

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Evaluación del efecto del secado solar en las características fisicoquímicas del almidón de Achira (*Canna edulis Ker*)

Ricardo Andrés Anzola Rodríguez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá, Colombia
2021

II Evaluación del efecto del secado solar en características fisicoquímicas del almidón de Achira (*Canna edulis Ker*)

Evaluación del efecto del secado solar en las características fisicoquímicas del almidón de Achira (*Canna edulis Ker*)

Ricardo Andrés Anzola Rodríguez

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magíster en Ingeniería – Ingeniería de Biosistemas

Directora:
Carolina María Sánchez Sáenz
Ingeniera Agrícola, Ph.D.

Línea de investigación:
Poscosecha de productos agrícolas

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá, Colombia
2022

IV Evaluación del efecto del secado solar en las características
físicoquímicas del almidón de Achira (*Canna edulis Ker*)

*Para todas aquellas personas que han estado presentes y
me han permitido ser lo que soy.
Para mis padres y hermano, por todo su apoyo
incondicional.
Para mi esposa, por su eterna y hermosa sonrisa.
Gracias.*

“El que no vive para servir, no sirve para vivir”

Madre Teresa de Calcuta

VI Evaluación del efecto del secado solar en las características
físicoquímicas del almidón de Achira (*Canna edulis Ker*)

Agradecimientos

Quisiera aprovechar esta sección para expresar todas las cosas que nunca le dije a todas aquellas personas que hicieron parte de este viaje; además, relatar de una u otra manera todas las experiencias que gracias a esta aventura he tenido la oportunidad de vivir y que me han permitido crecer de forma intelectual y personal. Quisiera empezar agradeciéndole a mi hermosa esposa, por no dejarme desistir de escribir este documento, por acompañarme y presionarme en los momentos que más lo necesite y por su incansable compañía en aquellos días eternos en el laboratorio. A mis padres por permitirme soñar y apoyarme en esta locura. Le agradezco especialmente a la Ingeniera Carolina Sánchez, por ser incondicional, por siempre tener presente a sus estudiantes y apoyarlos en la búsqueda de información que pueda ser de interés y especialmente por no abandonarme a pesar de todos los retrasos e inconvenientes que se presentaron de mi parte.

Gracias a Andrés Duran y todo su equipo de trabajo y colaboradores, los cuales me permitieron conocer personas maravillosas, como lo son Don Baudilio, su familia y sus trabajadoras abejas, en ese lugar maravilloso, Viracacha, Boyacá, con sus duchas de agua helada al punto de adormecer las manos, con su café acompañado de aguardiente y deliciosas achiras, herramientas perfectas para iniciar los días de trabajo. Gracias a Laurita por acompañarme desde hace tanto tiempo y estar pendiente de mis avances. Gracias a todas aquellas personas que pensaron que una maestría en este punto era un acierto. Gracias a todas aquellas personas que pensaron que era una locura. Gracias a todos los compañeros que me acompañaron a través de este infinito universo llamado Universidad Nacional de Colombia.

Por último, pero no menos importante, gracias alma mater, por acogerme a mí y a tantos en los años más hermosos, difíciles y peculiares de la vida.

Resumen

El secado siempre se ha considerado una opción viable ya que aumenta la vida útil de los productos y puede mantener la calidad en el tiempo. En la producción de almidón de achira el secado solar puede aliviar económicamente a las familias productoras, sin embargo, no hay estudios que comprueben que el producto obtenido conserve las características mínimas de calidad requeridas para su consumo y comercialización en el mercado. Este trabajo se enmarca en la modalidad de investigación participativa, ya que contó con el apoyo directo del productor; se realizó en una finca productora en Viracachá, Boyacá a 2480 m.s.n.m. Se evaluó el resultado de algunas propiedades físicas, químicas y funcionales, necesarias para la caracterización de la calidad del almidón obtenido en un secador solar artesanal y un secador solar tipo armario comparándolas con las características del producto acondicionado en un secador convectivo a tres diferentes temperaturas (35, 45 y 55°C). El propósito de esta investigación fue estudiar la incidencia directa del secado solar sobre las características de calidad de la matriz alimentaria del almidón de achira y con ello demostrar la capacidad del secado solar y su pertinencia en un modelo productivo diversificado y sostenible. Se seleccionó un diseño experimental completamente al azar (DCA), se recolectaron 3 muestras por triplicado para cada variable de respuesta en cada método de secado para realizar el análisis estadístico. Los resultados muestran que el secador tipo armario, cumple con las condiciones internas mínimas de temperatura y humedad relativa para el secado de productos agrícolas, el secador artesanal tuvo un rendimiento más bajo pero el almidón presentó características que permiten un consumo inmediato. Las variables que no presentaron diferencias significativas entre los secadores fueron densidad aparente, temperatura de gelatinización, tamaño y morfología de partícula. De acuerdo con los resultados obtenidos se concluye que el secado solar, sirve como alternativa de secado para el almidón de achira para los productores de zonas rurales.

Palabras clave: Calidad de productos agrícolas, investigación participativa, producción diversificada, secador convectivo, secador directo.

Astract

Drying has always been considered a viable option as it increases the shelf life of products and can maintain quality over time. In the production of achira starch, solar drying can provide economic relief for producer families, however, there are no studies proving that the product obtained preserves the minimum quality characteristics required for its consumption and commercialization in the market. This work is part of the participatory research modality since it had the direct support of the producer; It was carried out on a producing farm in Viracachá, Boyacá at 2480 m.a.s.l. It was evaluated the result of some necessary physical, chemical, and functional properties, for the quality characterization of the achira starch obtained in an artisanal solar dryer and a closet-type solar dryer, comparing them with the characteristics of the product dried on a convective dryer, at three different temperatures (35, 45 and 55 °C). The purpose of this research was to study the direct impact of solar drying on the quality characteristics of the achira starch food matrix and thereby demonstrate the capacity of solar drying and its relevance in a diversified and sustainable production model. A completely randomized experimental design (DCA) was selected, in each drying method, 3 samples were collected in triplicate for each response variable, in order to perform the statistical analysis. The results showed that the cabinet-type dryer meets the minimum internal conditions of temperature and relative humidity for drying agricultural products, the artisan dryer had a lower performance, but the starch dried by this method presented characteristics that allow immediate consumption. The variables that did not show significant differences between the dryers were apparent density, gelatinization temperature, size, and particle morphology. According to the results obtained, it is concluded that solar drying serves as a drying alternative for achira starch for producers in rural areas.

Keywords: Convective dryer, direct dryer, diversified production, participatory research, agricultural product quality.

Contenido

Agradecimientos	7
Resumen.....	9
Astract.....	10
Contenido.....	11
Lista de Figuras.....	13
Lista de Tablas.....	15
Introducción.....	17
Objetivos	19
1. Producción diversificada y sostenible como base de un sistema productivo que permita lograr una seguridad alimentaria generalizada y estable	21
1.1. Contextualización.....	21
1.2. Niveles de pérdidas y desperdicios en la producción de alimentos	22
1.3. Causas y consecuencias de las pérdidas y desperdicios en la producción de alimentos	22
1.4. El camino a una producción de alimentos sostenible y seguridad alimentaria	23
1.5. Conclusión	28
1.6. Bibliografía	29
2. Generalidades del secado solar y comparación de condiciones dentro y fuera de los secadores solares.....	31
2.1. Secado de productos agrícolas y su finalidad	31
2.2. Tipos de secado.....	37
2.3. Secado solar	38
2.4. Tipos de secado solar	44
2.5. Componentes de un secador solar	48
2.6. Parámetros que influyen en el diseño de un secador solar.....	55
2.7. Aspectos para verificar en la operación del secador	63
2.8. Materiales y métodos	64

2.9.	Resultados y análisis.....	70
2.10.	Recomendaciones para la operación de un secador solar.....	76
2.11.	Conclusiones y recomendaciones.....	85
2.12.	Bibliografía	87
3.	Determinación de parámetros físicos y químicos del almidón de achira obtenidos mediante secado convectivo y secado solar.....	95
3.1.	Generalidades de la Achira	95
3.2.	Achira en el mundo.....	98
3.3.	Achira en Colombia	98
3.4.	Almidón de achira.....	99
3.5.	Identificación del problema.....	108
3.6.	Materiales y métodos.....	109
3.7.	Resultados y análisis.....	116
3.8.	Conclusiones	136
3.9.	Bibliografía.....	137

Lista de Figuras

Figura 2-1. Etapas del proceso de secado.	33
Figura 2-2. Cambios que ocurren en los alimentos en función de la actividad del agua.	36
Figura 2-3. Distribución de la radiación solar.....	40
Figura 2-4. Mapa de irradiación promedio en el mundo.	41
Figura 2-5. Mapa de irradiación promedio en Colombia.	42
Figura 2-6. Captación de energía solar en un invernadero.	43
Figura 2-7. Clasificación general de secadores solares.	45
Figura 2-8. Configuraciones comunes de secadores directos activos y pasivos.	47
Figura 2-9. Configuraciones comunes de secadores mixtos activos y pasivos.	47
Figura 2-10. Configuraciones comunes de secadores indirectos activos y pasivos.	48
Figura 2-11. Configuraciones comunes de la cámara de secado en función del flujo del aire.	49
Figura 2-12. Clasificación de colectores solares según el número de cubiertas.	52
Figura 2-13. Clasificación de colectores solares según la circulación de aire con respecto a la placa absorbente.	53
Figura 2-14. Clasificación de colectores solares según el tipo de placa absorbente.....	54
Figura 2-15. Actividades que requieren mano de obra en la implementación de un secador solar.....	60
Figura 2-16. Mapa de irradiación promedio en Boyacá.	65
Figura 2-17. Mapa de irradiación promedio en Viracachá municipios vecinos.	66
Figura 2-18. Secador solar artesanal utilizado para el secado de almidón de Achira. ..	68
Figura 2-19. Secador solar directo tipo armario.....	69
Figura 2-20. Temperatura ambiental y dentro de los dos secadores solares con respecto al tiempo.	71
Figura 2-21. Humedad relativa ambiental y dentro de los dos secadores solares con respecto al tiempo.	74
Figura 3-1. División y segmentos del rizoma de la achira.	97
Figura 3-2. Cultivo de achira que presenta síntomas de madurez.	100
Figura 3-3. Rizoma cosechado en el sitio de estudio.	101
Figura 3-4. Tamizado de producto rallado o “masato”.	102
Figura 3-5. Estructura para lavado de almidón de achira.	103
Figura 3-6. Horno convectivo Haratherm OMS100.....	110
Figura 3-7. Estabilidad de los alimentos con respecto a la actividad de agua y el pH..	119
Figura 3-8. Resultados de micrografía electrónica de barrido y grafica de distribución de tamaño.	125
Figura 3-9. Sectores monitoreados en el secador artesanal.	130
Elaboración propia.	130
Figura 3-10. Comportamiento de la humedad (bs) de las secciones monitoreadas en el secador artesanal.....	131
Figura 3-11. Sectores monitoreados en el secador tipo armario.	132
Figura 3-12. Comportamiento de la humedad (bs) de las secciones monitoreadas en el secador tipo armario.....	132
Figura 3-13. Curvas de secado del almidón de achira en el secador convectivo a temperaturas de 35, 45 y 55°C.....	134

Lista de Tablas

Tabla 2-1. Valores medios ¹ de temperatura ambiente y temperatura dentro de los dos secadores solares.	72
Tabla 2-2. Valores medios ¹ del delta de temperatura interno de los dos secadores solares con respecto a la temperatura ambiental.	73
Tabla 2-3. Valores medios ¹ de la humedad relativa ambiental y la humedad relativa dentro de los dos secadores solares.	75
Tabla 3-1. Área sembrada de Achira por departamento.	99
Tabla 3-2. Características del almidón de achira.	104
Tabla 3-3. Valores medios ¹ del contenido de humedad final del almidón en los dos secadores solares.	117
Tabla 3-4. Resultados medios ¹ de actividad de agua y contenido de humedad final para cada secador.	117
Tabla 3-5. Resultados medios ¹ del pH para el almidón de achira seco en los tres secadores.	118
Tabla 3-6. Parámetros medios ¹ de color del almidón de achira fresco.	120
Tabla 3-7. Valores medios ¹ de los parámetros de color del almidón de achira seco. ...	121
Tabla 3-8. Análisis proximal de almidón de Achira obtenido en diferentes métodos de secado.	122
Tabla 3-9. Valores medios ¹ para la densidad aparente del almidón de achira obtenido en en los 3 secadores.	123
Tabla 3-10. Resultados medios ¹ de temperatura de gelatinización para el almidón de achira seco en los tres secadores.	123
Tabla 3-11. Tamaño promedio de gránulo de almidón de achira obtenidos por cada método de secado.	126
Tabla 3-12. Resultados medios ¹ de capacidad de retención de agua del almidón de achira en los tres secadores.	127
Tabla 3-13. Difusividad efectiva en función de la temperatura.	128
Tabla 3-14. Valore medios ¹ de contenido de humedad en equilibrio y tiempo de proceso de secado del almidón de achira en el secador convectivo.	133
Tabla 3-15. Tiempo de secado requerido para que el almidón de achira alcance un contenido de humedad de 9% en el secador convectivo en las tres temperaturas de ensayo.	135
Tabla3-16. Valores medios ¹ del tiempo de secado para los dos secadores solares. ...	135
Tabla 3-17. Valores medios ¹ del contenido de humedad final del producto en los dos secadores solares.	135

Introducción

La seguridad alimentaria por definición comprende el hecho de que la población en todo momento debe tener acceso físico y económico a suficiente alimento, seguro, inocuo y nutritivo, para satisfacer sus necesidades y sus preferencias alimenticias, con el objeto de llevar una vida activa y saludable (FAO, 2009). El modelo productivo actual, en donde se masifica y centraliza la producción de determinados productos, genera consecuencias económicas, sociales y ambientales, tales como el agotamiento de los suelos, aumento en estándares de comercialización y consumo, pérdida y desperdicio de alimentos, aumento en la deforestación, entre muchas otras (FAO, 2017). Por esto una agricultura familiar basada en una producción diversificada se presenta como un cambio de modelo productivo, económico y social que permita que la población cuente con una seguridad alimentaria y realice una actividad sostenible.

En la cadena productiva de los productos alimenticios, el secado es la actividad que permite prolongar la vida útil de los alimentos, además de conservar en el tiempo la mayoría de las propiedades organolépticas al inhibir el crecimiento de microorganismos, bacterias y hongos (Blanco & Valladecabres, 2016), sin embargo, es la actividad que tiene una mayor demanda energética. Aunque existen una gran cantidad de opciones de secado de alimentos, muchos métodos o equipos de secado son muy costosos o específicos, no obstante, el aprovechamiento de la radiación solar para realizar el proceso de secado es una opción que no necesita de grandes inversiones; tan solo se debe tener en cuenta algunos factores ambientales para su implementación (FAO, 2017).

El cambio de modelo productivo debe tener en cuenta que una producción diversificada debe contemplar y cumplir ciertos estándares de inocuidad y calidad en los alimentos producidos, incluso en actividades artesanales como el secado solar. Además, se deben tener en cuenta especies nativas de cada sector que suplan los requerimientos nutricionales sin afectar los ecosistemas ni la biodiversidad de cada zona (SENC, 2015).

En la región que comprende gran parte de la cordillera central, en los departamentos de Nariño, Tolima, Huila, Cauca y parte de Cundinamarca, se tiene arraigada de manera

cultural y ancestral el cultivo y procesamiento de la achira o sagú, principalmente por la elaboración de bizcochos, amasijos (principalmente achiras), pan, entre otras preparaciones derivadas (Seminario, 2004). Este almidón es parte importante de la economía de esta región y sus procesos fueron documentados de forma adecuada a finales del siglo XX, sin embargo, en lo que lleva el siglo XXI son pocos los trabajos de investigación que han tenido en cuenta este producto, tan solo hasta el 2018 el Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos - ICTA realizó una caracterización de diferentes variedades presentes en esta zona (Yaruro, 2018).

Este trabajo se realizó en una finca productora en Viracachá, Boyacá y se enmarca en la modalidad de investigación participativa, ya que el productor se involucró directamente en la identificación de las necesidades y el planteamiento de los objetivos. El señor Baudilio, dueño y administrador de la finca “Los Cerezos”, brinda oportunidades de investigación para estudiantes de diferentes instituciones como la Universidad Nacional de Colombia, caracterizándose siempre por su sencillez, amabilidad y disposición para aplicar el conocimiento y recomendaciones generadas, especialmente todo lo que tiene que ver con el cuidado y la inocuidad de sus productos. El señor Baudilio es un apicultor con décadas de experiencia y actualmente ofrece una gran diversidad de productos apícolas, los cuales incluyen la cata de mieles dependiendo de la altura de producción.

A pesar de que la labor principal del señor Baudilio es la apicultura, también es productor de varios productos, principalmente frutales y almidón de achira o sagú. Con este almidón realiza su versión del amasijo tradicional o achira, añadiendo miel y polen a su producto, al cual llama “Chiraviras” y es muy popular entre los asiduos de la región y sus visitantes. Toda la producción del almidón la ejecuta de manera artesanal y el proceso de secado lo realiza en un secador solar directo pasivo, de su propiedad.

El propósito de esta investigación fue estudiar la incidencia directa del secado solar sobre las características físicas y químicas de la matriz alimentaria almidón de achira y con ello demostrar la capacidad del secado solar y su pertinencia en un modelo productivo diversificado y sostenible. Para tal fin, el presente documento está compuesto por 3

capítulos. El capítulo 1 es un contexto global sobre el modelo de producción actual, sus consecuencias, definiciones sobre producción sostenible y seguridad alimentaria y una propuesta sobre un modelo de producción sostenible que satisfaga estas definiciones. El capítulo 2 contiene información relevante sobre el secado solar de alimentos y la comparación de las condiciones ambientales, las condiciones brindadas por un secado natural tradicional y un secador solar directo pasivo. Finalmente, el capítulo 3 contiene la información relevante sobre el cultivo y producción de achira, características físicas y químicas del almidón y requerimientos para su comercialización según normas nacionales, además se encuentran todos los estudios y resultados de las características del almidón seco utilizando secado tradicional, secador solar directo pasivo y secador convectivo en laboratorio.

Objetivos

Objetivo general

Determinar la influencia del secado solar en las características fisicoquímicas del almidón de achira (*Canna edulis* Ker).

Objetivos específicos

- Caracterizar física y nutricionalmente el almidón de achira obtenido de forma convencional, en laboratorio (secado convectivo) y con secador solar.
- Determinar parámetros esenciales para la cinética de secado de almidón achira como lo son la difusividad efectiva y la energía de activación, para las condiciones operativas establecidas.
- Realizar recomendaciones para la operación de los secadores solares y una propuesta de mejoramiento para el secador solar de tipo armario.

1. Producción diversificada y sostenible como base de un sistema productivo que permita lograr una seguridad alimentaria generalizada y estable

1.1. Contextualización

Los productos agrícolas se caracterizan por tener un alto contenido de humedad, el cual favorece procesos como la descomposición, el crecimiento de agentes patógenos y bacterianos, y promueve un rápido deterioro y posterior senescencia (Blanco & Valladecabres, 2016), por lo que se consideran productos perecederos. El deterioro de los productos agrícolas no solo se genera debido a factores y procesos naturales, sino también, por factores causales, como la compresión o daño mecánico, y consecuencias generadas por un mal almacenamiento como el ataque de insectos y roedores, la exposición prolongada a distintos tipos de radiación o la proliferación de microorganismos debido a las condiciones de temperatura y humedad, entre otros, sin embargo, estos pueden ser debidamente identificados, controlados y mitigados con buenas prácticas de higiene e inocuidad (Caballero, 2008).

La afectación de las cualidades organolépticas de los productos, debido a los factores mencionados anteriormente, genera pérdidas y desperdicios en toda la cadena de producción y abastecimiento, lo cual ocasiona perjuicios económicos a todos los actores directamente implicados en esta cadena, desde productores, hasta el consumidor final (Tello, 2014). Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación - FAO (2019), se denomina pérdida de alimentos a todos aquellos productos que son desechados entre las labores de cosecha y distribución, mientras que se denomina desperdicio de alimentos a los productos desechados entre la comercialización minorista y su consumo.

1.2. Niveles de pérdidas y desperdicios en la producción de alimentos

Según los reportes de la FAO (2019), para el 2016 el porcentaje de la pérdida de frutas y hortalizas a nivel mundial en promedio fue del 21,6%, mientras que los niveles de desperdicio de frutas y hortalizas se acercaron al 8,6%. Se estima que cerca del 45% de los alimentos producidos a nivel mundial no son consumidos, por seres humanos, en esta estimación se tienen en cuenta la pérdida y desperdicio de alimentos, además de los productos que se utilizan para semilla, para alimentación animal, producción de combustibles y aquellos que se pierden en campo por no ser cosechados (FAO, 2012).

Según el Departamento Nacional de Planeación - DNP (2016) en Colombia se pierden y desperdician aproximadamente el 58% de las frutas y hortalizas producidas en el país (6,1 millones de toneladas anuales), valor que supera el promedio mundial. La región en la que se presentan los mayores niveles de detrimento en los registros alimentarios del país es la Centro-oriental (Boyacá, Cundinamarca, Santander y Norte de Santander) aportando una afectación de aproximadamente 1 millón de toneladas anuales.

1.3. Causas y consecuencias de las pérdidas y desperdicios en la producción de alimentos

Según Caballero (2008), gran parte de los casos de pérdida y desperdicio de los alimentos sucede según la conformidad con los hábitos, costumbres y preferencias individuales, sea apto o no el alimento para el consumo humano. Esto se evidencia en procesos de selección, clasificación, comercialización y posterior consumo, lo que genera que la decisión de si un producto es consumible o no, sea un proceso con cierto carácter subjetivo y se encuentre estrechamente relacionado con los hábitos y costumbres del entorno.

Esta afirmación se comprueba con los datos presentados por la FAO (2012), en los cuales se menciona que en zonas industrializadas tales como Europa y América del Norte la cantidad de alimentos desechados per cápita durante toda la cadena de producción y

comercialización es de 280 a 300 kg/año, de los cuales el desperdicio de alimento per cápita se encuentra entre los valores de 95 a 115 kg/año. Porcentajes de desperdicio muy elevados al compararlos con valores de zonas en desarrollo tales como África subsahariana, Asia meridional y sudoriental en las cuales se desechan entre 120 a 170 kg/año de alimentos per cápita, de los cuales el desperdicio per cápita se encuentra entre 6 a 11 kg/año.

En resumen, en los países en vía de desarrollo más del 70% de los desechos generados son debidos a las pérdidas de alimentos, mientras que en países industrializados el desperdicio generado al momento del consumo aporta más del 40% de los desechos. La importancia de este porcentaje toma relevancia al observar que la cantidad de alimentos desperdiciados anualmente en los países desarrollados (222 millones de toneladas), es comparable a la producción de alimentos neta total anual del África Subsahariana, la cual es de 230 millones de toneladas (FAO, 2017).

Teniendo en cuenta e identificando los factores de pérdida de alimentos de cada economía o cultura, se han planteado escenarios y actividades para la mitigación, control y solución de sus consecuencias. Para esto se debe tener en cuenta que en cada una de sus fases o eslabones en la cadena productiva se produce un respectivo desperdicio (González, 2015), además, también se debe considerar que las pérdidas y desperdicios de alimento no solo se deben tratar desde un punto de vista ético, económico y social, sino que también se deben tener en cuenta consecuencias nutricionales, sanitarias y ambientales debido a que los residuos de alimentos contribuyen significativamente al calentamiento climático al producir gas metano por su degradación, cuyo efecto invernadero es 21 veces superior al del dióxido de carbono (Carretero, 2016).

1.4. El camino a una producción de alimentos sostenible y seguridad alimentaria

El modelo actual de producción de alimentos se basa en la intensificación masiva y centralizada de la agricultura, lo que ha aumentado sustancialmente la producción de alimentos pero con un alto coste para el medio ambiente, lo que ha generado

consecuencias como deforestación, agotamiento del suelo, aumento de emisiones de gases de efecto invernadero, pérdida de biodiversidad, pérdida de alimentos, menor resiliencia en los sistemas productivos, entre otras (FAO, 2017), además, este modelo genera una afectación social al exigir que las condiciones físicas y estéticas de los alimentos sea cada vez más homogénea y rigurosa por lo que aumenta el desperdicio antes del consumo (Friedrich, 2014).

Las múltiples afectaciones que genera el modelo productivo, se deben observar desde las diferentes perspectivas, no solo se deben afectar o modificar los gustos y preferencias de unos pocos actores, sino que se debe optar por un cambio de modelo alimentario, debido a que según lo expresado por el director general de la FAO, José Graziano da Silva, “para alcanzar el desarrollo sostenible, debemos transformar los actuales sistemas agrícolas y alimentarios, apoyando a los pequeños campesinos y a los agricultores familiares, reduciendo el uso de plaguicidas y productos químicos y mejorando las prácticas de conservación de la tierra” (FAO, 2017).

Para tratar de dar solución a las pérdidas y desperdicios generados por la producción de alimentos se han establecido los conceptos: producción sostenible y seguridad alimentaria, que para este propósito deben implementarse y complementarse mutuamente (Friedrich, 2014). La producción sostenible se refiere a minimizar la degradación del suelo agrícola, maximizando a su vez la producción, basándose en actividades agrícolas como el manejo de suelos y aguas, el manejo de cultivos y la conservación de la biodiversidad; considerando a su vez el suministro de alimentos y materias primas, manteniendo su productividad a pesar de las perturbaciones económicas y naturales, externas o internas (Martínez, 2009).

