



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO TECNO-ECONÓMICO Y EMISIONES DE UN  
SECADOR ARTIFICIAL CONVECTIVO DE GRANOS DE CACAO USANDO  
CÁSCARA DE MAZORCA DE CACAO COMO RECURSO ENERGÉTICO**

**Juan Sebastián Vásquez Alzate**

**Tesis para optar al título maestría en ingeniería con énfasis en energía**

**DIRECTOR: Juan Fernando Pérez Bayer, Ph.D.**

**CO-DIRECTOR: Edwin Lenin Chica Arrieta, Ph.D.**

**Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ingeniería  
Medellín  
2024**

Cita	Vásquez Alzate [1]
<b>Referencia</b>  Estilo IEEE (2020)	[1] J.S. Vásquez Alzate, "Evaluación del desempeño tecno-económico y emisiones de un secador artificial convectivo de granos de cacao usando cáscara de mazorca de cacao como recurso energético", Tesis de maestría, Maestría en Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2024.

Maestría en Ingeniería, Cohorte XXXVI.

Grupo de Investigación Manejo Eficiente de la Energía (GIMEL).



**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## **Dedicatoria**

*A mis padres, mi hermana y en general mi bondadosa familia. Gracias a su apoyo, su confianza y su amor fraterno, este trabajo pudo culminarse.*

## **Agradecimientos**

A mis directores de tesis, los profesores Juan Fernando Pérez Bayer y Edwin Lenin Chica Arrieta, de los cuales he aprendido la importancia de llevar a cabo la ejecución de proyectos con determinación, entendimiento y de ese modo manejar estos de forma controlada. Mil gracias también, a mis compañeros los ingenieros Juan Felipe Vásquez, José Alejandro Urrego, Jonatan Gutiérrez y Esteban López, con quienes desarrollé un trabajo en equipo dinámico, jalonando siempre al avance y sintonizados a los propósitos de los objetivos en desarrollo.

Gracias también al CODI (Comité para el Desarrollo de la Investigación) Universidad de Antioquia y a los grupos de investigación Gimel y GEA, quienes me permitieron realizar esta tesis de maestría, en el marco del proyecto “Desarrollo de un secador de granos de cacao aprovechando la cáscara de mazorca de cacao como fuente energética: aplicación tecnológica para el sector cacaotero de Colombia”.

A Don Chucho, su hijo Jiovany Zapata, Alvaro León Gómez y su querida esposa Vianey; nuevamente gracias por toda su hospitalidad y ayuda desinteresada, para sacar adelante todas las tareas realizadas en la vereda la Guyana, Municipio de Amalfi, Antioquia.

## RESUMEN

El cacao colombiano es reconocido en todo el mundo por su sabor y aroma únicos, que se logran mediante un proceso cuidadoso de postcosecha. El secado es una etapa crucial de este proceso ya que ayuda a preservar las características organolépticas. En la región de Antioquia al igual que en otras zonas del país donde se cultiva el cacao, el proceso de secado se realiza en estructuras simples conocidas como “marquesinas”, que pueden exponer el grano a factores externos contaminantes, como insectos, desechos de aves como plumas, objetos peligrosos como vidrios partidos, residuos metálicos como metal corroído u oxidados por intemperie, que podrían comprometer la calidad e inocuidad del grano. Igualmente, la variabilidad de las condiciones micro ambientales durante el secado pueden generar hongos y bacterias, comprometiendo la salubridad y la calidad del productos.

El aumento en la producción de cacao también ha llevado a un aumento en la generación de residuos de cosecha, como la cáscara de mazorca de cacao (CMC), que representa aproximadamente el 70% de la masa del fruto. Aunque se utiliza como fertilizante debido a su alto contenido de potasio, la disposición final de la CMC en el suelo de cultivo puede generar enfermedades y malos olores.

Estas dos problemáticas, la contaminación durante el secado y la disposición inadecuada de la CMC, junto con la necesidad de reducir el tiempo de secado, ya que depende de la disponibilidad de luz solar, han generado alternativas como el uso de secado artificial y la utilización de residuos de cacao como fuente de energía. Por lo tanto, el objetivo de esta tesis de maestría es desarrollar y evaluar el desempeño tecno-económico y las emisiones de un secador artificial que tiene como fuente energética una mezcla de biomasa, conformada por cáscara de mazorca de cacao y residuos de madera para el secado de granos de cacao.

Los principales resultados obtenidos en el secador artificial a escala o convectivo son; 14 horas de secado no continuas en horarios inclusive diferentes a horas solares, una eficiencia en cámara de secado de 28.17% y una tasa de secado de 38.07 g/h. Adicionalmente, evaluando la operación de secado en secador artificial versus marquesina, se tiene que la marquesina resulta 315  $COP\$/kg_{cacaoseco}$  más económico que el secador, sin embargo se debe considerar lo que se estaría dejando de percibir por secar solo en los tiempos que están establecidos para marquesina, que son momentos donde se tiene disponibilidad de energía solar ósea en horario diurno de 7 de la mañana a 5 de la tarde, concretamente.

## CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	9
1.1. Secado de cacao en el proceso tradicional.....	10
1.2. Secadores de productos agrícolas y secadores cacao .....	13
1.2.1. Materiales e instrumentación utilizada en fabricación de secadores de productos agrícolas .....	19
1.3. Caracterización termodinámica de secadores de cacao .....	20
1.3.1. Secadores Solares .....	21
1.3.2. Secadores híbridos.....	23
1.3.3. Secadores en operación con biomasa .....	23
1.4. Efectos del proceso de secado en las propiedades del grano de cacao..	23
1.4.1. Principales propiedades que afectan la calidad del grano de cacao. ...	24
1.4.2. Proceso de secado y su influencia en la calidad del grano de cacao...	25
1.4.3. Valores óptimos de las propiedades del cacao seco.....	26
1.5. Objetivos de la tesis y pregunta de investigación.....	27
1.5.1. Objetivo general .....	27
1.5.2. Objetivos específicos.....	27
2. METODOLOGÍA.....	28
2.1 Método de cosecha, fermentación y secado de grano de cacao en la vereda la Guayana, Amalfi, Antioquia .....	28
2.2 Fase 1: análisis de literatura .....	29
2.3 Fase 2: metodología caracterización del secado de cacao en proceso tradicional – línea de referencia .....	29
2.3.1 Fabricación y puesta a punto del secador a escala.....	34
2.4 Fase 3: metodología de experimentación proceso de secado convectivo a escala de granos de cacao usando CMC .....	38
2.4.1 Modelo de Cálculo.....	41
2.4.2 Materiales requeridos .....	43
2.4.3 Procedimiento experimental .....	43
2.5 Metodología para caracterizar emisiones contaminantes del secador a escala de CMC .....	44
2.5.1 Materiales requeridos .....	44
2.5.2 Modelo de cálculo.....	45
2.5.3 Procedimiento experimental .....	47

2.6	Fase 4: metodología análisis costo efectivo del secador convectivo a escala de laboratorio.....	47
3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	48
3.1	Caracterización del secado tradicional en marquesina. Línea base. ....	48
3.1.1	Curva de secado .....	48
3.1.2	Temperatura.....	50
3.1.3	Humedad relativa y radiación solar .....	51
3.1.4	Consumo específico de energía.....	53
3.1.5	Eficiencia térmica.....	54
3.1.6	Balance de energía del sistema .....	55
3.2	Costos asociados al proceso de secado tradicional.....	56
3.3	Calidad de grano en secado tradicional .....	57
3.4	Caracterización de prototipo a escala de laboratorio .....	58
3.4.1	Curva de secado .....	58
3.4.2	Temperatura.....	59
3.4.3	Humedad relativa exterior e interior.....	59
3.4.4	Eficiencia .....	61
3.4.5	Balance de energía del sistema la cámara de secado .....	61
3.4.6	Costos asociados al proceso de secado a escala de laboratorio .....	63
3.5	Calidad de grano en secador a escala de laboratorio .....	64
3.6	Emisiones.....	64
4.	CONCLUSIONES .....	66
5.	REFERENCIAS .....	67

## FIGURAS

Figura 1. Casa elba para secado tradicional de cacao. Tomado de [6].....	12
Figura 2. Marquesina para secado tradicional de cacao. Tomado de [7] .....	12
Figura 3. Secador solar de policarbonato tipo túnel. Tomado de [8] .....	16
Figura 4. Secador solar con almacenador térmico. Tomado de [38] .....	17
Figura 5. Secador solar con dos tipos de almacenadores térmicos. Tomado de [31] .....	17
Figura 6. Prototipo secador solar biomasa. Tomado de [39].....	18
Figura 7. Secador modelado para cinética de secado. Tomado de [40] .....	18
Figura 8. Secador con bomba de calor. Tomado de [41] .....	19
Figura 9. Marquesina para secado de cacao. ....	30
Figura 10. Balance de Energía en la marquesina .....	32
Figura 11. Marquesina estudiada .....	33
Figura 12. Diagrama de flujo de procesos secador a escala.....	34
Figura 13. Cámara de secado, secador escala .....	35
Figura 14. Bandeja superior secador a escala .....	36
Figura 15. Pines (flecha verde), sensores temperatura (flechas rojas) .....	37
Figura 16. Cadena para patronar bandejas secador .....	38
Figura 17. Pantalla de pesaje sistema arduino.....	38
Figura 18. Cámara de combustión de CMC (chimenea a la izquierda) e intercambiador de calor para aire de secado (anillo inoxidable en chimenea). ....	39
Figura 19. Hogar secador con CMC y roble .....	40
Figura 20. Bandeja para secado de cacao en cámara de secado a escala de laboratorio. ....	40
Figura 21. Pérdida de masa de granos en función del tiempo .....	49
Figura 22. Evolución de las características físicas del grano .....	50
Figura 23. Temperatura en función de tiempo de secado. ....	51
Figura 24. Humedad relativa y radiación en función del tiempo .....	52
Figura 25. Humedad relativa y humedad específica en función del tiempo. ....	53
Figura 26. Diagrama de Sankey de la marquesina usada en el proceso de secado tradicional.....	56
Figura 27. Pérdida de masa vs tiempo.....	58
Figura 28. Temperatura vs tiempo en secador a escala .....	59
Figura 29. Humedad relativa vs tiempo.....	60
Figura 30. Humedad relativa y específica vs tiempo .....	60
Figura 31. Balance de energía cámara secado.....	62
Figura 32. Diagrama de Sankey cámara de secado .....	63
Figura 33. Factor de emisiones de CO <sub>2</sub> , CO y NO de combustión CMC, madera y su mezcla .....	65

## TABLAS

Tabla 1. Resumen para referencia de secadores productos agrícolas .....	13
Tabla 2. Variables de secado de otros productos ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 3. Valores óptimos de las propiedades del cacao después del secado .....	27
Tabla 4. Especificaciones de equipo analizador de gases .....	46
Tabla 5. Análisis elemental de CMC .....	46
Tabla 6. Resumen de resultados.....	55
Tabla 7. Resumen de resultados especificaciones, secador a escala .....	63



## 1. INTRODUCCIÓN

La cáscara de mazorca de cacao (CMC) representa alrededor del 70% de la masa del fruto de cacao. Esto significó que, para 2021 se produjeran aproximadamente 50000 toneladas/año de CMC en Colombia, cifra no despreciable teniendo en cuenta que esta biomasa puede tener un poder calorífico superior de ~17 MJ/kg, energía que se podría emplear para secado de grano de cacao. Este residuo, por lo general se utiliza como fertilizante orgánico por su alto contenido de potasio. Sin embargo, la CMC depositada sin tratar en el suelo puede causar malos olores y puede ser fuente inocula de enfermedades en los cultivos, es por esto que, entre las necesidades del proceso de producción de cacao, se destacan la disposición adecuada de residuos, estandarización del proceso de fermentación e integración de residuos en otras estrategias de sostenibilidad [1].

Tradicionalmente el secado de cacao se ha realizado por exposición directa al sol, donde el grano se distribuye sobre el piso o sobre una superficie plana. Esto, incrementa la temperatura interna del grano sin uniformidad, comprometiendo vitaminas, sabor y color del cacao [2]. Además, el manejo del grano en piso de concreto o en superficies planas a exteriores, facilita la contaminación cruzada por insectos, bacterias o material particulado que pueden caer sobre el grano, generando riesgos de salud por ingesta de alimentos contaminados.

Para generar propuestas de solución a estos inconvenientes, se propone construir un secador de grano de cacao por convección, que además de aportar a la tecnificación del secado, permita obtener un grano de calidad y con un proceso operativo sostenible en el tiempo sobre todo por el recurso energético consumible. La tecnificación traería, además, beneficios como estandarización del proceso, uso racional y eficiente de recursos como combustible, energía eléctrica y tiempo de secado. Partiendo del supuesto que se realice el secado en un secador cerrado, se daría control a la calidad del grano de cacao mediante temperaturas uniformes, tiempos de secado óptimos y control de emisiones contaminantes por consumo de biocombustibles renovables. Se cumplirían también especificaciones como el contenido de humedad, acidez, contenido de polifenoles, mohosidad y producción de micotoxinas [56], siguiendo niveles de pH, contenido de ácido, coloración, sabor y olor, para garantizar que el producto cumpla con estándares para procesos de transformación, sin afectar la calidad del grano.

En este contexto, es necesario el desarrollo de un sistema de secado convectivo, que permita el estudio fenomenológico del proceso de secado de cacao, usando CMC como recurso energético. Por lo tanto, a partir de ecuaciones de balance de masa y energía, se diseñó y se fabricó una instalación experimental a escala de laboratorio, que permitió correlacionar las variables que intervienen en el proceso de secado. Los índices de desempeño esperados permitieron plantear recomendaciones para futuros proyectos en el escalado del sistema de secado, para una mayor capacidad de procesamiento de los granos de cacao.

En conclusión, esta tesis resuelve interrogantes como: ¿Cuáles serían las especificaciones técnicas del proceso de secado de cacao usando CMC como recurso energético?, ¿Qué tipo de emisiones contaminantes se generan por el secado artificial convectivo de granos de cacao usando CMC como recurso energético?, ¿Cuál es el costo específico del secado de granos de cacao fermentado con un secador artificial convectivo a escala de laboratorio?

A continuación, se hace entonces una revisión de temas como el estado del arte de secadores de productos agrícolas, y sus variables a reportar más importantes desde el punto de vista energético; se describe que tan importante es el secado en las propiedades de calidad de grano, pues se debe cumplir con especificaciones como el contenido de humedad, acidez, contenido de polifenoles, mohosidad y producción de micotoxinas [56]. También, se sigue niveles de pH, contenido de ácido, coloración, sabor y olor, para garantizar que el producto cumpla con estándares para procesos de transformación, sin afectar la calidad del grano. Por esto, es importante analizar cómo afectan tanto temperatura y el tiempo de secado, las características finales del producto.

Posteriormente, se sigue una metodología con propuesta de diseño para el secador convectivo a escala de laboratorio, luego caracterizarlo y compararlo con el secado tradicional de cacao tipo marquesina. Se hace también un análisis de los datos obtenidos tanto para el grano de cacao como para el desempeño energético del secador. Además, se determinan los costos específicos asociados para producir un kg de cacao seco y la calidad de grano. Finalmente se determinan las emisiones producidas por la combustión de CMC para el secado de grano de cacao.

### **1.1. Secado de cacao en el proceso tradicional**

El secado del cacao es el proceso posterior a la fermentación en el que se busca reducir la humedad del grano desde un ~60% hasta un ~7%. El objetivo de este proceso de postcosecha es prevenir el deterioro del cacao evitando la formación de moho. De esta forma, el producto puede ser almacenado para ser tratado posteriormente en los diferentes procesos productivos. Por otro lado, se destaca que, durante esta fase de secado se definen varias de las cualidades o propiedades del grano que evaluarán su calidad, como la acidez y la astringencia [3].

Actualmente, en muchos de los países productores de cacao como Colombia, el proceso de secado es llevado a cabo de manera artesanal exponiendo los granos directamente a la radiación solar. En esta técnica se disponen o esparcen los granos sobre una superficie en la que se recibe la energía solar y un campesino, de manera manual, mezcla y voltea los granos para garantizar el secado uniforme. Aunque este método puede cumplir el objetivo de secado, es un procedimiento ineficiente [4], al requerir un tiempo prolongado para el secado, estar supeditado a las condiciones climáticas, requerir mano de obra constante para el volteo de los granos, además

de afectar la calidad del grano al estar expuesto a las impurezas del medio durante el secado. En el departamento de Antioquia, los cacaoteros suelen realizar su secado al sol por medio de estructuras tipo casa Elba (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) o marquesinas (Figura 2) [5]. En casa elba los granos son esparcidos horizontalmente sobre estructuras de madera levantadas del piso alrededor de un metro, algunos pueden ser carros sobre rieles que permiten el desplazamiento de la estructura. Las marquesinas son estructuras de madera o metal que poseen un techo en forma de casquete de medio cilindro de plástico o materiales similares, en estos dispositivos se deja una entrada y una salida de aire, esto es necesario para garantizar la salida de la humedad y evitar su condensación; sin embargo, algunos cultivadores lo consideran contraproducente porque se pierde calor.



Figura 1. Casa elba para secado tradicional de cacao. Tomado de [6]



Figura 2. Marquesina para secado tradicional de cacao. Tomado de [7]

En el proceso tradicional de secado de cacao, el campesino evalúa el procedimiento de secado tomando algunos granos y exprimiéndolos, en el momento en que los granos estén crujientes (quiebren con facilidad) este sería un buen indicador de secado óptimo. Una prueba final consiste en partir el grano y verificar que adquiera un color totalmente marrón. Si aún presenta marcas de color morado, posiblemente hace falta tiempo en el proceso de secado o bien se ha excedido en el tiempo de fermentación [5].

Algunos autores han investigado el secado de cacao en invernaderos o marquesinas como por ejemplo López-Cerino et al [8] evaluaron la eficacia de un secador solar tipo túnel obteniendo un secado en menor tiempo y menor humedad

con respecto al secado tradicional (1,1% menos), Hii et al [9] diseñaron un secador solar tipo invernadero y evaluaron la calidad del grano seco, encontrando que para el caso particular del secador invernadero diseñado, 20 kg de grano resultaron ser la carga que mejores valores de calidad generó. Otros autores como Puello-Méndez [10] et al en Colombia y Banboye et al [11] en Camerún, compararon el secado de cacao en estructura tipo marquesina en contraparte al secado tradicional al sol. Belobo Belibi et al [12] estudiaron el secado en las técnicas mencionadas y en un horno de leña donde encontraron que se obtuvo mejor calidad en técnicas convencionales que horno en leña, por el sabor y aroma ahumado que dejaba este último. De manera similar, Mujaffa et al [13] estudiaron el secado en casa elba de cacao y en marquesina (invernadero), con resultados en calidad de grano para la variable ph, levemente superiores en secado tipo “casa elba” frente a secado tipo invernadero y horno adaptado. Por otro lado, los secadores solares tipo invernadero han sido evaluados en otros tipos de productos agrícolas como dátiles [14] y chili [15] donde se encontró para el primero una eficiencia cercana al 57%, validando factibilidad del secado de dátiles con este tipo de invernadero, y el segundo una operación de ventilación forzada con paneles fotovoltaicos y una reducción del tiempo de secado de 32 horas a 20 horas.

## 1.2. Secadores de productos agrícolas y secadores cacao

**Según la literatura, se pueden encontrar varios tipos de secadores artificiales de cacao, los cuales son todos aquellos que tienen en su operación un uso de recurso energético artificial, como por ejemplo ventilación forzada o energías derivadas del petróleo. Pasando también por secadores tradicionales (tipo invernadero), secadores solares con almacenamiento térmico para aprovechar al máximo la energía disponible y secadores híbridos operando con dos sistemas de fuente energética diferente. A continuación, se hace una descripción de forma general de dichos secadores y en la**

Tabla 1 **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se puede ver un resumen de referencias de varios tipos de secadores solares para productos agrícolas [16].

