivos de la tercera fase**

### **9.1 General**

Reutilizar el prototipo B que fue diseñado para el deshidratado de 225 kg de cardamomo en cereza, acondicionándolo para utilizarlo como deshidratador de chile Cahabonero.

### **9.2 Específicos**

- Analizar la pre factibilidad del proceso de acondicionamiento del prototipo B para su uso como deshidratador de chile Cahabonero considerando el proceso tradicional e identificando los posibles componentes reutilizables.
- Reducir el tiempo de deshidratado
- Disminuir el manejo o volteo del chile para evitar el rompimiento de la capsula.
- Incrementar la capacidad hasta 270 kg.

## **11. Metodología de la tercera fase**

### **11.1 localidad y Época**

Esta fase se desarrolló durante el mes de septiembre de 2021.

El diseño, análisis y construcción del equipo se llevó a cabo en las instalaciones del taller A&S ubicado en Cobán, Alta Verapaz.



## 11.2 Cambios de diseño en relación a los prototipos

El prototipo B de deshidratado de cardamomo, consta de un quemador industrial a base de GLP (gas licuado de petróleo), reguladores de presión de gas y llaves de paso que permiten el funcionamiento del sistema de calefacción; un intercambiador de calor en el que se eleva la temperatura ambiente del aire a la temperatura de deshidratación deseada de manera independiente, lo que significa que el aire pasa calentándose sin tener contacto directo con la llama del quemador, evitando así contaminarse y por ende el producto.

La temperatura se controla con un sistema automático que permite fijarla con una tolerancia de  $\pm 5$  grados centígrados, cuenta con un sistema de seguridad industrial para evitar el paso de gas sin llama, esto corresponde al sistema de calefacción con el quemador industrial.

El sistema de ventilación consta de un ventilador con un diámetro de 0.45 metros anteriormente accionado por un motor eléctrico de 2HP 240 voltios, 60 Hz. Debido a que en la comunidad carecen de energía eléctrica, se sustituyó por un motor de combustión diésel, de 6HP, todos los elementos anteriormente descritos del deshidratador de cardamomo, fueron reutilizados sin cambios relevantes en el nuevo diseño, únicamente se le agregó una base metálica para alcanzar la altura que exigían las nuevas tolvas y una tubería de retorno en la ventilación con el fin de mejorar la eficiencia energética.

En el diseño del prototipo B La pila de deshidratado consistía en una caja horizontal, de 1.00 metro de ancho por 1.5 metros de largo y 0.5 metros. de altura, por lo que se sustituyó con el fin de incrementar la capacidad del nuevo deshidratador de chile, ya que con el chile no se debe acumular una altura mayor a 15 cm. Para evitar daños mecánicos en el mismo y porque se debe evitar el movimiento manual del producto debido a su alto poder de picor cápsico, por tal razón se diseñó una nueva cámara de calefacción en la que pueden ingresar hasta seis clavijeros de veinte bandejas perforadas cada uno, con una capacidad total de seis quintales, con flexibilidad de llegar a diez quintales. El objeto de utilizar los clavijeros y bandejas es lograr una mejor distribución del flujo del aire caliente en las capas delgadas de producto, reducir la manipulación del chile, y el tiempo de deshidratado, las dimensiones de dicha cámara son 2.44



por 1.63 metros. y una altura de 2.00 metros. en esta cámara se acumula el flujo de aire caliente, arrastrando el vapor de las cápsulas de chile, provocando así la operación unitaria de la deshidratación por convección, alcanzando su efecto de adentro hacia afuera de cápsula de chile, la cámara de deshidratado y la tubería de retorno, están elaboradas con lámina de alucín, con el fin de reducir los costos de la ejecución, estos son los cambios sustanciales que se realizaron en la nueva cámara de deshidratado, y la suma de cuatro clavijeros de aluminio con rodos y ochenta bandejas de aluminio perforadas.

### 11.3 Costo del proyecto

El costo de reutilización y acondicionamiento del equipo, considerando únicamente el valor de los materiales adquiridos durante esta fase ascendió a Q27,506.25.

### 11.4 Imágenes del equipo terminado

A continuación, se incluyen algunas fotografías del equipo a gran escala.