La seguridad alimentaria se refiere a “cuando las personas, en todo momento, tienen acceso físico y económico a suficiente alimento, seguro y nutritivo, para satisfacer sus necesidades alimenticias y sus preferencias, con el objeto de llevar una vida activa y sana” (FAO, 2009). Sin embargo, estos conceptos no solo se deben ver desde el punto de vista productivo y nutricional, sino que se deben complementar con la protección sanitaria de los alimentos, para esto se deben identificar y priorizar las actividades críticas

de la cadena productiva, con la finalidad de adoptar medidas que permitan obtener el mayor beneficio posible, utilizando un mínimo de recursos físicos y humanos. En cuanto a la adopción de protocolos y medidas de inocuidad se emplea comúnmente la transferencia de tecnologías sostenibles y económicamente viables, y la educación sanitaria, debido a que tienen un efecto más duradero y efectivo que las acciones represivas (Caballero, 2008).

Existen acciones localizadas para atacar una preocupación en una zona específica, como la creación de una aplicación para evitar el desperdicio de alimentos por parte de los consumidores en algunas zonas de Europa (Carretero, 2016); e iniciativas más robustas como la creación de “SAVE FOOD” apoyada por la FAO, el Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola o FIDA y el Programa Mundial de Alimentos o PMA que apoyan proyectos en pro de la reducción de los desperdicios de alimentos (FAO, 2017), con el fin de alcanzar una producción sostenible y seguridad alimentaria; sin embargo, el problema de las afectaciones generadas por el modelo productivo, abarca tantas consecuencias de tan distintas naturalezas, que se deben empezar a plantear no solo acciones correctivas, sino también, un cambio o reestructuración del sistema productivo y alimentario.

Una propuesta de un sistema productivo ambientalmente sostenible, planteada por economistas liderados por R.S. de Groot et al. (2010), busca abarcar, la gran mayoría de los problemas, con el objetivo inicial de realizar una nueva metodología de valoración económica del ambiente. Para este propósito fue desarrollado un concepto llamado servicios ecosistémicos, que, en palabras sencillas, se define como los beneficios que los seres humanos obtienen directa o indirectamente de los ecosistemas sin acarrear costo alguno. Estos servicios se dividen en 4 grupos generales que son los servicios culturales, de soporte, de aprovisionamiento/abastecimiento y regulación (Müller & Sigrist, 2014).

El modelo mencionado anteriormente consiste en no priorizar uno o varios servicios ecosistémicos con determinado sistema productivo, al contrario, se debe tener en cuenta el paquete total de servicios para procurar un agroecosistema sostenible, como lo muestra la Figura 1-1.

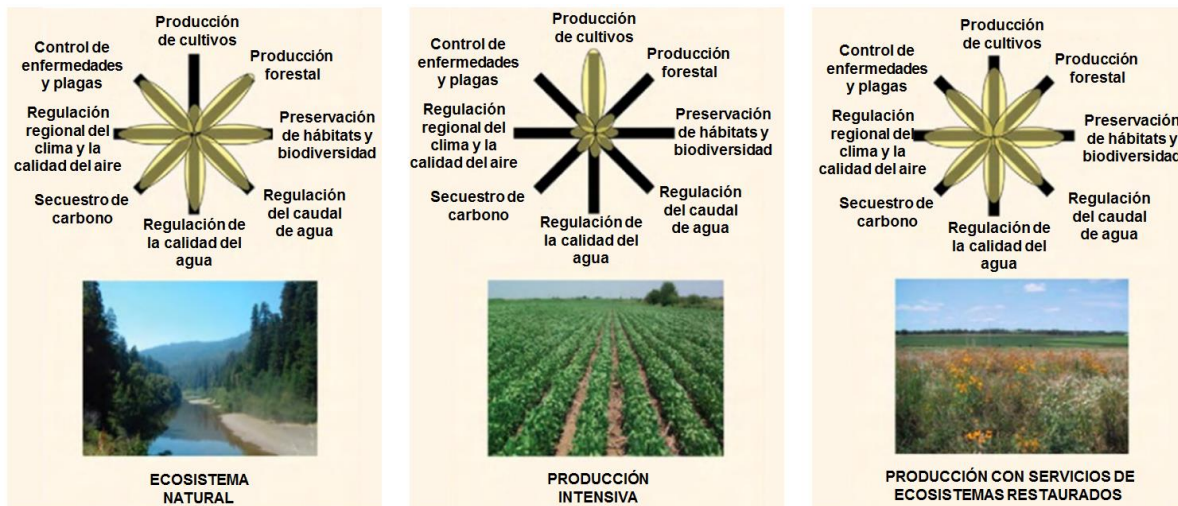


Figura 1-1. Efectos de los ecosistemas y agroecosistemas sobre los servicios ecosistémicos. Fuente: Groot et al. (2010).

En su planteamiento, también son conscientes de que este modelo no es posible sin un cambio de pensamiento social, mejoramiento en canales de comunicación y distribución de alimentos, una adecuada política gubernamental que establezca los límites entre conservación y producción, además, debido a que este modelo plantea una descentralización y de cierta manera, no optar por la producción intensiva de alimentos, tampoco sería posible sin una adecuada estructura que permita la adecuada disposición y un manejo inocuo de los alimentos y que permita que la actividad sea rentable (Jarquín et al., 2017), con lo cual se puede desarrollar una producción diversificada y familiar que permita lograr una soberanía alimentaria, reducir la dependencia de importaciones y la volatilidad de los mercados (Friedrich, 2014).

1.4.1. Requerimientos para una producción de alimentos sostenible

Con el objetivo de implementar adecuadamente políticas y actividades de agricultura diversificada y familiar, se refuerza la importancia del acceso a los conocimientos científicos tales como la fertilización para mejora de la productividad y manejo del suelo, nuevos métodos de cultivo, utilización de material botánico y biológico para el control de plagas y enfermedades, instalaciones adecuadas para actividades poscosecha requeridas como secado y almacenamiento, entre otros, dispuestos para lograr el propósito de ser sustentables y competitivos (Santana et al., 2016).

1.4.2. Secado de productos agrícolas, complemento para una producción sostenible

Un punto crítico en los procesos de producción de alimentos es la adecuada disposición y almacenamiento de los productos, especialmente de productos frescos que conlleva a un alto consumo energético (Villegas & Albarracín, 2016). Al requerir la aplicación de una cadena en frío o un ambiente con condiciones controladas el secado o deshidratación se convierte en una opción viable, debido a que aumenta la vida útil de los productos y puede mantener en el tiempo las propiedades organolépticas, físicas, químicas y nutricionales (García et al., 2018).

Según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente PNUMA una de las mejores estrategias para mitigar la problemática de la pérdida y desperdicio de alimentos es mejorar las prácticas poscosecha de los alimentos (Toepfer, 2009), específicamente el proceso de secado, sin embargo, el aprovechamiento de la energía solar para este proceso es fundamental, no solo para minimizar los desechos de alimentos, también para generar un impacto socio-económico en las familias y comunidades vulnerables en países en desarrollo (Hastings, 2018).

Según Coronado (2013), los agricultores que cuentan con cierta infraestructura de secado directamente en el campo se ven beneficiados al obtener un mejor nivel de ganancias debido a que pueden comercializar de una manera más fácil los productos, se reducen los costos de transporte debido a que disminuye el peso del producto y disminuye la susceptibilidad al daño mecánico y el requerimiento de almacenamiento al reducir su volumen, entre otros factores.

Actualmente existen documentados más de 500 tipos o métodos de secado, con tiempos que van desde pocos segundos a meses y para cualquier capacidad (Mujumdar, 2011). Sin embargo, en el contexto de una producción sostenible y diversificada se presentan limitaciones técnicas o no se cuenta con una transferencia de tecnologías apropiadas para el secado de productos agrícolas, principalmente en países en vía de desarrollo (Blanco & Valladecabres, 2016). Teniendo en cuenta este aspecto se considera el secado

con energía solar como una de las mejores alternativas, ya que los equipos empleados para este fin presentan mayor eficiencia que el secado al sol directo y menores costos de operación que otros métodos de secado mecanizado (Ivars et al., 2017).

1.5. Conclusión

La introducción de un modelo de producción sostenible y diversificada puede solventar gran parte de las consecuencias provocadas por la producción masificada y centralizada en la que se basa el sistema de producción actual. Aunque se entiende que su implementación puede ser compleja y demorada, es importante resaltar que un cambio de pensamiento hacia este modelo, como la disminución de estándares estéticos de los alimentos, cultivar personalmente algunos productos de consumo, adquirir alimentos directamente con el pequeño productor, entre muchas otras, son pequeñas acciones que pueden generar cambios significativos en las condiciones socio-económicas de los principales actores de la cadena productiva de alimentos.

La migración hacia este modelo podrá lograr poco a poco que la población en general, principalmente las familias productoras que no tienen la capacidad de acceder de manera habitual a servicios básicos como salud, educación y comunicación, entre otros, puedan obtener en todo momento la cantidad necesaria de alimentos de su preferencia, supliendo los requerimientos nutricionales, por medio de una seguridad alimentaria estable y duradera, lo cual no sería posible sin tener como base una producción familiar sostenible y diversificada.

El secado solar de productos agrícolas se presenta como una opción favorable y económica para mejorar los procesos de poscosecha de los alimentos, al aprovechar un recurso renovable como lo es la energía solar y no representar una inversión elevada en cuanto a su implementación, operación y mantenimiento, además de complementar las acciones dirigidas hacia la producción familiar y la seguridad alimentaria.

1.6. Bibliografía

- Blanco, L., & Valldecabres, L. (2016). Guía para el desarrollo de proyectos de secado solar en comunidades rurales. *Energía sin Fronteras*. 3: 8 - 9.
- Caballero, A. (2008). *Temas de Higiene de los Alimentos*. Centro Nacional de Información de Ciencias Médicas. Editorial Ciencias Médicas. 382p.
- Carretero, A. (2016). ¿Desechados por “feos”? Nueva plataforma europea contra las pérdidas y el desperdicio de alimentos. *Revista CESCO de Derecho de Consumo*. 20: 110 - 133
- Coronado, G. (2013). Evaluación de los centros de secado del sector maicero: Propuesta de Administración Cooperativista y su incidencia en el nivel de vida de los pequeños y medianos productores de maíz de los cantones Quevedo y Ventanas. Universidad Politécnica Salesiana. 228p.
- de Groot, R., Alkemade, R., Braat, L., Hein, L., & Willemen, L. (2010). Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity*. 7(3): 260 – 272.
- Departamento Nacional de Planeación - DNP. (2016). Informe de Desperdicio de Alimentos en Colombia. 48p.
- FAO. (2009). El estado de la inseguridad alimentaria en el mundo. 66p.
- FAO. (2012). Pérdidas y desperdicio de alimentos en el mundo – Alcance, causas y prevención. 42p.
- FAO. (2017). Incrementar la producción de alimentos sin perjudicar el medio ambiente. Comisión de Agricultura y Desarrollo Rural del Parlamento Europeo. Link de consulta: <http://www.fao.org/news/story/es/item/889910/icode/>. [Ultimo acceso: 20 de mayo de 2021]
- FAO. (2019). El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Progresos en la lucha contra la pérdida y el desperdicio de alimentos. 198p.
- Friedrich, T. (2014). La seguridad alimentaria: Retos actuales. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*. 48(4): 319 - 322.
- García, P., León, J., Cárdenas, L., & Giraldo, J. (2018). Modelado numérico del proceso de secado solar de manzanas en el municipio de Nuevo Colón - Boyacá. *Revista UIS Ingenierías*. 17(1): 201 – 208.

- González, L. (2015). El insostenible desperdicio de alimentos: ¿Que podemos hacer los consumidores? Revista CESCO de Derecho de Consumo. 14: 203 – 216.
- Hastings, C. (2018). TUNZA. Los alimentos y el medio ambiente. PNUMA. 6(2): 10.
- Ivars, Y., Mora, J., & Manavella, F. (2017). Deshidratador Solar Patagónico Familiar. INTA. 14p.
- Jarquín, N., Castellanos, J., & Sangerman, D. (2017). Pluriactividad y agricultura familiar: retos del desarrollo rural en México. Revista mexicana de ciencias agrícolas. 8(4): 949 - 963.
- Martínez, R. (2009). Sistemas de producción agrícola sostenible. Revista Tecnología En Marcha, 22(2): 23.
- Mujumdar, A. (2011). Drying Technology - An Overview. Notes of Industrial Transfer Processes. National University of Singapore. 7p.
- Müller, V., & Sigrist, N. (2014). BIODIVERSIDAD. Una guía para todos. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt Colombia. 15p.
- Santana, K., Santos, S., Pasquotto, M., & Benini, E. (2016). Análisis de la participación de los productores de la agricultura familiar de los asentamientos y comunidades rurales del Sur de Bahía, Brasil, en la Cadena de Valor del Cacao (Chocolate). Espacios. 37(17): 2.
- SENC. (2015). Pirámide alimentación saludable. Sociedad Española de Nutrición Comunitaria. Link de consulta: <https://www.nutricioncomunitaria.org/es/noticia/piramide-de-la-alimentacion-saludable-senc-2015>. [Ultimo acceso:20 de abril de 2021]
- Seminario, J. (2004). Raíces andinas. Contribuciones al conocimiento y a la capacitación. International Potato Center (CIP). 376p.
- Tello, P. (2014). Proyecto de evaluación de pérdidas físicas en poscosecha de productos agrícolas en etapa de mercadeo y elaboración de estrategias para mejoras del mercado municipal La Carolina. Quito, Pichincha. UCE. 111p.
- Toepfer, K. (2009). Nuestro planeta. Energía renovable. PNUMA. 16(4): 3.
- Villegas, C., & Albarracín, W. (2016). Aplicación y efecto de un recubrimiento comestible sobre la vida útil de la mora de castilla (*Rubus glaucus Benth*). Vitae, 23(3), 202 - 209.

2. Generalidades del secado solar y comparación de condiciones dentro y fuera de los secadores solares

En este capítulo se abordará todo el tema de secado solar; esto incluye los tipos de secado, los secadores solares y sus características, así como también, una descripción de los parámetros que influyen en el diseño. Se analizaron en este capítulo solamente el comportamiento de las condiciones internas de cada uno de los secadores solares usados en esta investigación, con respecto a las condiciones ambientales de humedad relativa y temperatura de la zona, para determinar si cada secador brinda las condiciones necesarias para el secado de productos agrícolas. Con base en esto se plantearon unas recomendaciones para mejorar el funcionamiento de cada secador solar. Finalmente se realizan unas recomendaciones de todos los componentes generales de un secador solar, para una adecuada implementación y operación que permita condiciones de funcionamiento óptimo.

2.1. Secado de productos agrícolas y su finalidad

El secado o deshidratación de productos agrícolas es un proceso que consiste en extraer el contenido de agua de los productos y moverla al medio circundante a través de un fenómeno de transferencia de energía y masa (Green & Perry, 2008). Si el medio posee ciertas características como baja humedad relativa, alta temperatura, entre otras, el agua contenida en el producto sale a la superficie, donde es removida por una corriente de aire en forma natural o forzada (Blanco & Valdecabres, 2016).

El aire húmedo debe ser removido continuamente para permitir que el proceso se realice de manera continua y no se afecte el producto (Condori, 2016). En la cadena productiva es la operación unitaria más antigua, común, diversa y la de mayor requerimiento energético (Espinoza et al., 2011). Este proceso permite prolongar la vida útil, conservar y preservar la mayoría de sus propiedades organolépticas, físicas, químicas y nutricionales para un consumo posterior, así como disminuir las necesidades en transporte y almacenamiento, ya que al extraer agua se reduce el peso y en ocasiones el tamaño y volumen de los productos (Durán, 2014; Rodríguez & Bohórquez, 2016; García

et al., 2018; Ortiz, 2014; El-Sebaili & Shalaby, 2012); además, mejora el aprovechamiento de las producciones excedentes y en muchos productos confiere un valor agregado que mejora los ingresos del productor (Ivars et al., 2017).

2.1.1. Etapas del proceso de secado

El proceso de secado de productos agrícolas, en condiciones constantes, consiste en 3 etapas que dependen de la tasa de secado, es decir, la pérdida de peso con respecto al tiempo, como se observa en la Figura 2-1 (Belessiotis & Delyannis, 2011; Srinivasan et al., 2021).

- a) **Periodo de tasa constante:** En esta primera etapa el proceso de secado se realiza con una tasa o velocidad de secado constante, debido a que el agua que está siendo retirada es la que se encuentra en la superficie (Agua libre). Este proceso termina en el primer punto crítico de humedad mc_1 .
- b) **Tasa decreciente 1er periodo:** En este periodo de secado la tasa de secado disminuye debido a que el agua que se retira en esta etapa es la que se encuentra en capas internas del producto (Agua ligada) y pasa de estas capas a la superficie por capilaridad. Este proceso termina en el segundo punto crítico de humedad mc_2 .
- c) **Tasa decreciente 2do periodo:** Etapa en la que la tasa de secado disminuye gradualmente hasta que el producto llegue a la humedad de equilibrio en el punto de contenido de humedad de equilibrio m_{ce} , en esta etapa se retira parte del agua contenida en el núcleo que sale a la superficie por capilaridad.

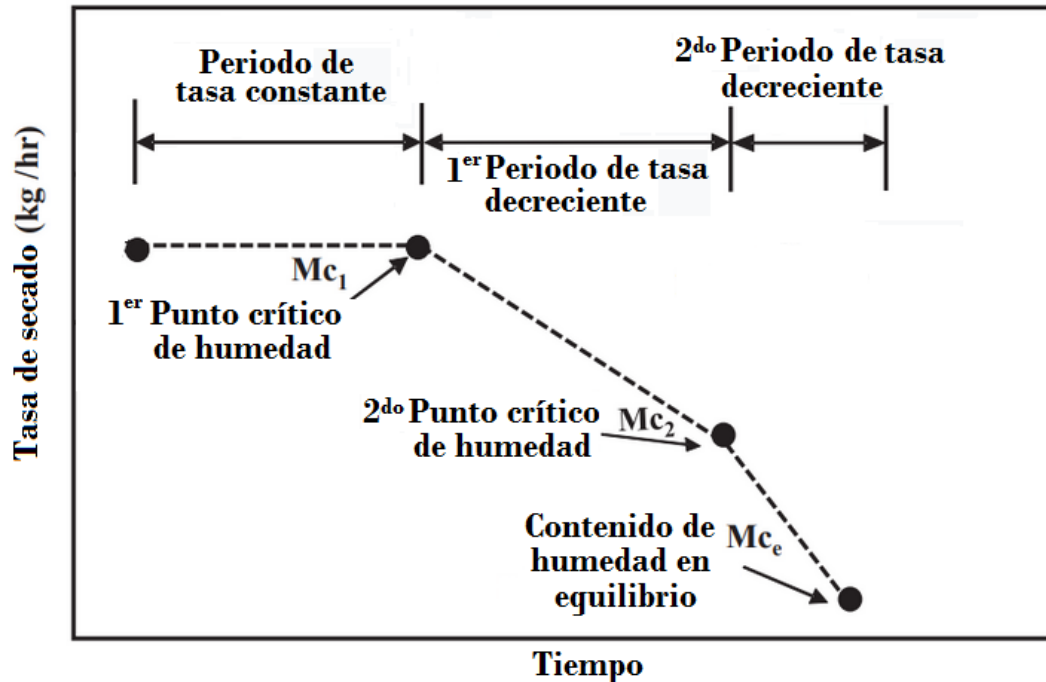


Figura 2-1. Etapas del proceso de secado.

Fuente: Srinivasan et al. (2021).

Es importante tener en cuenta que estas etapas de secado dependen de las condiciones del medio en el cual se está realizando el proceso de secado, debido a que la desorción del producto está en equilibrio dinámico con la absorción del medio ambiente, es decir, si el medio cuenta con condiciones desfavorables (temperatura baja y humedad relativa alta), la humedad de equilibrio va a ser mayor (Visavale, 2012).

2.1.2. Consideraciones a tener en cuenta en la selección de un método de secado

Para determinar el tipo adecuado de método de secado y su posterior diseño se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones y parámetros (Ratti, 2009; Bayona, 2011):

- Tipo de producto (a mayor humedad, mayor tiempo).
- Tamaño del producto a secar (a mayor tamaño, mayor tiempo).
- Temperatura del medio (a mayor temperatura, menor tiempo).
- Humedad relativa del medio (a mayor humedad, mayor tiempo).
- Velocidad del flujo (a mayor velocidad, menor tiempo).

Sin embargo, en muchos casos, principalmente en países en vía de desarrollo, no solo es importante esta información de requerimientos, capacidad y tiempo de secado, también es importante el contexto rural y productivo, ya que se pueden presentar limitaciones técnicas, operacionales al no contar con una transferencia de tecnologías y conocimiento apropiadas para el óptimo manejo, procesamiento, secado y almacenamiento de productos agrícolas (López et al., 2019). Esta transferencia de tecnología es fundamental para el incremento de la productividad en las comunidades rurales, mejorando sus ingresos y los de los demás actores que intervienen en las cadenas de valor agropecuarias, reduciendo los índices de pobreza (Trigo & Elverdin, 2019).

También se deben tener en cuenta factores como la rapidez y capacidad de extracción de agua en el secado debido a que, si el proceso es muy prolongado, especialmente en la primera etapa del secado, se puede favorecer el crecimiento de agentes patógenos debido a la presencia de agua libre y su interacción con el producto (Belessiotis & Delyannis, 2011; Bayona, 2011). Además, en los productos agrícolas, existen límites térmicos permisibles en los que no se ven afectadas propiedades físicoquímicas del producto y se deben tener en cuenta (Blanco & Valldecabres, 2016; Gutierrez, 2016).

2.1.3. Contenido de humedad en equilibrio

El contenido de humedad en equilibrio de un producto puede disminuir o aumentar en función de las condiciones del medio, esto se debe a que el producto y el medio se encuentran en un equilibrio dinámico (Visavale, 2012). Cuando un producto con cierta presión de vapor de agua es expuesto a un medio cuyas condiciones de temperatura y humedad le otorgan un valor de presión parcial de vapor diferente al del producto, éste va a perder o ganar humedad. Cuando las presiones entre el producto y el medio se igualan, el producto no va a perder más humedad a pesar del tiempo de exposición. A este estado se le conoce como el contenido de humedad en equilibrio. En la literatura se encuentran numerosos métodos de determinación y diferentes ecuaciones las cuales, según Ospina & Cuervo (1995) dependen principalmente de las siguientes variables:

- Humedad relativa del medio
- Temperatura del producto y del medio
- Especie o variedad del producto
- Madurez fisiológica

La determinación del contenido de humedad en equilibrio que alcanza un producto en un ambiente determinado es importante para la selección del método adecuado de secado, su diseño y también para determinar las condiciones óptimas de almacenamiento, al optimizar las condiciones requeridas para estos procesos (Moreira et al., 2008).

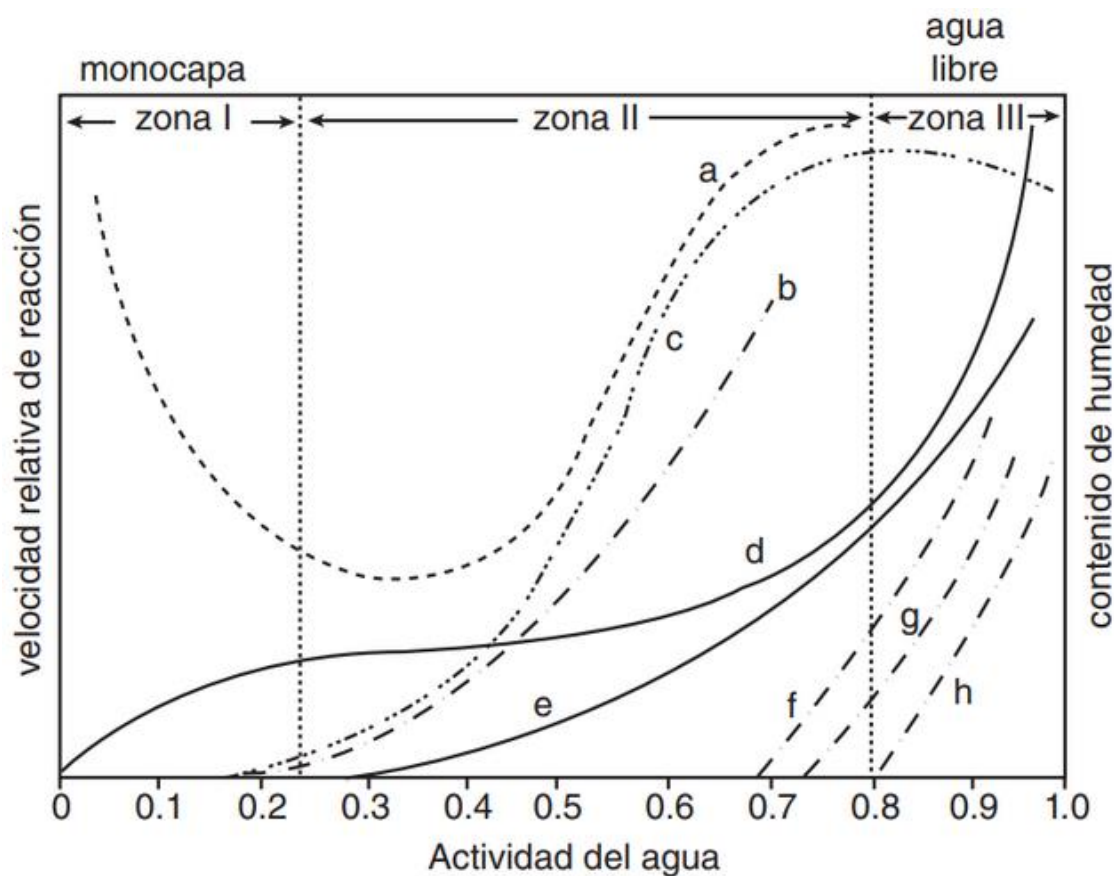
2.1.4. Actividad de agua

Entre los parámetros más importantes del proceso de secado y la conservación de productos agrícolas, se encuentra la actividad de agua (a_w), ya que dependiendo del valor de ésta, los productos se pueden considerar perecederos o no, por esto uno de los objetivos principales del secado es disminuir este parámetro a valores por debajo de 0.5, en los que la actividad microbiana que acelera la senescencia del producto se inhibe, permitiendo así alargar su vida útil (Gutierrez, 2016).