**Tabla 1. Resumen para referencia de secadores productos agrícolas**

REFERENCIA#	FUENTE ENERGÍA	CONVECCIÓN NATURAL O FORZADA	PRODUCTO	TEMA DE INTERÉS
[17]	Híbrido solar biomasa	Forzada	Banano en rodajas	Energía, datos de secado y análisis económico
[18]	Solar	Forzada	Uvas, albaricoques y fríjoles	Energía y datos de secado

[19]	Híbrido	Forzada /Natural	Marañón	Energía y datos de secado
<b>REFERENCIA#</b>	<b>FUENTE ENERGÍA</b>	<b>CONVECCIÓN NATURAL O FORZADA</b>	<b>PRODUCTO</b>	<b>TEMA DE INTERÉS</b>
[20]	Solar con almacenamiento	Forzada	Fresas	Energía y datos de secado
[21]	Biomasa / Solar	Forzada	Chili	Energía, datos de secado e instrumentación
[22]	Solar y biomasa	Natural	Baya de pimienta	Energía y datos de secado
[23]	Solar eléctrico	Forzado	Varios productos agrícolas	Energía
[24]	Solar	Forzada	Maíz	Datos de secado y análisis económico
[16]	Solar	Natural / Forzada	Varios productos agrícolas	Energía, datos de secado, análisis económico y análisis de emisiones
[25]	Solar	Natural / Forzada	varios productos agrícolas	Energía, datos de secado, análisis económico y análisis de emisiones
[26]	Biomasa	Natural / Forzada	Cacao	Energía y datos de secado
[27]	Solar / térmico	Forzada	Amla (fruto Indú)	Datos de secado y análisis económico
[28]	Solar	Forzada	Banano, Chili y Café	Energía, datos de secado y análisis económico
[29]	solar	Natural	cacahuates	Energía y datos de secado
[30]	solar	Forzada	Cacao	Energía y datos de secado
[31]	solar con almacenamiento	Natural	Cacao	Energía y datos de secado

[32]	solar con almacenamiento	Forzada	Melón amargo	Energía y datos de secado
<b>REFERENCIA#</b>	<b>FUENTE ENERGÍA</b>	<b>CONVECCIÓN NATURAL O FORZADA</b>	<b>PRODUCTO</b>	<b>TEMA DE INTERÉS</b>
[33]	Hibrido solar biomasa Hibrido solar biomasa	ForzadaForzada	CaféCafé	Energía y datos de secado Energía y datos de secado
[34]	Hibrido solar biomasa	Forzada	Cacao	Rendimiento del sistema / componentes de los secadores
[35][34]	BiomasaHibrido solar biomasa	NaturalForzada	CacaoCacao	Datos de secado Rendimiento del sistema / componentes de los secadores
[35]	Eléctrico Biomasa	ForzadaNatural	CaféCacao	Datos de secado Datos de secado
[36]	Eléctrico Eléctrico	ForzadoForzada	CacaoCafé	Datos de secado Datos de secado
[10][2]	SolarEléctrico	NaturalForzado	CacaoCacao	Datos de secado y análisis económico Datos de secado
[37][10]	HibridoSolar	NaturalNatural	BananoCacao	Energía y datos de secado Datos de secado y análisis económico
[37]	Hibrido	Natural	Banano	Energía y datos de secado

Entre los secadores de cacao más comunes, se destacan los secadores tradicionales que son aquellos que utilizan como fuente de energía la radiación solar (casa Elba y marquesina), usados en países en vía de desarrollo, debido a que es la forma más sencilla y económica de realizarlo [24]. López *et al.* [8] desarrollaron un secador solar de policarbonato tipo túnel (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) evaluaron su eficiencia y el nivel de satisfacción por parte del productor de cacao en México. Este cuenta con un techo parabólico de policarbonato para una capacidad máxima de 21 kg de cacao húmedo. Además, posee 4 ventiladores instalados en techo para homogenizar el aire al interior y 3 en la parte posterior para extracción del aire. En este caso la diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior alcanzó 25.7°C. En esta misma línea de secador tradicional, en Colombia, Puello *et al.* [10] compararon el proceso de secado de granos de cacao entre el método al sol directo sobre mesas de madera o casa Elba y mediante un secador con cubierta de plástico tipo marquesina. La conclusión más importante es que el menor tiempo de secado lo alcanzó el secador

con cubierta de plástico, ya que redujo el tiempo de 6 a 4 días con mejores parámetros de calidad de grano.



Figura 3. Secador solar de polycarbonato tipo túnel. Tomado de [8]

Por otro lado, se han construido también secadores solares con almacenamiento de energía térmica (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) con el fin de aportar calor al momento en que no se tiene radiación solar para el secado. Este es el caso de *Teixeira Da Silva* [38], que desarrollaron un secador solar directo de 10 kg para cacao, con una placa de granito como sistema de almacenamiento térmico. Por su parte, *Farah Dina et al.* [31] construyeron un prototipo con capacidad de 1kg para cacao, trabajando dos tipos de almacenamiento térmico; un tamiz molecular que trabaja como una superficie adsorbente y uno de  $CaCl_2$  absorbente (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). La diferencia básica, entre estos dos tipos de desecantes, es que el primero adsorbe energía de forma superficial, mientras que el segundo lo hace disolviendo el fluido de energía absorbido en su interior. Con estos tipos de desecante, se logró reducir el tiempo de secado a 41 horas y 30 horas, respectivamente, con respecto al secado tradicional en patio o sobre concreto al aire libre.



Figura 4. Secador solar con almacenador térmico. Tomado de [38]

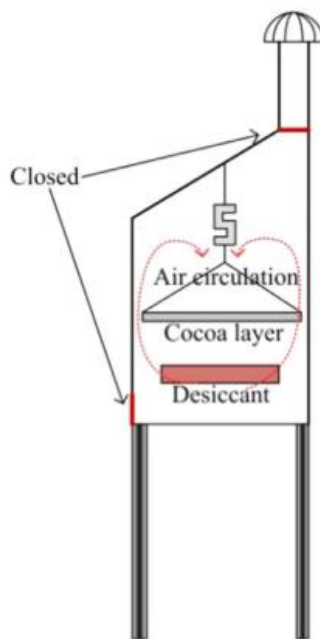


Figura 5. Secador solar con dos tipos de almacenadores térmicos. Tomado de [31]

También se han hecho pruebas con secadores híbridos como es el caso de *Quintero et al.* [34], en el departamento de Santander, Colombia. Estos diseñaron un prototipo solar-biomasa, con cáscara de mazorca de cacao como biomasa, en el cual lograron un secado a una temperatura inferior de 55 °C, durante 24 horas continuas en modo híbrido solar y biomasa (Figura 6). Igualmente, *Manrique et al.* [33] desarrollaron un sistema híbrido solar y de biomasa para el secado de granos de café, combinando la combustión de pellets de cascarilla de café con un sistema fotovoltaico; donde compararon el secado en el dispositivo con el proceso tradicional. El aprovechamiento de la energía solar supuso un importante ahorro energético, aportando hasta el 19% de la energía consumida durante las horas diurnas.

Figura 6. Prototipo secador solar biomasa. Tomado de [39]

En esa misma línea de secadores convectivos, pero con modelación de secadores y teniendo en cuenta cinética de secado (Figura 7), *Nwakuba et al.* [40] modelaron un secador convectivo natural a varias temperaturas entre 60 y 80 °C, encontrando coeficientes de determinación mayores al 94%, lo cual validó la efectividad del modelo. Similarmente, *Hii et al.* [41] simuló un secador con bomba de calor, donde encontraron que existen diferencias de humedades al interior del grano, inclusive 10 horas después de terminar el secado donde posiblemente esto sea lo que cause el endurecimiento de la capa exterior del grano (Figura 8).

Figura 7. Secador modelado para cinética de secado. Tomado de [40]

Figura 8. Secador con bomba de calor. Tomado de [41]

Luego de esta descripción de clasificación de tipos de secadores, se presenta a continuación información relacionada con materiales y componentes utilizados en construcción de secadores, los recursos energéticos alternativos usados en franjas horarias de no disponibilidad de radiación solar, las variables clave para operación de un proceso de secado, el análisis energético de literatura científica y finalmente análisis económico para justificar prefactibilidad de este proceso de secado.

### **1.2.1. Materiales e instrumentación utilizada en fabricación de secadores de productos agrícolas**

La mayoría de los secadores de productos agrícolas están compuestos por paneles térmicos o quemadores de biomasa, una cámara de secado con bandejas para exponer el producto a secado y ventilación para homogenizar el calor proveniente de la fuente energética. Esto, siempre y cuando, esté configurado con convección forzada e instrumentación para controlar la fuente energética. La revisión del estado del arte aquí presentada menciona los componentes y materiales importantes a considerar para la operación y correcto funcionamiento de secadores de productos agrícolas, entre esos el cacao.

Revisando los materiales constructivos usados en la fabricación de secadores, en el siguiente caso, *Atepor* [35] construyó un secador de cacao con fuente de energía CMC (Cáscara de Mazorca de Cacao), con una capacidad de secado de 20 kg, la cámara de secado se construyó con ladrillos de barro quemado, acero inoxidable para las bandejas de exposición del secado de grano de cacao, acero galvanizado

para la chimenea de cámara de combustión y se utilizó un mezclador de grano de madera para rotación de los mismos. Con estos materiales y componentes logró reducir a 7.47% de humedad en un tiempo de 8 horas, a una temperatura de 61.4 °C.

En otro artículo, pero ya relacionado con secado tradicional de cacao, con un secador tipo invernadero modificado, *Puello-Mendez et al.* [10] emplearon plástico de polietileno (o agrolene) con 2 mm de espesor, soportado sobre varillas corrugadas de diámetro 0.95 cm, con una capacidad de hasta 150 kg, donde con 4 días de secando se alcanzaron humedades del 5 y el 8%.

Finalmente, se revisaron los materiales empleados por *Ndukwu et al.* [37] para la operación de un secador de bajo costo, integrado con secador biomasa y solar, para secado de banano. El desarrollo del colector solar se hizo cubierto con un vidrio transparente y 2 mm de lámina de aluminio pintada de negro para capturar radiación solar. Este absorbedor descansa sobre unos ladrillos de granito, los cuales sirven como material de almacenamiento de calor. Se consiguió una reducción importante del tiempo de secado con panel solar, comparando con secado a exposición de sol, reduciendo de 36 a 21 h el proceso de secado.

En cuanto a componentes del sistema de control e instrumentación, los secadores normalmente se encuentran configurados con termocuplas, sensores de humedad, una balanza digital y un módulo de integración para operación total del sistema. En lo relacionado a temperaturas, *Yahya* [21], por ejemplo, instaló 11 termocuplas para un secador de chili de 350 kg de capacidad, las cuales fueron ubicadas en las entradas y salidas de flujos de masa (aire, chili y humedad). Por otro lado *Saravanan et al.* [19] en la India, para un secador híbrido de marañón, instaló 3 termocuplas; una de temperatura ambiente, otra para la cámara de secado y otra para la salida del colector. Con respecto a medidores de humedad *Saravanan et al.* [19] reportó que obtuvo esta medición con una termohigrómetro. La masa, tanto para *Yahya* [21] como para *Saravanan et al.* [19] se obtuvo con una balanza digital, reportada como TKB-0.15 con precisión  $\pm 0.05$  kg para el primero, ya que el segundo no la reportó.

Además de los componentes previamente mencionados, otro de los instrumentos importantes a considerar en este secado, es el medidor de velocidad de aire, que permite calcular el flujo másico de aire ingresando a la cámara de secado, que es una variable clave en este proceso ya que se encarga de homogenizar y transportar el calor necesario, ya sea por convección natural de aire o por ventilación forzada. Para este caso *Herman et al.* [2], reportaron usar, previo al ingreso del aire en la cámara de secado, un anemómetro marca "Testo 445" con una resolución de  $\pm 0.1$  °C para la temperatura y una resolución de velocidad de  $\pm 0.01$  m/s. Con este instrumento hicieron control de la velocidad del aire de secado, todo con base a la temperatura del aire ingresando a cámara de secado.

### **1.3. Caracterización termodinámica de secadores de cacao**

En el diseño y evaluación de cualquier sistema térmico, es importante un análisis energético a fin valorar parámetros que permitan diagnosticar y mejorar su desempeño. En los últimos años se han estudiado múltiples tipos de secadores para productos agrícolas, la mayoría de ellos, usan energía solar, biomasa o una combinación de ambas para desarrollar dicha operación. En este tipo de equipos, algunos de los indicadores de mayor interés son la eficiencia térmica o eficiencia global del sistema, rendimiento de algunos componentes como colector solar y cámara de combustión, también se evalúa el consumo específico de energía, y tasa de extracción de humedad. Además de variables fundamentales en el proceso de secado, como lo son temperatura, humedad relativa (tanto del ambiente como de la cámara de secado), y radiación solar en el caso de secadores solares.

Consecuentemente, en esta sección se mencionan algunas características del análisis energético de secadores de productos agrícolas en diferentes regiones del mundo. La revisión bibliográfica se enfocó en equipos que usen fuentes de energía renovables, como solar o biomasa para su operación. Primero se describirán los hallazgos reportados de algunos secadores solares, luego los híbridos que operan tanto con energía solar como biomasa y finalmente los de solo biomasa.

### 1.3.1. Secadores Solares

En la Tabla 2, se presenta un resumen de las variables de secado solar, asociadas a frutos o vegetales, así como también al cacao. La referencia de donde se toma la información, va la derecha de cada producto en esta misma tabla. Estas variables son tiempo de secado, temperatura, humedad relativa, consumo específico de energía, eficiencia térmica de energía y flujo másico de aire. Esta Tabla 2 se construyó con base a las referencias que se citan posteriores a la tabla en mención.

*Tabla 2. Variables de secado de otros productos y cacao*

Producto	Variables de secado					
	Tiempo [h]	Temperatura [°C]	humedad relativa [%]	Consumo esp. energía [MJ/kg]	Eficiencia térmica [%]	Flujo de aire [kg/s]
Uvas [18]	84	65	30	NI	20	0.22
Albaricoque [18]	37	60	13	NI	33	0.22
Fresas [20]	5	50	45.67	3.12	70	0.046
Cacao[42]	20	40	NI	NI	20.17	0.024

Para la variable tiempo experimentada en secadores solares se tiene que, *Puello – Méndez et al.* [10] compararon el secado de granos de cacao en Colombia a sol abierto con respecto a un secador tipo invernadero con techo de plástico. El secado de los granos tardó 6 días en el método de secado al sol, y 4 días en el secado tipo

invernadero. *Blaise et al.*[42] revisaron el desempeño térmico de un secador solar indirecto, donde determinaron que la humedad final de secado, se obtenía luego de 20 horas de secado continuo. *López-Cerino et al.*[43] también evaluaron el desempeño de un secador tipo invernadero para granos de cacao. Afirman que, durante el secado tradicional al sol abierto, el secado tarda 3.5 días (84 horas), frente a 35 horas que tomó el secador tipo túnel de policarbonato. *Dina et al.* [31] diseñaron un secador solar integrado con almacenamiento térmico para secar granos de cacao, donde lograron el objetivo de reducir la humedad en un tiempo de 30 horas, comparado con 55 h del secado directo al sol. En la línea de secadores solares con almacenamiento de energía, *Vijayan et al.* [32] propusieron otro tipo de secador solar con almacenamiento de energía térmica sensible para secar melón amargo, que contiene una humedad inicial cercana a 70%-80%. El prototipo logró reducir el tiempo de secado de 10 a 7 horas frente al secado al sol abierto.

En cuanto a temperaturas de secado encontradas en literatura para secadores solares, se ha experimentado lo siguiente. Al-Juamily et al. [18] construyeron un sistema de secado solar para diferentes frutos como uvas, duraznos y frijoles; para una capacidad de 10 kg. Los mejores resultados de secado se obtuvieron con uvas a una temperatura de 65°C. *Dina et al.* [31] diseñaron un secador solar integrado con almacenamiento térmico para secar granos de cacao. Las temperaturas en la cámara de secado oscilaron entre 40 °C a 54 °C logrando su objetivo de reducción de humedad. Por su parte, *Atalay et al.* [20] evaluaron un secador de fresas en operación solar con almacenamiento térmico. En el dispositivo, las temperaturas promedio de entrada y salida en la cámara de secado se midieron como 60 °C y 53 °C, respectivamente. Similarmente, *Komolafe et al.* [30] estudiaron un secador solar con almacenamiento 18 térmico para granos de cacao. Reportaron valores de temperatura de secado para los granos de cacao, la cual varió 30y 54 °C.

Con respecto a humedades relativas al interior de secadores solares, se encuentra que, *López-Cerino et al.* [42] observaron que los valores de la humedad relativa al interior del secador solar se mantienen por debajo de los valores de la humedad relativa ambiental en los dos días de la prueba. Al-Juamily et al. [18] obtuvieron 30% de humedad relativa dentro de la cámara. *Janjai et al.* [28] concuerdan con las conclusiones de *Cerino et al.* [8], que la humedad relativa del aire dentro de la secadora siempre es menor que la del aire ambiente. Citando datos de humedad específica, *Atalay et al.* [20]referenciaron que la tasa de extracción de humedad específica y la tasa de extracción de humedad fueron de 0.71 kg/kWh y 1.83 kg/h, respectivamente.

En consumos específicos de energía reportados, se tiene que *Dina et al.* [31] para su secador solar de cacao por colector, alcanzó un consumo específico de energía solar directa de 60.4 MJ/kg, comparado con 13.29 MJ/kg en el mismo secador solar pero integrado con un medio absorbente.

En términos de eficiencia Al-Juamily et al. [18] reportaron que su cámara de secado tiene una eficiencia de 20% al secar uvas y una eficiencia de 33% al secar albaricoque. De otra forma, *Atalay et al.* [20] indicaron que la mayor eficiencia

energética fue del 75% secando 10 kg fresa. Komolafe et al. [30] referenciaron que la eficiencia térmica su secador de cacao para el primer día fue de 28%, y para el segundo día fue de 58%, advierten que la notoria diferencia se debe a cambios en la radiación solar incidente de ambos días.

Durante la búsqueda flujos másicos de aire para secado de humedad, se halló información para otros productos diferentes al cacao, como melón amargo y fresas, sin embargo, se hace experimentación inicialmente con estos flujos y posterior se ajustaría a un flujo óptimo para el cacao. *Vijayan et al.* [32] para melón amargo, observó que la mayor tasa de extracción de humedad se logra en un flujo másico de aire de secado de 0.0636 kg/s. *Atalay et al.* [20] en sus estudio para fresas, encontró que para sus temperaturas optima de secado, requería un flujo másico de aire de 0.046 kg/s.

### **1.3.2. Secadores híbridos**

*Yahya* [21] diseñó un secador de chilis rojos con bomba de calor que en comparación con un secado a sol abierto, este produjo un ahorro del 82 % en el tiempo de secado, al realizar la tarea de reducción de humedad en 11 horas, con una eficiencia del 9.03%; este desempeño fue alcanzado con un flujo másico de aire de 0.124 kg/s. En términos de humedad relativa, en su secador con bomba de calor, *Yahya* [21] que fue el único reporte encontrado para secadores híbridos, operó a una humedad relativa de 10% y una tasa de secado de 1.57 kg/h. *Saravanan et al.* [19] por su parte, experimentó con marañón tiempos de secado de 7 horas para convección forzada, contra un tiempo de secado de 9 horas en el modo natural.

### **1.3.3. Secadores en operación con biomasa**

*Atepor.* [35] desarrolló un secador sencillo para granos de cacao alimentado con cáscara de mazorca de cacao. El prototipo es adecuado para secar un máximo de 20 kg de granos de cacao, reduciendo la humedad desde un 60.01% hasta un 7.47% en 8 h, comparado con 36 h que normalmente tarda el proceso de secado a sol abierto. Se obtuvo una temperatura media de la cámara de secado de 61.4 ° C. Se reporta una eficiencia en la cámara de combustión del 91.5%. Este valor de eficiencia térmica reportado logra superar todas las demás referencias expuestas. El tiempo de secado de los granos de cacao es considerablemente menor comparado con el secador del mismo producto agrícola reportadas por *Puello-Mendez et al.* [10], esto porque este último uso un secador tradicional, con 30 h e igual en tiempos de secado al reportado por *Rincón-Quintero et al.* [34] con 36 h.

## **1.4. Efectos del proceso de secado en las propiedades del grano de cacao**

Es necesario reconocer que el cacao experimenta cambios físicos y químicos complejos, debido a operaciones de postcosecha, como lo son la fermentación y secado, que igualmente establecen diferentes propiedades organolépticas como sabor, aroma y color. Es en el proceso de secado donde se reduce el sabor amargo y astringente, igualmente se mejora la coloración característica café/marrón. También se alcanzan niveles de humedad, que permiten almacenamiento de grano sin perder propiedades, que induzcan sabores y olores desagradables, como también el crecimiento de hongos.

#### **1.4.1. Principales propiedades que afectan la calidad del grano de cacao.**

Entre las propiedades que afectan la calidad del grano de cacao es importante que se regulen sabores indeseables, para tener un balance al momento de saborear el producto. Una propiedad a considerar es la astringencia, la cual se conoce tradicionalmente como el “quitar” saliva de la boca, dejando una sensación de aspereza y sequedad [44]. Tales sensaciones causan una contracción en la superficie de la mucosa bucal, que a su vez produce salivación. La astringencia por su parte tiende a ser confundida con el sabor conocido como amargo, dado que, tanto la astringencia como el sabor amargo vienen juntos en varios alimentos y por ello se confunden. Por otro lado, el sabor amargo es conocido como una de las cinco sensaciones gustativas básicas que se perciben y se concibe como un sabor poco agradable, pero debe tenerse en alimentos para balancear los sabores.

Otro elemento que juega un papel importante en la calidad del grano de cacao es el ácido acético y su cantidad presente en el cacao, pues con este se establecen algunos parámetros de sabor. También conocido como ácido etanoico, cuenta con una consistencia líquida incolora, de olor penetrante y en la industria alimentaria es empleado para conservar y desinfectar frutos y alimentos [45]. En fermentación de cacao es altamente importante, pues durante la fase aeróbica de cacao, este es sometido a un calor intenso, que junto a la difusión de etanol y ácido acético, produce una descomposición en las paredes celulares, propiciando un escenario para desarrollar sabores precursores asociados al chocolate [46].

Los polifenoles también juegan un papel importante en la calidad del cacao que posteriormente es comercializado. Estos son antioxidantes y antiinflamatorios, donde los de interés en el cacao son los del grupo de flavonoides, como las catequinas (37%), antocianinas (4%) y procianidinas (58%). Los flavonoides, se destacan por su baja toxicidad y elevada acción antioxidante, y su capacidad de inhibir la peroxidación lipídica al reducir radicales libres[47].

Aunque existen más propiedades que dan forma al sabor, color y aroma del cacao, como la cantidad de cotiledones, nitrógeno y el contenido oxálico, las características



mencionadas en los párrafos anteriores son propiedades reiterativas en distintas investigaciones.

#### **1.4.2. Proceso de secado y su influencia en la calidad del grano de cacao.**

Teniendo en cuenta propiedades organolépticas, físicas y químicas del grano de cacao, se revisaron diferentes artículos y avances en el campo del secado del grano de cacao, donde se busca conocer la relación de ciertas condiciones de secado como temperatura, humedad y tiempo de secado para la calidad del grano.