**Fotografía 6. Deshidratador de chile Cahabonero con 270kg de capacidad, 2021.**



**Fotografía 7. Deshidratador de chile Cahabonero, sistema de bandejas, 2021**

### **11.5 Generalidad de operación**

El deshidratador de chile Cahabonero puede ser utilizado con cilindros de GLP de 100 libras. Su puesta en funcionamiento consiste en realizar la siguiente serie de pasos:

- a. Abrir la llave principal de gas ubicada en el tanque de gas.
- b. Abrir la llave secundaria de gas ubicada antes del quemador.
- c. Verificar una presión de gas de 0.5 libras en el manómetro.
- d. Verificar que el sistema de control se encuentre energizado.
- e. Arrancar el motor de combustión diésel para iniciar el ventilador.
- f. Ingresar el producto en la cámara de deshidratación.
- g. Encender el sistema de calefacción
- h. Verificar el cierre correcto de las puertas.
- i. Programar la temperatura deseada, se recomienda iniciar con una temperatura de 40 grados Celsius durante las primeras tres horas del proceso para luego incrementar la temperatura 5 grados cada hora hasta alcanzar los 60 grados Celsius y mantener dicha temperatura hasta obtener un producto con el grado de deshidratación deseado.



### **11.6 Consumo De Gas Propano**

El consumo promedio de gas propano deberá rondar entre 1.5 y 1.75 galones por hora con la presión del manómetro en 0.5 libras de presión de GLP, lo cual se considera típico en estos prototipos.

### **11.7 Calidad Del Producto Deshidratado**

Debido a la falta de producto durante la época en que el equipo fue terminado, no fue posible realizar ninguna prueba real que permitiera evaluar la calidad del deshidratado.



## 12. Conclusiones

De acuerdo con el objetivo general de la primera fase de investigación, se diseñaron y construyeron dos prototipos para el deshidratado de cardamomo, cuyos diseños se describen con detalle en los planos anexos a la investigación, y cuya diferencia radica en el diseño estructural de las pilas de deshidratación. Comparando los resultados de las variables: “Duración del proceso”, “Rendimiento del producto deshidratado”, “Porcentaje de cardamomo de primera calidad”, “Porcentaje de cardamomo de segunda calidad” y “Costo del combustible consumido en la operación de deshidratado”. Se encontró que a pesar de que el prototipo B generalmente presento resultados levemente superiores al prototipo A, estas diferencias no fueron estadísticamente significativas ( $p > 0.05$ ). Si lo fueron sin embargo al contrastar los resultados contra los obtenidos del tratamiento testigo ( $p < 0.007$ ).

En base a dichos resultados se acepta la hipótesis alterna indicando que fue posible observar diferencias significativas entre los resultados de los prototipos y el testigo.

La conclusión anterior se evidencia en los porcentajes de capsulas de cardamomo de primera (41.26%) y segunda calidad (46.9%) obtenidos de los prototipos, lo cual representa un incremento en la proporción de estas calidades de 2.3 y 1.21 veces, respectivamente, al comparar con los porcentajes de primera (17.85%) y segunda (38.83%) obtenidos del tratamiento testigo.

Se calculó y comparó la magnitud de energía empleada por cada uno de los combustibles usados en los tratamientos y se encontró que los tratamientos A y B que funcionan con un quemador de GLP (4,578.91 kJ/corrida) son 5,135.62 veces más eficientes en el aprovechamiento energético de los recursos naturales que el tratamiento C que funciona por combustión de leña (23,515.54 MJ/corrida), esto significa que el 70% del potencial energético que se libera de la combustión de la leña no es aprovechado y por lo tanto se desperdicia. Verificando de esta forma que la combustión de GLP tiene un mejor aprovechamiento térmico en los intercambiadores de calor que la combustión de leña y por consiguiente se puede



considerar el recurso más responsable de los dos debido a un menor impacto ambiental que mejora la eco-eficiencia del proceso de deshidratado a la vez que coadyuva a la ecología industrial por el incremento en la eficiencia energética respecto al proceso de combustión involucrado.

Como se pudo observar en la gráfica de control de temperatura que compara los prototipos contra el tratamiento testigo, la tecnología de control electrónico permitió obtener temperaturas de deshidratado estables con oscilaciones no mayores a +/- 5 °C en los prototipos a diferencia de las oscilaciones observadas en los equipos testigo que superan este rango. Esto se debe a que la generación de calor por combustión de GLP es más sencilla de controlar que la de combustión de leña. El control electrónico de la temperatura también influyó en la duración del proceso que fue en promedio un 27.9% menor en los prototipos (29.06 horas) que en el testigo (40.33 horas), con la duración del prototipo B ligeramente menor que la del A. De esta manera la duración del proceso influye directamente en el gasto del combustible empleado para calentar el aire durante la operación de deshidratado presento diferencia estadísticamente significativa entre los tres tratamientos y siendo en promedio menor para el tratamiento C (Q398.83/corrida), seguido del tratamiento B (Q554.22/corrida) y por último el tratamiento A (Q593.67).