La actividad de agua se define como el agua libre o disponible en un alimento que puede reaccionar durante el proceso de descomposición, aunque está directamente relacionado con la humedad del producto, el valor de a_w no hace referencia al valor total del agua que el alimento presenta. La a_w comprende valores que van de 0 a 1, donde el agua pura toma el valor de 1. Alimentos con valores próximos a 1 son más inestables y se consideran altamente perecederos, mientras que un alimento con valores próximos a 0, se considera menos perecedero al reducirse la actividad biológica y, por tanto, más estable y con una vida útil más larga (Barrios, 2019; Cardona, 2019).

La a_w también se refiere a la zona en la que se encuentra el agua en las partículas de los alimentos (Figura 2-2). En la zona III se denomina agua “libre” a aquella que circula a través de los macrocapilares, la energía requerida para procesos como congelación y evaporación es relativamente baja; se considera que al retirar esta agua el valor de a_w es 0,8. En la zona II el agua se encuentra entre capas más estructuradas y microcapilares y

es considerada agua "ligada", por lo que su extracción requiere más energía y una vez realizado este proceso de extracción el alimento toma un valor de a_w de 0,25. Finalmente, el agua en la zona I (Agua de composición) se encuentra la capa monomolecular y es la que requiere más energía para su extracción, aunque esta extracción en algunos casos no es recomendable ya que puede afectar el alimento pues esta agua inhibe la oxidación de lípidos al actuar como barrera ante el oxígeno (Badui, 2006).



a) Oxidación de lípidos; b) reacciones hidrológicas; c) oscurecimiento no enzimático; d) isoterma de adsorción; e) actividad enzimática; f) crecimiento de hongos; g) crecimiento de levaduras, y h) crecimiento de bacterias.

Figura 2-2. Cambios que ocurren en los alimentos en función de la actividad del agua.

Fuente: Badui, 2006.

A valores inferiores de a_w , la actividad y velocidad de crecimiento de los microorganismos disminuye y la fase de latencia aumenta, así como las tasas de algunas reacciones químicas e inhibe el deterioro enzimático (Bonazzi & Dumolin, 2011). El valor mínimo de a_w que permite el crecimiento de la mayoría de los mohos, levaduras y bacterias más

comunes es de 0,61 (Caballero, 2008), sin embargo, Gutierrez (2016) recomienda que por medio del proceso de secado se logren valores inferiores a 0,5 para evitar la pérdida de calidad de los productos en parámetros físicos, químicos y nutricionales.

2.2. Tipos de secado

A lo largo del tiempo se han desarrollado, modificado e implementado nuevas y numerosas tecnologías, dependiendo de las características de cada producto, del ambiente y demandas del mercado (Sharma et al., 2009; Campo et al., 2018). Actualmente existen documentados más de 500 tipos de secado entre los que pueden diferenciar tanto el método y los equipos utilizados, con tiempos y capacidades de secado variables (Mujumdar, 2011). En la actualidad existen 2 grandes tipos de secado de productos alimenticios los cuales son el secado no térmico y térmico.

- a) **No térmicos:** métodos de secado que no se basan en el cambio de temperatura, como por ejemplo secado a alta presión hidrostática, ultrasonido, pulsos eléctricos de alta intensidad de campo, campos magnéticos oscilantes, aditivos químicos y bioquímicos, cambios cíclicos de presión, entre otros (Ramana, 2009; Gutierrez, 2016; Campo et al., 2018).
- b) **Térmicos:** Métodos de secado en los que la energía requerida para la extracción de la humedad de los productos es el delta o cambio de temperatura. El secado térmico se divide en dos grupos, secado térmico mecánico y solar (Gutiérrez & Copete, 2009).
 - Térmico mecánico: proceso en el cual se cambian las condiciones del aire o el ambiente de secado al presentar un delta de temperatura por medio de algún mecanismo (Oliveros et al., 2009). Estos equipos de secado se caracterizan por mantener las condiciones de trabajo constantes durante el periodo que se requiera (Condori, 2016). El calentamiento, es el método de secado más común en el que se aumenta la temperatura del aire ya sea por combustión de algún material o por medio de resistencias (Roa et al., 1999). Aquellos equipos que calientan el medio a través de la combustión de materia orgánica pueden producir hidrocarburos policíclicos aromáticos si se

presenta una combustión incompleta, generando contaminación de los productos y cambios organolépticos relacionados con lo “ahumado”, aunque esta situación puede evitarse al utilizar un intercambiador de calor (Caballero, 2008).

El enfriamiento comúnmente llamado liofilización, consiste en reducir la temperatura que lleve a la congelación del producto, y producir la sublimación del hielo generado por medio de una presión de vacío (Orrego, 2008).

- Secado solar: Método de secado que obtiene la energía necesaria para el proceso de adecuación del ambiente (aumentar la temperatura y disminuir la humedad relativa) por medio de la acción directa de la radiación solar y el calor generado por esta (Condori, 2016; Ivars et al., 2017).

2.3. Secado solar

El requerimiento energético para cualquier proceso de secado generalmente es elevado, en quipos de secado convencionales se obtiene la energía para el proceso por medio de combustión, resistencias o motores, lo que genera un aumento en los costos de operación. En secadores solares, esta energía se obtiene de la radiación solar. Sin embargo, se debe considerar que, aunque el proceso es complejo debido a la variabilidad de las condiciones meteorológicas como la radiación, nubosidad y pluviosidad que dependen de la época del año, la mayoría de los equipos diseñados para el aprovechamiento de la energía solar, son equipos de bajas inversiones iniciales a comparación de otros métodos o equipos de secado (Condori, 2016).

El secado solar de productos agrícolas ha tomado más importancia en los últimos años, por el contexto rural, principalmente en los países en vía de desarrollo (Blanco & Valladecabres, 2016), y por el interés de aprovechar la energía y calor de recursos renovables, ante el agotamiento de recursos fósiles y las diferentes implicaciones ambientales de su uso indiscriminado, como la contribución al efecto invernadero debido a la generación de CO₂ (García et al., 2012; Bayona, 2011). Sin embargo, la implementación de un secador solar tiene dificultades como el control de las condiciones operativas de temperatura, velocidad y humedad relativa del aire, debido a que estos

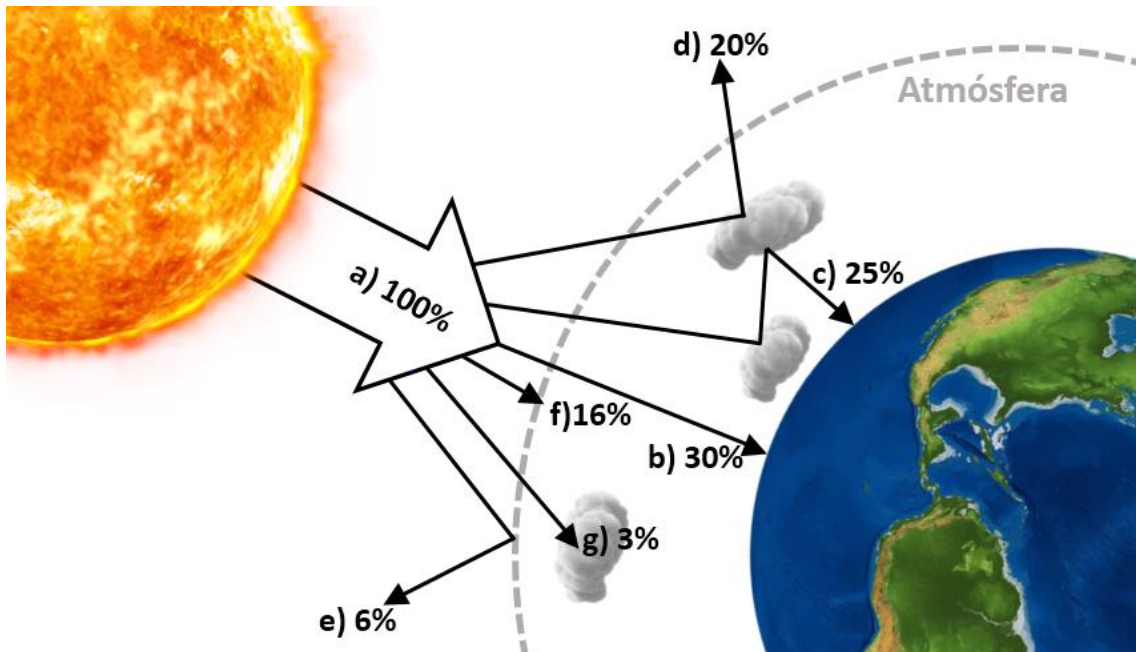
parámetros dependen de las condiciones climatológicas (Machado et al. 2010), además, tiene restricciones y requerimientos de acuerdo al lugar donde se quiera implementar, como aspectos técnicos, económicos, de los cuales depende la determinación del tipo adecuado de secador y su dimensionamiento (Viveros & Mayorga, 2017).

2.3.1. Radiación solar

El sol es el principal productor de energía del sistema solar, esta energía llega en forma de radiación electromagnética, penetra a través de la atmósfera y llega a la superficie terrestre (Mendoza, 2011; Tiwari, 2016; Garnacho et al., 2020). La radiación que produce el sol es considerada radiación de onda corta (ISO, 2007; Carmona, 2013; Zorzano, 2015) y se encuentra entre las regiones Ultravioleta, Visible e Infrarrojo cercano, las cuales se encuentran distribuidas en promedio de la siguiente manera (AEMET, s.f.; Inzunza, 2012):

- Ultravioleta: 7%
- Luz visible: 43%
- Infrarrojo: 49%
- Otros rangos: 1%

Del 100% de la radiación solar que llega a la atmósfera, aproximadamente, sólo un 55% incide sobre la superficie, 30% como radiación directa y un 25% como radiación difusa. El resto de la radiación total que llega a la atmósfera se pierde de la siguiente manera: 16% es absorbida en la atmósfera, 3% es absorbida por las nubes y material particulado, es reflejada hacia el espacio un 6% por la atmósfera y un 20 % por las nubes como se muestra en la Figura 2-3 (Inzunza, 2012).



- a) Radiación solar total, b) Radiación directa, c) Radiación difusa, d) Radiación reflejada por nubes y material particulado, e) Radiación reflejada por la atmósfera, f) Radiación absorbida por la atmósfera, g) Radiación absorbida por nubes y material particulado

Figura 2-3. Distribución de la radiación solar.

Fuente: elaboración propia.

Hay distintos factores que inciden sobre la cantidad e intensidad de la radiación solar y que pueden afectar su aprovechamiento (Garnacho et al., 2020; Poveda, 2020) como son:

- c) Nubosidad y contaminación:** que permiten el paso de la radiación ultravioleta, pero bloquean el paso de la infrarroja.
- d) Altitud:** en zonas más altas la radiación es más intensa debido a que hay menos columna de aire o, en otras palabras, la capa de atmósfera es más delgada.
- e) La latitud:** el ángulo de incidencia de la radiación influye en la intensidad de esta. En zonas más cercanas al Ecuador la intensidad puede ser hasta 5 veces más grandes que en las zonas cercanas a los polos.
- f) Estación del año:** la intensidad de la radiación es mayor en estaciones de calor o verano debido a la baja presencia de nubosidad que puedan impedir el paso de la radiación solar.
- g) Duración del día:** basada en consideraciones astronómicas.

h) Hora del día: debido a la rotación de la tierra, se presenta mayor intensidad al medio día, momento en que la radiación incide de forma más directa.

2.3.1.1. Irradiación solar en el mundo

Según estimaciones del World Bank Group, el promedio de irradiación solar a nivel mundial es de aproximadamente 4,02 kWh/m²/día. A continuación, se observa el mapa de irradiación solar total promedio anual (Figura 2-4) (World Bank Group, 2019).

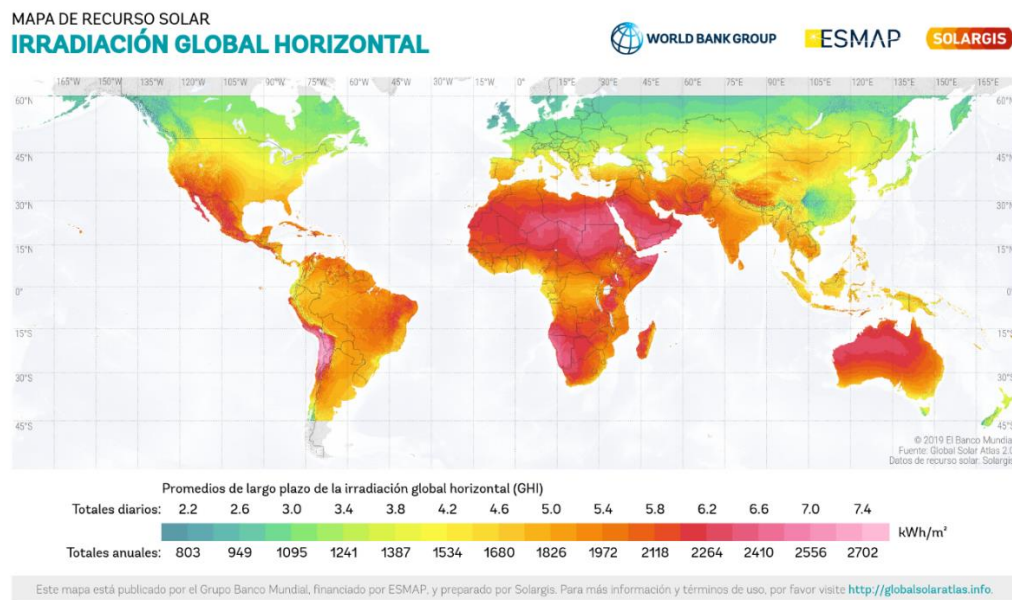


Figura 2-4. Mapa de irradiación promedio en el mundo.

Fuente: World Bank Group, 2019.

2.3.1.2. Irradiación solar en Colombia.

El promedio de irradiación solar en Colombia es de 4,64 kWh/m²/día (World Bank Group, 2019). Aunque los valores de irradiación en Colombia son inferiores a los que se presentan en África, el Medio Oriente o Australia, se encuentran por encima del promedio mundial y específicamente por encima de países nórdicos y europeos, además, este recurso promedio no varía significativamente a lo largo del año ya que Colombia no presenta estaciones (UPME, 2015).

Las condiciones de irradiación del país son suficientes y apropiadas para su aprovechamiento, especialmente para su aprovechamiento en la obtención de energía fotovoltaica, incluso en la costa pacífica, sector del país en el que hay más pluviosidad y

la irradiación presenta valores menores al promedio mundial (Lezcano et al., 2011; Quijano et al., 2012; Gamboa & Hill, 2016; Delgado & Aristizábal, 2017; Luna et al., 2020). A continuación, se observa el mapa de irradiación solar total promedio anual (Figura 2-5), obtenido de World Bank Group (2019).

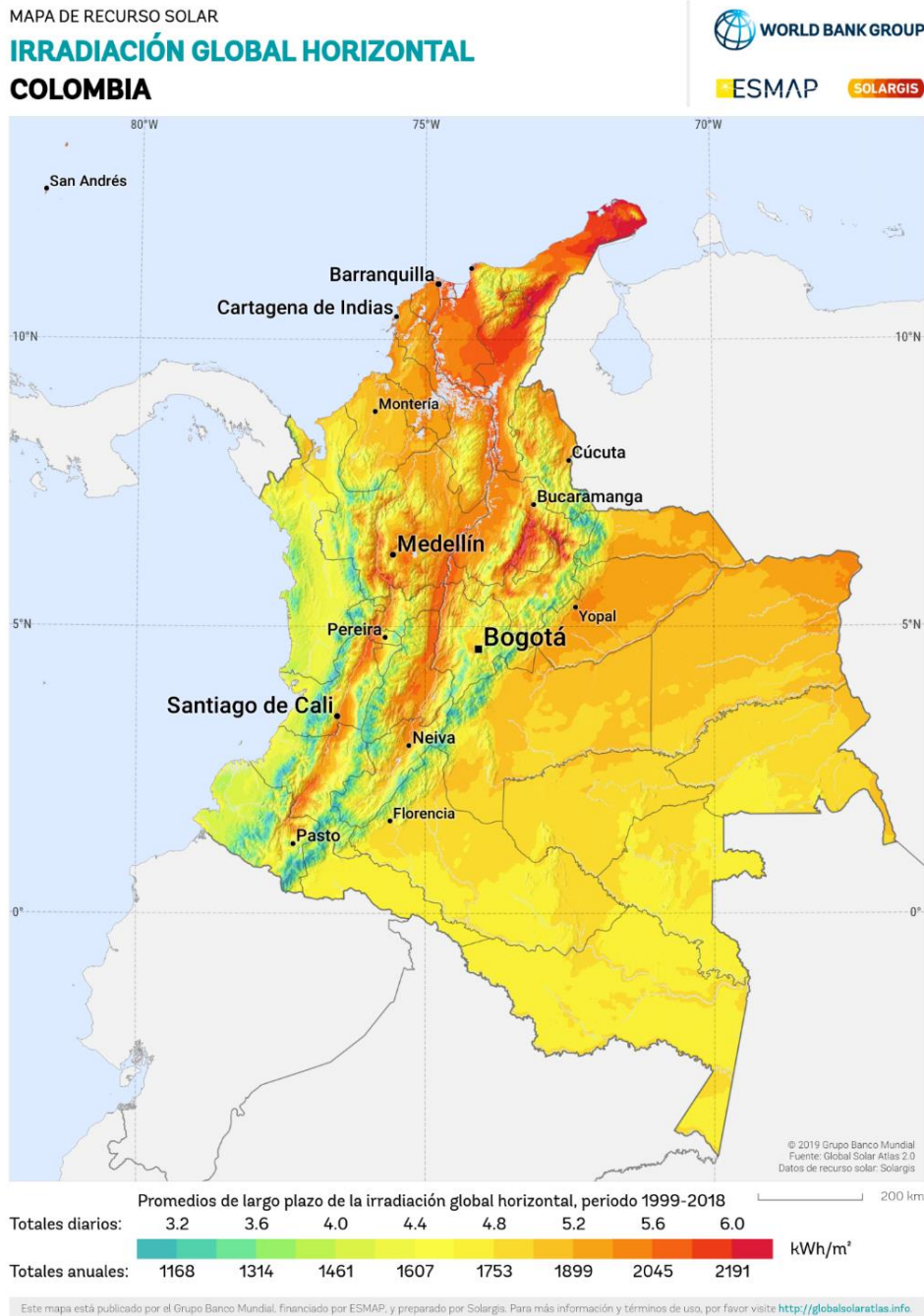


Figura 2-5. Mapa de irradiación promedio en Colombia.

Fuente: World Bank Group, 2019.

2.3.2. Método de aprovechamiento energético.

El efecto invernadero ocurre gracias a la atmósfera del planeta. En una primera instancia, la atmósfera es una barrera semitransparente ante la radiación solar o de onda corta, es decir, deja pasar la mayor parte de la radiación hacia la superficie terrestre, una vez la superficie se calienta debido a la incidencia de la radiación, emite radiación infrarroja o de onda larga hacia el espacio. La atmósfera transparente a la radiación solar es también, a su vez, opaca ante la radiación infrarroja de onda larga, por lo que absorbe y refleja una gran parte de esta radiación, de nuevo hacia la superficie (Gomajoa, 2016), por lo que se almacena calor en el planeta.

Este fenómeno ocurre a menor escala en un invernadero (Figura 2-6) y en un secador solar térmico, en donde la cubierta actúa como atmósfera y la parte interior almacena calor de manera similar (Prakash & Kumar, 2014).

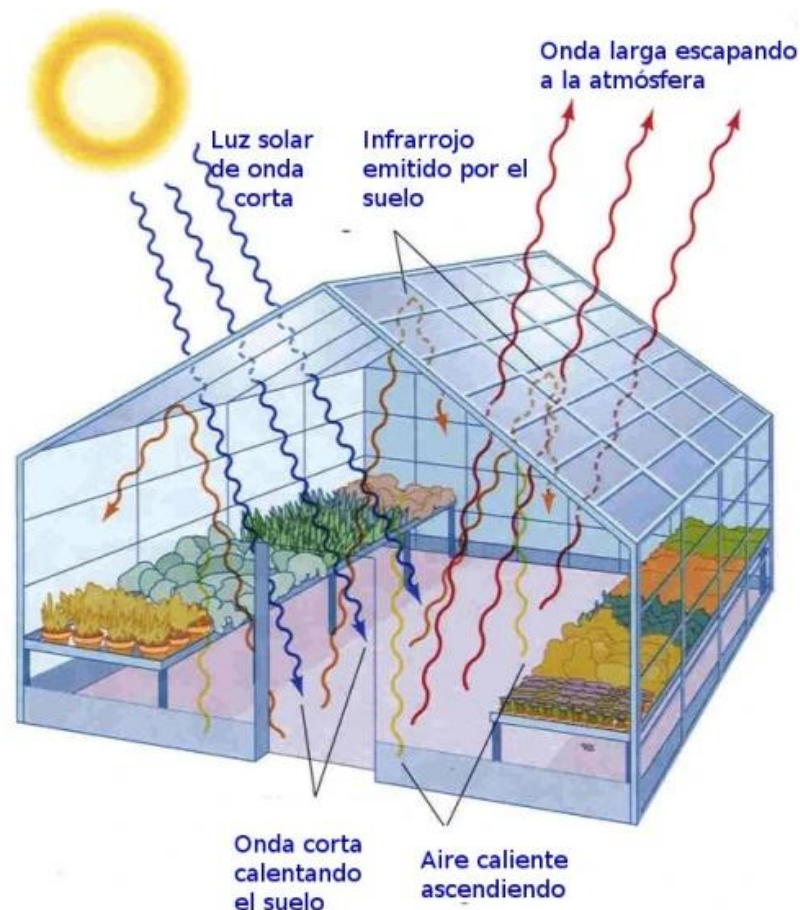


Figura 2-6. Captación de energía solar en un invernadero.

Fuente: Pedro, 2018.

2.4. Tipos de secado solar

2.4.1. Secado solar natural tradicional o al aire libre

Consiste en esparcir el producto sobre el terreno o una superficie, en la cual el producto recibe exposición directa de la radiación solar. Debido a esta exposición se pueden ver afectados parámetros de calidad de los productos, como el color o los valores nutritivos, afectación asociada principalmente con la acción de la radiación ultravioleta (Condori, 2016). Otras desventajas que posee este método son la contaminación por polvos externos, ataque de animales como insectos, roedores, pájaros, deficiencia o exceso de secado de los productos, secado no uniforme, entre otros. Además, requiere de grandes áreas y es un proceso muy lento (Ramana, 2009; Guzman et al., 2020). Se estima que las pérdidas de producto en este método de secado se encuentran entre el 30% y 40%, principalmente debido a que no existe un control directo sobre las condiciones de secado y su variabilidad, especialmente en regiones húmedas tropicales (Bayona, 2011). Los productos secados mediante este método, generalmente incumplen estándares de calidad que afectan su comercialización (Pava, 2016).

2.4.2. Secado solar térmico

Se basa en calentar un medio, generalmente aire, por medio de la captación de la radiación solar, lo que adecua sus condiciones, para hacerla pasar sobre o a través de un producto con el objetivo de remover la humedad (Ramana, 2009; Guzmán et al., 2020). El secado solar térmico requiere cierto nivel de aislamiento de las condiciones ambientales, con el fin de conservar en el tiempo las condiciones de temperatura y humedad, sin embargo, debe permitir el constante movimiento y renovación del aire (Blanco & Valldcabres, 2016).

2.4.2.1. Clasificación de secadores solares térmicos

Los secadores solares se clasifican generalmente por medio de dos parámetros, la naturaleza del movimiento del aire o tipo de convección y la forma de incidencia o captación de radiación solar, como se observa en la Figura 2-7.