Iniciando con la variable temperatura y lo propuesto por Mühlbauer *et al.* [62], donde se enseñan algunos parámetros para el secado, en este estudio se observó cómo la temperatura y la humedad del ambiente tienen influencia en la cinética del secado. En este caso, se presentó que el contenido de humedad se retira más rápidamente a medida que aumenta la temperatura. En adición, *Dzelagha et al.* [48] en su estudio presenta una revisión centrada en las innovaciones recientes en el proceso de secado y sus efectos sobre los parámetros de calidad. Por ejemplo, en el manejo de la temperatura, los autores señalaron que, a pesar de la reducción significativa del tiempo de secado manejando altas temperaturas, no se aconseja secar los granos de cacao a temperaturas superiores a 60 °C debido a la alta retención de ácido acético y al aumento del amargor [49], [50]. Así mismo, *Laisi et al.* [49], realizaron una comparación entre el secado artificial en capa fina continua con aire forzado y el secado al sol, a varios niveles de temperatura. Las muestras se secaron a cinco temperaturas de horno diferentes de 35 °C, 40°C, 45°C, 50°C y 55°C, hasta que el contenido de humedad se redujo hasta un rango entre 6% y 8%. En los resultados se observó que los granos de cacao secados a una temperatura de horno de 55 °C tenían el ácido graso libre y ácido acético más alto, de 1,69 y 6,70 mg/g respectivamente, mientras que las muestras secadas a 35 °C tenían ácido graso libre y ácido acético más bajos de 1,38 y 3,70 mg/g respectivamente, mostrando que el nivel de ácido graso libre y ácido acético aumenta con el aumento de la temperatura de secado. Por su parte, *Jinap et al.* [51] evaluaron el efecto del secado sobre varias muestras cambiando el método de secado, partiendo del secado en horno ventilado a 60°C durante 20 horas, le sigue el secado al aire, donde se involucra la agitación de los granos también a 60°C durante 82 horas. Además, incluyeron un secado a la sombra durante 120 horas y después se pasó a 60°C por 10 horas en un horno, finalmente otras muestras se secaron al sol. En cuanto a la temperatura, destacan que con valores entre 60-70 °C o superiores, se logra producir un sabor ácido en el cacao.

Para la variable humedad, *Mühlbauer et al.* [52] resaltan que, el contenido de ácido libre de grasa debe ser inferior a 1,75%, así mismo, el contenido de humedad debe

ser inferior a 7,5% (base húmeda). *Dzelagha et al.* [48] indicaron que, entre los parámetros a revisar para garantizar un producto de alta calidad está el contenido de humedad (5,5-8% en base húmeda). *Lasisi et al.* [49], en su comparación aire forzado vs radiación solar, secó muestras a 5 temperaturas diferentes, hasta que el contenido de humedad se redujo entre el 6% y el 8%. En el caso de tiempos, *Laisi et al.* [49], realizaron una comparación entre el secado artificial en capa fina continua con aire forzado y el secado al sol, el tiempo de secado para el método de secado al sol toma importancia, dado que, con una larga duración en el proceso, se puede causar daños a los granos debido al desarrollo de moho o generando un olor desagradable.

Por otra parte, para analizar las fuentes de variación en la formación y desarrollo de los sabores del chocolate, *Afoakwa et al.* [53] presenta una revisión crítica y sugieren cómo lograr el carácter general del cacao. En el artículo se indican que las concentraciones más altas de polifenoles dan lugar a un chocolate de sabor muy astringente, además, las reacciones de polifenoles con azúcar y aminoácidos aportan, tanto sabor como color a los granos de cacao y alcaloides al amargor. Profundizando en las características de color después del proceso de secado, se señala que, indicadores de un buen secado en la calidad del grano son el color marrón. Relacionado con el sabor, este requiere una secuencia de procesamiento para producir granos de cacao con buen sabor, donde en el proceso de secado, se tiene que en este se estabilizan algunas propiedades como el pH y la humedad, que permite el desarrollo del color característico del cacao. Los autores concluyen que, las concentraciones más altas de polifenoles dan lugar a un chocolate de sabor muy astringente. Además, las reacciones de polifenoles se destacan por su baja toxicidad y elevada acción antioxidante, incluyendo su capacidad de inhibir la peroxidación lipídica al reducir radicales libres. En cuanto a cantidad, el polifenol y los alcaloides contienen entre un 14% y 20% del peso del grano y son fundamentales para el carácter del sabor del grano.

#### **1.4.3. Valores óptimos de las propiedades del cacao seco**

A partir de la información expuesta anteriormente, es evidente la gran cantidad de parámetros analizados para determinar y garantizar la calidad del cacao después del proceso de secado, recordando que este, así como termina de establecer ciertas propiedades organolépticas, también permite el almacenamiento del grano, sin riesgo de formación de mohos que afecten la calidad del cacao.

Es notable que, al variar ciertos parámetros en el secado, se conservan o alteran características que definen la calidad final del grano. Por ejemplo, al aumentar la temperatura, también se incrementan el pH y la velocidad de reacciones. Además, en las diferentes investigaciones se obtuvo un mejor comportamiento a temperaturas inferiores a 60°C, dado que a temperaturas superiores se produce un sabor más ácido en el cacao seco. Sin embargo, estando alrededor de 35 a 50°C, las propiedades organolépticas, químicas y físicas logran ser óptimas[49].

A pesar de observar la medición de variados parámetros, al final, como constantes medidas o tenidas en cuenta están la astringencia, el amargor, pH, coloración, cantidad de ácido acético y los ácidos grasos libres. Por lo tanto, de toda esta revisión bibliográfica de autores de otros países, previamente mencionada en este punto 1, se presenta en la **Tabla 3** un resumen que integra los valores promedio en los que puede estar un cacao de buena calidad, fino y aroma. Finalmente, las condiciones de fermentación y el buen desarrollo de este se convierten en condiciones importantes para que durante el proceso de secado haya una culminación exitosa de reacciones químicas que terminen en un grano seco con aroma y sabor agradable.

**Tabla 3. Valores óptimos de las propiedades del cacao después del secado**

Propiedades cacao	Valores
Astringencia *	2,3 - 3,2
Amargor *	2,5 - 4
pH	5,1 - 5,4
Coloración	Café oscuro
Ácido acético [mg/g]	3,7 - 5,9
Ácidos grasos libres (FFA) [%]	1,38-1,75

\*Valores obtenidos en una escala de 1 a 10, según la recomendación de la Federación Nacional de Cacaoteros en Colombia.

## 1.5. Objetivos de la tesis y pregunta de investigación

### 1.5.1. Objetivo general

Caracterizar un secador artificial convectivo de granos de cacao usando CMC como recurso energético desde la perspectiva técnico-económica y ambiental.

### 1.5.2. Objetivos específicos

- 1.5.2.1. Evaluar el desempeño energético de un secador artificial convectivo de granos de cacao usando CMC como recurso energético
- 1.5.2.2. Caracterizar las emisiones contaminantes de un secador artificial convectivo de granos de cacao usando CMC como recurso energético.

- 1.5.2.3. Determinar los costos específicos de secado de cacao en el secador artificial convectivo, a escala de laboratorio, usando CMC como recurso energético.

## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1 Método de cosecha, fermentación y secado de grano de cacao en la vereda la Guayana, Amalfi, Antioquia**

Se entrevistan 2 cultivadores de cacao del municipio de Amalfi acerca de cómo realizan su proceso de cosecha y fermentación del cacao, las conclusiones del proceso se detallan a continuación.

Una vez el fruto este maduro, se hace la recolección de las mazorcas, con ayuda de tijera o de forma manual. Se separan las mazorcas sanas de aquellas que tengan alguna contaminación por plagas o enfermedades, dejando únicamente para la elaboración del chocolate las que estén sanas y bien maduras. Se lleva el producto a un punto estratégicamente ubicado para rajar la mazorca y sacar los granos con la mano. Luego estos se depositan en cajones de madera con pequeños orificios, dispuestos de tal forma que pueda salir la miel del cacao.

La fermentación se realiza en un cajón de madera blanca, como por ejemplo el pino, esto con el fin de que no absorba olores indeseados. Se deja el grano entre 5 y 7 días dependiendo del clima; 7 días si se tiene clima lluvioso o 5 días si se tiene clima soleado. Se busca que el grano no llegue a estar por debajo de los 30 °C ni por encima de 50 °C, en cuanto a temperatura. Durante la fermentación, se mezcla el producto cada 48 horas si se tiene temperatura cercana a 50 °C, pero si por el contrario se tienen temperaturas cercanas a los 30°C, se debe mezclar el grano cada 24 horas con el fin de subir la temperatura a valores cercanos a 40°C. En cuanto a pH, este debe finalizar en un rango de 5 - 5.5, que corresponde a un pH ligeramente ácido.

Para garantizar un buen control de proceso de fermentación, se debe hacer seguimiento a las variables temperatura, pH y apariencia en corte, mediante prueba de apertura longitudinal de granos de cacao. Esto es mediante instrumentación apta para cada variable, como un termopar portátil de contacto tipo K para la temperatura y un medidor de pH portátil, para el pH. En el caso de la prueba de corte se debe tener presente la norma técnica Colombiana NTC 1252 [54] y seguir las indicaciones de percepción de apariencia que explican allí para una cantidad de muestra de 100 granos.

En cuanto al método de secado en la vereda la Guayana de Amalfi, en el primer día, los granos de cacao se secan al sol durante 2 horas en la mañana y 2 horas en la tarde, al segundo día 3 horas en la mañana y 3 horas en la tarde. Consecutivamente se pone el producto al sol hasta que esté completamente seco, normalmente durante 5 días.

El trabajo de investigación está enfocado en caracterizar, desde el punto de vista de desempeño energético, emisiones contaminantes y costos específicos de secado, para un secador artificial convectivo de granos de cacao usando CMC como recurso energético, buscando obtener un mejor rendimiento al del proceso tradicional de secado de granos de cacao. Las fases planteadas a seguir para el desarrollo del trabajo de investigación se enumeran a continuación:

## **2.2 Fase 1: análisis de literatura**

Haciendo uso de las bases de datos de la Universidad de Antioquia y con base al análisis de la información del estado del arte encontrada en los puntos 1.3 y 1.4 del presente trabajo, se identifica que las variables más importantes a caracterizar, en secadores en operación con biomasa. Estas son las siguientes:

- Temperatura de aire secado
- Temperatura de grano
- Temperatura de gases de chimenea
- Velocidad o flujo másico de aire de secado
- Masa de grano de cacao
- Humedad relativa a la entrada del secador
- Humedad relativa a la salida del secador
- Emisiones específicas de cada especie de combustión en kilogramo de CMC ( $g/kg_{cacao}$ ).

En la Fase 2 del presente trabajo se propone una caracterización termodinámica del secado de cacao en proceso tradicional, con el ánimo de definir y establecer una línea de referencia que permita, evidenciar los cambios del proceso de secado a escala de laboratorio con respecto al proceso tradicional en marquesina

## **2.3 Fase 2: metodología caracterización del secado de cacao en proceso tradicional – línea de referencia**

La caracterización del proceso de secado de granos de cacao tradicional se evalúa según el procedimiento de postcosecha comúnmente realizado en las fincas colombianas. La caracterización energética se lleva a cabo en una finca pequeña (<1 ha de cacao cultivada) dedicada a la producción de cacao. El terreno está

ubicado en el municipio de Amalfi (Ant.), vereda la Guayana. Las coordenadas del sitio son 6°54'33"N 75°04'36"O. Está situada a 956 msnm y posee una temperatura media de 21 °C [5]. El proceso de secado se lleva a cabo en una marquesina como la presentada en la (Figura 9), ubicada a 1 m de altura del suelo, donde se pueden secar hasta 200 kg de cacao fermentado. La estructura donde reposan los granos tiene dimensiones de 4 m de largo y 3 m de ancho.



Figura 9. Marquesina para secado de cacao.

Entre los parámetros característicos del secado tradicional de granos de cacao, se pretende determinar el consumo específico de energía (SEC) en  $\text{kJ}/\text{kg}_{\text{agua}}$ , el cual mide la cantidad de energía necesaria para el secado por kilogramo de agua evaporada [3]. La ecuación (1) expresa la relación para determinar (SEC), donde  $Q_{\text{net}}$  (kJ) es la energía total entrega al sistema para realizar el proceso de secado; para el caso analizado, corresponde con la energía absorbida por la radiación solar en la marquesina y  $m_{\text{agua}}$  ( $\text{kg}_{\text{agua}}$ ) es la masa de agua evaporada durante el proceso de secado.

$$\text{SEC} = \frac{Q_{\text{net}}}{m_{\text{agua}}} \quad (1)$$

La masa de agua removida ( $m_{\text{agua}}$ , en kg) se estima como la diferencia entre la masa de granos de cacao antes de iniciar el proceso  $m_i$  (kg) y la masa al finalizar el proceso de secado  $m_f$  (kg), ver ecuación (2). El proceso de secado se realizó para una totalidad de granos fermentados:  $m_i = 69.3$  kg.

$$m_{\text{agua}} = m_i - m_f \quad (2)$$

Durante el proceso de secado, se registra el cambio en la masa en 3 lotes de 1 kg, tomados de los 69.3 kg totales, separados aparte del resto de cacao fermentado depositado en marquesina, para identificar posibles diferencias de temperatura por ubicación y diferencias en tiempos de secado con la cantidad mayor también por ubicación. Esto se hizo cada hora, durante todo el muestreo en marquesina. Los montículos de grano se depositan en recipientes separados para evitar el contacto directo con manipulación manual, ya que debían sacarse de la marquesina para medir su peso en una balanza y posterior a esto registrar mediciones de cambio de masa (Figura 11).

Posteriormente, estos valores se utilizan para construir una curva de pérdida de masa vs tiempo de secado. Otro de los parámetros es la tasa de secado  $\dot{m}_{\text{agua}}$  (g/h) identificada en la ecuación (3).

$$\dot{m}_{\text{agua}} = \frac{m_i - m_f}{t} \quad (3)$$

Adicionalmente, se determina la humedad del grano en cada hora de secado con base en la humedad inicial del grano ( $H_i$ , %), a partir de un balance de masa en el proceso de secado se llega a la ecuación (4) [6], que permite predecir la humedad de grano  $H$  (%) en cualquier momento de tiempo conociendo la masa en ese instante. Con estas estimaciones es posible construir la gráfica de pérdida de humedad del grano vs tiempo de secado. Esta evaluación permite estimar el tiempo de secado promedio asociado al proceso tradicional en marquesina.

$$H = \left[ 1 - \left( m_i \frac{1 - H_i}{m_f} \right) \right] * 100\% \quad (4)$$

En la (Figura 10) se presenta un balance para las entradas y salidas de energía en la marquesina. La ecuación (5) relaciona los términos de energía a la entrada y salida asociados con el proceso de secado tradicional en marquesina. Mediante este análisis de primera ley de la termodinámica, se estima la energía que entra al proceso, así como las pérdidas. Donde  $E_{IR}$  (kJ) es la energía solar que llega sobre la superficie o techo de la marquesina durante todo el secado,  $E_{cam}$  (kJ) es el trabajo que realiza el campesino para mezclar los granos,  $E_{evapo}$  (kJ) es la energía necesaria para evaporar la cantidad de agua contenida en el grano de tal forma que se alcance la humedad deseada,  $E_{chum}$  (kJ) y  $E_{cseco}$  (kJ) se refieren a la energía que posee la masa de granos asociada a una diferencia de temperaturas entre el producto y el ambiente al inicio y final del proceso, respectivamente;  $E_{per}$  (kJ) se asocia a la energía no aprovechada durante el proceso de secado o degradada,  $E_{aint}$  (kJ) es la energía de aire en movimiento lento al interior de la marquesina.

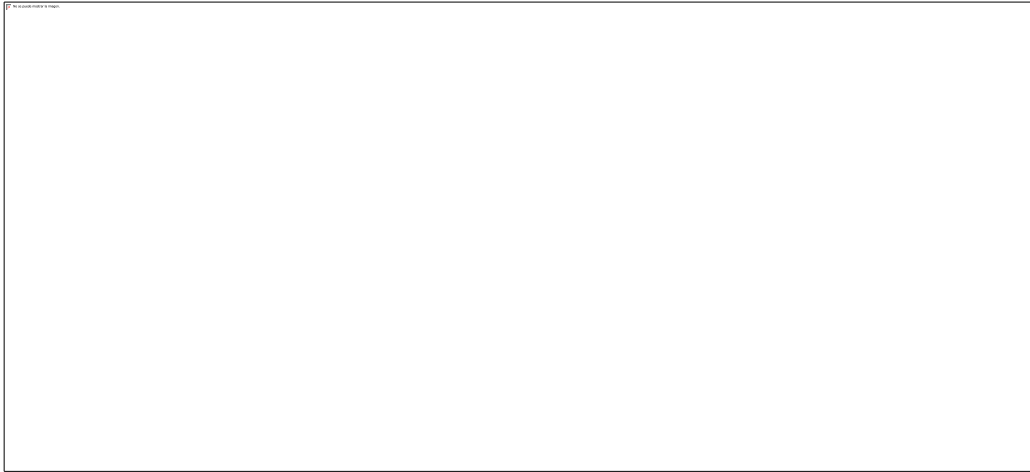


Figura 10. Balance de Energía en la marquesina

$$E_{IR} + E_{C_{hum}} + E_{C_{cam}} = E_{evapo} + E_{C_{seco}} + E_{per} + E_{aint} \quad (kJ) \quad (5)$$

Finalmente, el cálculo de la eficiencia térmica  $\eta$ , del proceso de secado se lleva a cabo considerando la entrada requerida: la energía entregada al sistema como la irradiación solar  $I$  (kW/m<sup>2</sup>) que recibe la superficie de la marquesina, y la salida deseada es la energía necesaria para el secado de los granos de cacao y puede ser calculada usando la ecuación (6). La energía de secado se refiere a suma de la energía necesaria para elevar la temperatura de los granos de cacao hasta la temperatura de secado y la energía necesaria para evaporar esa cantidad de agua de los granos.

$$\eta = \frac{\text{Energía secado}}{\text{Energía solar entregada}} = \frac{N * (m_i * C_{p_{cacao}} * (T_{sec} - T_{amb})) + (m_{agua} * h_{fg@T_{sec}})}{I * A * t} \quad (6)$$

Donde  $N$  es la cantidad de días de secado,  $C_{p_{cacao}}$  (3746.3 J/kg °C) es el calor específico de los granos de cacao,  $T_{sec}$  (°C) es la temperatura que alcanzan los granos al interior de la marquesina,  $T_{amb}$  (°C) es la temperatura ambiente del sitio,  $A$  (m<sup>2</sup>) es el área sobre la cual incide la radiación solar,  $h_{fg}$  (kJ/kg) es la entalpía de vaporización del agua a la temperatura de secado, y  $t$  (s) es el tiempo de secado. La temperatura de los granos de cacao se mide en función del tiempo a fin de determinar la variable de interés,  $T_{sec}$  (°C). La temperatura será medida en los granos en cajones dispuestos con mallas para 1 kg y también será medida en la distribución espacial de la marquesina en 9 puntos diferentes. Otras de las variables de interés que serán medidas son la temperatura ambiente  $T_{amb}$  (°C) que permite determinar cuánto se incrementa la temperatura durante el secado, y la humedad específica al interior de la marquesina  $H_m$  (g/g), esta permite tener una noción de la efectividad del proceso de secado, si la humedad se acumula al interior del recinto, puede luego condensarse y ser contraproducente para el proceso de secado.



Para la medición de la radiación solar se usará un piranómetro Kipp & Zonnen modelo CM3 de precisión  $\pm 25 \text{ W/m}^2$ , sensores de temperatura y humedad relativa de referencia AHT21 ASAIR de precisión de  $\pm 0.3 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $\pm 2\%$ , respectivamente, ubicados al interior y exterior de la marquesina. Los sensores y el piranómetro fueron integrados a un sistema de adquisición de datos (datalogger) con una frecuencia de muestreo de 12 minutos. Se usó un termómetro laser infrarrojo para la medición de la temperatura de los granos de cacao con una precisión de  $\pm 1.5 \text{ }^\circ\text{C}$ . En la evaluación de pérdida de masa en los montículos de granos de cacao se empleó una balanza digital de precisión  $\pm 0.1 \text{ g}$  para capacidad máxima 10 kg.

La Figura 11 ilustra la marquesina caracterizada, evidenciando los granos esparcidos y los 3 montículos de granos a los que se les hizo el seguimiento de su masa. Se definió dejar mitad de la superficie de la marquesina destinada para los granos esparcidos, para moverlos durante el secado y la otra mitad para los 3 cajones con montículos de 1kg, donde se tuviese espacio para movimiento y salida de los mismos para poder pesarlos por fuera de la marquesina. Debían pesarse por fuera ya que la balanza podría averiarse por las temperaturas de secado y humedad alcanzada en marquesina. En los granos esparcidos se midió en 9 puntos diferentes y en cada montículo se tomó temperatura por cada uno.

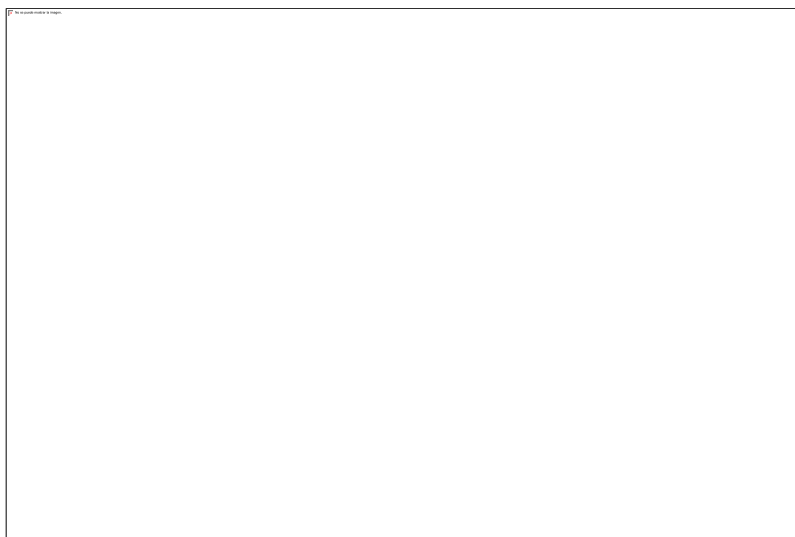


Figura 11. Marquesina estudiada

Otra de las variables de interés en este estudio es el costo específico asociado al proceso de secado por unidad de masa de grano seco ( $\text{COP}\$ / \text{kg}_{\text{cacao seco}}, \text{USD}\$ / \text{kg}_{\text{cacao seco}}$ ). Para esto se tienen en cuenta los costos de grano fermentado ( $\text{costo}_{\text{c}_{\text{ferm}}}, \text{COP}\$ / \text{kg}_{\text{cacao seco}}$ ) que son  $4231 \text{ COP}\$ / \text{kg}_{\text{cacao seco}}$  (Fedecacao, comunicación privada abril 12, 2022) que incluye todos los costos asociados a siembra, abono, cosecha, fermentado y costos de inversión de la marquesina ( $\text{costo}_{\text{inver}}, \text{COP}\$ / \text{kg}_{\text{cacao seco}}$ ), cuya instalación tiene un costo de inversión para el año 2022 de  $\text{COP}\$ 2.500.000$ . Este costo, más adelante se considera distribuir por 4 años de vida útil que se da por experiencia del cacaocultor a la marquesina. El

costo de secado se calcula según la ecuación (7), este parámetro será de importancia para evaluar la viabilidad del uso de una marquesina y compararla con instalaciones similares.