El rendimiento del producto deshidratado al final del proceso, a nivel de las observaciones descriptivas, fue levemente mayor en el tratamiento B, seguido por el tratamiento A y por último el resultado del tratamiento C, sin embargo a nivel estadístico no se presentó diferencia significativa ( $p > 0.05$ ) entre los tres tratamientos lo cual se interpreta como la existencia de homogeneidad entre muestras validando el diseño estadístico aplicado al experimento. El promedio para los tres tratamientos fue de 5.77 kilos de cardamomo en cereza para obtener 1 kilo de cardamomo en pergamino.

El costo de producción de los prototipos empleados en este estudio se considera elevado considerando su capacidad productiva pero no es representativo de su costo de fabricación en masa debido a las continuas modificaciones intrínsecas de un proceso de



**CRIA**

**Programa Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria**



73

investigación y desarrollo, dicho esto, adjunto en los anexos del presente documento se encuentran los costos de los materiales empelados durante este estudio.

Como segunda fase del proyecto se planteó aplicar lo aprendido con los prototipos a un equipo de mayor escala. igualando la capacidad productiva de los equipos tradicionales. Los resultados de esta fase fueron satisfactorios pues se construyó un equipo con capacidad para procesar 4,525 Kg de producto por lote, proveyendo 20 veces mayor capacidad productiva que cualquiera de los prototipos iniciales, con un costo de fabricación de tan solo el doble que uno de estos y siendo capaz de mantener la temperatura de deshidratado estable.

A la vez se redujo el tiempo de deshidratado un 25% respecto a los datos obtenidos del tratamiento C de la primera fase y se obtuvo 1.57 veces más cardamomo de primera (28%) que en este. Cabe señalar que los datos se obtuvieron de una sola corrida puesto que experimentar con lotes de tal magnitud incurriría en gastos de materia prima mayores a los disponibles para el proyecto. Y por último que el producto con el que se realizó esta única prueba se considera de una calidad inferior al promedio por haberse obtenido del ultimo corte de la cosecha.



**CRIA**

**Programa Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria**





### 13. Recomendaciones

El análisis estadístico no mostró diferencia significativa entre los resultados obtenidos con los prototipos sin embargo a pesar de esto, los resultados constantemente fueron más favorables con el prototipo B que con el A por lo que se recomienda profundizar en la investigación de los diseños de recamaras de deshidratación con el fin de optimizar el proceso e incrementar su eco-eficiencia.

De igual forma se recomienda continuar con el desarrollo de diseños de intercambiador, su construcción y materiales empleados con el fin de incrementar la eficiencia térmica del equipo para reducir el consumo de GLP incrementado la ecología industrial y ayudando a mitigar el problema logístico de distribución de este combustible a las aldeas más remotas.

Por último, a quien esté interesado en implementar la tecnología desarrollada y evaluada en esta investigación se le recomienda tomar como referencia el diseño del tratamiento B si desea operar con lotes de alrededor de 226 Kg, y el del equipo diseñado en la segunda fase si requiere un equipo de mayor capacidad. Ambos diseños se detallan en los planos adjuntos al documento.