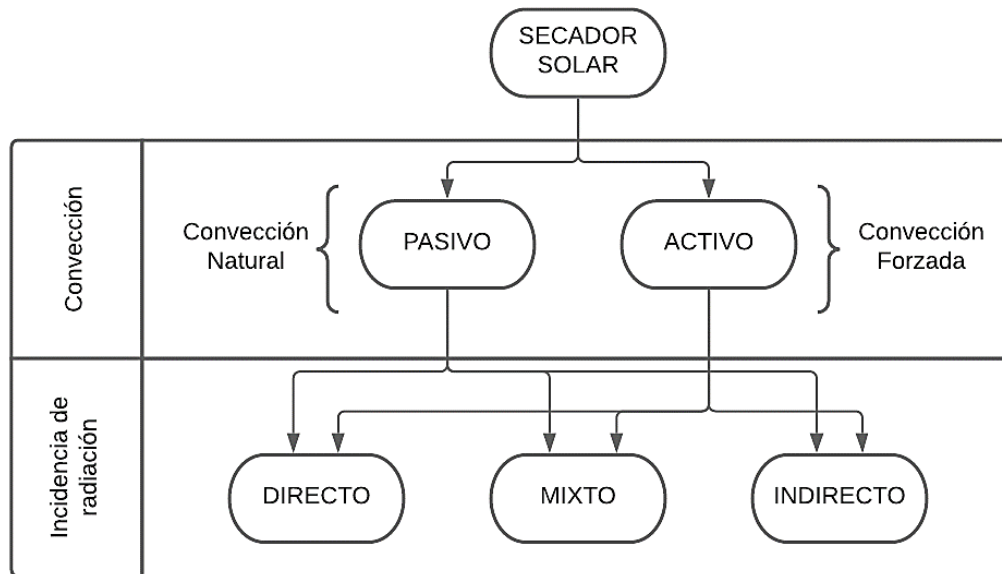


Figura 2-7. Clasificación general de secadores solares.

Fuente: Bayona, 2011.

2.4.2.1.1. Clasificación según el tipo de convección

La convección es un proceso de transferencia de calor que se realiza entre dos sustancias, esta transferencia se realiza cuando hay una diferencia de temperatura entre ellas (Aguilar, 2020). Esta transferencia se puede dar de forma forzada, cuando una o las dos sustancias obtienen cierta velocidad, lo que acelera el proceso, de lo contrario si las sustancias no poseen velocidad o muy poca, se denomina convección natural (Ekechukwu & Norton, 1999).

- a) **Pasivo:** Se denomina secador solar pasivo a aquel que se caracteriza por realizar el proceso de secado por medio de la convección natural (Bayona, 2011), es decir, el movimiento del aire se debe únicamente a la diferencia de densidades del aire generada por las diferencias de temperatura en el secador (García, 2011). Debido al tipo de circulación de aire, los secadores de menor tamaño son más eficientes, debido a que a mayor tamaño de la cámara de secado o colector se reduce la velocidad del flujo generado por la convección natural (Rodríguez, 2016), además, estos secadores pueden presentar problemas durante la noche y en tiempo nublado, ya que se detiene la circulación del aire, lo que puede provocar deterioro del producto (Bayona, 2011).

- b) Activo:** Se denomina secador solar activo a aquel que induce la circulación del aire a través del colector y/o cámara de secado mediante un ventilador, lo que permite que el proceso de secado se base en la convección forzada (Blanco & Valldecabres, 2016). Tener control sobre el flujo de aire y caudal constante puede disminuir hasta en un 50% el tiempo de secado, aumentar la capacidad de secado y mejorar la calidad del producto seco, al compararlo con un secador solar pasivo (Bayona, 2011; García, 2011). La eficiencia de este secador depende del dimensionamiento previo debido a que un mayor tamaño requiere un mayor caudal de aire. El hecho de que se requiera una fuente de energía eléctrica para el funcionamiento del ventilador supone una desventaja para su implementación, especialmente en zonas rurales, sin embargo, esto se puede solucionar por medio de un módulo solar que proporcione dicha energía (Rodríguez, 2016).

Los secadores solares pasivos y activos pueden subdividirse a su vez, de acuerdo con la manera en que incide la radiación y es captada la energía térmica; según esta clasificación pueden ser directos, indirectos o mixtos (Bayona, 2011).

2.4.2.1.2. Clasificación según la incidencia de la radiación

- a) Directo:** Se considera secador solar directo a aquel en el que la cámara de secado en donde se encuentra el producto está expuesta a la radiación solar y es donde se capta la radiación solar para su aprovechamiento. Aunque la incidencia directa de la radiación solar sobre el producto mejore el aprovechamiento de la energía, es difícil controlar la sobreexposición lo que puede generar pérdida de calidad (García, 2011; Blanco & Valldecabres, 2016). En la Figura 2-8, se observan configuraciones o diseños comunes para secadores solares directos activos y pasivos.

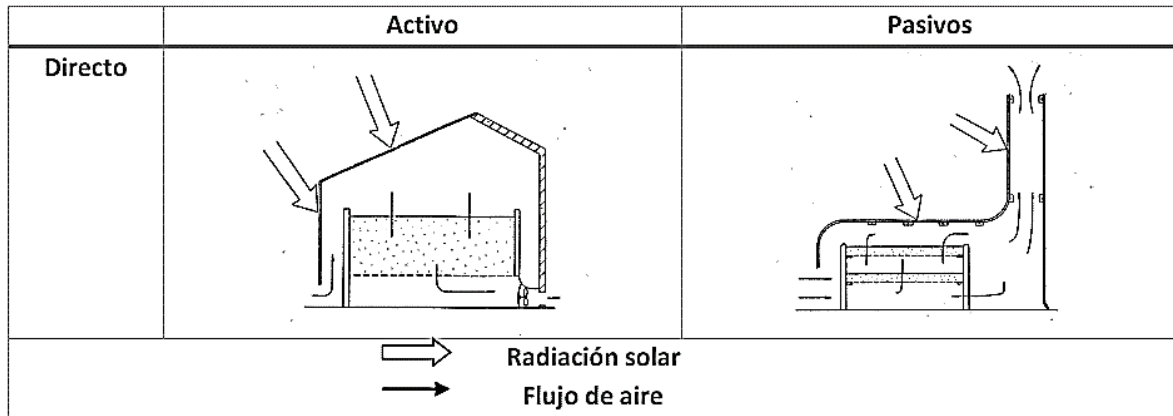


Figura 2-8. Configuraciones comunes de secadores directos activos y pasivos.

Fuente: Ekechukwu & Norton, 1999.

b) Mixto: La capacidad y eficiencia de los secadores solares directos puede mejorar con la incorporación de un colector solar debido al aumento del flujo de aire (Bayona, 2011). Si la cámara de secado y el colector reciben y aprovechan la radiación del sol directamente, se denomina un secador solar mixto. Su diseño permite captar una mayor cantidad de radiación debido a que posee mayor área de incidencia que otros tipos de secadores, sin embargo, la sobreexposición de los productos y la temperatura son parámetros difíciles de controlar. Además, al necesitar un colector, su implementación conlleva un precio más elevado a comparación de los secadores directos (García, 2011). En la Figura 2-9, se observan configuraciones o diseños comunes para secadores solares mixtos activos y pasivos.

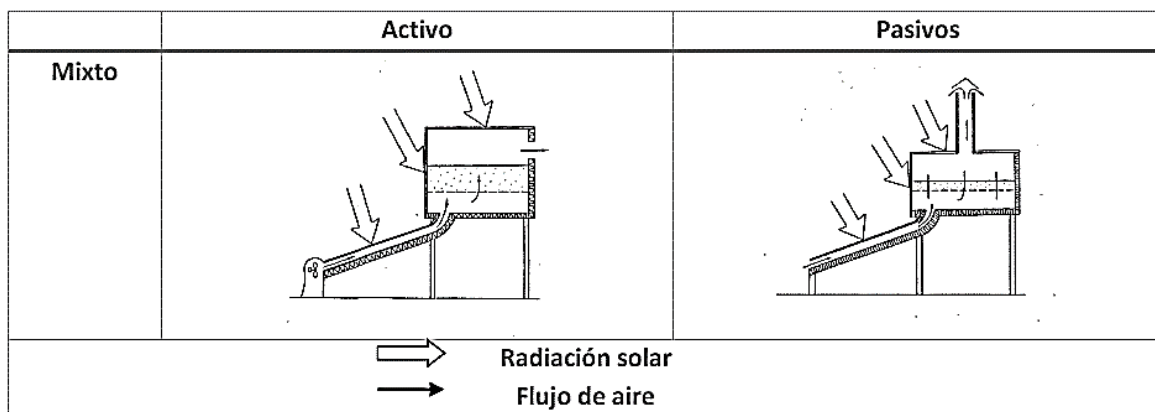


Figura 2-9. Configuraciones comunes de secadores mixtos activos y pasivos.

Fuente: Ekechukwu & Norton, 1999.

c) **Indirecto:** Se denomina secador solar indirecto a aquel que protege el producto que se encuentra en la cámara de secado de la exposición directa de la radiación solar, por lo que debe tener un colector que aproveche la energía de la radiación solar y caliente el aire para que pase por la cámara de secado (Bayona, 2011). A diferencia de los secadores directos y mixtos, protegen el producto de las consecuencias generadas por la incidencia directa de la radiación solar (García, 2011). En la Figura 2-10, se observan configuraciones o diseños comunes para secadores solares indirectos activos y pasivos.

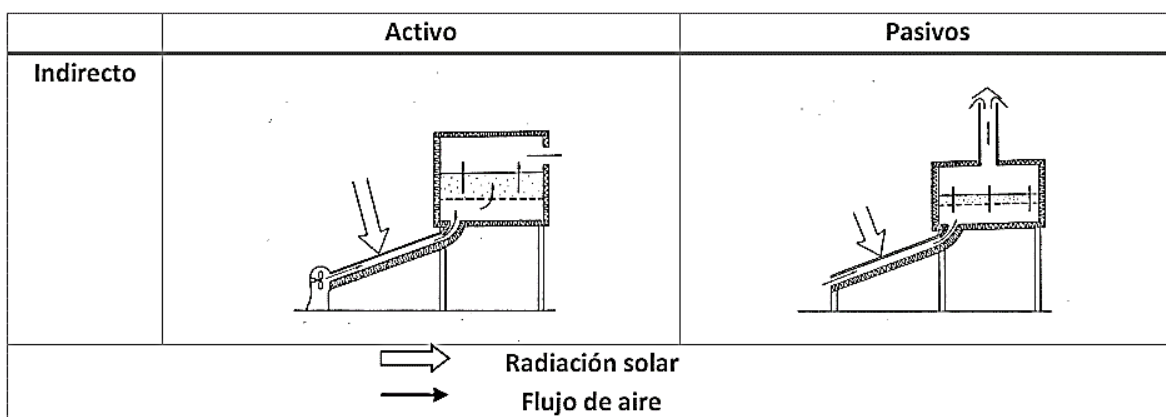


Figura 2-10. Configuraciones comunes de secadores indirectos activos y pasivos.

Fuente: Ekechukwu & Norton, 1999.

2.5. Componentes de un secador solar

Dependiendo del tipo de secador solar pueden variar sus componentes, su naturaleza y complejidad. A continuación, se enuncian los diferentes componentes, sus tipos y requerimientos.

2.5.1. Cámara o torre de secado

Es el componente principal de cada secador solar, es una estructura en la cual se ubica el producto para su secado. La estructura puede tener distintas formas como cajón, carpa, gabinete, entre otros, pero debe asegurar las siguientes características (Bayona, 2011; García, 2011; García et al., 2012; Blanco & Valdecabres, 2016):

- Debe proteger al producto de las condiciones y fenómenos ambientales.
- Debe asegurar una adecuada renovación y circulación del aire a través del producto y toda la estructura.
- Debe contar con un acceso adecuado y suficientemente grande que permita llenar y vaciar fácilmente la cámara.
- Debe contar con una estructura de soporte que permita una disposición adecuada del producto, como mallas o bandejas. Estas pueden permitir el paso del aire a través de ellas o no, dependiendo de la naturaleza del producto y principalmente de la configuración de circulación del aire requerida, como se observa en la Figura 11. Se recomienda que su tamaño y peso faciliten su manipulación. (García et al., 2012).

A continuación, en la Figura 2-11, se muestran las configuraciones comúnmente usadas en la cámara de secado en función del flujo del aire.

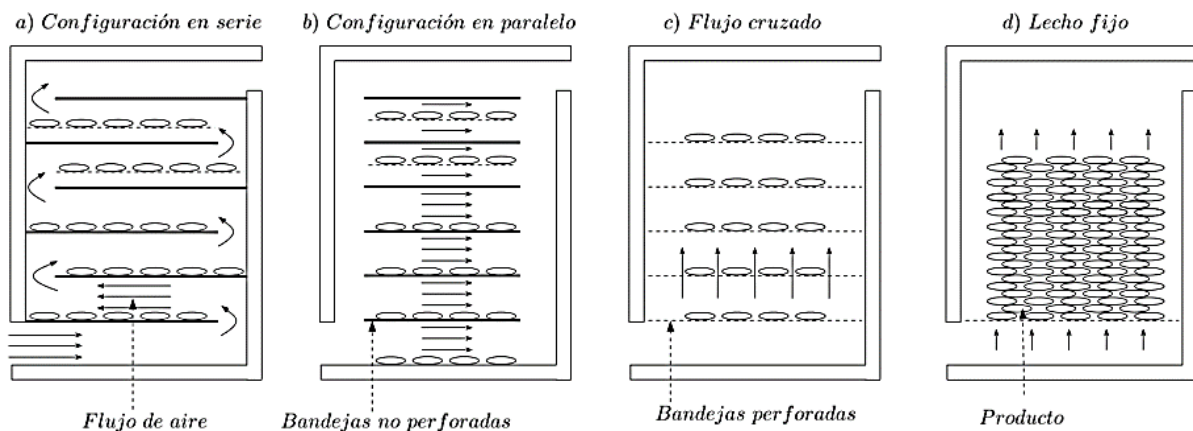


Figura 2-11. Configuraciones comunes de la cámara de secado en función del flujo del aire.

Fuente: Blanco & Valldecabres, 2016.

Adicionalmente, hay parámetros o características que pueden ser opcionales de acuerdo con el tipo de secador y su complejidad como, por ejemplo:

- a) **Chimenea:** al agregar una chimenea a la cámara de secado, se mejora el flujo de aire, velocidad y renovación de este, debido a la diferencia de presión generada por la altura de salida, además, su exterior es típicamente negro para aprovechar la radiación solar, calentar el aire y favorecer su ascensión por densidad (Bayona, 2011; García, 2011; Blanco & Valldecabres, 2016).
- b) **Elementos o modificaciones para conservar el calor:** Se pueden utilizar elementos o materiales de almacenamiento energético con el fin de captar, conservar y almacenar el calor generado en los periodos pico de incidencia de radiación para aprovecharlo en las horas en las que la radiación es muy poca o nula, generalmente en las noches (Agrawal & Sarviya, 2016). Estos materiales o modificaciones se utilizan y recomiendan especialmente para secadores solares pasivos directos, los ejemplos más comunes de modificaciones son superficies rugosas, superficies pintadas de negro y materiales dispuestos entre la entrada del aire y el producto como rocas, parafina, grasa entre otros materiales de diferente naturaleza que capten, almacenen y liberen el calor.
- c) **Materiales de las paredes de la cámara de secado:** Estos materiales pueden ser de diversos tipos, teniendo en cuenta si el diseño permite o no una incidencia directa de radiación solar sobre el producto presente en la cámara de secado. Para proteger el producto de la radiación solar se utilizan materiales opacos, de baja transmisión y bajo almacenamiento térmico, principalmente madera o plásticos rígidos densos, con un adecuado aislamiento (García, 2011).
- d) **Materiales transparentes:** son utilizados cuando se requiere una incidencia total o parcial de la radiación. Generalmente se utilizan distintos tipos de plásticos y vidrio. Los plásticos dejan pasar cierto porcentaje de la radiación de acuerdo con sus compuestos y filtros, aunque poseen una durabilidad reducida y un precio alto, poseen propiedades mecánicas, densidad y peso convenientes y manejables (Martínez, 2008). El vidrio es un material no combustible; mantiene sus propiedades iniciales en el tiempo y solo requiere una limpieza periódica; su manejo requiere cuidado al ser un material frágil y pesado; presenta una transmisión óptica y térmica óptima y es opaco a la radiación UV (Fontal et al., 2005); es un material transparente a la radiación infrarroja de onda corta o cercana

(NIR), pero es opaco a la radiación infrarroja térmica de onda larga o lejana (FIR), que resulta de la emisión radiante de materiales calientes, lo que permite la acumulación de calor (Pearson et al., 2009; Carmona, 2013; Zorzano, 2015).

2.5.2. Colector solar

Es una estructura cuyo fin es recibir la radiación solar, captarla y transformarla en energía térmica para calentar y disminuir la humedad relativa del aire o medio que circula dentro, así el aire circula de manera pasiva o activa a través del secador para retirar la humedad del producto dispuesto en él (Bayona, 2011; García et al., 2012; Benítez et al., 2017; Escobar, 2017).

El colector consta de cubierta, placa o superficie absorbente, material aislante y aperturas para la circulación de aire (Blanco & Valdecabres, 2016; Roche et al., 2017), a continuación, se explican las características y funcionalidad de cada componente:

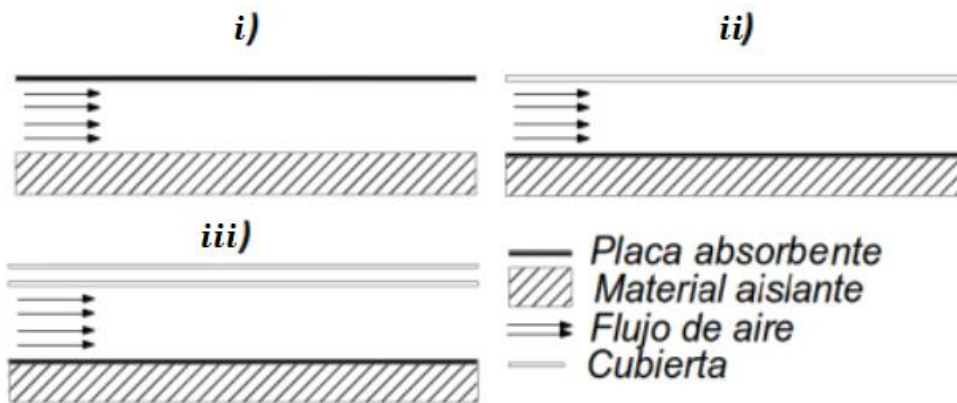
- a) **Cubierta:** Material que permite el paso de la radiación solar, pero evita la salida de radiación térmica desde el interior para aumentar la temperatura. Se pueden implementar los mismos materiales transparentes a la radiación solar que se utilizan para recubrir las cámaras de secado (vidrio o plástico).
- b) **Placa o superficie absorbente:** Superficie o materiales que captan la radiación solar, la cual es transformada en energía térmica y transferida por convección al aire dentro del colector (Escobar, 2017; Iglesias et al., 2017). El uso de materiales de elevado almacenamiento térmico o elevada capacidad calorífica mejoran la eficiencia del secador solar en horas en las que la radiación solar es poca o nula lo que ocurre generalmente en las noches, pero son materiales que poseen un mayor peso, por lo que la estructura del colector debe ser más resistente, así mismo, se aumenta el costo de fabricación (García, 2011; Villalba, 2014; Roche et al., 2017).
- c) **Aperturas para la circulación de aire:** Orificios que permiten la entrada y salida de aire del colector. En la apertura de entrada se puede instalar un ventilador en el caso de un secador solar activo, además, se recomienda la instalación de una maya para evitar la entrada de insectos, desechos o partículas.

- d) **Material aislante:** Principalmente usado en la estructura del colector con el objetivo de evitar las pérdidas de calor hacia el ambiente.

2.5.2.1. Clasificación de colectores solares

A continuación, se presentan las diferentes clasificaciones de colectores solares, según el número de cubiertas, circulación de aire con respecto a la placa absorbente y el tipo de placa absorbente (Blanco & Valdecabres, 2016).

- a) **Según el número de cubiertas:** El colector solar puede no tener cubierta, tener una o varias (Figura 2-12). Los colectores sin cubierta son más económicos, pero presentan una menor eficiencia; los colectores con una sola cubierta son más comunes; colectores con múltiples cubiertas presentan un mejor almacenamiento de radiación térmica, debido a que hay más material opaco a esta, sin embargo, pueden aumentar las pérdidas ópticas de radiación ya que la reflectancia del colector puede aumentar (García, 2011).



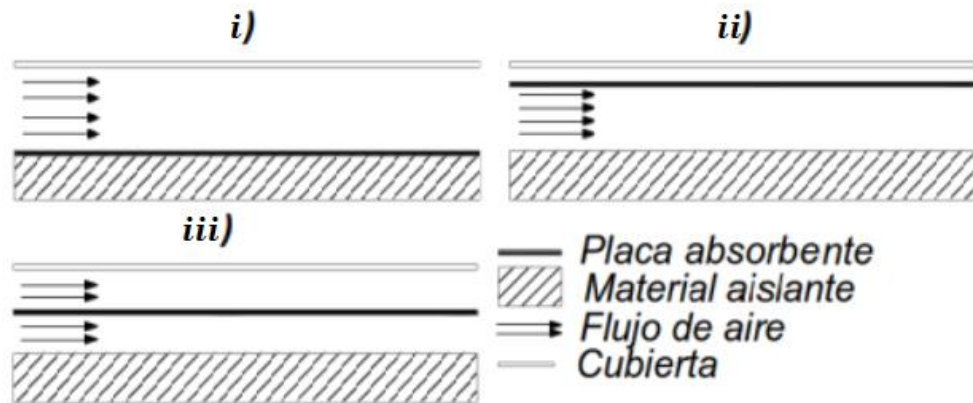
i) colector sin cubierta, ii) colector con una cubierta, iii) colector con múltiples cubiertas.

Figura 2-12. Clasificación de colectores solares según el número de cubiertas.

Fuente: Blanco & Valdecabres, 2016.

- b) **Según la circulación de aire con respecto a la placa absorbente:** Como se observa en la Figura 2-13, el colector solar puede tener circulación de aire sobre la placa absorbente (paso frontal), bajo la placa absorbente (paso trasero) y de ambas (placa suspendida) (García, 2011; García et al., 2012). Los colectores de paso frontal y trasero son considerados colectores de canal simple. El colector de

paso frontal es la configuración más común, debido a que son baratos y sencillos de fabricar. El colector de paso trasero es una configuración que mejora el aislamiento de la parte superior debido a la capa de aire quieto entre la cubierta y la placa, se desempeña de forma óptima en secadores solares activos, en secadores solares pasivos los colectores de paso frontal presentan mejores eficiencias. El colector de placa suspendida proporciona mayores temperaturas de aire debido a que el área de transferencia efectiva de calor es mayor (García, 2011).

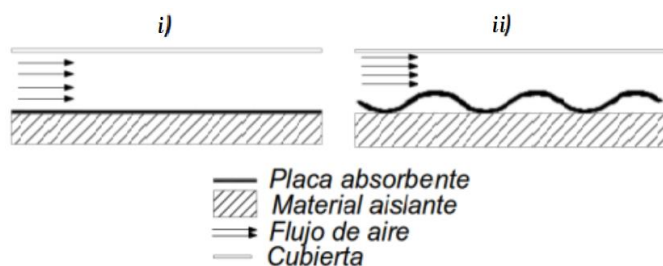


i) colector de paso frontal, ii) colector de paso trasero, iii) colector de placa suspendida.

Figura 2-13. Clasificación de colectores solares según la circulación de aire con respecto a la placa absorbente.

Fuente: Blanco & Valdecabres, 2016.

c) Según el tipo de placa absorbente: La placa absorbente generalmente es plana o corrugada, como se observa en la Figura 2-14. Los colectores de placa plana son los más sencillos de fabricar y en términos de costos, los más económicos, sin embargo, una superficie corrugada aumenta la superficie de absorción de radiación solar y del mismo modo, aumenta el área de transferencia efectiva de calor, también aumenta la turbulencia del flujo, lo que aumenta los coeficientes de transferencia por convección, por lo que presentan mayores eficiencias. El carácter corrugado de una superficie puede ser tan simple como ondulaciones o corrugaciones en V, o tan complejo como realizar un diseño de aletas que mejore la transferencia de calor (García, 2011; García et al., 2012).



i) placa plana, ii) placa corrugada.

Figura 2-14. Clasificación de colectores solares según el tipo de placa absorbente. Fuente: Blanco & Valdecabres, 2016.

2.5.3. Elementos auxiliares

Debido a que el principio de funcionamiento es relativamente sencillo, los equipos pueden dar resultados satisfactorios con muy pocos componentes como la cámara de secado y el colector. Sin embargo, hay una serie de equipos y elementos auxiliares que pueden mejorar la eficiencia del proceso y su control (García et al., 2012). Cabe aclarar que cada adición aumenta costos tanto en infraestructura como en requerimientos energéticos (Blanco & Valdecabres, 2016).

- a) **Ventiladores o extractores:** Estos equipos le dan a un secador solar la denominación de “Activo”. Se debe tener en cuenta que su implementación requiere la presencia de alguna fuente energética cercana, de lo contrario se recomienda el uso de un módulo fotovoltaico que alimente el ventilador (Villalba, 2014). Con la implementación de este módulo se elimina la dependencia de una fuente de energía eléctrica (Gutierrez et al., 2012; Cahahuanca et al., 2020), además se aumenta la autonomía del ventilador. Los módulos fotovoltaicos generan corriente en función de la intensidad de la radiación incidente, por lo que el caudal de aire es mayor a mayor intensidad, lo que favorece la estabilidad en la temperatura durante el día.
- b) **Materiales de almacenamiento térmico:** Aunque ya ha sido mencionado brevemente este tema en la sección de cámara de secado y colector solar, se tiene en cuenta en esta sección debido a que son materiales de implementación opcional, que pueden generar aumento de la eficiencia del proceso, pero conlleva un aumento en los costos, tanto de fabricación como de mantenimiento.