Para calcular el costo de producción por kg de cacao seco, se plantea la siguiente ecuación:

$$costo_{secado} = costo_{c_{ferm}} + costo_{inver} \left( \frac{\$COP}{kg_{cacao\ seco}} \right) \quad (7)$$

### 2.3.1 Fabricación y puesta a punto del secador a escala

En la Figura 12, se presenta el diagrama de flujo de los procesos de fabricación del secador a escala de laboratorio, desde las actividades de fabricación mecánica, hasta las actividades de instalación de instrumentación, partiendo de planos de taller, subensambles y ensamble con medidas generales. Se indican también los reportes necesarios para comunicar resultados y valores esperados de las fases de fabricación y puesta a punto.

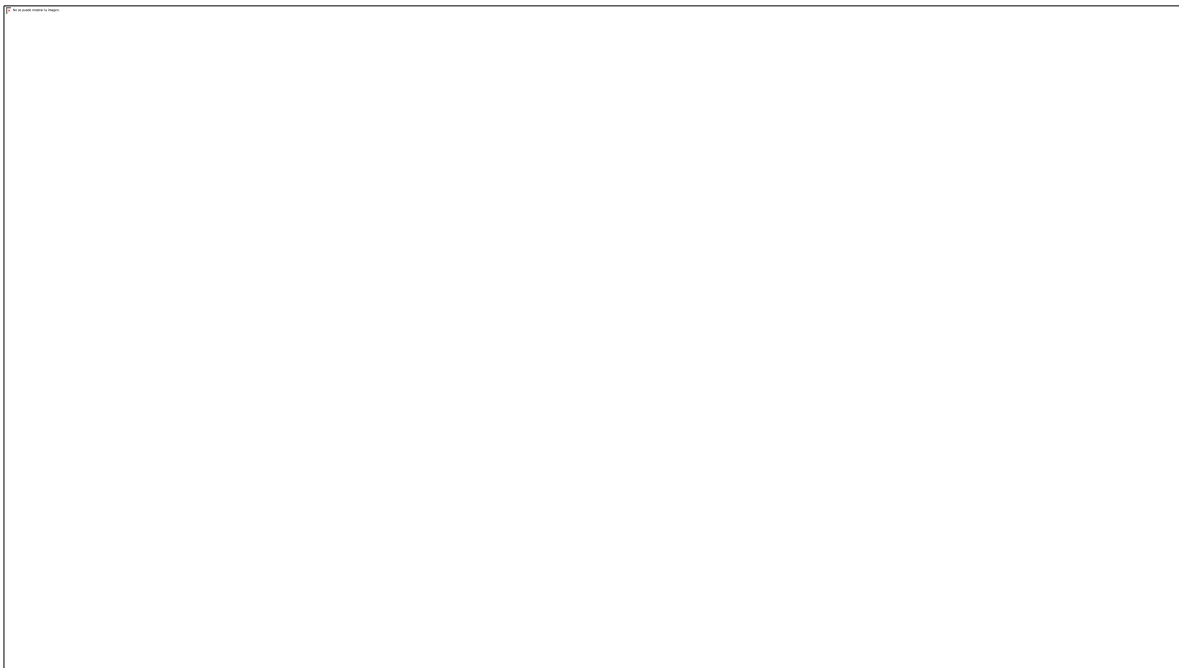


Figura 12. Diagrama de flujo de procesos secador a escala



Figura 13.Cámara de secado, secador escala

En la Figura 13 se enumeran cada uno de los componentes de la cámara de secado del secador a escala, donde podemos ver: 1 - gorro chino salida de aire, 2 - tapa gorro chino, 3 - cámara de secado, 4 - ducto de inyección de aire caliente, 5 - sensores de temperatura y humedad, 6 - ducto de entrada aire, 7 - codo integración entradas de aire, 8 - estructura cámara secado, 9 - rodachinas, 10 - entrada de aire caliente de intercambio de combustión, 11 - camisa exterior aislante, 12 - celdas de carga, 13 . bandejas para grano cacao, 14 – ventilador eólico para extracción de aire caliente.

En cuanto a los componentes para la instrumentación del secador se encuentran los siguientes:

Sensores (9 unidades) de temperatura a prueba de agua referencia DS18B20.

Tarjeta sensor de temperatura y humedad AHT21B.

Tarjeta Mega 2556 (Arduino).

Celda de carga tipo “S” 100 kg, utilizada en aplicaciones de tensión-compresión.

Anemómetro mini digital para medir velocidad del viento.

En cuanto a la puesta a punto del secador, se debe considerar la calibración de las celdas de carga; 3 por cada bandeja, en cada momento que se deba hacer un movimiento de estas bandejas por verificación de peso en balanzas externas que sirvan de validadoras del peso del grano.

El procedimiento de calibración de cada nivel de celdas es el siguiente:

- Se debe iniciar calibración primero de la bandeja inferior, luego la bandeja del medio y por último la bandeja superior (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Esto por temas de facilidad de desinstalación e instalación en el cilindro de la cámara de secado.

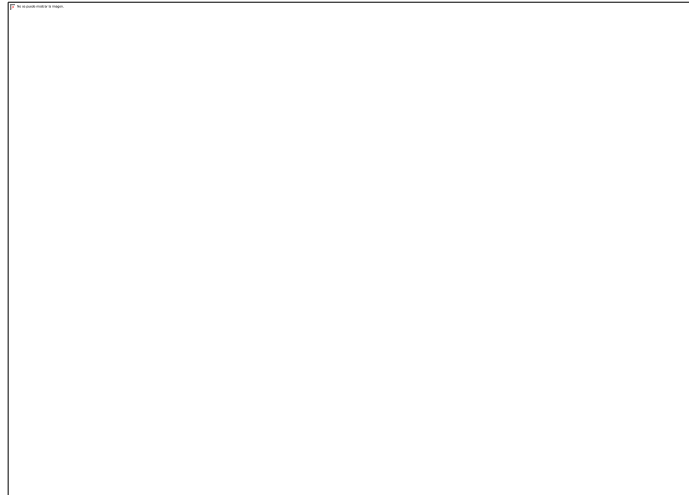
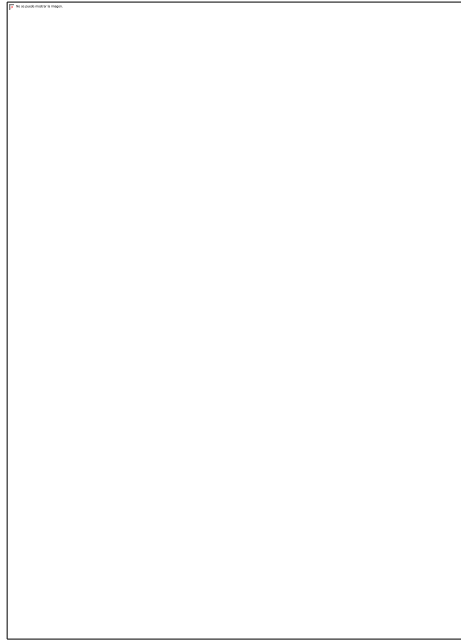


Figura 14. Bandeja superior secador a escala

- Cada bandeja debe estar soportada por sus pines de apoyo, 3 unidades por cada bandeja (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), luego de tener estos pines en posición, se debe instalar los sensores de temperatura de grano por bandeja y de temperatura de aire, respectivamente. El sensor de temperatura de grano va alojado en un agujero que tiene cada bandeja para que pueda estar en contacto con la temperatura de grano. El sensor de temperatura de aire ingresa en la cámara de secado arriba del pin de apoyo y del sensor de temperatura de grano.



*Figura 15. Pines (flecha verde), sensores temperatura (flechas rojas)*

- Luego de tener los pines (3 unidades por bandeja) y sensores de temperatura ( 1 de grano y 1 de aire) en posición por bandeja, se procede a hacer calibración de “cero”, que es una calibración sin peso en bandeja. Esto se hace oprimiendo el botón de cero de la respectiva bandeja en calibración, que se encuentra en la caja de tarjetas electrónicas del sistema de medición del secador.
- Luego de hacer la calibración cero, verificando que el indicador de peso esté en cero en la bandeja en calibración, se procede hacer la calibración de “span”. Este se hace poniendo un peso conocido y verificado en otra balanza de referencia, que en este caso sería un valor de 992 g, que se obtiene de una cadena de acero eslabonada (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Se seleccionó esta cadena ya que permite simular una carga distribuida en todo el perímetro de cada bandeja.



Figura 16. Cadena para patronar bandejas secador

Después de hacer la calibración de “cero” y “span” por cada bandeja, antes de pasar a calibrar y posicionar la bandeja siguiente a poner a punto, se debe adicionar la cantidad de grano de cacao que se va a secar y este debe indicar un peso aproximado, verificado previamente este peso de grano en una balanza referencia. Para el caso de este experimento se consideran 350 g (Figura 17) por bandeja, para un total de 1050 g en el secador, que tiene una capacidad máxima de secado de 3000 g.



Figura 17. Pantalla de pesaje sistema arduino

### **2.4 Fase 3: metodología de experimentación proceso de secado convectivo a escala de granos de cacao usando CMC**

Para la fase de experimentación y análisis de resultados, se describe una propuesta de caracterización del proceso de secado de granos de cacao en el secador a escala de laboratorio. Entre las variables de interés a medir se destacan

temperatura de aire de secado, flujo másico de aire secado, la pérdida de masa de los granos de cacao, así como el tiempo de secado, entre otros.

La prueba de verificación del secador a escala de laboratorio, con capacidad nominal de secado de 1 kg, se hace con el fin conocer la eficiencia del sistema de la cámara de secado. Para este propósito se seca grano de cacao, dispuestos en una bandeja fabricada en acero inoxidable, como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, usando Cáscara de Mazorca de Cacao (CMC) en proporción (50%) y madera residual de roble (50%) como fuente de energía térmica. La CMC y la madera alimentan la cámara de combustión tal y como se observa en la

Figura 18, de chimenea más pequeña a la izquierda de la figura, y en la Figura 19 donde se puede ver el detalle de la cámara de combustión con madera en parte inferior y CMC parte superior. La madera residual se usa porque se determinó en pruebas iniciales de combustión solo con CMC, que esta no permite mantener una llama estable, con una temperatura en chimenea de cámara de combustión superior a 220C, que es el punto de temperatura más bajo, en el que se considera que una biomasa está haciendo combustión [55]. Por tanto, como la CMC no permite mantener una temperatura estable superior a 220° C, en proceso de combustión, tampoco es posible que mantenga la temperatura de aire caliente con valores superiores a 40-50°C, al interior de la cámara de secado. La razón por la que se determina mezclar estas dos biomosas de tipo residual, es porque se requiere dar estabilidad de llama a la combustión.

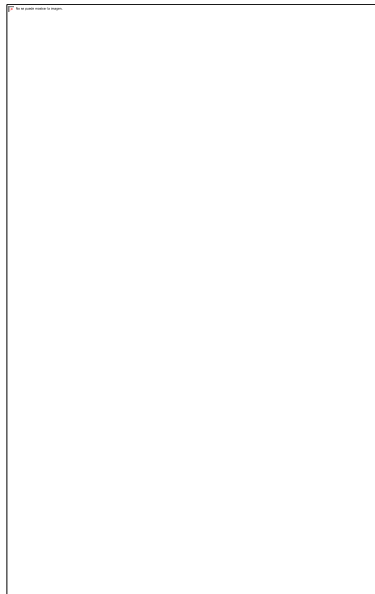


Figura 18. Cámara de combustión de CMC (chimenea a la izquierda) e intercambiador de calor para aire de secado (anillo inoxidable en chimenea).

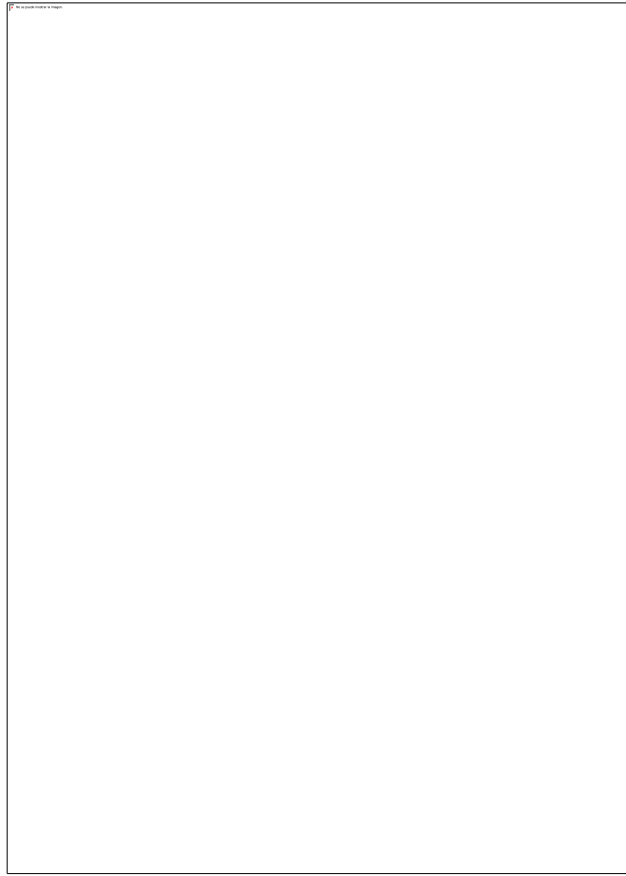


Figura 19. Hogar secador con CMC y roble

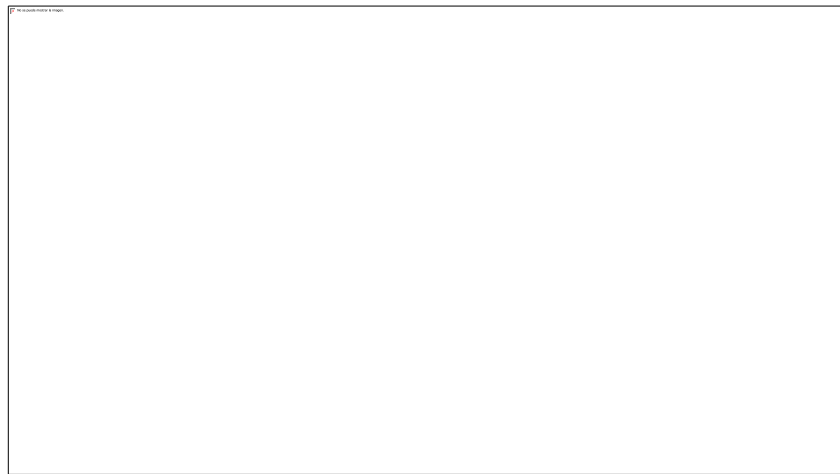


Figura 20. Bandeja para secado de cacao en cámara de secado a escala de laboratorio.



De manera general, para esta metodología, se proponen las siguientes etapas:

- Búsqueda de referencias bibliográficas, para soportar parámetros constantes del experimento.
- Verificación funcional y/o configuración de instrumentos manuales (termómetro laser, anemómetro, termohigrómetro y balanza) para registro de variables de operación en el secador a escala de laboratorio.
- Caracterizar el proceso de secado de 1 kg de cacao fermentado usando el secador convectivo a escala de laboratorio.
- Tratamiento de datos y análisis de resultados.
- Reporte de pruebas preliminares y de puesta a punto.

A continuación, se describe el modelo de cálculo considerado para la caracterización experimental del secador de grano de cacao a escala de laboratorio.

#### 2.4.1 Modelo de Cálculo

Entre las variables características del proceso de secado convectivo de granos de cacao a escala de laboratorio, se determina el consumo específico de energía,  $SEC_{ELab}$  descrito en la sección 2.3, ecuación (8) .

$$SEC_{ELab} = \frac{Q_{net}}{m_{agua}} \quad \left( \frac{kJ}{kg} \right) \quad (8)$$

La energía total entregada al sistema,  $Q_{net}$  (kJ) ecuación (9), considera el calor entregado por la biomasa y el consumo de energía eléctrica del ventilador.

$$Q_{net} = m_{cmc} * PCI_{cmc} + m_{made} * PCI_{made} + Pot_{vent} * t \quad (kJ) \quad (9)$$

Donde  $m_{cmc}$  (kg) es la masa de CMC y  $m_{made}$  es la masa de madera consumidas en la cámara de combustión para el proceso de secado, y  $PCI_{cmc}$  (kJ/kg),  $PCI_{made}$  es el poder calorífico inferior de la cáscara de mazorca de cacao y madera respectivamente. El primero, el cual se determina por análisis de laboratorio siguiendo la norma ASTM D240-19 [56] y el segundo por literatura de poder calorífico para madera roble.  $Pot_{vent}$  (kW) es la potencia eléctrica del ventilador y  $t$  (h) es el tiempo en el que el ventilador está en funcionamiento.

La masa de agua evaporada,  $m_{agua}$  (kg), se estima de acuerdo a la sección 2.3 en este mismo documento, ver ecuación (10) :

$$m_{\text{agua}} = m_i - m_f \quad (kg) \quad (10)$$

Durante el proceso de secado, se registraron datos del cambio en la masa en un lote de 1 kg de grano de cacao, cada intervalo de tiempo medido a través de celdas de carga acopladas a un sistema de adquisición de datos, de esta manera, se midió la evolución de la masa de los granos de cacao en función del tiempo de secado. Adicionalmente, se determinó la humedad del grano  $X_o$  (%), en función del tiempo de secado con base en la masa inicial  $M_o$  (g) y la masa final (masa de secado por su sigla en inglés, mass drying)  $M_d$  (g), ecuación (11). La evaluación de masa permite estimar el tiempo de secado asociado al proceso a escala de laboratorio.

$$X_o = \frac{M_o - M_d}{M_d} \left( \frac{g \text{ agua}}{g \text{ materia seca}} \right) \quad (11)$$

La masa final objetivo ( $m_{T \text{ Objeto}}$ ) de producto seco, se podrá determinar mediante la ecuación (12) teniendo como dato la humedad deseada ( $H_{\text{Objeto}}$ , en %) y la humedad inicial del grano ( $H_{\text{ini}}$  en %).

$$m_{T \text{ Objeto}} = \frac{(1 - \%H_{\text{ini}})}{(1 - \%H_{\text{Objeto}})} * m_{T \text{ ini}} \quad (kg) \quad (12)$$

La masa de agua a remover para alcanzar la humedad objetivo se calcula mediante los datos de la humedad inicial del grano ( $H_{\text{ini}}$  en %) y la humedad deseada ( $H_{\text{Objeto}}$  en %), ver ecuación (13).

$$m_{W, \text{remover}} = m_{T \text{ ini}} * \frac{(\%H_{\text{ini}} - \%H_{\text{Objeto}})}{(1 - \%H_{\text{Objeto}})} \quad (kg) \quad (13)$$

Igualmente, se desea evaluar la eficiencia térmica global ( $\eta$  dada en %, ecuación ()) del proceso de secado a escala de laboratorio. Considerando la entrada requerida como la energía suministrada entregada al proceso por la CMC; mientras que la salida deseada, es la energía necesaria para el secado de los granos de cacao. En la sección 2.3 de este documento, se da una explicación detallada de los parámetros de esta ecuación de eficiencia.

$$\eta = \frac{\text{Energía secado}}{\text{Energía térmica entregada}} = \frac{N * (m_i * C_{p_{\text{cacao}}} * (T_{\text{sec}} - T_{\text{amb}})) + (m_{\text{agua}} * h_{\text{fg}@T_{\text{sec}}})}{Q_{\text{req}} + E_{\text{electricA}}} \quad \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kJ}}\right) \quad (14)$$

Finalmente, se quiere calcular la eficiencia de la cámara de secado del secador convectivo a escala de laboratorio. Para esto, tomamos en cuenta la ecuación (15) reportada por Atepor [35], en su secador de combustión de CMC:

$$\eta_{\text{camSec}} = \frac{(T_1 - T_2)}{(T_1 - T_a)} \quad (\%) \quad (15)$$

Donde, T1 es la temperatura de entrada a la cámara de secado y T2 es la temperatura de salida de la misma. Ta se refiere a la temperatura ambiente en el momento exacto.

#### 2.4.2 Materiales requeridos

Se listan a continuación, los materiales básicos para operar el secador a escala de laboratorio.

- Ventilador de aire forzado 100W – 110V.
- Sistema de Adquisición de datos
- Computador portátil
- 1 kg de Cacao fermentado
- 40 kg cáscara de mazorca, para 12 h aproximadamente de secado
- Anemómetro
- Baterías AAA
- Guantes de cuero
- Gafas

El anemómetro se requiere para verificar la velocidad de aire caliente ingresando y saliendo de la cámara de secado, al igual que las baterías para respaldo de este. En tema de protección personal de la persona que estará al frente de la operación de la combustión de la cámara de quema de CMC, se recomienda tener disponibles guantes de cuero reforzado o carnaza y gafas de seguridad.