**CRIA**

**Programa Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria**





### Referencias

- AGEXPORT. (4 de Mayo de 2018). *La importancia del cardamomo en la economía de Guatemala*. Obtenido de <https://web.archive.org/web/20190712210244/http://cardamomo.gt:80/estudioimpacto/Presentacion%20Estudio%20de%20%20Impacto%20Cardamomo.pdf>
- Banco Central de Guatemala (BANGUAT). (30 de 05 de 2020). [www.banguat.com.gt](http://www.banguat.com.gt). Obtenido de VOLUMEN Y PRECIO MEDIO DE LOS 25 PRINCIPALES PRODUCTOS DE EXPORTACIÓN: <http://www.banguat.gob.gt/inc/ver.asp?id=estaeco/bc/bc04.htm&e=26137>
- Castro, W. L. (2015). *Estudio para mejorar el diseño de secadoras para cardamomo*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- de León, P. (11 de octubre de 2017). Presentan impacto del cardamomo en la economía guatemalteca. (DataExport, Entrevistador)
- Dirección General de Investigación y Extensión Agrícola. (1991). Aspectos Técnicos sobre Cuarenta y Cinco Cultivos Agrícolas de Costa Rica. San José.
- Eguizabal, L. F. (2017). *Evaluación de trampas etológicas para el control de Trips (Sciothrips cardamomi) en el cultivo de cardamomo (Elettaria cardamomum) en Alta Verapaz, Diagnóstico y servicios realizados con la asociación de cardamomeros de Guatemala, Guatemala*. Universidad San Carlos de Guatemala.
- Espinoza H., S. E. (2016). *Fortalecimiento de las capacidades de los consorcios de actores locales para gestionar y participar en investigación aplicada en las cadenas productivas priorizadas por región*. Cadena del cultivo de Cardamomo, Region Norte. CATIE.
- Fuentes, C. R. (2016). *Consumo de leña en el proceso de secado de cardamomo (Elettaria cardamomum); Santa Catalina la Tinta, Alta Verapaz*. San Juan Chamelco, Alta Verapaz: Universidad Rafael Landívar.
- Granados, E. O. (2014). *Evaluación cualitativa de la cadena de valor de cardamomo en Guatemala*. Guatemala: Ministerio de Economía.
- Ibarz, A., & Barbosa-Cánovas, G. V. (2011). *Operaciones Unitarias en la Ingeniería de Alimentos*. Mexico: Mundi-Prensa.
- Nair, K. P. (2020). The Geography of Cardamom (*Elettaria Cardamomum* M.). En K. P. Nair, *The Geography of Cardamom*. Switzerland: Springer.
- Ruano, R. (2002). *El CULTIVO DE CARDAMOMO (Elettaria cardamomun) EN GUATEMALA*. Guatemala: INSTITUTO DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA AGRÍCOLAS ICTA.
- Sosa, M. E. (1983). *Abscisión, fenología y fenometría en inflorescencias, flores y frutos de cardamomo (Elettaria cardamomun (L) Maton Grupo Minúscula Burkhill) en Cobán Alta Verapaz*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Universidad de Minnesota, Departamento de Agricultura . (19 de 05 de 2017). *Dryeration and in-storage cooling for corn drying*. Obtenido de Departamento de agricultura: <https://extension.umn.edu/agriculture/corn/harvest/dryeration-and-cooling-for-corn-drying/>
- Vanaclocha, A. C., & Requena, J. A. (2003). *Procesos de conservación de alimentos*. Madrid: Mundi-Prensa.



**CRIA**

**Programa Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria**



**CRIA****Programa Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria****12 Anexos****12.1 Costo de materiales utilizados para la fabricación del tratamiento A**

<i>Tratamiento</i>	<b>Componente</b>	<b>Unidades</b>	<b>Producto</b>	<b>Precio Unitario</b>	<b>Total</b>	
<b>Tratamiento A</b> <i>(Prototipo con pila de deshidratación circular)</i>	<b>Pila de deshidratación</b>	1	LAMINA PERFORADA	Q 1,000.00	Q 1,000.00	
		5	TUBO GALVANIZADO DE 1X1	Q 88.87	Q 444.35	
		3	LAMINA DE ACERO INOX 4X8	Q 410.00	Q 1,230.00	
		200	TORNILLOS DE 1/2 PUNTA DE BROCA	Q 0.09	Q 18.00	
		2	VISAGRAS	Q 10.00	Q 20.00	
		4.8	FIBRA DE VIDRIO	Q 35.00	Q 168.00	
		1.5	LAMINA DE ALIUSIN CALIBRE 24 DE 4X5	Q 56.00	Q 84.00	
		1	CARACOL TURBINA ACERO INOX	Q 3,500.00	Q 3,500.00	
		2	FAJAS PARA TURBINA	Q 48.00	Q 96.00	
		1	MOTOR DE 2HP	Q 2,900.00	Q 2,900.00	
		1	TOLVA DE ACERO INOX	Q 1,000.00	Q 1,000.00	
		2	ELECTRODOS 6013 PUNTO CAFÉ DE 1/8	Q 12.00	Q 24.00	
	<b>Sub-Total</b>					<b>Q 10,484.35</b>
	<b>Intercambiador de calor</b>	3	TUBO GALVANIZADO DE 2X2	Q 171.00	Q 513.00	
		1	LAMINA DE ACERO INOX 0.6 DE 4X12	Q 800.00	Q 800.00	
		4.5	LAMINA DE ALIUSIN CALIBRE 24 DE 4X15	Q 56.00	Q 252.00	
		3	TUBO GALVANIZADO REDONDO DE 2"	Q 160.00	Q 480.00	
		12	ELECTRODOS 6013 PUNTO CAFÉ DE 1/8	Q 12.00	Q 144.00	
		1	LAMINA NEGRA 3/32 DE 4X8	Q 410.00	Q 410.00	
		1	QUEMADOR DE GAS	Q 12,000.00	Q 12,000.00	
		1	GABINETE INDUSTRIAL CON CONTROLES	Q 3,251.17	Q 3,251.17	
		1	MEDIDOR DE GAS	Q 1,450.00	Q 1,450.00	
		4	TACOS DE HULE DE 2X2	Q 5.00	Q 20.00	
		4	FIBRA DE VIDRIO	Q 35.00	Q 140.00	
		2	TUBO DE ALUSIN DE 4"	Q 75.00	Q 150.00	
		1	SOMBRERO CHINO (PARA CHIMENEA)	Q 35.00	Q 35.00	
		1	PINTURA COLOR VERDE	Q 300.00	Q 300.00	
1		TUBO GALVANIZADO DE 1X1	Q 88.87	Q 88.87		
1	INSTALACION COMPLETA DE GAS	Q 1,300.00	Q 1,300.00			
<b>Sub-Total</b>					<b>Q 21,334.04</b>	
<b>TOTAL</b>					<b>Q 31,818.39</b>	