- c) **Filtros o materiales desecantes:** Cuando el aire del ambiente presenta condiciones como alta humedad o presencia de partículas, se pueden implementar una serie de filtros y materiales desecantes para mejorar las condiciones del aire que va a circular dentro del secador solar. Debido a que estos elementos producen una pérdida de carga alta su implementación debe realizarse en compañía de ventilación de una potencia más alta a la de secadores solares activos convencionales (Blanco & Valldecabres, 2016).
- d) **Sistema o elementos de monitoreo y control:** Son equipos que se implementan con el objetivo de registrar las condiciones presentes dentro y fuera del secador y en determinados casos, controlar estas condiciones (Benítez et al., 2017). Aquellos parámetros que pueden ser monitoreados y controlados para optimizar o modelar el proceso de secado son la irradiación solar, el caudal del aire que atraviesa el secador, la temperatura y humedad relativa del aire dentro y fuera del secador, la temperatura y humedad del producto. Los diferentes equipos de monitoreo tienen cierta autonomía que se debe tener en cuenta, pero la implementación de sistemas de control conlleva un mayor requerimiento energético y mayor inversión. Dentro de los implementos de control se pueden utilizar fuentes auxiliares de calor como resistencias eléctricas o equipos de combustión (Cajahuanca et al., 2020). Sin embargo, si su implementación y uso es estrictamente para suplir el requerimiento de temperatura, cuando las condiciones de irradiación solar no sean suficientes, no afecta la denominación de secador solar del equipo en el que se implemente (Villalba, 2014).

2.6. Parámetros que influyen en el diseño de un secador solar

El secado solar térmico presenta diversidad de configuraciones y posibilidades de diseño que lo hace un método de acondicionamiento de alimentos muy versátil. Un diseño y dimensionamiento adecuado permite optimizar el volumen de producto acondicionado y su calidad, minimizando tiempos de secado y pérdidas de producto (Blanco & Valldecabres, 2016; Iglesias et al., 2017; Masías, 2019; Largo, 2020). Debido a la

variedad y diversidad de condiciones ambientales, productos y recursos, hasta el momento no existe algún tipo de norma o estandarización internacional para la implementación de secadores solares.

A continuación, en el numeral 2.6.1, se presentan una serie de parámetros recomendados para evaluar, seleccionar y dimensionar la opción óptima de secado solar para un lugar determinado (García et al., 2012; Visavale, 2012; Iglesias et al., 2017).

2.6.1. Espacio y condiciones físicas disponibles para la implementación del secado solar

La instalación de los equipos debe hacerse en un lugar central y contiguo a los lugares donde se realizan actividades previas y sucesivas como la producción y el almacenamiento. Además, debe contar con vías de acceso en condiciones adecuadas para la disposición y manejo del producto. Si se requiere, debe tener disponibilidad de energía eléctrica, lo que no sería necesario si se implementan células fotovoltaicas. El sitio disponible no debe presentar olores fuertes o gases de combustión producidos por algún proceso o carretera. El espacio disponible es limitante ante la posible implementación de colectores solares, debido a que es un elemento que requiere un área considerable, además, este espacio también condiciona el tamaño y configuración de la cámara de secado, especialmente si se considera un secador directo el cual requiere que el producto sea dispuesto en una mayor área superficial. El espacio, en lo posible, debe estar en una zona abierta, sin la presencia de árboles o construcciones que puedan afectar la circulación de corrientes de aire o generar sombra (Benítez et al., 2017).

2.6.2. Producto y cantidad disponible

Determinar la capacidad que debe tener un secador solar es de vital importancia ya que en temporadas o épocas de cosecha suele presentarse un elevado requerimiento de acondicionamiento, el secador solar debe tener la capacidad para manejar, en lo posible

la totalidad del producto. También se debe tener en cuenta que algunos productos requieren una mayor rapidez de acondicionamiento y que otros pueden permitirse estar en condiciones naturales húmedas por un tiempo (García et al., 2012; Iglesias et al., 2017; Roche et al., 2017; Masías, 2019; Largo, 2020).

El producto que se va a disponer para su acondicionamiento, es el punto de partida de muchas labores culturales y operacionales, inicialmente, la naturaleza del producto y el objetivo que se tiene al acondicionarlo definen si el producto requiere algún proceso anterior al secado (escaldado, cortado, pelado, lavado, entre otros), como es el caso de algunas frutas y verduras que poseen epidermis impermeables que pueden disminuir la velocidad de secado o productos que requieren una determinada forma con un fin comercial. Con una estimación aproximada de la cantidad del producto que se debe secar y con ciertas características físicas, como la densidad aparente y el peso fresco para no incurrir en subestimaciones (Largo, 2020), se calcula el área que se requiere para suplir la necesidad de secado (Villalba, 2014; Masías, 2019).

2.6.3. La naturaleza del producto y el objetivo de su acondicionamiento

El estado inicial o natural del producto o las características en las que se dispone para el proceso de secado, como rodajas, pellets, etc., define si se puede disponer éste en bandejas perforadas que permitan la circulación de aire, siempre y cuando no se genere goteo por exceso de humedad o, pérdida de producto (García et al., 2012; Iglesias et al., 2017).

Mientras que el objetivo del acondicionamiento, es decir, si el producto se seca con fines de consumo propio o con fines comerciales, define en gran medida la operación del secador, ya que puede ser necesario manejar lotes de secado grandes que obtengan al mismo tiempo una cantidad de producto con una humedad determinada, o si se pueden manejar lotes más pequeños y utilizar una sección del secador como pre secado, mientras otro lote obtiene la humedad deseada (Roche et al., 2017).

2.6.4. Condiciones críticas del producto

Hay algunas condiciones o factores que pueden afectar las características fisicoquímicas y nutricionales del producto, si se presentan en valores por fuera de los rangos establecidos (García et al., 2012; Iglesias et al., 2017). Estos factores se indican a continuación:

- a) **Temperatura:** El producto puede presentar deterioro en sus propiedades organolépticas y nutricionales si se expone a temperaturas altas. En la literatura se encuentra información sobre la temperatura crítica de una gran variedad de productos; si se presentan temperaturas superiores a las críticas el diseño del secador solar debe permitir la reducción de la temperatura en su interior (Villalba, 2014). Las temperaturas bajas también pueden afectar el producto teniendo en cuenta que al presentarse estas temperaturas sube la humedad relativa del aire y afecta la velocidad de secado.
- b) **Humedad final:** El secador solar debe proveer las condiciones necesarias para que el producto pueda alcanzar la humedad final requerida para las siguientes etapas de acondicionamiento (Almacenamiento, molienda, transformación del producto, entre otras), en donde idealmente, la a_w esté por debajo de 0.6 (Villalba, 2014, Masías, 2019). Con este parámetro en cuenta se puede definir la eficiencia que el secador debe presentar ante el aprovechamiento de la energía.
- c) **Incidencia de radiación solar:** Los productos pueden ser susceptibles a la incidencia directa de la radiación solar (Cajahuanca et al., 2020; Largo, 2020). Por ejemplo, se ha encontrado que compuestos como el ácido ascórbico y los carotenos son sensibles a esta exposición (Bayona, 2011), también puede afectar el color del producto. Este parámetro define si el secador sea indirecto o directo.
- d) **Propiedades físicas y mecánicas iniciales (Humedad, peso, volumen, densidad, tamaño de partícula, velocidad terminal):** Conocer y analizar estos parámetros es importante debido a que se puede determinar espesor y número de capas, el tipo de flujo y la velocidad del aire que puede presentar la cámara de secado (Ratti, 2009; Villalba, 2014; Iglesias et al., 2017; Masías, 2019). Si se presentan capas muy gruesas, la carga de aire entrante puede ser insuficiente y puede que no logre atravesar el producto, por lo que habría una zona de alta

humedad y sería necesario reducir el espesor de la capa de producto o cambiar el tipo de flujo (Largo, 2020). El peso también define que tan resistente debe ser la estructura para soportar el producto mientras es acondicionado.

- e) **Tiempo de secado:** Esta información es relevante debido a que hay productos que pueden estar en condiciones húmedas por un tiempo prolongado sin afectar significativamente sus características, mientras que, hay productos que necesitan ser acondicionados rápidamente para conservar su calidad (Iglesias et al., 2017; Roche et al., 2017; Cahahuanca et al., 2020). El conocimiento de esta información permite establecer la eficiencia que el secador solar debe ofrecer (Oliveros et al., 2009; Gutierrez et al., 2012; Masías, 2019).

2.6.5. Materiales de construcción

La selección, el diseño y construcción de un secador solar no solo depende del producto, también depende de los materiales que pueden ser dispuestos para su uso. Para esto se deben tener en cuenta los aspectos a seguir (García et al., 2012; Masías, 2019):

- a) **Disponibilidad:** La zona debe contar con disponibilidad del material seleccionado, no sólo para su construcción, sino también para su mantenimiento (Prakash & Kumar, 2014; Masías, 2019; Largo, 2020).
- b) **Precio:** Los materiales utilizados en la construcción deben ser asequibles, de acuerdo con la capacidad económica del productor, para que el acondicionamiento no genere costos unitarios demasiado elevados.
- c) **Características físicas:** El material de construcción debe ser resistente para soportar el peso del producto y la operación (Villalba, 2014; Masías, 2019).
- d) **Propiedades térmicas:** En lo posible debe ser de baja capacidad térmica y aislante, aparte de los materiales destinados a coleccionar y almacenar radiación solar, con el fin de que se encuentre aislado de las condiciones ambientales y para que tenga una mayor eficiencia (Masías, 2019; Largo, 2020).
- e) **Inocuidad:** El material debe brindar cierto nivel de inocuidad para que no afecte la calidad sanitaria de los productos, en lo posible ser de superficie lisa, evitando grietas o corrugaciones en los que se almacene suciedad, además, debe permitir que se le hagan procesos de limpieza sin que afecte sus condiciones físicas.

2.6.6. Mano de obra

El secado solar es un proceso que requiere trabajo y mano de obra en todas sus etapas, desde su construcción, operación durante el secado y procesos posteriores a este (Oliveros et al., 2009; Benítez et al., 2017; Gutierrez et al., 2012; Roche et al., 2017). A continuación, en la Figura 2-15, se pueden observar algunas de las actividades que requieren mano de obra en la implementación de un secador solar:

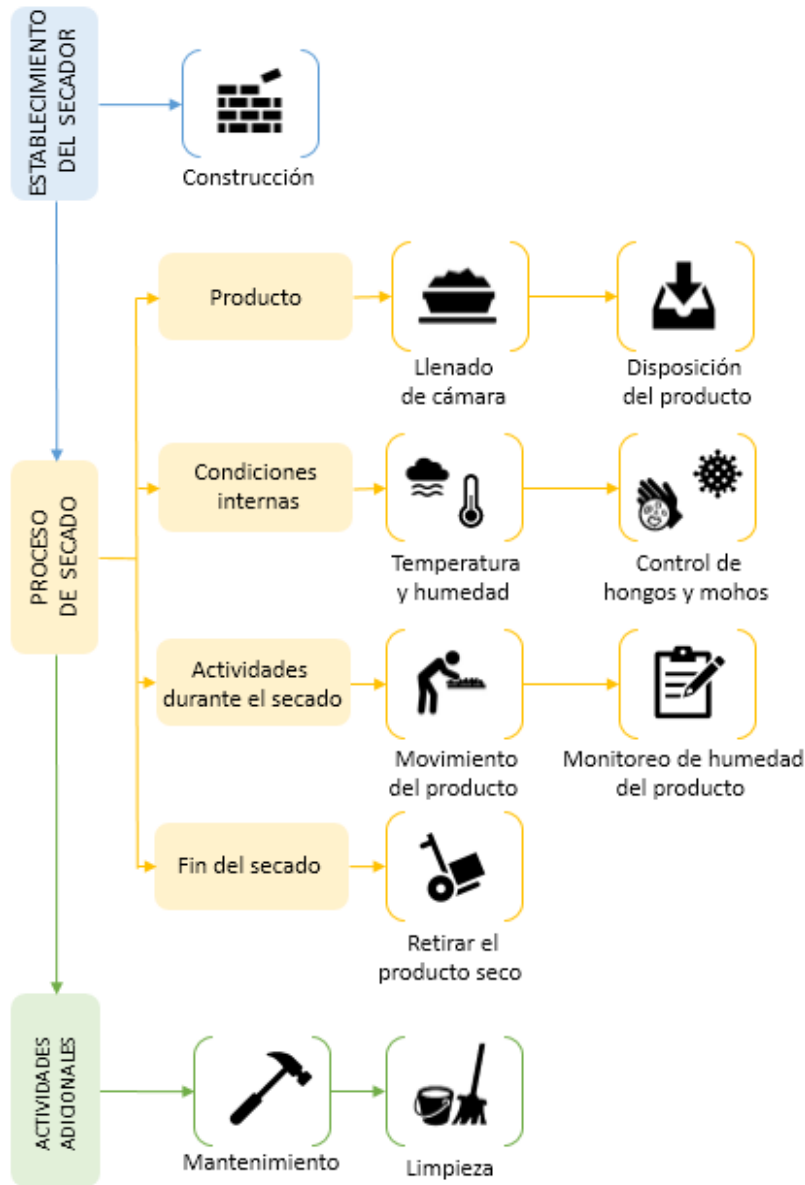


Figura 2-15. Actividades que requieren mano de obra en la implementación de un secador solar.

Fuente: Elaboración propia.

Así mismo, el o los operarios, deben contar con los equipos e instalaciones necesarias para realizar las actividades mencionadas. El acceso al secador y a las diferentes áreas de trabajo debe ser adecuado. Debe contar con condiciones de higiene y salubridad adecuadas para evitar que el producto se contamine, además, el diseño debe ser ergonómico y debe permitir que su operación sea sencilla y no afecte de ninguna manera la integridad o salud del operario (Masías, 2019).

2.6.7. Condiciones ambientales

Las condiciones ambientales y meteorológicas de la zona son un factor determinante en el diseño e implementación de un secador solar (García et al., 2012; Mustaven et al., 2014; Iglesias et al., 2017; Roche et al., 2017; Masías, 2019), de ser posible, se debe contar con un registro previo considerable, para determinar condiciones promedio que se tendrán en cuenta en su diseño. En la operación se recomienda monitorear y registrar las condiciones. A continuación, se enuncian las condiciones más relevantes para el proceso de secado solar:

- a) **Radiación solar:** Una de las características ambientales más relevantes para este secado debido a que es la fuente energética del mismo (Benítez et al., 2017). Tener el conocimiento sobre los valores promedio que se presentan en la zona es importante para determinar requerimientos del colector y sus materiales, así como el recubrimiento o cubierta que se puede utilizar (Prakash & Kumar, 2014; Iglesias et al., 2017; Roche et al., 2017).
- b) **Nubosidad:** La presencia de nubosidad generalizada inhibe la incidencia de radiación solar, especialmente la radiación directa (Roche et al., 2017). En zonas en las que se presenta alta nubosidad se recomienda el uso de vidrio como material transparente para coleccionar la mayor cantidad de radiación difusa.
- c) **Pluviosidad:** Las lluvias generan una disminución en la temperatura y aumento en la humedad del ambiente. En zonas con alta pluviosidad se recomiendan adaptaciones y elementos que mejoren el rendimiento del secador solar y aprovechen al máximo la radiación directa y la difusa (Masías, 2019).
- d) **Altitud:** La altura sobre el nivel del mar se relaciona generalmente con la temperatura, la presión atmosférica y la incidencia de radiación UV. Con la temperatura y la presión atmosférica se tiene una relación inversamente

proporcional, es decir, a mayor altura, menor temperatura y presión atmosférica. Con la incidencia de radiación UV la relación es directamente proporcional, debido a que, a menores alturas, la columna de aire es mayor y la radiación pierde más energía al tener que recorrer más distancia en este medio (Roche et al., 2017).

- e) **Velocidad y dirección del viento:** Este parámetro es importante en el diseño de la implementación de un secador solar debido a que se puede determinar la orientación del secador y tomar decisiones con respecto al proceso de flujo y renovación de aire del secador (Masías, 2019).
- f) **Geografía:** En algunos casos la geografía puede ser partícipe de la nubosidad, pluviosidad y formación de microclimas (Masías, 2019).
- g) **Calidad del aire:** es importante ya que, al ser el medio utilizado para la extracción de humedad del producto, van a estar en contacto todo el tiempo, por lo que, si el aire contiene material particulado o se ha visto contaminado de alguna forma, el riesgo de contaminación del producto es alto (Mustayen et al., 2014). Si se presenta algún tipo de fenómeno que comprometa la calidad del aire ambiental se recomienda la implementación de filtros en la sección de entrada de aire del secador, para mejorar sus condiciones y no afectar el producto.
- h) **Propiedades psicrométricas del aire:** Son propiedades que permiten cuantificar y definir características del aire y su comportamiento ante un posible acondicionamiento. Conocer estas propiedades es necesario para una estimación del tiempo y de la energía requerida en el secado de productos agrícolas (Castro et al. 2010; Soto et al., 2018). A continuación, una breve descripción de las propiedades más importantes:
 - Temperatura: Importante para determinar las condiciones del aire y su capacidad de extracción de humedad de un producto. Su determinación es punto de partida para el diseño del colector y la cantidad de energía que debe proveer al aire (Villalba, 2014; Benítez et al., 2017; Roche et al., 2017; Masías, 2019). Para determinar adecuadamente las propiedades del aire, su energía y capacidad de absorción se deben tener en cuenta la temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo (Castro et al., 2010).

- Humedad relativa: Se usa no solo para el acondicionamiento, sino para el almacenamiento de los productos (Benítez et al., 2017; Masías, 2019). Se refiere a la relación entre la cantidad de humedad que contiene el aire y la cantidad de humedad máxima que el aire puede contener a la misma temperatura (Castro et al., 2010).
- Presión de vapor de agua: Este parámetro se refiere, en palabras simples, a la capacidad o facilidad que las moléculas del vapor de agua contenido en un volumen de aire tienen para cambiar de estado. Este parámetro, junto con la presión de saturación se relacionan con la humedad relativa (Castro et al., 2010).
- Entalpía: Este es un parámetro que permite cuantificar la energía que posee un volumen de aire y por ende su capacidad de extraer humedad de un producto, se encuentra directamente relacionada con la temperatura de bulbos seco y la humedad relativa (Castro et al., 2010).

2.7. Aspectos para verificar en la operación del secador

Una vez verificados y estudiados los parámetros de diseño anteriormente mencionados, se procede a realizar una selección e implementación del secador solar adecuado. Cuando esto haya ocurrido se recomienda realizar las siguientes pruebas y estudios operacionales, para verificar que el secador cumpla con los requerimientos y condiciones óptimas (Blanco & Valdecabres, 2016).

2.7.1. Capacidad de secado

Se debe realizar un secado inicial en el cual se valide si la capacidad planteada de secado es válida y no afecta el tiempo de secado, la estructura del secador o la calidad del producto. Si la capacidad planteada es insuficiente o en algún momento el requerimiento de producto por acondicionar supera la capacidad del secador, se recomienda implementar otro secador para no sobrecargar el inicial o implementar una actividad de pre-acondicionamiento en condiciones que no afecten el producto; por ejemplo, un secado solar tradicional o un almacenamiento en condiciones controladas (Villalba, 2014).

2.7.2. Humedad relativa del aire que circula a través de la cámara de secado

El aire que se encuentre en la cámara de secado debe tener idealmente una humedad relativa que no supere el 60% para que no inhiba el proceso de secado del producto. Si esta condición no es alcanzada se debe verificar una serie de posibilidades como: La eficiencia térmica del colector o la cámara de secado (Roche et al., 2017); que los componentes del secador se encuentren debidamente aislados de las condiciones ambientales; que la renovación y flujo de aire caliente sea continua o de lo contrario el aire caliente y húmedo no está siendo debidamente extraído (Iglesias et al., 2017; Roche et al., 2017; Largo, 2020).

2.7.3. Temperatura de secado

El aire que entra y permanece en la cámara de secado debe estar entre 10 y 30 °C por encima de la temperatura ambiente, dependiendo de la radiación presente y exceptuando en horas de la noche en las que no hay ningún tipo de radiación solar (Roche et al., 2017). Para promover el proceso de secado durante estos periodos de tiempo, se recomienda el uso de materiales que conserven energía y la liberen en estos tiempos (Cajahuanca et al., 2020).

2.8. Materiales y métodos

A continuación, se describen los materiales y métodos utilizados.

2.8.1. Zona de estudio

Esta investigación se realizó en la Finca “Los Cerezos” ubicada a dos kilómetros del casco urbano del municipio de Viracachá, sobre la vía Viracahca - Soracá en el departamento de Boyacá Colombia a una altura de 2480 msnm. La finca pertenece al señor Baudilio Suarez y su familia, cuya actividad principal es la apicultura, son productores de miel, polen y propóleo principalmente, complementan esto con el cultivo de achira y la preparación de biscochos derivados del almidón de achira, dándoles un valor agregado con productos apícolas.

La zona presenta niveles de pluviosidad que varían entre 900 y 1364 mm/año, con un régimen de lluvias bimodal, en donde se evidencian dos temporadas secas, la primera en los meses de diciembre, enero y febrero, y la segunda temporada de bajas precipitaciones en el mes de septiembre; los meses más críticos de máxima precipitación son mayo, junio y julio (Consortio Río Garagoa, 2017).

Boyacá se caracteriza por presentar variabilidad en cuanto a la radiación solar como se observa en la Figura 2-16, debido a sus condiciones geográficas, por la presencia de montañas y valles, además este departamento se ve influenciado por la zona de confluencia intertropical y vientos húmedos procedentes de Brasil y la Amazonía (Consortio Río Garagoa, 2017), lo que genera aumento en las lluvias y, por ende, la disminución de la radiación, principalmente en la zona sur y occidente.

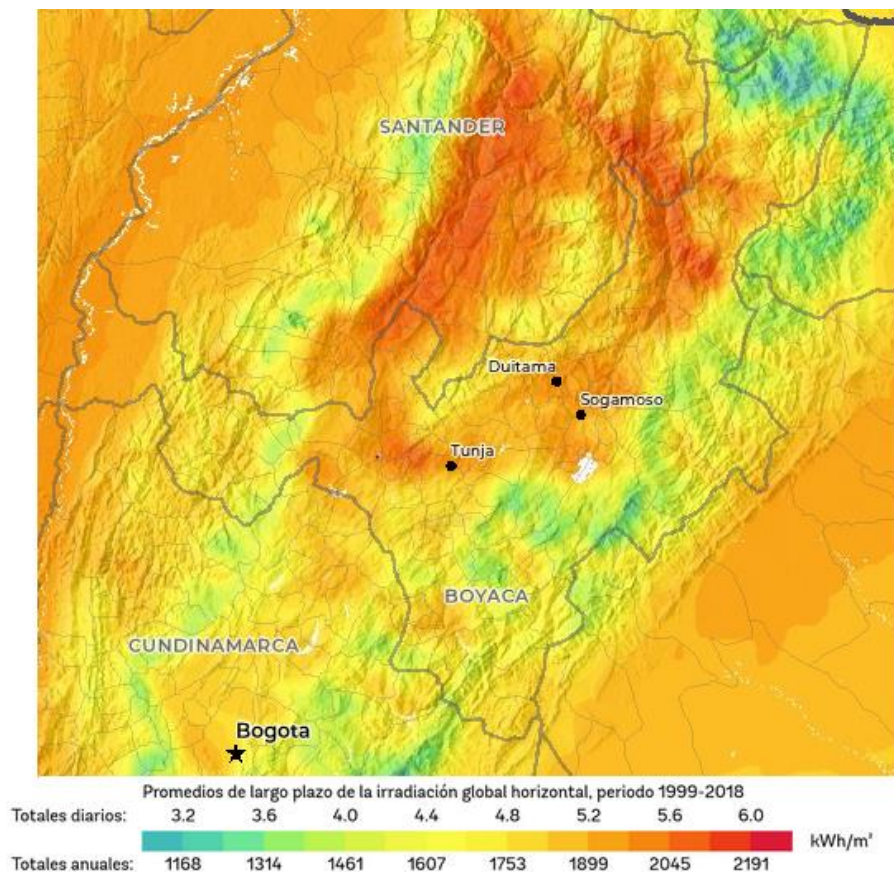


Figura 2-16. Mapa de irradiación promedio en Boyacá.

Fuente: World Bank Group, 2019.

Viracachá se encuentra en la zona norte de la cuenca del Río Garagoa, y está rodeada de formaciones montañosas, lo que protege al municipio de los vientos húmedos de la Amazonía. El municipio cuenta con una temperatura promedio de 14,6°C, humedad relativa de 80,2% y un promedio de irradiación aproximado de 4,6 kWh/m² al día, como se observa en la Figura 2-17. Según varios autores, el nivel de radiación es suficiente para un aprovechamiento térmico o fotovoltaico (Lezcano et al., 2011; Quijano et al., 2012; Gamboa & Hill, 2016; Delgado & Aristizábal, 2017; Luna et al., 2020).