#### 2.4.3 Procedimiento experimental

A continuación, se describe el procedimiento experimental a seguir para la caracterización del proceso de secado de granos de cacao a escala de laboratorio:

- Pesar la masa inicial de CMC (kg).
- Iniciar la oxidación de la CMC en la cámara de combustión, hasta que la temperatura en la chimenea este por encima de 220°C, con lo cual se garantiza estado estable.
- Tomar 3 granos de cacao aproximadamente y cortarlos por la mitad para tomar evidencia fotográfica de su color inicial.
- Poner el cacao a secar sobre las bandejas de secado (1 kg de cacao fermentado) en cada bandeja y posicionarlas al interior de la cámara de secado.
- Tomar fotografías antes de iniciar la prueba con la ubicación de todos los elementos.
- Conectar y ubicar el sistema de adquisición de datos con sus respectivos sensores de masa, temperatura y humedad.
- Conectar el ventilador de aire forzado.
- Tomar hora de inicio del proceso de secado.
- Verificar que los sensores estén midiendo correctamente los datos del proceso.
- A lo largo de la actividad de secado se debe seguir alimentando la cámara de combustión con la CMC. Se recomienda cada 30 minutos revisar la temperatura en la chimenea con el termómetro laser para verificar que este por encima de 220°C.
- El paso anterior se continuará hasta que la masa de granos en cada bandeja alcancen aproximadamente 157 g (de esta forma se asegura que se llega a la humedad objetivo de 7%).
- Se estima que el proceso de secado tarde de 12 a 16 horas, con un consumo de 1.5 kg de CMC y 1.5 kg de madera por hora.

## **2.5 Metodología para caracterizar emisiones contaminantes del secador a escala de CMC**

La caracterización de emisiones por combustión de CMC en el secador a escala de laboratorio para 1kg de cacao, se lleva a cabo para identificar especies contaminantes que se puedan generar por la combustión de esta cáscara durante el proceso de secado de cacao.

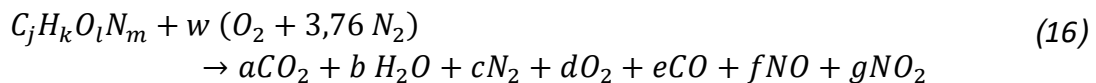
Se plantea medir posibles especies contaminantes como CO<sub>2</sub>, CO y NO<sub>x</sub>, y también la temperatura de gases de combustión de salida. Para esto se emplea un analizador de gases, con el que se obtendrán concentraciones de CO, CO<sub>2</sub> y NO, con las cuales posteriormente se determinarán las emisiones específicas en gramos de CO/ kg de CMC, gramos de CO<sub>2</sub>/ kg de CMC, y gramos de NO/ kg de CMC.

### **2.5.1 Materiales requeridos**

- Medidor y analizador de gases
- 20 kg CMC
- Ventilador centrifugo de 100W
- Guantes para proteger manos
- Gafas para proteger ojos
- Tapabocas o filtro respirador si es necesario

### 2.5.2 Modelo de cálculo

A fin de determinar el factor de emisiones FE ( $g_{\text{especie}}/kg_{\text{combustible}}$ ). Se plantea la ecuación (166) estequiométrica, que determina el balance de masa para la reacción química que ocurre. Donde  $C_jH_kO_lN_m$  representa la molécula equivalente de CMC, los coeficientes  $a, b, c, d, e, f, g$  (mol) representan las moles producidas de cada especie en los productos cuando se oxida una mol de combustible.  $w$  representa las moles de aire con las que ocurre la combustión. Para dar solución al problema de 8 incógnitas, se plantean balances de para Carbono, Hidrogeno, Nitrógeno y Oxígeno basado en el principio de conservación de masa. Las 4 ecuaciones restantes necesarias para dar solución al sistema se obtienen de los resultados del analizador de gases empleador que es KIMO- Kigaz 300, que arroja la fracción molar de  $O_2, CO, NO, NO_2$  en los productos de combustión en base seca. De esta forma, para cada medición realizada se resuelve el sistema de ecuaciones lineales por medio del software Engineering Equation Solver (EES). Una vez obtenidos los coeficientes  $a, e, f, g$  ( $mol_{\text{especie } i}/mol_{\text{cmc}}$ ) se multiplican por el peso molecular ( $g/mol$ ) de cada especie y se divide entre el peso molecular del combustible  $PM_{\text{cmc}}(g/mol)$ , obteniendo la relación deseada ( $g_{\text{especie } i}/g_{\text{cmc}}$ ).



La Tabla 4 muestra las características y especificaciones de las medidas que arroja el equipo KIMO- Kigaz 300.

**Tabla 4. Especificaciones de equipo analizador de gases**

Parámetro	Sensor	Rango Medición	Resolución	Precisión
O <sub>2</sub>	Electroquímico	0-21 %	0.1% vol.	± 0.2 % vol.
CO <sub>2</sub>	Electroquímico	0-8000 ppm	1 ppm	± 10% valor medido
NO	Electroquímico	0-5000 ppm	1 ppm	± 5 ppm
NO <sub>2</sub>	Electroquímico	0-1000 ppm	1 ppm	± 5 ppm
CO <sub>2</sub>	Calculado	0-99%	0.1 % vol	-
Temp humos	Termopar K	-100 a +1250 °C	0.1 °C	± 1.1 °C o ± 0.4% medido
Temp ambiente	NTC interno	-100 a +120 °C	0.1 °C	± 0.5 °C

La molécula equivalente de CMC fue posible determinarla a partir de un análisis elemental de esta biomasa, realizada en el laboratorio ambiental de la Universidad Pontificia Bolivariana. La prueba fue llevada a cabo en el analizador elemental de referencia Thermo Scientific FLASH 2000 que permite conocer la composición de Carbono, Nitrógeno, Hidrogeno y Azufre de la muestra bajo la norma UNE-EN-15407. La *Tabla 5* representa los resultados obtenidos del análisis elemental de la cáscara de mazorca de cacao estudiada.

El paso siguiente a fin de obtener la fracción molar de cada especie  $x_i$  es normalizar los resultados de la fracción másica  $y_i$  del análisis elemental sin cenizas. Luego, es posible aplicar la ecuación (177) a las especies Carbono, Hidrogeno, Oxígeno y Nitrógeno determinando los coeficientes j, k, l, m respectivamente, donde  $PM_i$  (g/mol) es el peso molecular de cada especie.

Finalmente, se deduce que la molécula equivalente de la CMC es  $C_{0,3202}H_{0,4731}O_{0,1895}N_{0,0171}$ . Ahora es posible realizar cálculos estequiométricos a partir de la reacción de combustión de esta biomasa.

**Tabla 5. Análisis elemental de CMC**

Análisis Elemental % db	
Carbono	42,17%
Hidrogeno	5,19%
Oxígeno	33,26%
Nitrógeno	2,62%
Azufre	0%
Cenizas	16,76%

$$x_i = \frac{\frac{y_i}{PM_i}}{\sum \frac{y_i}{PM_i}} \quad (177)$$

### 2.5.3 Procedimiento experimental

A continuación, se describen una serie de pasos a tener presentes para hacer una correcta medición y análisis de gases de CMC.

- Pesar la cantidad a quemar de CMC
- Iniciar la oxidación de CMC en la cámara de combustión, hasta que la temperatura en la chimenea este por encima de 350°C.
- Si es necesario para rápido encendido, considerar el uso del ventilador de aire forzado de 100W.
- Tomar el dato de la hora de inicio de medición.
- Poner la sonda de medición sobre la chimenea de la cámara de combustión del secador.
- Verificar el valor de temperatura de la chimenea cada 15 minutos y asegurar con aire forzado o con ayuda de cartón seco, que la temperatura se mantenga arriba de 350°C.

Las pruebas de diagnóstico se realizan normalmente en estado estacionario, cuando se alcanza la temperatura de funcionamiento normal o nominal (300 -350° C). Una vez alcanzado dicho estado, se procede a medir las emisiones en gases. Para eso se usa un analizador de gases, el cual contiene una bomba que se encarga de succionar los productos de combustión, por lo que se debe garantizar un acceso a la chimenea, ideal que sea lo más cercano a la descarga de ésta, para evitar que los productos se diluyan en el aire. En esa medición se mide la temperatura, y la composición de CO, CO<sub>2</sub> y NO. Con base a estos datos y un modelo de cálculo, se determinan las pérdidas energéticas que se van en los productos de combustión.

También se mide el consumo de combustible, para estimar la potencia térmica consumida y definir la energía que se está consumiendo, con el fin de identificar en qué parte están las pérdidas de energía.

### 2.6 Fase 4: metodología análisis costo efectivo del secador convectivo a escala de laboratorio

Los costos para la instalación y manejo técnicos del cultivo del cacao, se refieren a conceptos como la mano de obra, los insumos, las herramientas, infraestructura, la tierra, la asistencia técnica y los costos financieros, considerando todos los costos asociados a la producción del cacao [57].

De acuerdo con esto, los principales componentes del costo específico del secado de granos de cacao a escala de laboratorio (USD\$/ kg<sub>cacao,seco</sub> ó COP\$/ kg<sub>cacao,seco</sub>) son el valor del cacao fermentado y el valor de inversión del secador correspondiente por ciclo de secado.

Como se mencionó en la sección de secado tradicional de cacao, los costos de las actividades relacionadas con el proceso de fermentación de cacao por kilogramo de grano fermentado, de acuerdo con Fedecacao [5], se estima en COP\$ 4231 para el año 2022. Para obtener el precio de kilogramo fermentado por kilogramo de cacao seco, se multiplica este valor por la relación entre masa inicial y masa final. Este sería el valor de kilogramo fermentado por kilogramo de cacao seco ( $costo_{c_{ferm}}$ ).

Con respecto al costo de inversión del secador a escala, se deben considerar dos sistemas principales que lo componen; la cámara de combustión y cámara de secado. Estos dos sistemas se dividen a su vez en hogar combustión de biomasa, chimenea, intercambiador de calor; para cámara de combustión y ductos de conexión entre combustión y secado, cámara de secado de acero inoxidable, bandejas inoxidables de alojamiento de grano de cacao y ducto inoxidable de salida de aire húmedo. La instrumentación mínima para seguimiento de variables de secado, también se debe considerar con el fin de poder controlar el proceso. Esta instrumentación se compone de sensores de temperatura, sensores de humedad y celdas de carga para determinar el cambio de masa. Ya teniendo datos de costo de fabricación del secador, con todos sus componentes es necesario considerar también la capacidad de secado en kilogramos y ciclos de operación durante la vida útil del secador. Al sumar todos estos costos, dividir por el número de ciclos en su vida útil y a su vez dividir por la capacidad promedio en kilos de secado, se obtiene COP\$ / kg<sub>cacao</sub> seco por inversión en secador, ecuación (18) :

$$costo_{inver} = \frac{\text{Costeo fabricación secador}}{\#ciclos \text{ en vida util} * kg \text{ prome. secado}} \quad (18)$$

Los costos asociados a la mano de obra de operación, de acuerdo con entrevistas realizadas con personal técnico de Fedecacao [57], varían de un proyecto (finca cacaotera) a otro y generalmente no son considerados actividades de costo directo que se desarrollan en las fincas, ya que están implícitos a otras actividades del mismo lugar, como por ejemplo abonar o fertilizar los terrenos, recoger cáscara de mazorca del suelo, inspeccionar plagas o enfermedades en arboles aledaños, realizar actividades de oficios varios de la casa de la finca, etcétera. Se considera entonces que, en el valor de cacao fermentado por kilogramo de cacao seco, se destina un rubro relacionado con mano de obra, donde parte de esta va por secado de cacao.

### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1 Caracterización del secado tradicional en marquesina. Línea base.

##### 3.1.1 Curva de secado



La Figura 21 muestra la evolución de la pérdida de masa promedio de los montículos de granos en cada hora, con escala de tiempo en horas del día. Esto durante cada uno de los días de secado. Contrario a lo esperado, la pérdida de masa no es decreciente en todo momento a lo largo del proceso de secado. Al final del día la pérdida de masa no es significativa, a pesar de la energía por radiación solar, esto debido a que durante la noche, los granos ganan humedad por condensación y por eso la masa aumenta nuevamente. Por tanto, se estima que las dos primeras horas de secado del día son dedicadas únicamente a remover la humedad ganada durante la noche anterior, es decir, son alrededor de 6 horas de secado invertidas únicamente a remover la humedad ganada durante la noche; pues son 2 horas diarias por 3 días de secado. Esto ocurre porque en el momento en que la radiación solar comienza a disminuir, alrededor de las 15:30 h en adelante, el aire húmedo al interior de la marquesina comienza a enfriarse, generando un retroceso en el cambio de fase del vapor de agua a líquido, agua que queda en las paredes plásticas de la marquesina y se condensa directamente sobre el grano de cacao, generando un aumento de masa a los granos, como se puede evidenciar en la Figura 21, donde se muestra el porcentaje de masa pérdida versus las horas que transcurren en el secado. Sobre todo, esto se observa en los días 2 y 3, finalizando la fracción másica en torno al 56% para el día 2, iniciando en 59% en día 3 (aumento del 4%), terminando este último en 48% e iniciando en 52% (aumento del 4%) el día 4, respectivamente.

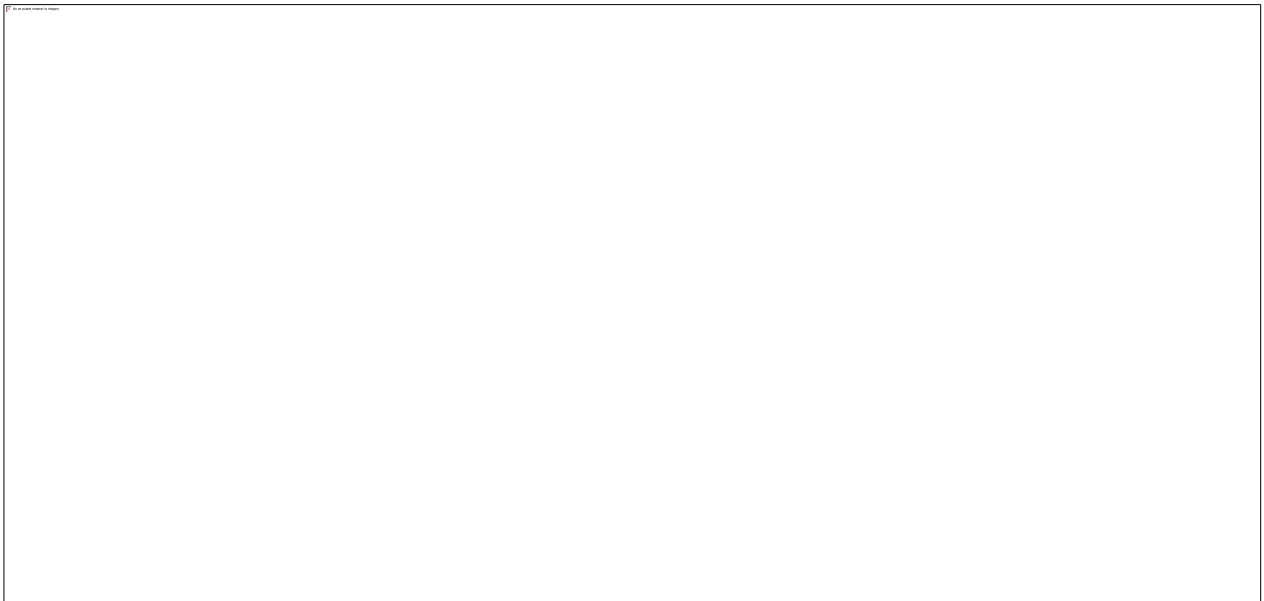
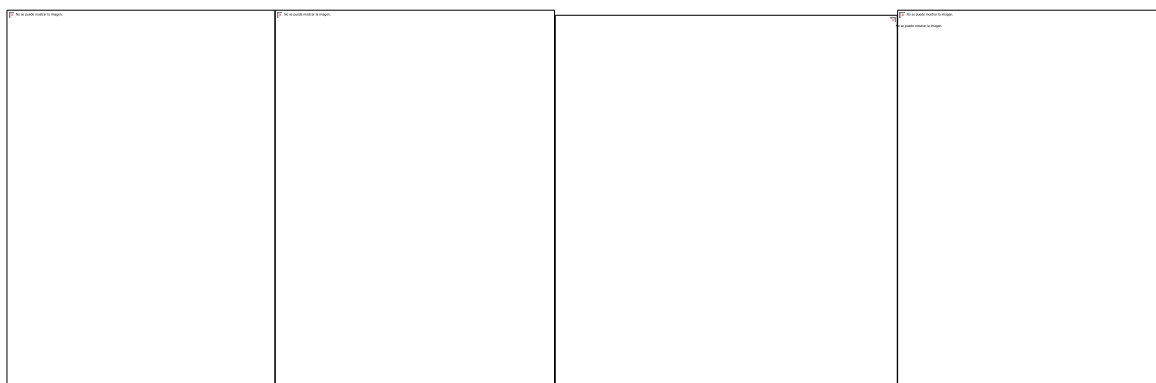


Figura 21. Pérdida de masa de granos en función del tiempo

Las curvas anteriores reflejan que el secado es más rápido durante el primer día y más lento en los días consecutivos, esto sucede porque la tasa de secado del grano de cacao es mayor cuando se tienen contenidos de humedad mayores, que es lo que se presenta en el primer día [2]. El desplazamiento de la humedad dentro de los granos se rige por difusión y capilaridad, pues no están saturados con agua, mientras que para el segundo día de tasa decreciente, se puede atribuir al flujo debido a la contracción, los gradientes de presión, y la gravedad [58][59].

Al evaluar las tasas de secado en cada día se calcularon valores de 37.1, 14.3, 14.2 y 12.1 g/h en los días de secado uno, dos, tres y cuatro, respectivamente. Con base en la evolución de la pérdida de masa, se concluye que el tiempo de secado total fue de 77 horas no continuas, de las cuales se podría decir que realmente se presentó un cambio de humedad en el grano hasta el día 3, porque en el día 4 el grano al final quedó con el mismo porcentaje de masa que el día 3. Este procedimiento se llevó a cabo el día 4 con el ánimo de corroborar el resultado de secado del día 3. De ese tiempo los granos recibieron una cantidad de energía solar significativa durante 32 horas, y en consecuencia estuvieron en reposo por aproximadamente 45 horas. En estudios de secado de cacao en marquesina, Puello-Mendoza et al [10] reportaron un tiempo de secado de 6 días igualmente, López-Cerino [8] de 35 horas, Belobo Belibi et al de 5 días [12], y Mujaffar et al [13] de 11 días. Algunos de ellos con intermitencia en el secado.

En el proceso artesanal de producción de granos de cacao, el encargado del proceso estima su culminación por medio de un análisis de inspección visual en el que evalúa el color, forma y textura de los granos. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se aprecian imágenes de los granos en los días de secado. En el primer día (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.a**), el interior del grano posee un color morado-rosa y a lo largo del proceso, en el día 2 (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.b**) y día 3 (Figura 20c) el color del grano se oscurece hasta alcanzar una coloración marrón opaca en el día 4 (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.d**), color propio del chocolate, día de secado que fue necesario para conseguir esta coloración y confirmar secado óptimo [11].



a) primer día

b) segundo día

c) tercer día

d) cuarto día

*Figura 22. Evolución de las características físicas del grano*

### 3.1.2 Temperatura

En la Figura 23 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta la temperatura ambiente de la zona, la temperatura al interior de la marquesina y la temperatura superficial de los granos durante los 4 días de secado. Durante el tiempo del experimento, la temperatura al interior de la marquesina, exterior de marquesina y temperatura de grano obtuvieron valores en promedio de  $46.44\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 11.32\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $30,8\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5.32\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $40.29\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 12.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , respectivamente, donde el resultado de la temperatura al interior de la marquesina es mayor que las demás temperaturas, logrando que este aire caliente favorezca el secado del grano de cacao, ya que el aire posee una humedad relativa menor, por lo que se promueve la evaporación del agua desde la superficie de los granos de cacao hacía el aire. La marquesina, por tanto, resulta ser un montaje estructural adecuado para aumentar la temperatura, ya que la temperatura al interior de la marquesina es superior a la temperatura ambiente en todo momento de radiación solar presente, encontrando diferencias de temperatura de hasta  $30^{\circ}\text{C}$ .

Por su parte, en intervalos de tiempo puntuales, la temperatura de los granos de cacao se eleva hasta valores por encima de los  $60^{\circ}\text{C}$ , aunque puede ser un indicador de un secado más rápido, algunos autores consideran que sobrepasar esta temperatura en el secado puede afectar las propiedades del grano [12].

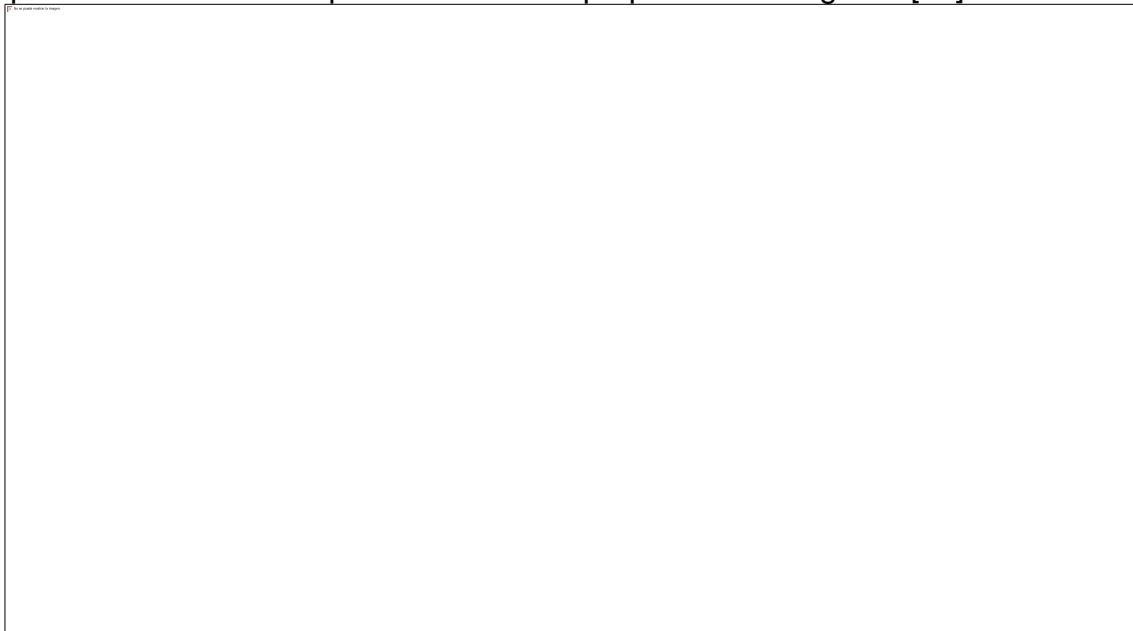


Figura 23. Temperatura en función de tiempo de secado.