### 12.2 Costo de materiales utilizados para la fabricación del tratamiento B

Tratamiento	Componente	Unidades	Producto	Precio Unitario	Total	
<i>Tratamiento B</i> <i>(Prototipo con pila de deshidratado rectangular)</i>	Pila de deshidratado	12	LAMINA DE ALUSIN CALIBRE 24 DE 4X40	Q 56.00	Q 672.00	
		1	LAMINA DE ACERO INOX 0.8 DE 4X10	Q 655.00	Q 655.00	
		1	LAMINA PERFORADA	Q 1,000.00	Q 1,000.00	
		200	REMACHES	Q 0.35	Q 70.00	
		2	TUBO NEGRO DE 2X2	Q 185.00	Q 370.00	
		2	TUBO GALVANIZADO DE 2X2	Q 171.00	Q 342.00	
		1	TUBO GALVANIZADO DE 1X1	Q 88.87	Q 88.87	
		4.66	FIBRA DE VIDRIO	Q 35.00	Q 163.10	
		1	TUBO GALVANIZADO REDONDO DE 3/4	Q 150.00	Q 150.00	
		1	TUBO GALVANIZADO REDONDO DE 2"	Q 150.00	Q 150.00	
		1	ANGULAR NEGRO DE 1/16 X1	Q 65.50	Q 65.50	
		45	TORNILLOS POLSER PUNTA DE BROCA DE 1"	Q 0.60	Q 27.00	
		1	BISAGRA PIANO	165	Q 165.00	
		1	MOTOR ELECTRICO 2HP	Q 2,900.00	Q 2,900.00	
		2	FAJAS	Q 48.00	Q 96.00	
		2	PINTURA COLOR VERDE	Q 300.00	Q 600.00	
		1	CARACOL TURNINA DE ACERO INOX	Q 3,500.00	Q 3,500.00	
		3	ELECTRODOS 6013 PUNTO CAFÉ DE 1/8	Q 12.00	Q 36.00	
	<b>Sub-Total</b>					<b>Q 11,050.47</b>
	Intercambiador de calor	3	TUBO GALVANIZADO DE 2X2	Q 171.00	Q 513.00	
		1	LAMINA DE ACERO INOX 0.6 DE 4X12	Q 800.00	Q 800.00	
		4.5	LAMINA DE ALIUSIN CALIBRE 24 DE 4X15	Q 56.00	Q 252.00	
		3	TUBO GALVANIZADO REDONDO DE 2"	Q 160.00	Q 480.00	
		12	ELECTRODOS 6013 PUNTO CAFÉ DE 1/8	Q 12.00	Q 144.00	
		1	LAMINA NEGRA 3/32 DE 4X8	Q 410.00	Q 410.00	
		1	QUEMADOR DE GAS	Q 12,000.00	Q 12,000.00	
		1	GABINETE INDUSTRIAL CON CONTROLES	Q 3,251.17	Q 3,251.17	
		1	MEDIDOR DE GAS	Q 1,450.00	Q 1,450.00	
4		TACOS DE HULE DE 2X2	Q 5.00	Q 20.00		
4		FIBRA DE VIDRIO	Q 35.00	Q 140.00		
2		TUBO DE ALUSIN DE 4"	Q 75.00	Q 150.00		
1		SOMBRERO CHINO (PARA CHIMENEA)	Q 35.00	Q 35.00		
1		PINTURA COLOR VERDE	Q 300.00	Q 300.00		
1		TUBO GALVANIZADO DE 1X1	Q 88.87	Q 88.87		
1		INSTALACION COMPLETA DE GAS	Q 1,300.00	Q 1,300.00		
<b>Sub-Total</b>					<b>Q 21,334.04</b>	
<b>TOTAL</b>					<b>Q 32,384.51</b>	





**CRIA**

**Programa Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria**