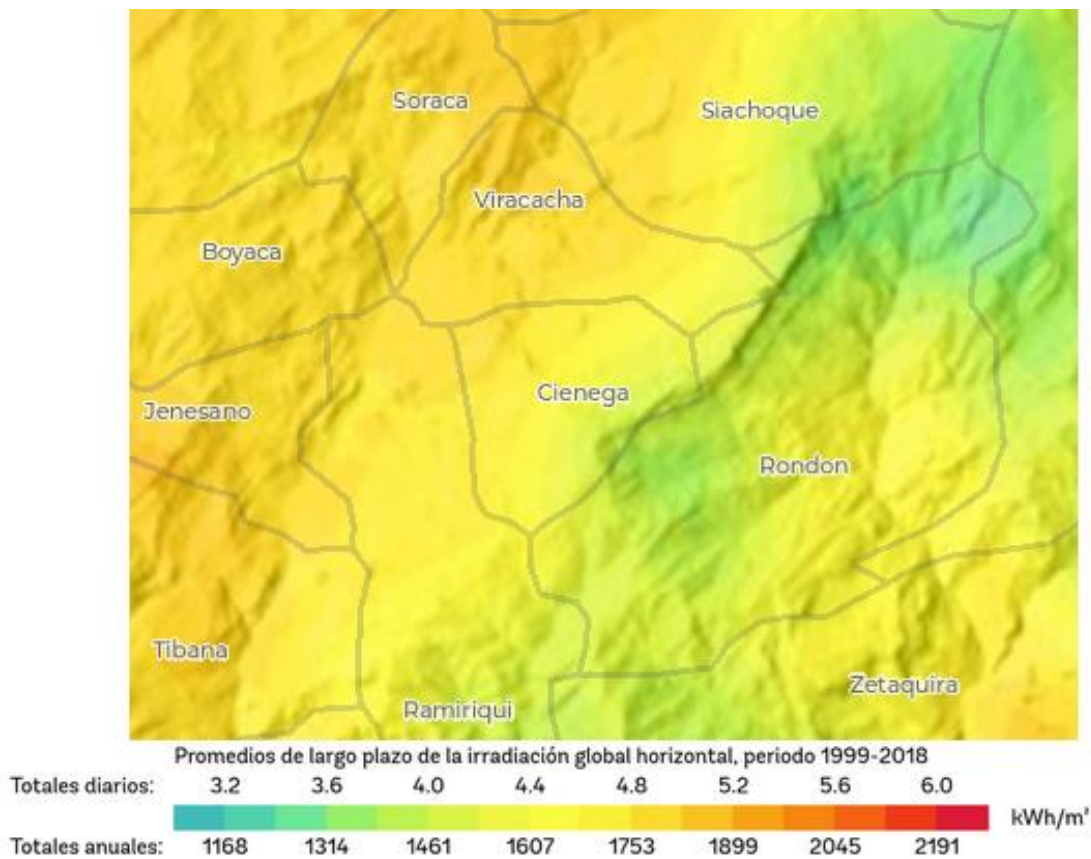


Figura 2-17. Mapa de irradiación promedio en Viracachá municipios vecinos.

Fuente: World Bank Group, 2019.

Además, esta región se caracteriza por presentar un régimen de precipitación monomodal, en donde la época de mayor precipitación se encuentra comprendida entre los meses de marzo y agosto (Consortio Río Garagoa, 2017).

2.8.2. Secadores solares

En la mayoría de los secadores solares, el proceso de secado suele ser similar. Para los secadores evaluados en esta investigación, el proceso que realizan los productores consiste en poner pliegos de papel filtro en las secciones de los secadores en donde se dispone el producto para evitar pérdidas de producto debido al tamaño de partícula. Antes de poner el producto en el papel, se deben ir rompiendo los terrones que se forman en el almidón fresco en su proceso de obtención, esto con el fin de esparcirlo adecuadamente y generar una capa uniforme de aproximadamente 0,03 m de espesor.

Durante el proceso de secado se revuelve el producto aproximadamente cada 2 horas, para aumentar la velocidad de secado y romper terrones que se vayan formado durante el proceso, para que tanto la masa como el proceso de secado sea más uniforme. Ya que por lo general los productores no disponen de tecnologías que ayuden a indicar con más precisión cuando detener el proceso de secado, por experiencia en su labor, lo detienen cuando no observan cambios en la apariencia y la textura de la masa.

Una vez finalizado el proceso de secado, el producto es almacenado en canecas plásticas de cierre hermético para que no se rehidrate y poder conservarlo mientras es transformado en los subproductos deseados.

A continuación, se describen las características generales de los secadores solares usados en esta investigación.

2.8.2.1. Secador solar artesanal

Consiste en una habitación de 8 m x 6 m, la cual tiene paredes en los cuatro costados levantadas 1,5 m desde el suelo, sobre estas paredes cuenta con ventanas para ventilación, pero no cuenta con un sistema de aislamiento necesario para que las condiciones ambientales no afecten las condiciones internas en momentos de baja temperatura y alta humedad relativa, es decir, algunas ventanas faltan y otras están quebradas. Sin embargo, cuenta con una cubierta de policarbonato azul, con su punto más bajo a 2,5 m de altura y el más alto a 3 m, está cubierta le permite almacenar energía

solar y por ende aumentar la temperatura del medio. El producto es dispuesto y extendido sobre lonas en una estructura alta de madera a 1,4 m del suelo, con el propósito de evitar su contaminación y optimizar su manejo, como se observa en la Figura 2-18.

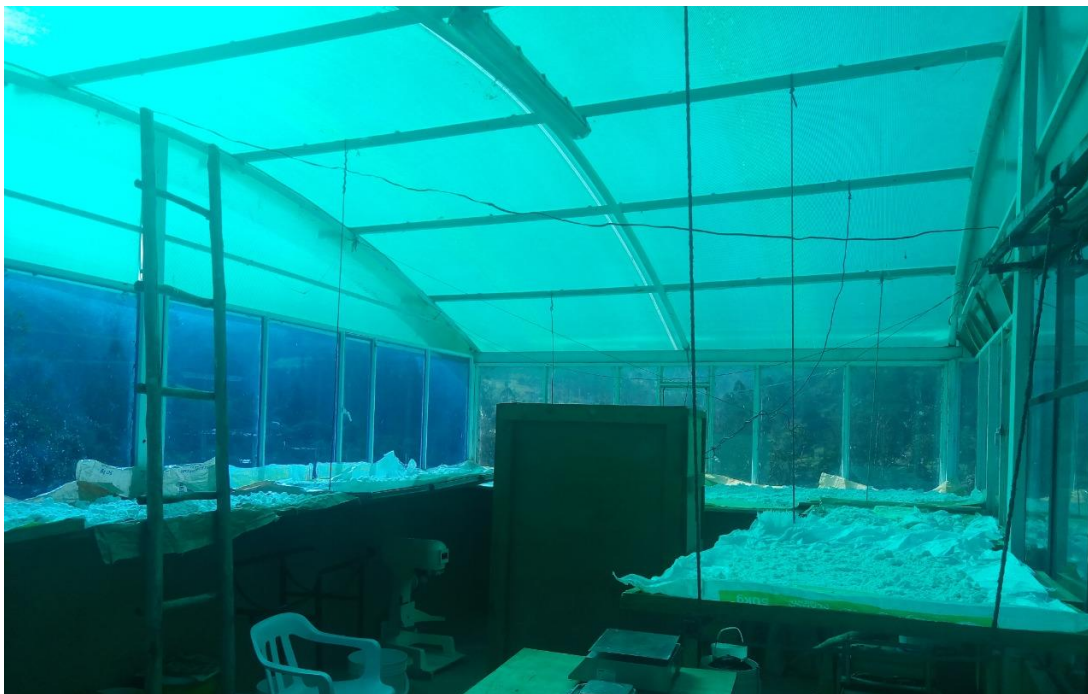


Figura 2-18. Secador solar artesanal utilizado para el secado de almidón de Achira. Fotografía propia del autor.

2.8.2.2. Secador solar tipo armario

El secador solar directo tipo armario está compuesto por una estructura metálica, la cual tiene láminas de vidrio en sus 4 laterales desde una altura de 0,88m desde el suelo y está cubierto también por estas. El piso y las paredes hasta antes de las láminas de vidrio están hechos de bloque de concreto y recubiertos con cerámica negra. Para ubicar el producto dentro, consta de rieles metálicos a 0,88m del suelo para ubicar bandejas microperforadas tipo criba de acero inoxidable con perforaciones de 1,8 mm y espacios de 5 mm entre centros, sobre las cuales se ponen pliegos de papel filtro para colocar el almidón. En la Figura 2-19, se observa un esquema del secador.

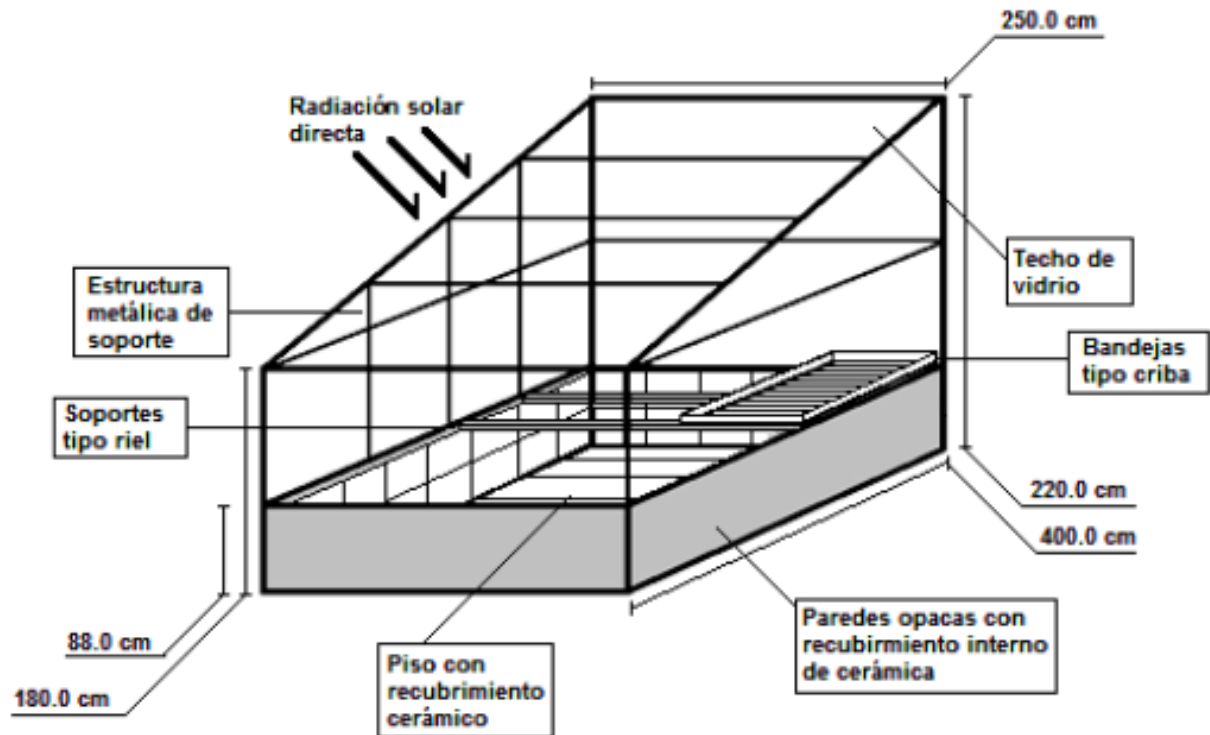


Figura 2-19. Secador solar directo tipo armario.

Fuente: Duran, 2014.

2.8.3. Proceso de secado

La cosecha, procesamiento del almidón de achira y el proceso de secado se realizó en el mes de abril, el cual coincide con la época de mayores precipitaciones en la zona, en dos secadores solares. Se monitoreó la temperatura y humedad relativa tanto del aire dentro de los secadores como de las condiciones ambientales de forma simultánea durante el tiempo de secado. Este monitoreo se realizó por 10 días consecutivos para evaluar el comportamiento en condiciones críticas, en las cuales, la humedad que es retirada del producto afecta las condiciones del aire presente en los secadores.

En los dos secadores, una vez dispuesto el almidón, se colocaron 9 bandejas plásticas de 0,2m x 0,15m, ubicadas uniformemente, en las cuales se dispuso el producto de la misma forma y altura que la muestra general, es decir, con un espesor de capa de aproximadamente 0,03m. Estas bandejas fueron pesadas con una balanza digital Mega 3000 de 0,1 gr de precisión, cada cierto tiempo dependiendo de velocidad de pérdida de

peso, es decir, en la primera etapa en la que la pérdida de peso con respecto al tiempo es más alta, el tiempo fue de 10 minutos aproximadamente, a medida que no se observaron cambios considerables en el peso, se fue aumentando el tiempo de cada medida a 30 y 60 min. El proceso de secado se detuvo cuando 3 medidas consecutivas cada 60 min, fueron iguales.

2.8.4. Variables evaluadas

Se monitorearon solamente la temperatura y humedad relativa dentro y fuera de los secadores, por medio de sensores Sensor Push (Cousins & Sears Creative Technologists, EE. UU.), estos permiten el monitoreo de las variables minuto a minuto, para determinar el comportamiento de cada una de ellas.

2.8.5. Análisis estadístico

El análisis estadístico fue realizado mediante el software RStudio. Primero se verificó si los datos recolectados cumplían con el supuesto de normalidad, por medio de la prueba de Shapiro-Wilk. También se verificó el supuesto de homogeneidad de la varianza por medio de la prueba de Levene. Una vez realizadas las verificaciones de los supuestos, se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA) y una prueba de comparación de tratamientos Tukey al nivel del 5% de significancia para determinar si los parámetros determinados para cada secador presentaron diferencias estadísticas significativas.

2.9. Resultados y análisis

A continuación, se presentan los resultados y análisis obtenidos, del monitoreo de la temperatura y humedad relativa del ambiente y dentro de los dos secadores solares.

2.9.1. Condiciones ambientales

El municipio no cuenta con una estación meteorológica para el monitoreo de las condiciones ambientales, por lo que no hay datos ambientales básicos para analizar el potencial del municipio en cuanto a la implementación de secado solar para productos agrícolas. Aunque existen algunos documentos de la alcaldía de Viracachá que registran algunos datos ambientales, no se tuvieron en cuenta por su antigüedad y carácter puntual.

El Consorcio Río Garagoa (2017), realizó distintos modelos para predecir condiciones ambientales con base a los datos recolectados por las estaciones meteorológicas presentes en la cuenca del Río Garagoa. Para el caso específico de la temperatura desarrollaron un modelo que depende de la altitud. La temperatura promedio obtenida durante la experimentación se aproxima a la temperatura media calculada por el modelo generado para la cuenca del río Garagoa por el Consorcio Río Garagoa (2017).

De acuerdo con los datos obtenidos en esta investigación, las condiciones ambientales durante el tiempo de ensayo fueron en promedio, temperatura de 15°C y humedad relativa del 80%

2.9.1.1. Temperatura

A continuación, se observa en la Figura 2-20, el comportamiento de la temperatura dentro y fuera de los secadores:

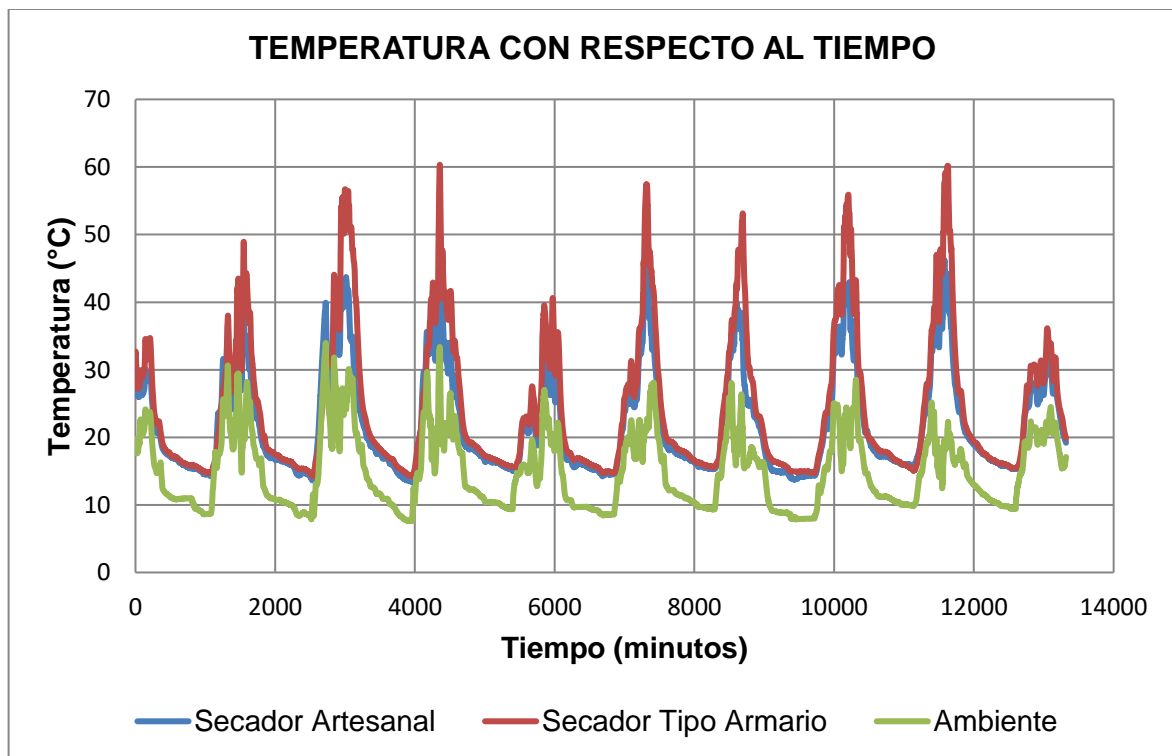


Figura 2-20. Temperatura ambiental y dentro de los dos secadores solares con respecto al tiempo.

Los picos de la gráfica corresponden a las horas de mayor radiación y temperatura, es decir entre las 10:00 am a 2:00 pm aproximadamente, los valles corresponden a las horas de la noche en que la radiación es nula y la temperatura ambiental es mínima. Se observa un comportamiento similar entre las tres temperaturas monitoreadas, pero con claras diferencias entre sus magnitudes.

Como se observa en la Tabla 2-1, los dos secadores y las condiciones del ambiente presentaron diferencias significativas en cuanto al promedio de temperatura y temperatura máxima, siendo el secador tipo armario el que presentó mejores desempeños. La temperatura mínima al comparar los dos secadores no presentó diferencias significativas entre ellos, pero si se presenta una diferencia significativa a comparación de la temperatura mínima ambiental. Sin embargo, se aprecia que en el secador solar tipo armario el descenso de la temperatura en horas de la noche fue menor que en el secador artesanal.

Tabla 2-1. Valores medios¹ de temperatura ambiente y temperatura dentro de los dos secadores solares.

	Ambiente	Secador Artesanal	Secador Tipo Armario
T prom. (°C)	15,00±0,92a	21,95±1,2b	24,08±1,61c
T máx. (°C)	28,35±3,45a	40,19±6,27b	50,42±9,83c
T mín. (°C)	8,84±1,01c	14,55±0,87d	15,00±0,59d

¹ Media ± ds

Medias seguidas de letras distintas en el mismo parámetro, en la misma fila, indican diferencias significativas, según prueba de Tukey (P ≤ 0,05)

De acuerdo con la información generada por Roche et al. (2017), la cual afirma que un secador solar debe presentar temperaturas por encima a las ambientales entre 10 y 30°C, es decir, la temperatura dentro del secador debe ser mayor a la temperatura ambiental entre 10 y 30°C, se observa en la Tabla 2-2, que el secador Tipo Armario es aquel que presenta un mejor desempeño, sin embargo, no es suficiente para que sea considerado óptimo, por lo que la eficiencia del proceso debe aumentar. Por otra parte, se observa una diferencia significativa en cuanto al delta de temperatura máximo, en donde el Secador Tipo Armario estuvo cerca de los 30°C de diferencia, este hecho junto con el anterior significa que este secador es eficiente en cuanto a la captación de radiación, pero su capacidad de retener y almacenar energía térmica por un mayor tiempo es baja.

Tabla 2-2. Valores medios¹ del delta de temperatura interno de los dos secadores solares con respecto a la temperatura ambiental.

	Secador Artesanal	Secador Tipo Armario
ΔT prom. (°C)	6,95±1,08a	9,08±1,53b
ΔT máx. (°C)	19,00±5,62a	27,91±9,03b
ΔT mín. (°C)	1,98±1,57a	1,84±2,48a

¹ Media ± ds

Medias seguidas de letras distintas en el mismo parámetro, en la misma fila, indican diferencias significativas, según prueba de Tukey ($P \leq 0,05$)

Adicionalmente, se observa que no hubo diferencias significativas entre los valores de la diferencia de temperatura mínima, lo que quiere decir que, en ciertos periodos de tiempo, en el interior de los dos secadores se presentan las mismas condiciones.

2.9.2. Humedad Relativa

A continuación, se observa en la Figura 2-21, el comportamiento de la humedad relativa dentro y fuera de los secadores:

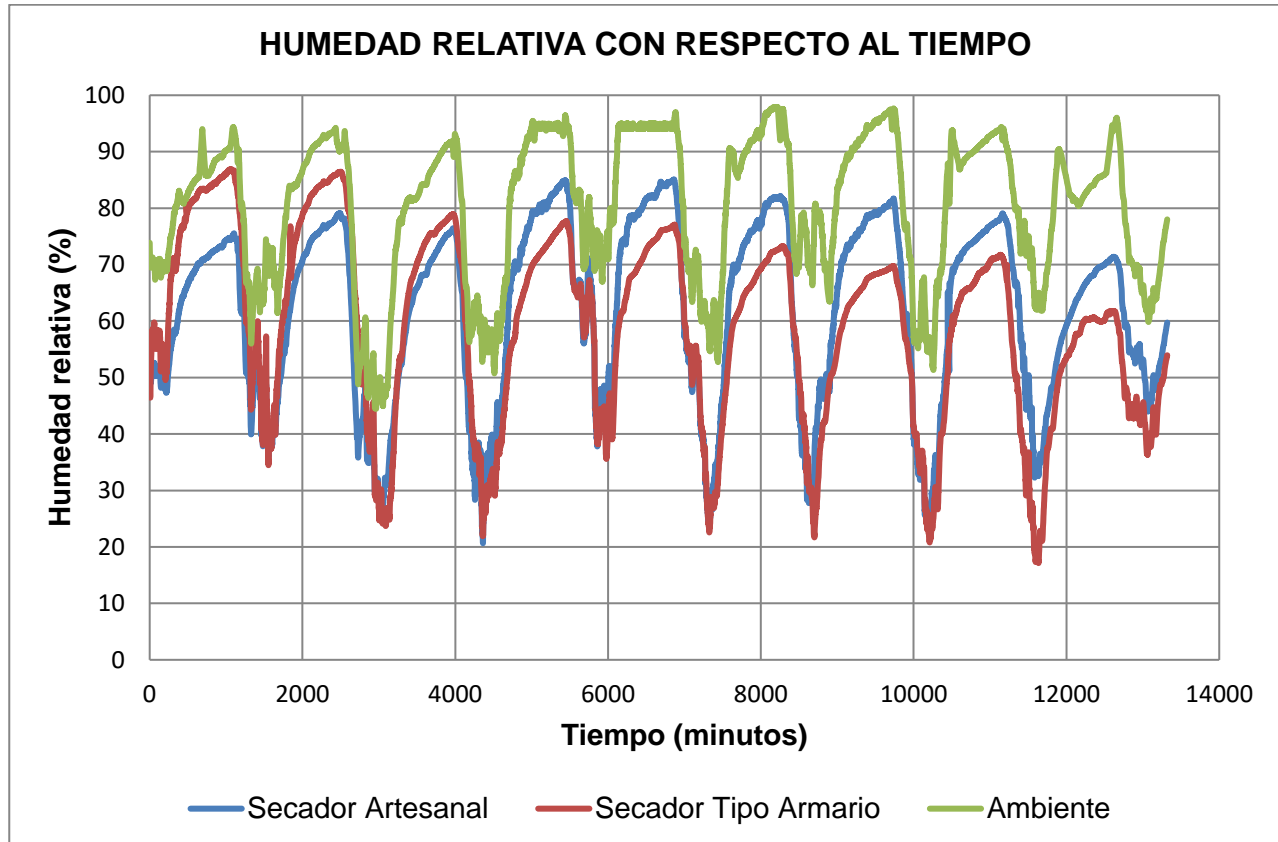


Figura 2-21. Humedad relativa ambiental y dentro de los dos secadores solares con respecto al tiempo.

Los picos altos de humedad corresponden a las horas de la noche, en las que no hay incidencia de la radiación, la temperatura es más baja y esto hace que la humedad relativa sea mayor. Los picos bajos corresponden a las horas del día donde la radiación y temperatura inciden en la humedad relativa obteniendo valores bajos de este parámetro. Se observa que la humedad relativa presentó algunos picos altos, en los datos ambientales, debido a que las condiciones climáticas que se presentaron durante el proceso se caracterizaron por lluvias de baja intensidad recurrentes a lo largo del día, intercaladas con periodos de radiación directa.