### 3.1.3 Humedad relativa y radiación solar

En la Figura 24 se presentan la humedad relativa al interior y exterior de la marquesina y la intensidad de radiación solar. Los valores promedio obtenidos para la humedad relativa al interior de la marquesina, humedad relativa al exterior de la marquesina y la radiación solar fueron de  $27.02\% \pm 32\%$ ,  $51.61\% \pm 16.3\%$  y  $539.8\text{ W/m}^2 \pm 476.6\text{ W/m}^2$ , respectivamente. Se destaca que la humedad relativa al exterior siempre es mayor a la humedad relativa al interior, es un comportamiento

esperado pues a mayor temperatura del aire interior, la humedad relativa disminuye, con lo cual se favorece el secado del producto [60]. En la misma figura se presenta la gráfica de la radiación solar medida por el piranómetro, destacando la variabilidad de la radiación a lo largo del día.

Figura 24. Humedad relativa y radiación en función del tiempo

En la Figura 25 se muestran los datos de humedad relativa al exterior e interior de la marquesina, y la humedad específica al exterior y al interior de la marquesina. Para los 4 días, se observa que la humedad específica al interior de la marquesina es mayor que la humedad específica exterior, lo que indica que el vapor de agua presente en la marquesina es mayor que al exterior de la marquesina por la evaporación de la humedad (secado) a excepción del día 3 después de las 11am, donde se presentó una igualdad en las humedades específicas, debido a que la entrada de aire en la marquesina permaneció abierta completamente sin percatarse de esto, en la manipulación del plástico (poliuretano) para entrar y salir en momentos necesarios de movimiento del grano de cacao. Es evidente el estado líquido saturado del ambiente de la marquesina, por las gotas de agua que se perciben en las paredes plásticas de la marquesina y por la humedad que impregna el cuerpo cuando ingresas en esta. Por lo que, hablando en términos de secado de grano de cacao, esto retrasa conseguir el objetivo de humedad de 7%, ya que estas gotas de agua se condensan de nuevo sobre la superficie de los granos de cacao, sobre todo en la madrugada (2 primeras horas de secado) como se perciben los granos húmedos al iniciar una nueva jornada de secado.

La humedad específica se calculó partiendo de dos datos o variables conocidas del ambiente al interior de la marquesina e igualmente al exterior de esta misma. Datos como por ejemplo temperatura de saturación y humedad relativa para el interior de la marquesina. Para el exterior de la marquesina se consideraron los datos de humedad relativa exterior y temperatura ambiente. Datos que fueron localizados en la carta psicrométrica a 1 atmosfera de presión total.

Las humedades específicas de los días 1 y 4 vs días 2 y 3 son diferentes por particularidades puntuales de humedad en el ambiente o de condiciones ambientales particulares en cada uno de esos días.

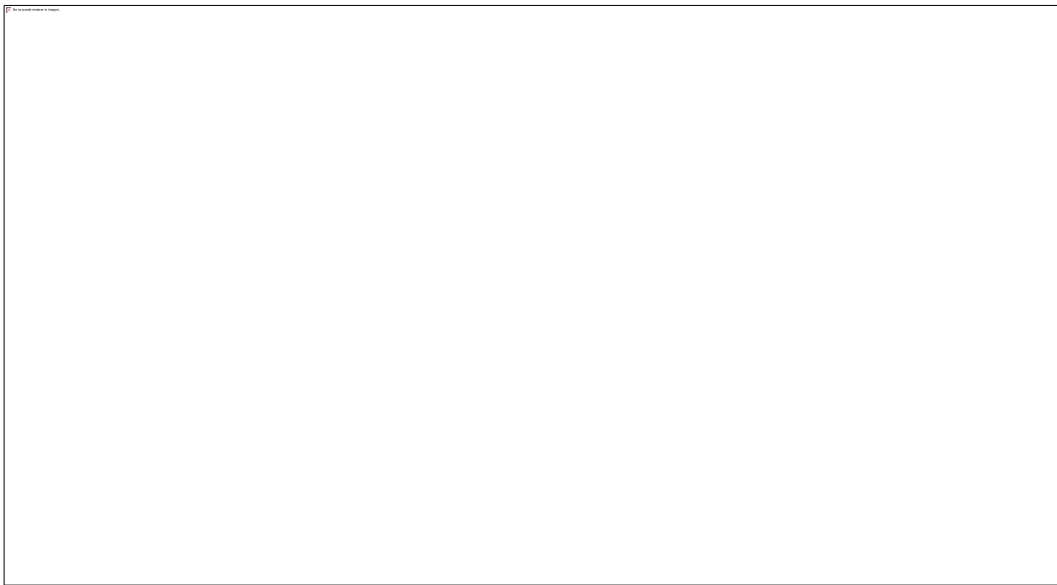


Figura 25. Humedad relativa y humedad específica en función del tiempo.

### 3.1.4 Consumo específico de energía

La energía solar recibida en el sitio para los cuatro días de secado se estimó como  $54071. \text{kJ}/\text{m}^2$ , realizando una integración numérica de los datos de radiación recolectados por el piranómetro. La radiación solar incide en la marquesina sobre la superficie de plástico de la Figura 9. Marquesina para secado de cacao. . Esta superficie se estima como medio casquete cilíndrico de diámetro 3 m y longitud 4 m, es decir un área de  $18.85 \text{ m}^2$ . De esta forma, se calcula la energía total entrega al sistema  $Q_{\text{net}} = 866335.75 \text{ kJ}$ . Durante el proceso analizado, se evaporaron  $m_{\text{agua}} = 31.17 \text{ kg}$ . Por tanto, el consumo específico de energía es  $\text{SEC} = 27793.9 \text{ kJ}/\text{kg}$ , (para 69.3 kg de masa de cacao fermentado). Es un valor cercano al rango reportado por Dina et al. [31] para secado de cacao por secador solar integrado por desecante adsorbedor, absorbedor y secador sencillo, pues la energía específica reportada fue  $18940 \text{ kJ}/\text{kg}$  y  $13290 \text{ kJ}/\text{kg}$  y hasta  $60400 \text{ kJ}/\text{kg}$

respectivamente para una carga de 1 kg de grano de cacao. En este caso, este secador tenía un comportamiento de consumo específico de energía más efectivo, por la integración de almacenamiento de energía que permitía secado inclusive en la noche.

### 3.1.5 Eficiencia térmica

Durante cada día de secado se requirió energía para elevar la temperatura de los granos desde la temperatura ambiente  $T_{amb} = 22.8\text{ °C}$  (en promedio para los días estudiados) hasta la temperatura de secado, estimada como la temperatura máxima media en los 4 días,  $T_{sec} = 60\text{ °C} \pm 6.8\text{ °C}$ . El calor específico de los granos de cacao se consideró como  $C_{p_{cacao}} = 3.746\text{ kJ/kg °C}$  [7]. Es importante notar que este gasto energético se dio en los 4 días de secado, pues durante la noche la temperatura de los granos bajaba y al día siguiente era necesario elevar la temperatura nuevamente. En este proceso de elevar la temperatura de los granos de cacao en los 4 días de secado, las primeras 2 horas de secado diarias, se requiere 38628.1 kJ de energía, que es el primer término en el numerador (14)).

El segundo término de la energía necesaria para el secado, presente en la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (6) corresponde con la energía para evaporar la masa de agua removida durante el secado, la masa de agua evaporada fue de  $m_{agua} = 31.17\text{ kg}$ . Por medio de tablas de saturación del agua es posible estimar la entalpía de vaporización del agua a la temperatura de secado  $h_{fg@60\text{°C}} = 2357.7\text{ kJ/kg}$  [10]. Así, la energía necesaria en este proceso de evaporación de agua es 73489.5 kJ. De este modo, la energía total para el secado es la suma de la energía requerida para evaporar agua y para elevar la temperatura de los granos de cacao,  $Q_{sec} = 112117.7\text{ kJ}$ . Anteriormente, se estimó la energía recibida por la radiación solar como  $Q_{net} = 1019218\text{ kJ}$ , durante el secado también intervenga el trabajo realizado por el campesino al voltear los granos: A partir de la definición de trabajo mecánico, se evaluó la energía del campesino durante todo el proceso como 38.8 kJ, este es un valor despreciable comparado con la energía solar recibida, por lo que no será tenido en cuenta en cálculos de eficiencia.

Conociendo la energía de secado  $Q_{sec}$  y la energía entregada al sistema durante el secado  $Q_{net}$  es posible determinar la eficiencia térmica del proceso de secado en la marquesina como el cociente de estas dos cantidades,  $\eta = 11\%$ . Esta eficiencia térmica es estimada para el caso en el que se sequen en la marquesina solo 69.3 kg de granos de cacao fermentado. Sin embargo, el sistema tiene una capacidad máxima de secado de 200 kg de granos fermentados, por lo que el valor de  $\eta$  puede variar según la cantidad de masa de secado, y desde luego, las condiciones climáticas de los días en los que ocurre el secado.

La eficiencia térmica  $\eta = 11\%$  podría considerarse un valor bajo, sin embargo, en el año 2021 Merlin Simo-Tagne y otros [26], con un estudio de secadores solares de grano de cacao natural y convectivo reportaron que debido a bajo consumo de

energía específica comparado con otros productos y métodos convectivos con aire, la eficiencia térmica global se encontró en un rango de 5% al 18%.

La Tabla 6 resume algunos de los parámetros más relevantes en el análisis de este trabajo, obtenidos en la etapa experimental de esta tesis:

**Tabla 6. Resumen de resultados**

Parámetro	Valor	Unidad
Energía solar recibida	1019218	kJ
Energía para el secado	112117	kJ
Consumo específico de energía	32698.7	kJ/kg
Tiempo de secado total	77	hora
Tiempo de secado neto	32	hora
Tasa promedio de secado	16	g/h
Eficiencia Térmica	11	%

### 3.1.6 Balance de energía del sistema

De la ecuación 5 se establece que la energía de entrada al sistema la componen la energía recibida por radiación solar  $E_{IR}(kJ)$ , energía por trabajo mecánico del volteo de grano a cargo del campesino, la cual es despreciable comparada con el valor de total energía solar que recibe la marquesina, y finalmente, energía de los granos de cacao a la entrada en la marquesina, la cual es cero porque los granos se encuentran a la temperatura ambiente. De esta forma  $E_{IR} = Q_{net} = 1019218.5$  kJ. En los términos de salida del balance de energía se encuentra la energía para evaporar el agua, anteriormente estimada; la energía asociada a la masa de cacao a la salida del proceso de secado, que se calcula según la masa de cacao al final del secado, calor específico de los granos de cacao y diferencia entre la temperatura de grano promedio durante toda la medición (40.66 °C fue el promedio durante toda la medición) y la temperatura ambiente, obteniendo  $E_{c_{seco}} = 389.39$  kJ. La  $E_{aint}$  que es la energía del aire en movimiento lento al interior de la marquesina, se obtiene de multiplicar masa de aire al interior de la marquesina (volumen de aire de la marquesina) por la densidad del aire, calor específico del aire y la diferencia de temperatura entre exterior e interior de marquesina, generando como resultado  $E_{aint} = 565.48$  kJ. De esta forma, de la ecuación (5), se pueden estimar las pérdidas de energía como  $E_{per} = 944774.13$  kJ. El diagrama de Sankey representando en Figura 26. Diagrama de Sankey de la marquesina usada en el proceso de secado tradicional., ilustra la distribución de la energía en porcentaje derivada del balance de masa y energía de la ecuación (5).



Figura 26. Diagrama de Sankey de la marquesina usada en el proceso de secado tradicional.

### 3.2 Costos asociados al proceso de secado tradicional

El costo de grano fermentado se refiere a costos por operación de sembrar, mantener, fertilizar, cosechar y fermentar el grano de cacao en una finca cacaotera de mediano tamaño (< 5 ha), con todas estas actividades anteriormente mencionadas, ubicadas en el mismo terreno de cultivo. Si el lugar de fermentado estuviese en un lugar distinto al cultivo, se debería tener en cuenta el costo por transporte. El desarrollo de estas actividades; iniciando desde siembra hasta fermentación del cacao, tiene un costo de USD\$0.92 (COP\$4231) por kg fermentado, esto según consulta a la Federación Nacional de Cacaoteros, Fedecacao. En las mediciones realizadas, la masa inicial de granos fermentados fue 69.3 kg y el producto final de granos secos fue 38.13 kg, a partir de esta relación de pesos en kilogramos, obtenemos un factor 1.82, el cual multiplicando por el valor de grano fermentado, se obtiene un valor de kilogramo de grano seco valorizado por este factor y se deduce el precio de granos fermentados como  $costo_{c_{ferm}} = 1.656 \text{ USD\$/kg}_{cacao,seco}$  (7689.7 COP\$/kg<sub>cacao,seco</sub>).

El costo de inversión de una marquesina como la descrita en este informe, con capacidad de secado de 200 kg, y área superficial de 12 m<sup>2</sup> es de \$USD 657.89 (COP\$~2,500,000, TRM de COP\$/USD\$ 4600 fecha 13/07/2022). Se estima que la vida útil de la marquesina es 4 años. En promedio se realizan 2 secados al mes, por lo tanto, se alcanza 96 ciclos de secado durante la vida útil, lo que se traduce en un costo de 6.85 USD\$ /ciclo (31510 COP\$ /ciclo), que es la discriminación del valor total de la marquesina en los 96 ciclos. Asumiendo que en cada ciclo de trabajo se producen 38.13 kg de grano seco. El costo de inversión se calcula como 0.68 USD\$/kg<sub>cacao,seco</sub> (3128 COP\$/ kg<sub>cacao,seco</sub>).



Como se mencionó previamente en la sección de metodología, análisis costo efectivo del secado, la mano de obra para secado es variable y es particular a cada proyecto, por tanto solo se consideran costos fijos hasta el punto de fermentación en el proceso e igualmente, los costos relacionados con inversión.

Finalmente, sumando los costos de grano fermentado  $costo_{c_{ferm}}$  y costos de inversión  $costo_{inver}$ , se obtiene un costo específico de secado ( $costo_{secado}$ ) de  $\sim 2.34$  USD\$/kg<sub>cacao,seco</sub> (10786 COP\$/kg<sub>cacao,seco</sub> con una TRM de 4609 para abril de 2022), por cada kg de grano seco obtenido durante el proceso de beneficio de cacao.

En otros estudios donde se desarrollaron cálculos similares, se encontró que Luna et al. [4] reportaron en la región de El Empalme Cantón, La Caraca, Ecuador, para un proyecto de tecnificación del proceso de fermentado comparando con el proceso tradicional, evidenciaron que los costos variables y fijos anuales incurridos por fermentación por 100 quintales, donde los costos variables considerados fueron mano de obra, materiales e insumos, mientras que los costos fijos considerados corresponden a energía eléctrica y transporte. Los costos de fermentación tradicional para 10000kg (que equivalen a 100 quintales que reporta el artículo) cuestan USD\$ 3646.5, que equivalen a 1531.53 COP\$/kg. Yahaya et al. [61] analizaron el costo de producción de cacao y el análisis mostró que el costo de producción promedio incluyendo todas las actividades previas a fermentado, incluso con secado y transporte al transformador era de \$USD 0.18 (COP\$ 684), un costo muy bajo comparado con los valores reportados por el ministerio de agricultura y desarrollo social en alianza con Fedecacao para 2022, que están entre los COP\$8000-9000, por kilogramo de cacao seco [62] e igualmente muy bajo comparando con el valor 10786 COP\$/kg<sub>cacao,seco</sub>, que se encontró puntualmente en este proceso de esta finca en Amalfi, Antioquia, pero que resulta coherente por los ciclos de secado y la particularidad con la que se hace el secado en esta finca.

### 3.3 Calidad de grano en secado tradicional

De acuerdo a caracterización de muestra de grano de cacao seco para determinación de humedad, prueba realizada por el Grupo de Investigación de ciencia sensorial de la Universidad de Antioquia, se encontró que la humedad específica del grano de cacao fermentado fue de inicialmente el  $41.09 \pm 0.16$  %. Mientras que la humedad de grano de cacao seco final (después de secado), fue de  $5.93 \pm 0.01$ . La humedad se midió mediante método gravimétrico basado en masa específica de grano de cacao.

Se concluye, de modo preliminar que, el proceso de secado en marquesina, a pesar de ser un proceso con variación en su estabilidad de temperatura interior, cumple con las características de secado para el grano de cacao. El parámetro de calidad para porcentaje de humedad recomendado cumple para grano de alta calidad (5.5 – 8) [48]. Este valor en marquesina no se tiene como un registro disponible, por

tanto, se puede correr el riesgo de que el grano de cacao quede por fuera del rango alta calidad para grano fino y aroma.

### 3.4 Caracterización de prototipo a escala de laboratorio

La caracterización del proceso de secado de granos de cacao en el secador a escala de laboratorio permite medir y hacer seguimiento a variables de interés, como se mencionó en la sección 2.5, tales como pérdida de masa de los granos de cacao, temperatura de aire de secado, flujo másico de aire secado, humedades relativas y específicas al interior de la cámara de secado, así también como el tiempo de secado.

#### 3.4.1 Curva de secado

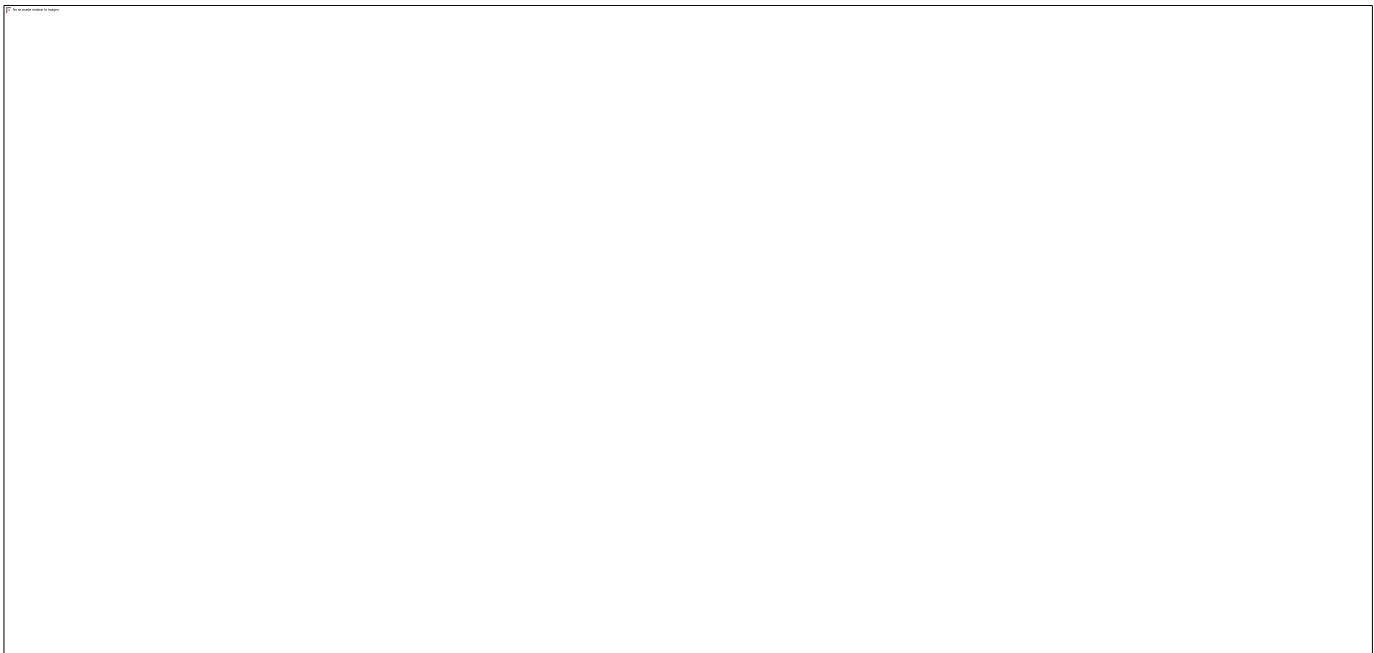


Figura 27. Pérdida de masa vs tiempo

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, donde el tiempo está en horas de operación en el eje x, se muestra disminución del contenido de humedad del grano de cacao, hasta un valor aproximado del 46% que es el valor del porcentaje de humedad que pierde el grano de cacao durante el secado. Se puede visualizar igualmente que, a diferencia del secado tradicional donde el grano de cacao ganaba humedad en la noche, en el secador a escala de laboratorio, el grano durante su receso de secado de un día a otro, presentaba en el interior de la cámara de secado, pérdida de humedad. Esto se puede ver en el día 1, donde terminó en 80%, mientras que en el día 2, inició cerca al 70%. En el día 3 con respecto al día 2 se puede ver algo similar, pero con menor reducción de humedad en la noche. La

razón de esto, es por el aislamiento que tiene la cámara de secado con respecto al contacto con el exterior e igualmente por la hermeticidad que tiene esta cámara de secado, donde permite sostener temperaturas por un tiempo luego de cortar el suministro de aire caliente. El valor de humedad perdida durante tiempo de receso en la noche, se evidenció que fue hasta el 6% del total de humedad que debe perder el grano de cacao, cuya humedad total representa un 57% de su peso, humedad que serían unos 10 g perdidos en hora nocturna de no operación. En el día 1 y día 3, solo se operó el secador durante 4 horas continuas, debido a que se decidió hacer esta prueba terminando la tarde e iniciando la noche, lo que mostró facilidad de operación en horas no diurnas, que es lo que no ocurre en secado tradicional.

### 3.4.2 Temperatura

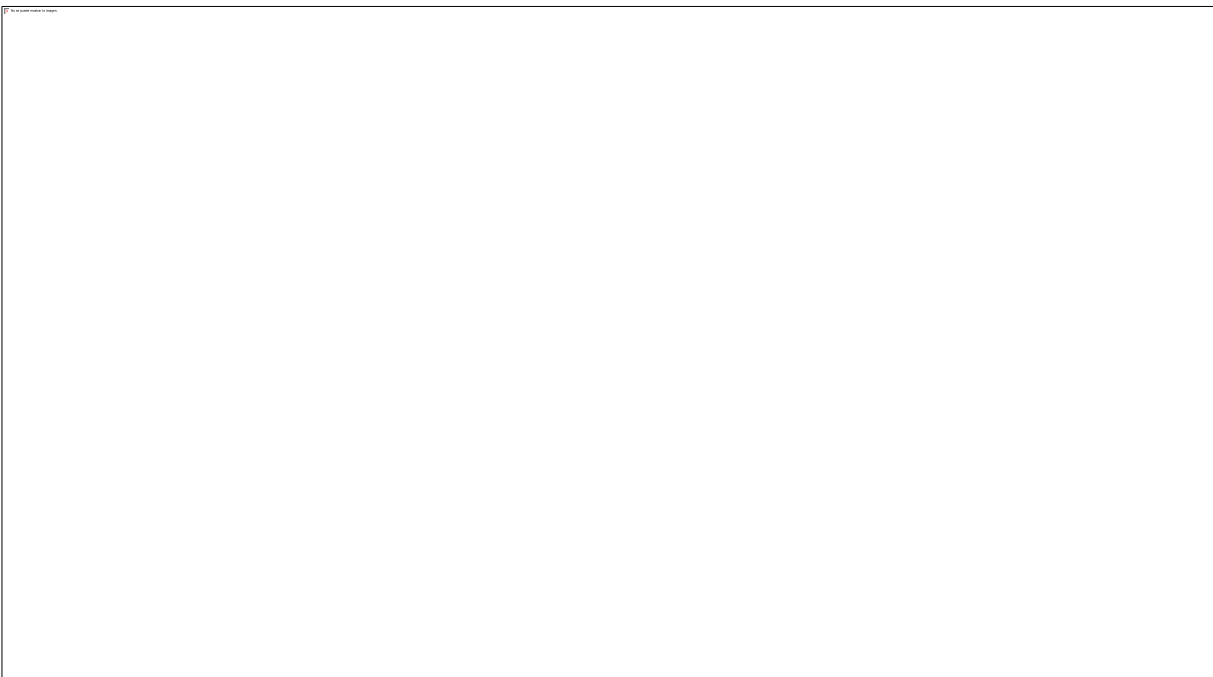


Figura 28. Temperatura vs tiempo en secador a escala

La Figura 28 muestra que el proceso de encendido de la cámara de combustión y estabilización de temperaturas en cámara de secado, puede tardar de 30 a 60 minutos. Después de este tiempo, se puede lograr una temperatura uniforme entre 40 y 50 °C, como también entre 50 y 60 °C favoreciendo la homogeneidad del secado, con los parámetros de temperatura recomendados 40-60 °C por la literatura científica. Estas variaciones de temperatura suceden por cantidades puntuales de biomasa adicionadas a la cámara de combustión, que generan mejora en el intercambio de calor, facilitando la combustión y por ende el sostenimiento de temperatura entre 40-60 °C.

### 3.4.3 Humedad relativa exterior e interior



Figura 29. Humedad relativa vs tiempo

Como se observó en secado tradicional, se esperaba que la humedad relativa interior fuese menor que la humedad relativa exterior, esto con el ánimo de poder obtener evidencia de secado al interior de la cámara donde se aloja en grano. Con base en la Figura 29 se observa por tanto que la diferencia aproximada entre la humedad exterior y la interior es de 40%, evidenciando deshidratado al interior de la cámara de secado por las diferencias de temperatura entre ente el interior y el exterior.

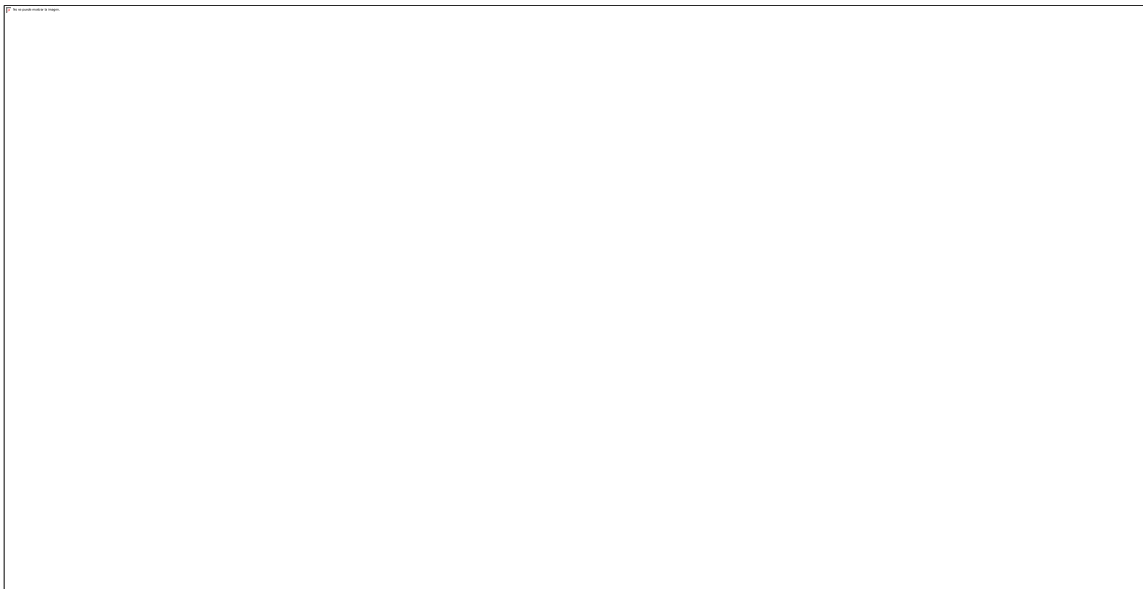


Figura 30. Humedad relativa y específica vs tiempo

En la Figura 30, se observa que la humedad específica interior, tiene una tendencia a ser menor, que la humedad específica exterior, esto quiere decir que los gramos

de agua por kilogramos de aire seco son menores al interior de la cámara de secado, por esta razón se promueve el secado de los granos de cacao. A diferencia de este mismo fenómeno en la marquesina, en el secador podemos concluir que se presenta un secado constante, ya que no se evidencian gotas de humedad al interior de la cámara de secado, por lo tanto, se espera que la humedad específica sea mayor al exterior que al interior.

#### **3.4.4 Eficiencia**

En cuanto a la eficiencia en la cámara de secado, tal como se mencionó para la ecuación (15), los parámetros que se tienen para calcularla son los siguientes:  $T_1$  que es la temperatura promedio de entrada a la cámara de secado del grano,  $T_2$  que es la temperatura promedio de salida de la cámara de secado del grano,  $T_a$  es la temperatura ambiente promedio. El resultado de eficiencia en la cámara de secado es 28.17%, que corresponde a valores similares reportados por Al-Juamily et al. [18] con 20% para uvas y 33% para duraznos. Se encontraron eficiencias para cámara de secado de grano de cacao, pero con valores de 91%, esto ya que se trataba de un secador trabajando con ladrillos, material mejor aislante comparado con el acero inoxidable que es nuestro caso [35]. De acuerdo con la ecuación (15), haciendo un análisis si se adicionara una cantidad mayor de cacao, por ejemplo 3 kg que sería su capacidad máxima, la temperatura de salida de aire sería menor y por tanto el numerador de esta ecuación sería mayor. Esto daría como resultado un mayor valor de eficiencia térmica, sin embargo, esto podría afectar la calidad del producto, ya que el flujo másico adicional de grano de cacao complicaría la distribución uniforme de aire caliente al interior de la cámara de secado.

#### **3.4.5 Balance de energía del sistema la cámara de secado**

Igual que en la sección 3.1.6 de secado tradicional, la ecuación (5) establece que la energía de entrada al sistema la compone la energía recibida de los granos de cacao húmedos a la entrada del secador a escala, en este caso energía de cacao húmedo (ver la Figura 31) la cual es cero porque los granos se encuentran a temperatura ambiente. También se tiene como energía de entrada a la cámara del secador, la energía de aire caliente, que en este caso tiene un valor de 1153.33 kJ, calculada con base al primer término de la suma de la ecuación (9). Este valor de aire caliente, es similar al reportado por [37] para el valor de calor total requerido, en un secador híbrido, para secado de plátano verde con capacidad de 0.8 kg. En los términos de salida del balance de energía se encuentra que, la energía para evaporar el agua es de 1089.26kJ, que se calcula multiplicando masa de secado de agua por la entalpía de evaporación a 60°C, que es la temperatura de saturación al interior del secador ; la energía asociada a la masa de cacao a la salida del proceso de secado, que se calcula según la masa de cacao al final del secado, con calor específico de los granos de cacao y diferencia entre la temperatura de grano

promedio durante toda la medición (52.9 °C fue el promedio durante toda la medición) y la temperatura ambiente promedio, obteniendo  $E_{c_{seco}} = 58.81$  kJ. La  $E_{aint}$  que es la energía del aire al interior del secador a escala, se considera nula, ya que al interior no se tiene un gran masa de aire que aporte una componente considerable de energía. De esta forma, con la ecuación (5), se pueden estimar las pérdidas de energía como  $E_{per} = 5045,27$  kJ. El diagrama de Sankey representando en Figura 32, ilustra la distribución de la energía derivada del balance de masa y energía de la ecuación (5).

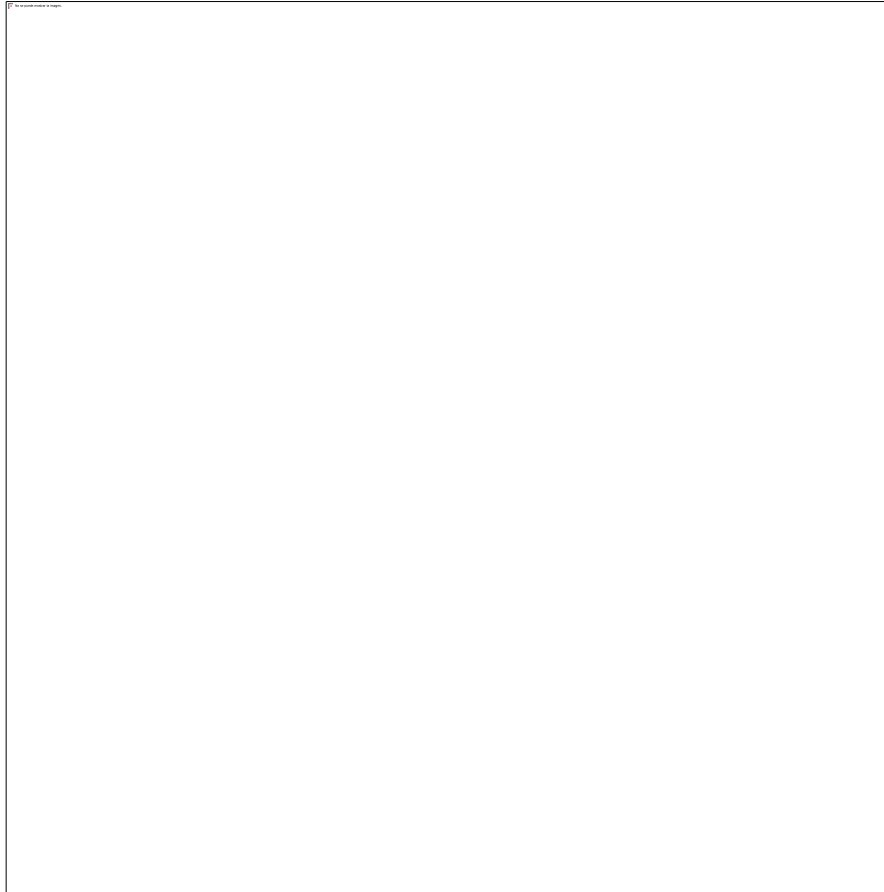


Figura 31. Balance de energía cámara secado

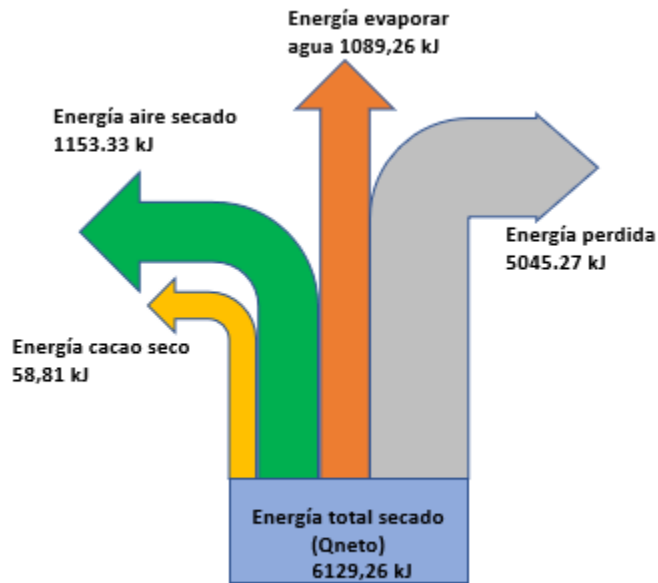


Figura 32. Diagrama de Sankey cámara de secado

La Tabla 7 resume algunos de los parámetros más relevantes en el análisis de este trabajo con el secador de cacao a escala:

**Tabla 7. Resumen de resultados especificaciones, secador a escala**

Parámetro	Unidad	Valor
Energía secado	kJ	1153.33
Tiempo de secado neto	hora	14
Tasa promedio de secado	g/h	38.07
Eficiencia térmica de secado	%	28

### 3.4.6 Costos asociados al proceso de secado a escala de laboratorio

Como se mencionó previamente en la sección de metodología, de análisis costo efectivo del secador a escala de laboratorio, para este cálculo se considera  $costo_{c_{ferm}} = 1.656 \text{ USD}/\text{kg}_{\text{cacao, seco}}$  (7689.7 COP\$/kg<sub>cacao, seco</sub>), que es igual a secado tradicional. También se considera el costo de inversión, ecuación (18), por kilogramo de cacao seco, que se obtiene del valor de secador, que incluye cámara de combustión y cámara de secado, por un total de COP\$ 9.953.000, que son costos de producción mayores a marquesina por tratarse de una instalación experimental. Los ciclos de vida útil se calculan teniendo en cuenta un ciclo de vida de secador de 10 años, que es lo que se estima de tiempo de operación este equipo, con funcionamiento disponible durante 24 horas, por 365 días al año, se obtiene un valor de 625.71 *ciclos por año*. Este valor a 10 años sería de 6257.14 *ciclos*, por tanto el valor de  $costo_{inver} = 3443 \text{ COP}/\text{kg}_{\text{cacao, seco}}$ .

Sumando los valores  $costo_{c_{ferm}}$  y  $costo_{inver}$  obtenemos un total de 11.101 COP\$/kg<sub>cacao,seco</sub>.

Es claro que el costo de producción de cacao por kilogramo seco es mayor, a este punto en el secador a escala de laboratorio comparando con marquesina, con una diferencia favorable a marquesina de 315 COP\$/kg<sub>cacao,sec</sub>, sin embargo, es de considerar que este es un valor que podría ser manejable para el cacaocultor, teniendo presente la mejora en disponibilidad para secado que da el secador convectivo. Adicionalmente, el hecho de secar el grano de cacao en marquesina estaría generando un costo de oportunidad de 50 ciclos mensuales (teniendo en cuenta 14 horas de secado en secador convectivo) de secado en 1 mes y 600 ciclos en el período de un año. Esto sería importante evaluarlo, en temas de percepción de ingresos para este negocio, ya que se estaría dejando de recibir ganancias por no aplicar una operación de economías de escala y además, teniendo en cuenta que el secador convectivo puede generar un secado más uniforme y de mejor calidad que el secado tradicional en la marquesina de la finca la Rosa, este grano de cacao, considerado fino de sabor y aroma, podría venderse a un precio en mercado internacional hasta de un 47.06% más por kilogramo de cacao seco o inclusive a un valor de 11.36% más si se vende como grano orgánico premium, de acuerdo con precios de cacao y sostenibilidad a 2022 [63].

### 3.5 Calidad de grano en secador a escala de laboratorio

Se realizó la misma caracterización mencionada en la sección 3.3, prueba igualmente realizada por el Grupo de Investigación de ciencia sensorial de la Universidad de Antioquia. Se encontró lo siguiente:

La humedad de grano de cacao seco final (después de secado durante 14 horas), fue en promedio 7.81%, con humedades de los 3 niveles diferentes de secado 8.99% nivel 1, 7.35% nivel 2 y 7.08% nivel 3.

Se concluye que el proceso de secado en secador convectivo a escala cuenta con adecuada estabilidad de temperatura para el secado, respondiendo por medio de aumento o disminución de la cantidad de combustible, en este caso biomasa CMC y astillas de madera, cumpliendo con las características específicas para grano de cacao seco de buena calidad. El parámetro de calidad para porcentaje de humedad recomendado está entre el 5.8-8%, tal como lo recomienda la literatura científica [48].

### 3.6 Emisiones

La gráfica de la Figura 33 muestra el resultado del factor de emisiones promedio para las especies CO<sub>2</sub>, CO, NO (g/kg<sub>cmc</sub>). Aunque en un principio, se pretendió determinar la cantidad de NO<sub>2</sub> (g/kg<sub>cmc</sub>) producido durante la combustión, el analizador de gases arrojó una fracción molar 0% en todas las pruebas realizadas.

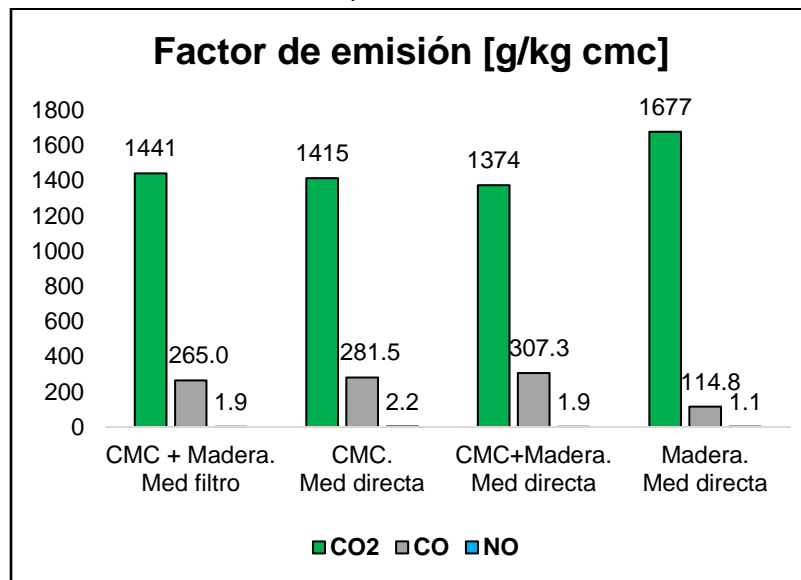


Por lo que se concluye que las emisiones de  $\text{NO}_2$  ( $\text{g}/\text{kg}_{\text{cmc}}$ ) durante la combustión de CMC son nulas.

La gráfica también representa la comparación entre las emisiones producidas cuando se realiza la combustión de CMC, madera y una mezcla entre ambas (aproximadamente 50%-50%). El resultado indica una mayor emisión de  $\text{CO}_2$  en la combustión de madera frente a CMC. Caso contrario se presenta en la emisión de  $\text{CO}$  donde es mayor en la combustión de CMC que en madera. Desde este punto de vista, además de las propiedades en estabilidad de llama durante la combustión, la mezcla madera y CMC se hace llamativa y viable para fines de aprovechar calor de estos combustibles.

Con el fin de comparar la viabilidad de los experimentos realizados, se efectuó un cuarto tipo de medición con un filtro antipartículas en la boca del analizador de gases, de la combinación de CMC y madera. Comparada con la medición directa que se realizó para estas mismas especies, se aprecia una disminución en el factor de emisión de  $\text{CO}_2$ , un incremento en el factor de emisión de  $\text{CO}$  y una invarianza en el factor de emisión de  $\text{NO}$ .

4



5

Figura 33. Factor de emisiones de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  y  $\text{NO}$  de combustión CMC, madera y su mezcla

De los resultados obtenidos se puede evidenciar una relación inversa entre las emisiones de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CO}$ . Esto quiere decir que de acuerdo a los valores de  $\text{CO}_2$  obtenidos, comparando con los valores de  $\text{CO}$ , se presenta una combustión completa, pues los valores de  $\text{CO}_2$  obtenidos maximizan la combustión, ya sea con CMC y madera o CMC sola, mientras que si se hubiese obtenido valores altos de  $\text{CO}$ , la combustión sería deficiente [64].