El comportamiento de esta variable y los valores obtenidos en el secador Tipo Armario se vieron evidentemente afectados en los días iniciales del proceso de secado, en los cuales los valores de humedad relativa dentro del mismo fueron incluso mayores a los presentados dentro del secador Artesanal (Figura 2-21). Esto debido a que, en la primera etapa del secado, la velocidad de extracción de humedad de los productos es más alta, por lo que, si el secador no presenta una adecuada renovación de aire, aumenta la humedad relativa en su interior. Esto afecta la velocidad de secado de manera directa y puede incidir en la proliferación de agentes patógenos que afecten la calidad del producto. A pesar de este hecho el secador Tipo Armario obtuvo unas condiciones ligeramente más favorables que las del secador Artesanal, aunque ninguna variable de humedad relativa se considera diferente estadísticamente entre los dos secadores como se observa en la Tabla 2-3.

Tabla 2-3. Valores medios¹ de la humedad relativa ambiental y la humedad relativa dentro de los dos secadores solares.

	Ambiente	Secador Artesanal	Secador Tipo Armario
H prom (°C)	80,21±6,47a	61,64±3,35b	59,50±6,47b
H máx. (°C)	95,74±1,48a	78,95±4,99b	76,71±7,87b
H mín. (°C)	57,46±7,63a	31,88±9,15b	28,06±9,45b

¹ Media ± ds

Medias seguidas de letras distintas en el mismo parámetro, indican diferencias significativas, según prueba de Tukey (P ≤ 0,05)

Si bien el comportamiento de la humedad relativa tiene la misma tendencia dentro y fuera de los secadores, se observa que dentro de los secadores esta es menor a la ambiental, es decir que cumplen en cierta medida su función de aislamiento. Que la humedad relativa sea menor dentro de los secadores es importante para el proceso ya que según Roche et al. (2017), las condiciones máximas de humedad relativa que debe presentar el aire para un adecuado secado de productos agrícolas es de 60%. Según eso se observa que los dos secadores presentan condiciones promedio favorables, principalmente en las horas de incidencia de radiación solar. Además, aunque en las horas de la noche no se presenten condiciones óptimas de humedad relativa, dentro de los secadores se presentan valores más bajos que los que se presentan ambientalmente.

2.10. Recomendaciones para la operación de un secador solar

Las siguientes recomendaciones se realizaron con base en la información recolectada en este estudio, el estado actual de los secadores y en información recolectada por Duran, (2014), quien realizó un estudio que incluía el secado de polen en el mismo secador tipo armario.

En primer lugar, se debe tener en cuenta que el estudio se realizó en un mes en el que las condiciones de temperatura y humedad relativa presentaron un comportamiento promedio, lo que concuerda con la información ambiental que se encuentra en la literatura. Aunque al analizar solo estas dos variables los dos secadores presentan condiciones aptas para el secado solar de productos agrícolas, las condiciones ambientales en los meses de alta pluviosidad son menos propicias para el fin de acondicionar productos, por lo que la eficiencia puede disminuir significativamente y retardar el proceso de secado debido a las altas humedades. Por lo anterior se plantean una serie de recomendaciones en cuanto a la adaptación de las características físicas de cada secador, para aumentar la eficiencia de los secadores y mejorar su desempeño.

Se debe considerar que ninguno de los dos secadores se encontraba en condiciones óptimas de funcionamiento, ya que el secador artesanal no se encontraba debidamente aislado de las condiciones ambientales y el secador tipo armario presentaba láminas de vidrio con suciedad, la cual puede reflejar la radiación solar, disminuir la eficiencia al captarla y por ende desaprovecharla. Por estos motivos se incluye una sección de recomendaciones operacionales para cualquier otro tipo de secador solar.

2.10.1. Optimización de las características físicas de un secador

Un secador solar puede ser desde una construcción muy simple, hasta una compleja que incluya diferentes tecnologías y materiales, esto varía principalmente de acuerdo con el propósito de implementación, las condiciones ambientales de la zona y la capacidad económica con la que se cuente.

La cámara de secado es el componente principal de los secadores solares, ya que esta sección por sí sola puede considerarse un secador solar directo. La implementación de colectores solares y elementos auxiliares permite el aumento de eficiencia del proceso de secado, pero así mismo aumenta costo (Guirado, 2012). A continuación, se realizan recomendaciones de adaptaciones básicas que debe tener un secador solar de productos agrícolas, de acuerdo con sus segmentos y posible complejidad.

2.10.1.1. Recomendaciones para cámara de secado

Debe estar construida con materiales que brinden un adecuado aislamiento y protejan el producto de las condiciones ambientales. Los materiales en lo posible deben ser inocuos para evitar la contaminación del producto, además se debe tener en cuenta si el producto es sensible a la incidencia de la radiación solar directa, para determinar si los materiales deben ser opacos (Madera, plásticos con filtros solares, entre otros.) o transparentes (Plásticos sin filtros, vidrio, entre otros.) ante la radiación. Si la temperatura ambiental es muy baja y se requiere una mayor conservación térmica, los materiales deben tener una baja conductividad térmica (Madera, aglomerados, PVC de alto calibre, entre otros.) para que no se presenten pérdidas de calor por medio estos.

Un secador solar debe estar aislado para proteger al producto de la lluvia, de las fuertes corrientes de viento, de contaminantes como el polvo y de pequeños animales como roedores, también para permitir la retención del calor dentro de este, con ello aumentar la temperatura interna y favorecer el secado (Sivipaucar et al., 2008). Esto ha llevado a muchos productores a cometer el error de encerrar el producto en su totalidad, sin embargo, para que el producto se seque adecuadamente, debe ingresar al secador aire seco, atravesar la masa de producto y en este proceso absorber la humedad de este y luego salir. Debido a que el aire externo es más frío, al ingresar al secador se calienta, se genera una diferencia de densidades del aire y el aire asciende atravesando el producto y retirando su humedad. Si la masa de aire húmedo no es retirada, la humedad relativa aumenta y en algunos casos puede condensarse dentro del secador, lo que disminuye la

velocidad de secado y promueve la afectación del producto por agentes patógenos, microbianos y fúngicos. Para que esto no ocurra el secador debe contar con la adecuada ventilación, sin afectar el aislamiento (Hernández et al., 2017).

Una ventilación eficiente debe permitir la renovación del aire, por medio de un caudal adecuado que permita la entrada de aire seco y la salida del aire caliente húmedo, este caudal de renovación de aire depende directamente de las condiciones a las que está expuesto el secador. Si la humedad relativa es muy alta, el caudal de renovación debe ser mayor y se deben realizar las adecuaciones correspondientes, ya sea con la ayuda de ventiladores o extractores o aumentando los orificios de renovación del aire del secador (Espinoza & Yange, 2012).

En lugares donde las temperaturas ambientales sean muy altas e internamente se pueda llegar a temperaturas superiores a los 30°C por encima de la temperatura ambiental, lo que podría afectar la calidad del producto (Roche et al., 2017), se deben aumentar los orificios de entrada y de salida de aire, para que la renovación de aire sea más constante y no permita exceso de temperatura, de igual forma en secadores activos se deberá aumentar el caudal de los equipos utilizados.

Para realizar adecuaciones cuyo propósito sea cambiar el caudal de ventilación, si no se cuenta con personal calificado con experiencia en los cálculos y el diseño, se pueden implementar pequeños ajustes y comprobar su efecto con algunos lotes de secado.

2.10.1.1.1. Disposición del producto

El tamaño y dimensionamiento de la estructura para disponer el producto, depende de la cantidad de producto y sus características, esta debe soportar el peso total del producto a secar, debe ubicarse a una altura que permita un majeo ergonómico del material por parte del operario, además, la cámara de secado debe contar con un sistema adecuado para el ingreso y salida del producto, de forma fácil y segura, para no comprometer ni el producto ni al operario ante posibles accidentes (Guirado, 2012).

El producto debe disponerse en soportes o bandejas adecuadas, el diseño de estas se debe establecer previamente de acuerdo con las condiciones iniciales de la matriz alimentaria, permitiendo el flujo de aire a través de esta. Según el tamaño, forma y densidad del producto, las bandejas pueden tener orificios, además, estos pueden ser de distintos tamaños. Los soportes o bandejas deben estar hechas de un material inocuo y para permitir una adecuada manipulación deben ser de un peso y tamaño adecuado (Sivipaucar et al., 2008).

Ya que la temperatura de las paredes o cubiertas suele ser más alta, se recomienda que el producto conserve una distancia aproximada de 0,2m de estas, para que no existan diferencias de temperatura muy grandes entre la masa total del producto a secar y el secado sea más uniforme y no presente defectos de calidad.

En la cámara de secado debe haber espacio suficiente para desarrollar las actividades operacionales de forma óptima. Desde una perspectiva superior del secador, el espacio disponible para el tránsito y manejo del producto y las bandejas debe ser mínimo del mismo ancho de estas últimas. Desde una perspectiva frontal, la altura del techo del secador debe permitir el tránsito, además, el espacio entre el producto y el techo debe permitir actividades como la disposición, remoción, volteo y retirada de la matriz alimentaria (Hernández et al., 2017).

2.10.1.1.2. Condiciones internas

Las condiciones de temperatura y humedad relativa del aire presentes en el interior de la cámara de secado tienen unos requerimientos mínimos y máximos, independientemente a si el secador posee colector solar o no.

En cuanto a la humedad relativa, esta no debe sobrepasar el 60% (Roche et al., 2017), mientras que la temperatura debe presentar una diferencia con respecto a la temperatura ambiental entre 10 y 30°C, debido a que, a temperaturas muy bajas, el proceso de secado sería muy lento y temperaturas altas pueden afectar las características fisicoquímicas del

producto y generar sobre secado (Roche et al., 2017). Estas temperaturas máximas dependen del producto a secar y en literatura se encuentran valores experimentales para una gran variedad de productos.

En horas o periodos de tiempo en los que la radiación es nula o muy poca, para evitar que el proceso de secado se vea demasiado afectado se pueden introducir materiales o modificaciones que acumulen calor durante las temperaturas altas y la transfieran al ambiente cuando la temperatura disminuye (Espinoza & Yange, 2012). Se recomienda que estos materiales o modificaciones se implementen dentro de las cámaras de secado de secadores directos que no cuenten con un colector solar, debido a que en estos secadores la misma cámara de secado es la encargada de captar y almacenar la radiación solar.

2.10.1.2. Recomendaciones para el colector solar.

2.10.1.2.1. Materiales

Ya que el propósito del colector solar es mejorar las condiciones psicrométricas del aire para aumentar su capacidad de retirar humedad de un producto, los materiales que deben ser utilizados para su construcción ya se encuentran definidos, aunque hay varios tipos y clasificaciones, los materiales requeridos no varían. Los materiales necesarios para un colector solar básico son una cubierta transparente, una estructura aislante y un material o superficie absorbente (Guirado, 2012).

Para la cubierta transparente pueden utilizarse diferentes tipos de materiales como plásticos o vidrio, siendo este último el que presenta mejor captación y almacenamiento de radiación solar, sin embargo, su manejo, instalación o disponibilidad no se encuentran aseguradas en todas las zonas, especialmente en sectores rurales (Espinoza & Yange, 2012).

En cuanto a la estructura del colector, debe construirse con materiales que no presenten una conductividad térmica elevada, es decir, que no transfieren calor. Generalmente esta estructura es construida en madera y aislada en sus paredes con espuma, sin embargo, también se pueden utilizar otros materiales como láminas de PVC de alto calibre o fibra de vidrio, aunque pueden conllevar un costo más elevado (Sivipaucar et al., 2008).

La placa o material absorbente puede ser de distinto tipo y naturaleza, puede utilizarse una lámina o teja de aluminio pintada de negro, baldosas de cerámica negra, gravilla, parafina, entre otros materiales que sirven para el cometido. Entre más corrugaciones tenga esta placa o material, se aumenta la turbulencia del aire que circula a través, aumenta el área superficial de incidencia de radiación y a su vez el área efectiva de transferencia de calor, es decir, se transfiere más calor al aire (Roche et al., 2017).

2.10.1.2.2. Posición

El colector se debe ubicar en un ángulo entre 20 y 45° con respecto al suelo, con el fin de que la radiación incida de manera más perpendicular a la placa y se disminuya la probabilidad de reflexión. El colector se debe colocar de forma tal que la altura de salida del aire caliente esté por debajo o coincida con la altura de entrada de aire de la cámara de secado, esto es para favorecer y facilitar el tránsito del aire caliente del colector hacia la cámara de secado (Hernández et al., 2017).

Se debe instalar o colocar en un lugar despejado, en el que no le llegue sombra de árboles o estructuras cercanas durante el día, con el fin de captar toda la radiación posible. No se debe encontrar alguna fuente de gases u olores desagradables que puedan contaminar el producto, como una carretera concurrida o algún tipo de producción animal. Además, la zona de entrada de aire debe contar con algún tipo de filtro o malla que no permita la entrada de insectos o partículas, que puedan contaminar el producto (Roche et al., 2017).

2.10.1.2.3. Condiciones ambientales

En zonas donde se presenten altas temperaturas y alta incidencia de radiación, en las cuales se pueda obtener diferencias de temperatura entre el aire ambiental y el que circula en el colector mayores a 30°C, se deben realizar modificaciones que permitan un mayor flujo de aire para que disminuya la temperatura y no afectar el producto, estas modificaciones pueden ser como las mencionadas anteriormente en las recomendaciones para cámara de secado en el numeral 2.10.1.1, en las que se permita el ingreso de aire ambiental y así reducir la temperatura o implementar un ventilador en el colector que aumente el flujo de aire (Espinoza & Yange, 2012)

Si se presentan condiciones de temperatura bajas que no permitan un adecuado secado se puede recurrir a materiales de cambio de fase, más especializados en almacenar energía y transferirla en los momentos en que la temperatura ambiental sea baja. Además, si la humedad relativa del aire ambiental presenta valores muy altos, también se puede recurrir al uso de materiales desecantes, como sales o gel, las cuales se dispondrán en la zona de entrada del aire para acondicionarlo retirándole humedad (Torres & Vega, 2015).

2.10.1.3. Recomendaciones para elementos auxiliares

Debido a la variedad de elementos auxiliares, y a que algunos ya se han mencionado en el contexto de la cámara de secado y el colector solar, como ventiladores, materiales de almacenamiento energético y desecantes, esta sección se enfocará en los elementos de monitoreo y control. Aunque estos elementos representan un monto económico considerable para la mayoría de los productores, la información que se puede obtener junto con la influencia que se puede ejercer sobre el proceso, puede traer beneficios en la calidad del producto y facilidad de operación considerables.

2.10.1.3.1. Posición de los elementos auxiliares

La posición de los elementos y equipos es de vital importancia para su correcto funcionamiento y para obtener información relevante. Por ejemplo, los sensores de temperatura y humedad relativa deben estar a la altura promedio en la que se encuentra

el producto, para evaluar las condiciones a las cuales se encuentra expuesto; detectores de velocidad de viento se deben disponer en la entrada y salida de aire en la cámara de secado; celdas fotovoltaicas deben posicionarse en un lugar despejado, en donde reciban radiación directa y donde no se vean afectadas por la sombra de algún árbol o estructura, además deben estar sobre la estructura del secador o muy cerca, para minimizar los materiales requeridos en las conexiones.

Controlar algún parámetro del secador de manera remota puede ser una actividad tan sencilla o compleja como se requiera y se tenga la capacidad. El ejemplo más sencillo es la implementación de una celda fotovoltaica para alimentar un ventilador o extractor, en el cual la velocidad del ventilador depende de la intensidad generada por la celda, que a su vez depende de la intensidad de la radiación, es decir, a mayor intensidad de la radiación aumenta la velocidad del ventilador, lo que ayuda a controlar de manera remota la temperatura (Chaverri & Moya, 2008).

2.10.2. Recomendaciones de operación

Estas recomendaciones están divididas según la etapa del proceso de secado. Sin embargo, se debe tener en cuenta que, a lo largo de toda la operación, las actividades se deben realizar cuidando los 3 parámetros principales del proceso, el operario, el producto y el secador, evitando accidentes que puedan afectar la condición de cualquiera de los 3.

2.10.2.1. Antes del secado.

Antes de realizar el proceso de secado, se debe tener certeza sobre qué producto y que cantidad se va a someter al proceso. Con esta información se deben realizar los cambios necesarios al secador, como cambio de tipo o número de bandejas. Algunos productos requieren un tratamiento previo ya sea para mejorar la eficiencia del secado o por fines comerciales. Las condiciones de higiene del secador también deben ser revisadas y si es necesario realizar una adecuada limpieza y mantenimiento antes de introducir algún producto.

2.10.2.2. Durante el secado.

El secado debe iniciar, con la introducción del producto al secador, esta actividad se debe realizar de manera organizada y tranquila, sin exigir las bandejas o camas introduciendo una gran cantidad de producto ni mucho menos exigir al operario al cargar mucho peso o cargarlo de manera incorrecta.

Paso siguiente se debe disponer el producto de manera uniforme, con implementos inocuos. Así mismo se debe remover y reorganizar el producto regularmente, para aumentar la eficiencia de secado y promover la uniformidad de la masa. Esta última actividad se encuentra condicionada a la posibilidad de ejercer daño mecánico al producto, pero es una práctica muy recomendada si se realiza con la debida precaución.

Si no se cuenta con la posibilidad y los recursos para realizar un monitoreo de condiciones dentro del secado adecuado, se recomienda, tratar de realizar un monitoreo periódico de condiciones básicas, como la temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo, o temperatura máxima y mínima, para tener un acercamiento mínimo a su comportamiento, con el fin de tomar decisiones si se presentan condiciones que puedan afectar el proceso y la calidad del producto.

Además de monitorear las condiciones del aire, también se debe monitorear las condiciones del producto, cuidando que no se presenten sucesos problemáticos como goteras, focos de infección de hongos, presencia de animales, entre otros; además se debe observar la humedad del producto para determinar en qué punto dar por terminado el proceso (Mealla & Morales, 2018).

El secado termina bajo una de dos condiciones, la primera es la situación ideal, cuando el producto ha alcanzado la humedad requerida; la segunda es cuando a pesar de que transcurra un tiempo considerable, no se detecte un cambio aparente en la humedad, aunque esta humedad no sea la deseada, esta situación se presenta cuando las condiciones del aire no son capaces de retirar más humedad del producto.

Una vez el producto esté listo para ser retirado del secador, se realizan las actividades necesarias para este propósito, ya sea amontonar el producto para disponerlo en algún recipiente o retirar las bandejas con todo y producto. El transporte del producto seco debe

realizarse con cuidado de que el operario no se lastime por el exceso de peso y que el producto no sufra ningún tipo de contaminación.

2.10.2.3. Después del secado

Una vez terminado el proceso de secado y retirado el producto del secador, se debe realizar una limpieza adecuada, para retirar cualquier material que pueda generar algún tipo de contaminación, también se debe realizar una limpieza periódica del material transparente, para permitir la entrada de radiación a la cámara de secado o al colector, debido a que la presencia de suciedad puede reflejar la radiación y afectar su aprovechamiento (Torres & Vega, 2015).

También se debe realizar una verificación del estado general del secador y de sus componentes, para realizar cualquier modificación o mantenimiento, si son requeridos, antes del próximo proceso de secado.

2.11. Conclusiones y recomendaciones

2.11.1. Conclusiones

El secador Tipo Armario fue el que presentó mejores resultados en cuanto a las variables de temperatura y humedad relativa obtenidas en el interior del secador, lo que significa que es el más eficiente en el secado de productos agrícolas; este ofrece condiciones de temperatura y humedad relativa aceptables, aunque tampoco completamente óptimas, teniendo en cuenta que el proceso de secado se realizó en el mes de abril, el cual coincidió con la época de mayores precipitaciones en la zona.

Si bien ambos secadores presentaron condiciones internas favorables con respecto a las condiciones ambientales, el secador artesanal no cumple con los requerimientos mínimos de humedad relativa y temperatura ideales para el secado de productos agrícolas.

De ser necesario, debido al volumen de producto manejado y para aprovechar la estructura del secador artesanal ya existente, se recomienda su uso como un pre-secado, es decir, que se realice el secado durante la primera etapa, en la cual, debido que el

secador artesanal presentó humedades más bajas que favorecieron el secado en esta primera etapa, entonces, se puede usar preferiblemente con espesores de capa delgada y pasar el producto para finalizar secado al secador Tipo Armario.

Se verifica que a pesar de que las condiciones climáticas no fueron favorables, principalmente por bajas temperaturas y humedad relativa alta, la implementación del secado solar para productos agrícolas en un contexto socioeconómico como el que se presenta especialmente en las zonas rurales del país es una opción viable y óptima bajo ciertos parámetros de diseño y actividades de operación tratados y mencionados a lo largo del capítulo.

2.11.2. Recomendaciones

No se recomienda el uso de secadores solares artesanales en zonas como Viracachá que presenten bajas temperaturas y altas humedades relativas, ya que el proceso de secado se ve afectado por estas condiciones y disminuye la eficiencia de este. Este tipo de secadores, son de mayor utilidad en zonas de altas temperaturas y baja humedad relativa, ya que estas condiciones no difieren tanto en horas nocturnas, y aunque el secador no esté aislado adecuadamente, no afecta drásticamente el proceso de secado.

Teniendo en cuenta lo anterior, para su uso adecuado, se puede aumentar la eficiencia del secador solar de tipo armario, aumentando el área de absorción de radiación o implementando algún material, que permita captar y almacenar por más tiempo el calor y que complemente la cerámica negra, por ejemplo, grava o parafina. Se debe mejorar la renovación del aire húmedo por lo que se recomienda la implementación de una chimenea sencilla para aumentar esta renovación, sin afectar las condiciones interiores de manera significativa. Junto con las modificaciones físicas se recomienda la implementación de actividades operacionales exhaustivas, específicamente, la remoción y movimiento del producto si este lo permite, para aumentar la velocidad del secado y mejorar la uniformidad de la masa; además, de un constante monitoreo para determinar y controlar las condiciones del aire y el estado del producto.

2.12. Bibliografía

- AEMET - Agencia Estatal de Meteorología. (s.f.). La radiación solar. Ministerio de medio ambiente, medio rural y marino. España. Link de consulta: http://www.aemet.es/documentos/es/eltiempo/observacion/radiacion/Radiacion_Solar.pdf. [Ultimo acceso: 20 de enero de 2021]
- Agrawal, A., & Sarviya, R. (2016). A review of research and development work on solar dryers with heat storage. *International Journal of Sustainable Energy*, 35(6): 583 – 605.
- Aguilar, J. (2020). Sistema descentralizado de desalinización de Agua basado en Energía Solar para generar Volúmenes de Agua Segura en Comunidades Indígenas de La Guajira. Universidad Nacional de Colombia. 145p.
- Badui, S. (2006). Química de los Alimentos. Cuarta edición. PEARSON EDUCACIÓN. 716p.
- Barrios, F. (2019). Análisis de actividad de agua en alimentos. Universidad Técnica Federico Santa María. 64p.
- Bayona, C. (2011). Modelado matemático de un secador solar de plantas aromáticas. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia. 144p.
- Belessiotis, V., & Delyannis, E. (2011). Solar Drying. *Solar Energy. Progress in solar energy* 85(1): 1665 – 1691.
- Benítez, R., Flores, A., Ramírez, L., González, J., Cavieses, R., & Barrón, I. (2017). Diseño y construcción de un secador solar para frutas. Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología del Mar. 10p.
- Blanco, L., & Valldecabres, L. (2016). Guía para el desarrollo de proyectos de secado solar en comunidades rurales. *Energía sin Fronteras*. 85p.
- Bonazzi, C., & Dumoulin, E. (2011). Quality changes in food materials as influenced by drying processes. In: *Modern drying technology. Volume 3: Product quality and formulation*, Tsotsas, E. y Mujumdar, A.S. (eds.). Primera edición, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Cajahuanca, A., García, A., & Casimiro, E. (2020). Diseño, construcción y evaluación de un secador solar de cámara para textiles. *Revista Cubana de Ingeniería*. 9(2): 66 – 77.

- Campo, Y., Gélvez, V., & Ayala, A. (2018). Ultrasonido en el procesamiento (homogenización, extracción y secado) de alimentos. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 16(1): 102 – 113.
- Cardona, F. (2019). *Actividad del agua en alimentos: concepto, medida y aplicaciones*. Universitat Politècnica de València. 7p.
- Carmona, F. (2013). *Desarrollo de un modelo general para la estimación de la radiación neta con imágenes de satélite*. Universidad de Valencia. 140p.
- Castro, E., Condori, M., Righini, R., Hernández, A., Saravia, L., & Altobelli, F. (2010). *Secado solar de productos agroalimentarios en Iberoamérica*. 1ra Edición. 52p.
- Chaverri, D., & Moya, R. (2008). Temperatura y humedad relativa en un secador solar de plantas para la salud. *UNICIENCIA*. 22: 5 – 9.
- Condori, M. (2016). *Secadores solares*. Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO, UNSa – CONICET). 20p.
- Consorcio Río Garagoa. (2017). *Actualización POMCA Río Garagoa. Plan de ordenación y Manejo de la cuenca Hidrográfica. Fase de Diagnóstico. 03. Caracterización Físico-Biótica. 3.1 Clima*. CORPOCHIVOR. 204p.
- Delgado, L., & Aristizábal, J. (2017). A method for modeling photovoltaic modules under non-standard conditions of solar radiation and ambient temperature in Quibdó, Colombia. *Int. J. Ambient Energy*. 1-5.
- Durán, A. (2014). *Diseño de un sistema de secado y separación de impurezas para polen apícola en Colombia*. Universidad Nacional de Colombia. 181p.
- Ekechukwu, O., & Norton, B. (1999). Review of solar-energy drying systems II: An overview of solar drying technology. *Energy Conversion & Management*. 40(6): 615 – 655.
- El-Sebaili, A., & Shalaby, S. (2012). Solar drying of agricultural products: A review. *Renewable and sustainable energy review*. 16: 37 – 43.
- Escobar, M. (2017). *Implementación de un sistema de acumulación de energía con materiales de cambio de fase (PCM) en un secador solar tipo Hohenheim*. Universidad Nacional de Colombia. 150p.
- Espinoza, J., Puente, L., & Castro, E. (2011). *Aplicación de un proceso de secado asistido infrarrojo para la deshidratación del fruto de murtilla (Ugni molinae Turcz.)*. Universidad de Chile. 93p.