Comparando los resultados obtenidos con otras investigaciones similares, en [65] para biomasa denominada residuos agrícolas reportan factores de emisión de

CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> de 1585, 102 y 3,11 g/kg<sub>biomasa</sub> respectivamente. Por su parte, [66] para residuos agrícolas reportan factores de emisión de CO<sub>2</sub> y CO de 1515 y 927 g/kg<sub>biomasa</sub>, respectivamente. En la investigación de combustión de paja de arroz de [67] hallaron un factor de emisión de CO de 283 g/kg<sub>biomasa</sub>, un valor muy cercano al hallado para la combustión de CMC (281,5 g/kg<sub>biomasa</sub>). Los valores de factor de emisión de CO<sub>2</sub> de las referencias [65] [66] son cercanos a los resultados obtenidos, aunque menor el factor de emisión de CMC calculado en esta investigación. El reporte de factor de emisión de CO varía considerablemente en los estudios [65] este cambio significativo puede explicarse por las diferencias entre las especies de biomasa analizadas, y las condiciones en las que ocurre la combustión.

De forma general, lo que se evidenció en la combustión del secador a escala, es que se presenta combustión completa, de acuerdo a los productos obtenidos. Estos productos aunque pueden generar cierta cantidad de CO<sub>2</sub>, equivalente en atmósfera, no es mayor a la cantidad de CO<sub>2</sub>, equivalente que se puede generar por descomposición de CMC en el suelo sin tratar, con un valor superior hasta del 70% de acuerdo con Andersen et. al [68].

#### 4. CONCLUSIONES

- El secado de granos de cacao en estructuras tipo marquesina es un procedimiento con baja eficiencia, la caracterización realizada del proceso de secado de granos de cacao alcanzó un 11% de rendimiento térmico.
- Los costos asociados al proceso de secado tradicional se relacionan con el precio del kilogramo de grano fermentado e inversión de la marquesina. La suma de estos costos específicos deriva el costo específico total de secado de ~2.34 USD/kg<sub>cacao,seco</sub> (10786\$COP/kg<sub>cacao,seco</sub> con TRM 4609 para abril de 2022).
- De acuerdo con la curva masa versus tiempo del secador a escala de laboratorio; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, durante los momentos de receso en secado entre los días 1 y 2, como días 2 y 3, se presenta una disminución en la masa de agua perdida, debido a la temperatura de aire caliente que permanece contenida en la cámara de secado. Esto comparando con el secado en marquesina es una ventaja significativa, ya que hace parte de los tiempos de optimización (18 horas menos en total) del secado.
- El desempeño de la cámara de secado del secador convectivo, desde el punto de vista de eficiencia térmica, alcanzó un valor de 28%, lo cual es acorde con otros estudios científicos realizados. Esto podría mejorar el desempeño que se obtuvo en marquesina con una eficiencia del 11%.
- Los productos que se obtienen en el proceso de combustión en la cámara de combustión de biomasa, son CO<sub>2</sub>, CO y NO, donde el CO<sub>2</sub> muestra un

comportamiento de combustión completa en este proceso. No se presentan valores de azufre y el NO es muy bajo. Según esto, se puede considerar un impacto neutro en medio ambiente, ya que la combustión que se requiera para el secado de grano de cacao, se contrarresta con el secuestro de CO<sub>2</sub> que logran los árboles de cacao de la CMC que se consume.

- La calidad de grano de cacao seco, por proceso de secado en secador convectivo con CMC y madera como fuentes de energía, se logra principalmente de acuerdo a la estabilidad en las temperaturas de secado, que se consiguen entre 50°C y 60°C, esto evidenciado en prueba de secado con cacao y pruebas de puesta a punto previas al secado. Para el secador a escala en estudio, se logró una humedad de grano promedio de 7.81%, lo que significa que este secador puede lograr humedades en el rango de calidad de grano entre 5.5 y 8%, que le da inocuidad y salubridad, sobre todo seguridad de productos, en el proceso de secado de grano de cacao, evitando que se formen hongos y/o bacterias posteriormente.
- Comparando costos de secado en marquesina, con costos de secado en secador a escala, por cada kilogramo secado en marquesina sale 1554.35 COP\$/kg<sub>cacao,sec</sub> más económico que en secador a escala, sin embargo, teniendo en cuenta los precios del cacao fino de sabor y aroma que es el tipo de producto al que le apunta el secador convectivo, garantizando humedades al final del secado entre 5.5 y 8%, con respecto a precios de cacao convencional, el cacao fino aroma se puede vender hasta por un 47% más, frente a 12.6% de sobrecosto de producirlo en secador artificial, lo que indica que se puede percibir en margen de utilidad adicional del 34.46% produciendo cacao fino de aroma. Inclusive se puede percibir ingresos hasta por 600 veces más, en un período de un año, secando cacao en el secador convectivo, comparando ciclos en marquesina con ciclos secador convectivo.

## 5. REFERENCIAS

- [1] M. Syamsiro, H. Saptoadi, B. H. Tambunan, and N. A. Pambudi, "A preliminary study on use of cocoa pod husk as a renewable source of energy in Indonesia," *Energy Sustain. Dev.*, vol. 16, no. 1, pp. 74–77, 2012, doi: 10.1016/j.esd.2011.10.005.
- [2] C. Herman, L. Spreutels, N. Turomzsa, E. M. Konagano, and B. Haut, "Convective drying of fermented Amazonian cocoa beans (*Theobroma cacao* var. Forasteiro). Experiments and mathematical modeling," *Food Bioprod. Process.*, vol. 108, pp. 81–94, 2018.
- [3] L. Ortiz, "Efecto del secado al sol sobre la calidad del grano fermentado de cacao," *Agron. Trop. v.54 n.1 Maracay ene. 2004*, vol. v.54, 2004, [Online]. Available: [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0002-192X2004000100003&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2004000100003&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
- [4] I. Pablo, G. Parra, and D. Ph, "Economic estimation of the production of

- cocoa fermentation through an industrial automation process in a controlled environment in the farms of the La Caraca sector of the El Empalme canton Estimación económica de la producción de fermentación del cacao,” pp. 1–9, [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19303/1/UPS-GT003001.pdf>
- [5] “Consultas realizadas a FEDECACAO.” Medellín, 2022. [Online]. Available: <https://www.fedecacao.com.co/>
- [6] AGROSAVIA, “Con el cacao, AGROSAVIA vuelve al departamento de Arauca,” *Agrosavia*, 2021. <https://www.agrosavia.co/noticias/con-el-cacao-agrosavia-vuelve-al-departamento-de-arauca> (accessed Apr. 17, 2023).
- [7] Innovakit, “Cultivo. Cosecha. Beneficio. Secado. Almacenamiento. Mercado,” 2020. <https://docplayer.es/187674356-Cultivo-cosecha-beneficio-secado-almacenamiento-mercado.html> (accessed Dec. 10, 2022).
- [8] I. López Cerino and E. Chávez García, “Eficacia de secador solar tipo túnel con cacao (*Theobroma Cacao* L.) en Tabasco,” *Rev. Mex. Ciencias Agrícolas*, no. 21, pp. 4395–4405, 2018.
- [9] C. Hii, A. Rahman, S. Jinap, and Y. Che Man, “Quality of cocoa beans dried using a direct solar dryer at different loadings Ching,” *Sci Food Agric*, vol. 86, 2006.
- [10] J. Puello-Mendez *et al.*, “Comparative study of solar drying of cocoa beans: Two methods used in Colombian rural areas,” *Chem. Eng. Trans.*, vol. 57, no. 2012, pp. 1711–1716, 2017.
- [11] F. D. Banboye, M. N. Ngwabie, S. A. Eneighe, and D. B. Nde, “Assessment of greenhouse technologies on the drying behavior of cocoa beans,” *Food Sci. Nutr.*, vol. 8, no. 6, pp. 2748–2757, 2020.
- [12] Marguerite Belobo Belibi *et al.*, “Comparison of the Performance of Three Cocoa Bean Drying Techniques in Bafia, Southwest Region, Cameroon,” *J. Life Sci.*, vol. 13, no. 2, pp. 25–34, 2019, doi: 10.17265/1934-7391/2019.02.004.
- [13] M. Saheeda, D. Sukhab, and R. Aveena, “Comparison of the drying behavior of fermented cocoa (*Theobroma cacao* L.) beans dried in a cocoa house, greenhouse and mechanical oven,” no. November, pp. 13–17, 2017.
- [14] E. A. Almuhanha, “Utilization of a Solar Greenhouse as a Solar Dryer for Drying Dates under the Climatic Conditions of the Eastern Province of Saudi Arabia,” *J. Agric. Sci.*, vol. 4, no. 3, pp. 237–246, 2011.
- [15] M. A. Hossain and B. K. Bala, “Drying of hot chilli using solar tunnel drier,” *Sol. Energy*, vol. 81, no. 1, pp. 85–92, 2007.
- [16] H. El Hage, A. Herez, M. Ramadan, H. Bazzi, and M. Khaled, “An investigation on solar drying: A review with economic and environmental assessment,” *Energy*, vol. 157, pp. 815–829, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.05.197.
- [17] F. G. Kiburi, C. L. Kanali, G. M. Kituu, P. O. Ajwang, and E. K. Ronoh, “Performance evaluation and economic feasibility of a solar-biomass hybrid greenhouse dryer for drying Banana slices,” *Renew. Energy Focus*, vol. 34, pp. 60–68, 2020, doi: 10.1016/j.ref.2020.06.009.
- [18] K. E. J. Al-Juamily, A. J. N. Khalifa, and T. A. Yassen, “Testing of the performance of a fruit and vegetable solar drying system in Iraq,”

- Desalination*, vol. 209, no. 1-3 SPEC. ISS., pp. 163–170, 2007, doi: 10.1016/j.desal.2007.04.026.
- [19] D. Saravanan and A. Wilson, Vincent H. and Technology, “Design and thermal performance of the solar biomass hybrid dryer for cashew drying,” *Facta Univ. Mech. Eng.*, vol. 12, no. 3, pp. 277–288, 2014, [Online]. Available: <http://casopisi.junis.ni.ac.rs/index.php/FUMechEng/article/view/564/270>
- [20] H. Atalay and E. Cankurtaran, “Energy, exergy, exergoeconomic and exergo-environmental analyses of a large scale solar dryer with PCM energy storage medium,” *Energy*, vol. 216, p. 119221, 2021, doi: 10.1016/j.energy.2020.119221.
- [21] M. Yahya, “Design and performance evaluation of a solar assisted heat pump dryer integrated with biomass furnace for red chilli,” *Int. J. Photoenergy*, vol. 2016, 2016, doi: 10.1155/2016/8763947.
- [22] A. R. H. Rigit, A. Q. Jakhrani, S. A. Kamboh, and P. L. Tiong Kie, “Development of an indirect solar dryer with biomass backup burner for drying pepper berries,” *World Appl. Sci. J.*, vol. 22, no. 9, pp. 1241–1251, 2013, doi: 10.5829/idosi.wasj.2013.22.09.2724.
- [23] N. Abdenouri, A. Zoukit, I. Salhi, and S. Doubabi, “Model identification and fuzzy control of the temperature inside an active hybrid solar indirect dryer,” *Sol. Energy*, vol. 231, no. April 2021, pp. 328–342, 2022, doi: 10.1016/j.solener.2021.11.026.
- [24] J. Mumba, “Economic analysis of a photovoltaic, forced-convection, solar grain drier,” *Energy*, vol. 20, no. 9, pp. 923–928, 1995, doi: 10.1016/0360-5442(95)00037-H.
- [25] G. Srinivasan and P. Muthukumar, “A review on solar greenhouse dryer: Design, thermal modelling, energy, economic and environmental aspects,” *Sol. Energy*, vol. 229, no. October 2020, pp. 3–21, 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.04.058.
- [26] M. Simo-Tagne, H. D. Tamkam Etala, A. Tagne Tagne, M. C. Ndukwu, and M. El Marouani, “Energy, environmental and economic analyses of an indirect cocoa bean solar dryer: A comparison between natural and forced convections,” *Renew. Energy*, vol. 187, pp. 1154–1172, 2022, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.02.015>
- [27] K. G. Sajith and C. Muraleedharan, “Analysis of economic and environmental factors of solar dryer integrated with a hybrid photovoltaic,” vol. 39, no. 2, pp. 335–345, 2020.
- [28] S. Janjai, P. Intawee, J. Kaewkiew, C. Sritus, and V. Khamvongsa, “A large-scale solar greenhouse dryer using polycarbonate cover: Modeling and testing in a tropical environment of Lao People’s Democratic Republic,” *Renew. Energy*, vol. 36, no. 3, pp. 1053–1062, 2011, doi: 10.1016/j.renene.2010.09.008.
- [29] E. Tarigan, U. Surabaya, and P. Tekasakul, “Proceedings of ISES World Congress 2007 (Vol. I – Vol. V),” *Proc. ISES World Congr. 2007 (Vol. I – Vol. V)*, no. January, pp. 0–9, 2009, doi: 10.1007/978-3-540-75997-3.
- [30] C. A. Komolafe, M. A. Waheed, S. I. Kuye, B. A. Adewumi, I. O. Oluwaleye, and T. M. A. Olayanju, “Sun drying of cocoa with firebrick thermal storage

- materials,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 44, no. 8, pp. 7015–7025, 2020, doi: 10.1002/er.5364.
- [31] S. F. Dina, H. Ambarita, F. H. Napitupulu, and H. Kawai, “Study on effectiveness of continuous solar dryer integrated with desiccant thermal storage for drying cocoa beans,” *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 5, pp. 32–40, 2015, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.csite.2014.11.003>
- [32] S. Vijayan, T. V. Arjunan, and A. Kumar, “Mathematical modeling and performance analysis of thin layer drying of bitter melon in sensible storage based indirect solar dryer,” *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, vol. 36, pp. 59–67, 2016, doi: 10.1016/j.ifset.2016.05.014.
- [33] R. Manrique, D. Vásquez, F. Chejne, and A. Pinzón, “Energy analysis of a proposed hybrid solar–biomass coffee bean drying system,” *Energy*, vol. 202, pp. 1–8, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117720.
- [34] A. D. Rincón-Quintero, L. A. Del Portillo-Valdés, A. Meneses-Jácome, J. G. Ascanio-Villabona, B. E. Tarazona-Romero, and M. A. Durán-Sarmiento, “Performance Evaluation and Effectiveness of a Solar-Biomass Hybrid Dryer for Drying Homogeneous of Cocoa Beans Using LabView Software and Arduino Hardware,” vol. 2, pp. 238–252, 2021, doi: 10.1007/978-3-030-72208-1\_18.
- [35] L. Atepor, “Development of Cocoa Pod Husk Fueled Dryer for Rural Cocoa Farmers,” *Int. J. Agric. Innov. Res.*, vol. 9, no. 2, pp. 132–138, 2020.
- [36] J. . Jurado, E. . Montoya, C. . Oliveros, and J. García, “Método para medir el contenido de humedad del café pergamino en el secado solar del café,” *Rev. Cenicafé*, vol. 60, no. 2, pp. 135–147, 2009.
- [37] M. C. Ndukwu, E. O. Diemuodeke, F. I. Abam, U. C. Abada, N. Eke-emezie, and M. Simo-Tagne, “Development and modelling of heat and mass transfer analysis of a low-cost solar dryer integrated with biomass heater: Application for West African Region,” *Sci. African*, vol. 10, p. e00615, 2020, doi: 10.1016/j.sciaf.2020.e00615.
- [38] J.-M. I. Teixeira-Da Silva and F.-A. I. Malpica-Pérez, “Development of a mathematical model to determine the proportions a direct solar dehydrator of cacao,” *Ing. Mecánica*, vol. 19, no. 1, pp. 30–39, 2016, [Online]. Available: <http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.xn--cu30artculooriginal-r1b>
- [39] M. B. Tobar, *Lecture Notes in Electrical Engineering 762 Recent Advances in Electrical Engineering , Electronics and Energy*, vol. 1. 2020.
- [40] N. R. Nwakuba, P. K. Ejebu, and V. C. Okafor, “A mathematical model for predicting the drying rate of cocoa bean (*Theobroma cacao* L.) in a hot air dryer,” *Agric. Eng. Int. CIGR J.*, vol. 19, no. 3, pp. 195–202, 2017.
- [41] C. L. Hii, C. L. Law, and M. C. Law, “Simulation of heat and mass transfer of cocoa beans under stepwise drying conditions in a heat pump dryer,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 54, no. 1, pp. 264–271, 2013, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2013.02.010.
- [42] K. K. Blaise, K. E. P. Magloire, and G. Prosper, “Thermal performance evaluation of an indirect solar dryer,” *Instrum. Mes. Metrol.*, vol. 17, no. 1, pp. 131–151, 2018, doi: 10.3166/I2M.17.131-151.
- [43] I. L. Cerino, “Efficiency of tunnel type solar dryer with cocoa (*Theobroma Cacao* L.) in Tabasco,” no. 21, 2018.

- [44] P. D. Green, "No Title: Entendiendo el Sabor, la Textura y la Astringencia Del Chocolate," 2019.
- [45] J. gomozcorta Aguirre, "Determinación de la composición química y actividad antifúngica de extractos vegetales obtenidos de *Hypericum perforatum*, *Valeriana officinalis*, *Chamaemelum nobile*, *Achillea millefolium* y *Salvia officinalis*." <https://zaguan.unizar.es/record/57952#>
- [46] PDG Español, "Qué Sucede Durante la Fermentación Del Cacao?," *28 de junio de 2019*. Qué Sucede Durante la Fermentación Del Cacao? - Perfect Daily Grind Español." [Online]. Available: <https://perfectdailygrind.com/es/2019/06/28/que-sucede-durante-la-fermentacion-del-cacao/>
- [47] E. S. Ordoñez, A. Leon-Arevalo, H. Rivera-Rojas, and E. Vargas, "Quantification of total polyphenols and antioxidant capacity in skins and seeds from cacao (*Theobroma cacao* L.), tuna (*Opuntia ficus indica* Mill), grape (*Vitis Vinífera*) and uvilla (*Pourouma cecropiifolia*)," *Sci. Agropecu.*, vol. 10, no. 2, pp. 175–183, 2019, doi: 10.17268/sci.agropecu.2019.02.02.
- [48] B. F. Dzelagha, "A Review of Cocoa Drying Technologies and the Effect on Bean Quality Parameters," 2020. <https://www.hindawi.com/journals/ijfs/2020/8830127/>
- [49] D. Lasisi and B. Engineering, "A Comparative Study of Effects of Drying Methods on Quality of Cocoa Beans," *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 3, no. 1, pp. 991–996, 2014.
- [50] E. Afoakwa, P. Guda, and S. Gadhe, "Primary processing of cocoa Effects of Ferment at ion and Drying on t he Ferment at ion Index and Cut Test of Pulp Pre-conditioned," pp. 456–461, 2017, [Online]. Available: [www.tjprc.org](http://www.tjprc.org)
- [51] S. Jinap and J. Thien, "Effect of drying on acidity and volatile fatty acids content of cocoa beans".
- [52] W. Mühlbauer and J. Müller, *Drying Atlas*, no. July. 2020.
- [53] E. O. Afoakwa, A. Paterson, M. Fowler, and A. Ryan, "Flavor formation and character in cocoa and chocolate: A critical review," *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, vol. 48, no. 9, pp. 840–857, 2008, doi: 10.1080/10408390701719272.
- [54] Icontec, "NTC 1252 Cacao," 2021.
- [55] R. Manrique, "Estudio de la combustión de pélet de cisco de café," *Univ. Nac. Colomb.*, p. 85, 2018, [Online]. Available: <http://bdigital.unal.edu.co/69757/1/1152186564.2018.pdf>
- [56] Astm, "Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter," 1997 doi: 10.1520/D0240-19.2.
- [57] F. N. D. C. Fedecacao, "GUIA TECNICA CULTIVO DE CACAO EN COLOMBIA\_2021," 2021.
- [58] N. A. Musa, "Drying characteristics of cocoa beans using an artificial dryer," *Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 7, no. 2. pp. 194–197, 2012. doi: 10.3923/jeasci.2012.194.197.
- [59] C. L. Hii, C. L. Law, M. Cloke, and S. Suzannah, "Thin layer drying kinetics of cocoa and dried product quality," *Biosyst. Eng.*, vol. 102, no. 2, pp. 153–161, 2009, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.10.007>
- [60] C. L. Hii, S. P. Ong, C. L. Chiang, and A. S. Menon, "A review of quality

- characteristics of solar dried food crop products,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 292, no. 1, 2019.
- [61] A. M. Yahaya, B. Karli, and M. Gül, “Economic analysis of cocoa production in Ghana: The case of eastern region,” *Custos e Agronegocio*, vol. 11, no. 1, pp. 336–352, 2015.
- [62] M. de agricultura y desarrollo Social, “Precio semanal de compra de cacao,” *Agronet*, 2022. <https://www.agronet.gov.co/Noticias/Paginas/Precio-de-referencia-semanal-de-compra-de-cacao---Fuente-Industria.aspx> (accessed Apr. 02, 2023).
- [63] S. Bermudez, V. Voora, C. Larrea, and E. Luna, “Cocoa Prices and Sustainability,” Wninipeg, 2022.
- [64] Y. A. Cengel and M. Boles, *Termodinámica*, 7th editio. Mexico D.F., 2012.
- [65] S. K. Akagi *et al.*, “Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models,” *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 11, no. 9, pp. 4039–4072, 2011, doi: 10.5194/acp-11-4039-2011.
- [66] N. H. Hanafi, M. H. Hassim, and S. H. M. Setapar, “Jurnal Teknologi COMPARISON OF EMISSION FACTORS FROM,” vol. 6, no. August 2015, pp. 79–86, 2015.
- [67] M. G. Nugraha, E. D. Mozasurya, M. Hidayat, and H. Saptoadi, “Evaluation of combustion characteristics in biomass residues open burning,” *Mater. Today Proc.*, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.02.098.
- [68] J. K. Andersen, A. Boldrin, T. H. Christensen, and C. Scheutz, “Greenhouse gas emissions from home composting of organic household waste,” *Waste Manag.*, vol. 30, no. 12, pp. 2475–2482, 2010, doi: 10.1016/j.wasman.2010.07.004.