- Espinoza, X., & Yange, W. (2012). Diseño e implementación de una secadora híbrida para el control y monitoreo del proceso de secado del cacao. Universidad Politécnica Salesiana. 225p.
- Fontal, B., Suárez, T., Reyes, M., Bellandi, F., Contreras, R., & Romero, I. (2005). El Espectro Electromagnético y sus Aplicaciones. Escuela Venezolana para la Enseñanza de la Química. 151p.
- Gamboa, Y., & Hill, A. (2016). Gestión de sistemas fotovoltaicos para la generación de energía eléctrica en las zonas no interconectadas (En comunidades menores a 500 habitantes) en el pacífico colombiano. Universidad Pontificia Bolivariana. 102.
- García, J. (2011). Estudio y construcción de una instalación de secado de madera mediante energía solar térmica. Universidad de Madrid. 242p.
- García, L., Mejía, M., Mejía, D., & Valencia, C. (2012). Diseño y construcción de un deshidratador solar de frutos tropicales. AVANCES. Investigación de Ingeniería. 9(2): 9 – 19.
- García, P., León, J., Cárdenas, L., & Giraldo, J. (2018). Modelado numérico del proceso de secado solar de manzanas en el municipio de Nuevo Colón - Boyacá. Revista UIS Ingenierías. 17(1): 201 – 208.
- Garnacho, G., Salido, R., & Moreno, J. (2020). Efectos de la radiación solar y actualización en fotoprotección. Anales de Pediatría. 92(6): 377.e1 – 377.e9.
- Gomajoa, L. (2016). Incertidumbre en los reportes nacionales de emisión de gases de efecto invernadero: evaluación de sus efectos en la política pública. Universidad Nacional de Colombia. 117p.
- Green, D., & Perry, R. (2008). Chemical Engineers Handbook (8th ed. Vol. I). McGraw Hill. 312p.
- Guirado, L. (2012). Diseño de un secador solar para chitepín (*Capsicum annum* var .aviculare) de la región del Río Sonora. Universidad de Sonora. 104p.
- Gutiérrez, M., Sanz, J., Oliveros, C., & Orozco, C. (2012). Ventiladores para secadores de café: Diagnóstico, diseño y construcción económica de ventiladores centrífugos. Cenicafé. 58p.
- Gutierrez, S. (2016). Diseño, implementación y evaluación de un sistema de deshidratación por cambios cíclicos de presión para residuos agroindustriales. Universidad Nacional de Colombia. 103p.

- Gutiérrez, F., & Copete, H. (2009). Hacia la mejora del secado mecánico del café en Colombia. Instituto Tecnológico Metropolitano. *Tecnológicas*. 23: 109 – 132.
- Guzmán, T., Obando, J., Castro, G., Rodríguez, D., Arce, N., Ortega, J., & Araya, F. (2020). Aplicación de tecnologías solares térmicas híbridas, para la deshidratación y secado de productos agrícolas en la Región Huetar Norte de Costa Rica. *Revista ventana*. 21 – 25.
- Hernández, V., Olvera, O., Guzmán, P., & Morillón, D. (2017). Secado de frutas y verduras con energía solar. *Revista de Sistemas Experimentales*. 4(11): 22 – 33.
- Iglesias, R., José, R., Lastres, O., López, P., Ferrera, N., & Ibáñez, G. (2017). Diseño, Construcción y evaluación de un secador solar para mango Ataulfo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 8(8): 1719 – 1732.
- Inzunza, J. (2012). Ciencias integradas. Clase 2 Radiación solar y terrestre. Universidad de Concepción. 5 – 8.
- ISO - International Standards Organization. (2007). ISO 20473, Optics and photonics - Spectral bands. 20p.
- Ivars, Y., Mora, J., & Manavella, F. (2017). Deshidratador Solar Patagónico Familiar. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). 14p.
- Largo, E. (2020). Efecto del secado solar intermitente en la composición química del café. Universidad Nacional de Colombia. 131p.
- Lezcano, D., Botero, S., & Velásquez, H. (2011). Estudio Exergético para identificar y evaluar potencialidades en energías renovables en el territorio Colombia, para planteamiento energético en periodos futuros. Universidad Nacional de Colombia. 121p.
- López, G., Yañez, M., Velázquez, T., Ayala, F., & López, C. (2019). Actitud del productor agrícola ante la transferencia de tecnología en la región centro de Sinaloa. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 10(6), 1457 – 1462.
- Luna, C., Jiménez, F., Moreno, R., & Mulcué, L. (2020). Potencial de irradiación solar para generar electricidad en el departamento de Putumayo de Colombia. *Revista UIS Ingenierías*. 19(3): 153 – 162.
- Machado, A., Oliveira, E., Santos, E., & Oliveira, J. (2010). Estudio del Secado de Anacardo (*Anacardium occidentale L.*) mediante Secador Solar de Radiación Directa. *Información tecnológica*, 21(1), 31-37.

- Martínez, J. (2008). Uso de diferentes cubiertas plásticas en invernaderos para mejorar los efectos de radiación, temperatura y humedad relativa. Centro de investigación en química aplicada. 71p.
- Masias, L. (2019). Diseño de un secador solar directo de circulación natural tipo invernadero para cacao. Universidad de Piura. 172p.
- Mealla, L., & Morales, J. (2018). Evaluación del comportamiento térmico de secadores solares en régimen pasivo. *TecnoLógicas*. 21(41): 29 – 44.
- Mendoza, C. (2011). Viabilidad técnica-económica de una central solar termoeléctrica de colectores cilíndricos parabólicos para su implementación en México. Universidad Nacional Autónoma de México UNAM. 161p.
- Moreira, R., Chenlo, F., Torres, M., & Vallejo, N. (2008). Thermodynamic analysis of experimental sorption isotherms of loquat and quince fruits. *Journal of Food Engineering*. 88: 514 – 521.
- Mujumdar, A. (2011). *Drying Technology - An Overview*. Notes of Industrial Transfer Processes. National University of Singapore. 7p.
- Mustayen, A., Mekhilef, S., & Saidur, R. (2014). Performance study of different solar dryers: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 34: 463 – 470.
- Oliveros, C., Sanz, J., Ramírez, C., & Peñuela, S. (2009). Aprovechamiento eficiente de la energía en el secado mecánico del café. *Avances técnicos* 380. Cenicafé. 8p.
- Orrego, C. (2008). *Congelación y liofilización de alimentos*. 1ª edición. Artes gráficas Tizan Ltda. 169p.
- Ortiz, M. (2014). *Modelación matemática del secado de alimentos por el método de ventana de refractancia*. Universidad del Valle. 126p.
- Ospina, J., & Cuervo, S. (1995). Humedad de equilibrio y calor latente de vaporización del ajonjolí. *Sésamun indicum L. Ingeniería e Investigación*. 31: 3 – 12.
- Pava, D. (2016). Eficacia de los métodos de fermentación y secado para optimizar la calidad de las almendras de cacao (*Theobroma cacao L.*). Universidad Técnica de Machala - UTMACH. 23p.
- Pearson, C., Levacic, D., Bergant, D. & Diez, M. (2009). *Manual del vidrio plano*. 3a Edición. CAVIPLAN. 138p.

- Pedro, J. (2018). El calentamiento de un invernadero y las dificultades de la física básica. Link de consulta: <https://xclima.wordpress.com/2018/08/03/el-calentamiento-de-un-invernadero-y-las-dificultades-de-la-fisica-basica/>. [Ultimo acceso: 20 de febrero de 2021]
- Poveda, W. (2020). Validación de la radiación solar en superficie para la región Orinoquía a partir de imágenes de satélite. Universidad Nacional de Colombia. 83p.
- Prakash, O., & Kumar, A. (2014). Solar greenhouse drying: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 29: 905 – 910.
- Quijano, R., Botero, S., Domínguez, J. (2012). MODERGIS application: Integrated simulation platform to promote and develop renewable sustainable energy plans, Colombian case study. *Energy Rev*. 16(7): 5176 – 5187.
- Ramana, M. (2009). A review of new technologies, models and experimental investigations of solar driers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13(4): 835 -844.
- Ratti, C. (2009). *Advances in Food Dehydration* (1st ed. Vol. I). CRC Press. Taylor & Francis Group. 467p.
- Retirado, Y., Lamorú, M., Góngora, E., Torres, E., Leyva, B., & García, D. (2011). Transferencia de calor en el secado solar a la intemperie de menas lateríticas ferroniquelíferas. *Minería y Geología*. 27(1): 1 – 21.
- Roa, G., Oliveros, C., Álvarez, J., Ramírez, C., Sanz, J., Dávila, M., Álvarez, J., Zambrano, D., Puerta, G., & Rodríguez, N. (1999). Beneficio ecológico del café. *Cenicafé*. 273p.
- Roche, L., Hernández, J., & García, A. (2017). Diseño conceptual de secador solar a escala piloto para algas marinas. *Tecnología Química*. 37(2): 184 – 200.
- Rodríguez, D., & Bohórquez, J. (2016). Diseño de un colector solar de placa plana para la deshidratación de productos agroindustriales. Universidad Libre. 82p.
- Rodríguez, F. (2016). Optimización de un secador solar basado en el método de análisis exergético. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. 95p.
- Sharma, A., Chen, C., & Vu, N. (2009). Solar energy drying systems: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*. 13: 1185 – 1210.

- Sivipaucar, C., Curo, H., Huancahuari, E., Llantoy, V., & Valderrama, A. (2008). Cálculo y construcción de un secador solar por convección natural para el secado de plantas medicinales no tradicionales. Centro de Desarrollo e Investigación en Termofluidos CEDIT. 3: 18 – 30.
- Soto, V., Sarabia, E., Carnero, P., & Pinazo, J. (2018). Psicrometría aplicada a la climatización. Bases teóricas y problemas. Universitat Politcnica de València. 304p.
- Srinivasan, G., Rabha, D., & Muthukumar, P. (2021). A review on solar dryers integrated with thermal energy storage units for drying agricultural and food products. Solar Energy. 229: 22 – 38.
- Tiwari, A. (2016). A Review on Solar Drying of Agricultural Produce. Journal of Food Processing & Technology. 7(9): 1 – 12.
- Torres, M., & Vega, D. (2015). Evaluación de un sistema de secado con energía solar, para deshidratar los residuos orgánicos generados en el restaurante del bloque D de la Universidad Libre sede bosque popular. Universidad Libre. 87p.
- Trigo, E., & Elverdin, P. (2019). Los sistemas de investigación y transferencia de tecnología agropecuaria de América Latina y el Caribe en el marco de los nuevos escenarios de ciencia y tecnología. FAO. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua (UNAN-Managua). 18p.
- UPME. (2015). Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia. Bogotá D.C., Colombia. 188p.
- Villalba, J. (2014). Análisis experimental de la cinética del secado de bagazo de caña panelera. Universidad Nacional de Colombia. 182p.
- Visavale, G. (2012). Principles, Classification and Selection of Solar Dryers. Sol. Dry. Fundam. Appl. Innov. 55p.
- Viveros, A., & Mayorga, E. (2017). Diseño e implementación de un prototipo de deshidratador híbrido (solar-eléctrico) e implementación de su sistema de control. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. 81p.
- World Bank Group. (2019). Global Solar Atlas 2.0. Link de consulta: <https://globalsolaratlas.info/download/colombia>. [Ultimo acceso: 20 de enero de 2021]

Zorzano, E. (2015). Estudio de la instalación de un sistema de paneles de captación solares para la generación de agua caliente sanitaria en una vivienda unifamiliar. Universitat Politècnica de Catalunya Barcelonatech. 88p.

3. Determinación de parámetros físicos y químicos del almidón de achira obtenidos mediante secado convectivo y secado solar

En este capítulo se aborda el tema de la Achira, sus generalidades y las del almidón extraído de esta. Se analiza en este capítulo algunos parámetros físicos y químicos para determinar la influencia del tipo de secado en la calidad del producto, de acuerdo con los métodos de secado utilizados en esta investigación.

3.1. Generalidades de la Achira

La Achira (*Canna edulis Ker*) también llamada Sagú, chumbimba, chisgua, entre otros nombres de acuerdo con cada región, es una planta monocotiledónea perenne de origen andino, pero presente en regiones tropicales de América Latina, el Caribe, Asia y África (Rodríguez et al., 2003; Torres, 2004; Puncha et al., 2007; Andrade et al., 2012). Es cultivada principalmente con el objetivo de extraer almidón de sus rizomas (Ariza, et. al., 2013).

Dependiendo de su variedad, presenta periodos vegetativos entre 7 a 12 meses y es uno de los cultivos que posee mayor rendimiento en cuanto a la producción de almidón por área sembrada (Seminario, 2004; Torres, 2012). Puede desarrollarse en altitudes inferiores a los 2700 m.s.n.m. (Andrade et al., 2012), pero las condiciones de producción óptima son (Torres, 2004):

- Altitud entre 1600 y 2000 m.s.n.m.
- Temperatura promedio de 18°C.
- Humedad relativa entre 50 y 80%.
- Alta luminosidad.
- Suelos francos, franco-arenosos o franco-limosos, ricos en materia orgánica, acidez entre 5 y 6.5, con buen drenaje para evitar encharcamientos que puedan generar pudrición de los rizomas.
- Precipitación entre 800 y 1120 mm/año, distribuidas uniformemente a lo largo de su periodo vegetativo (Estrada, 2020).
- Vientos de máximo 20 km/hora.

3.1.1. Clasificación botánica

La achira (*Canna edulis Ker*) es una planta perenne monocotiledones que pertenece a la familia de la Cannaceae (Puncha et al., 2007). A continuación, se observa su clasificación general (Torre, 2004).

- Reino: Vegetal
- Subreino: Fanerógamas
- División: Angiospermae
- Clase: Monocotiledóneas
- Orden: Scitaminales
- Familia: Cannaceae
- Género: *Canna*
- Especie: *Edulis*

3.1.2. Descripción morfológica

Dependiendo de la variedad o ecotipo sus características morfológicas pueden presentar una alta variabilidad (Lobo et al., 2017). Sin embargo, según estudios realizados por Sultana et al. (2019), se ha demostrado que la diferencia entre variedades y ecotipos es rigurosa, principalmente debido al color de las flores, su altura, la morfología del tallo, hojas y rizomas, y el color de estos últimos. Algunas de las características generales de la planta se encuentran a continuación.

- a) **Altura:** La planta puede alcanzar una altura entre 0,31 y 3 m (Yepes & Grisales, 2013; Estrada, 2020), esta diferencia depende de la variedad, las condiciones ecológicas de la zona del cultivo y según la fertilidad del suelo (Torres, 2004).

- b) Hojas:** Son largas y anchas, poseen una nervadura central, son de color verde oscuro en la parte superior y claro en la parte posterior, en algunas variedades se presentan bordes purpura (Torres, 2004). Posee diferentes dimensiones dependiendo de la variedad, largo entre 0,29 y 0,7 m y ancho entre 0,11 y 0,28 m (Yepes & Grisales, 2013)
- c) Flores:** Presentan colores que varían entre rojo, amarillo y naranja, por lo que en algunas zonas es utilizada como planta ornamental (Torres, 2004). Yepes & Grisales (2013) determinaron ciertos parámetros cuantificables entre distintas variedades, el número de flores por planta puede variar entre 3 y 83 flores, en cuanto a los pétalos su longitud varía entre 0,05 y 0,24 m y su ancho entre 0,04 y 0,25 m.
- d) Rizoma:** Los rizomas son ramificados y se orientan de forma paralela a la superficie, sus ramificaciones se dividen en segmentos, que se desarrollan consecutivamente como se observa en la Figura 3-1 (Puncha et al., 2007). Los segmentos que presentan mejor rendimiento en el contenido de almidón y sus propiedades fisicoquímicas son el prematuro y el maduro, los cuales tienen cierta forma de trompo (Ariza et al., 2013). El rizoma aprovechable posee un tamaño que oscila entre los 3 y 12 cm de diámetro (Estrada, 2020) y de longitud poseen entre 7 y 26 cm (Torres, 2004), una humedad que oscila entre 71 y 83% (Puncha et al., 2007).

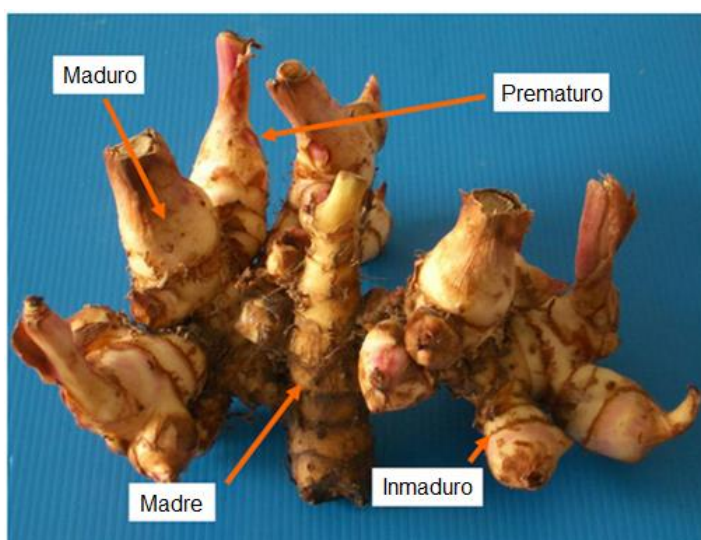


Figura 3-1. División y segmentos del rizoma de la achira.
Fuente: Puncha et al., 2007.

3.2. Achira en el mundo

La achira se encuentra presente en regiones tropicales de América Latina, el Caribe, Asia y África (Andrade et al., 2012). Su objetivo principal desde hace 4000 años es la extracción de almidón contenido en sus rizomas, debido a su importancia en la gastronomía tradicional como alimento básico (Puncha et al., 2007), desde entonces y hasta ahora, refuerza la identidad y cultura indígena y rural de varias regiones, especialmente andinas (Yaruro et al., 2021). Sin embargo, en la última década se han realizado algunos estudios para el aprovechamiento de los derivados del rizoma que genera la extracción del almidón.

Según Andrade et al. (2015) se han realizado estudios para aprovechar los residuos fibrosos del rizoma que se generan después de la extracción del almidón, con el fin de generar materiales biodegradables de interés comercial, también se han propuesto como una fuente de biopolímeros para industrias de empaque y farmacéuticas.

3.3. Achira en Colombia

Según Torres (2012) en Colombia la extracción del almidón de achira se realiza de forma artesanal y participan cerca de 1200 núcleos productores, al menos 3500 personas. Hay cerca de 1600 ha sembradas, en departamentos de la zona andina y la región cafetera, donde el departamento con mayor producción es Cundinamarca (áreas de producción por departamento se presentan en la Tabla 3-1). El rendimiento del cultivo en cuanto a la producción del almidón del cultivo varía entre 1000 y 2000 kg/ha (Torres, 2004; Suquilanda, 2012).

Tabla 3-1. Área sembrada de Achira por departamento.
Fuente: Agronet, 2014.

Departamento	Área sembrada (ha)
Cundinamarca	584,4
Boyacá	335,25
Hulia	290
Nariño	150
Tolima	87,5
Cauca	44,3
Antioquia	24
Santander	24
Putumayo	22,2
Valle del Cauca	9
Norte de Santander	7
Caldas	1,6
Quindío	1
Caquetá	1

Además de la extracción del almidón, el cultivo de achira también es usado para fines ornamentales por el colorido de sus flores, además, sus hojas son utilizadas en la industria gastronómica para envolver y servir alimentos (Ariza et al., 2013). La Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA) ahora AGROSABIA, ha investigado este cultivo y lo han posicionado como una alternativa de producción para el pequeño productor del país (Seminario, 2004; Torres, 2012).

3.4. Almidón de achira

El almidón de achira es un polímero de glucosa que está compuesto principalmente por una fracción molecular lineal y una ramificada (amilosa y amilopectina respectivamente), estos polímeros se comprimen en partículas semicristalinas con una estructura bien organizada (Warren et al., 2016).

La investigación sobre este producto, y sobre otras fuentes de almidones no convencionales o no comerciales ha tomado relevancia durante los últimos años, debido a su disponibilidad regional, su producción sustentable y principalmente por algunas

ventajas tecnológicas en comparación con los almidones comerciales (Tagliapietra et al., 2021), estas ventajas se evidencian especialmente en su utilidad en la industria alimentaria, cosmética, papelera y textil (Zhu, 2020).

3.4.1. Extracción

La extracción de almidón es un proceso que en gran parte se realiza de manera artesanal (Torres, 2012), este proceso inicia con la cosecha y termina con el producto seco. A continuación, se enuncian brevemente los procesos que se requieren (Torres, 2004).

- a) **Cosecha:** Este proceso se debe realizar cuando el cultivo muestra síntomas de madurez, por ejemplo, el follaje empieza a secarse (como se observa en la Figura 3-2) y que el contenido de almidón en sus rizomas sea alto, para esto se cosecha un rizoma, el cual es cortado, por procesos de oxidación aparece un color negrozco después de unos cuantos minutos.



Figura 3-2. Cultivo de achira que presenta síntomas de madurez. Fotografía propia del autor. Finca los cerezos - Viracachá (2019).

La cosecha consiste en sacar los rizomas subsuperficiales de forma manual o con la ayuda de algún implemento como azadón o una yunta, estos últimos se deben manejar con cuidado ya que pueden ocasionar daño a los rizomas (Torres, 2004). Una vez se han sacado los rizomas se procede a sacudir la tierra que tienen adherida, se cortan las raíces y se seleccionan las secciones del rizoma que se quieran aprovechar (Figura 3-3), especialmente las secciones maduras y prematuras que son las que poseen mayor cantidad de almidón (Puncha et al., 2007).



Figura 3-3. Rizoma cosechado en el sitio de estudio.

Fotografía propia del autor. Finca los cerezos - Viracachá (2019).

- b) Lavado de rizomas:** Una vez se ha realizado la cosecha de los rizomas se deben lavar, esto es de gran importancia debido a que, por su forma irregular, pueden tener gran cantidad de tierra y arena adherida, que si no se retira puede afectar la calidad del almidón.

Se recomienda que el rizoma sea puesto en remojo durante aproximadamente 30 minutos, para que la tierra y partículas se ablanden, posteriormente se termina de lavar los rizomas por medio del suministro de agua y agitación.

- c) Rallado:** Cuando los rizomas ya se encuentren limpios son introducidos en un molino para su procesamiento, lo que produce una masa de producto rallado, denominado popularmente “masato”. La eficiencia de este proceso influye directamente en la facilidad de separación del almidón, por lo que se recomienda que el proceso se realice en un implemento mecánico, que cuente con un motor ya sea eléctrico o de combustión para garantizar una potencia y trabajo suficientes y constantes. También se recomienda para facilitar el proceso, la adición de un caudal de agua durante el proceso.
- d) Tamizado:** La masa de producto rallado o masato obtenido contiene material vegetal procesado, raíces y almidón, por lo que es necesario tamizarlo para separar el almidón. Para esto, el masato es dispuesto sobre una malla o tamiz fino, en donde se mueve y presiona repetidas veces, al mismo tiempo se adiciona agua para que arrastre el almidón, el cual pasa a través de la malla. El agua con almidón se va acaparando en recipientes o tanques para continuar con el proceso. (Figura 3-4).



Figura 3-4. Tamizado de producto rallado o “masato”.

Fotografía propia del autor. Finca los cerezos - Viracachá (2019).

e) Lavado o blanqueado: El agua obtenida en el tamizado se debe disponer en tanques y recipientes donde el almidón se sedimenta y las impurezas quedan en suspensión debido a la diferencia de densidades (Figura 3-5). Cuando el almidón se sedimenta, se retira el agua con impurezas y se introduce nuevamente agua limpia. Con la ayuda de implementos inocuos se remueve y se agita el almidón sedimentado con el objetivo de que las impurezas del almidón floten. Después de agitar se debe permitir que el almidón sedimente de nuevo y se debe retirar de nuevo el agua. Este proceso se debe repetir entre 6 y 8 veces, o hasta que el almidón sedimentado presente un color blanco uniforme.



Figura 3-5. Estructura para lavado de almidón de achira.

Fotografía propia del autor. Finca los cerezos - Viracachá (2019).

- f) **Secado:** Una vez el almidón esté debidamente lavado se procede a secar. Normalmente, el secado se realiza de manera artesanal, expuesto directamente a la radiación en secadores solares tradicionales artesanales, los cuales cuentan con una estructura donde se dispone el almidón y una cubierta plástica que almacene calor y proteja al almidón.

3.4.2. Propiedades fisicoquímicas

La relación de sus componentes y su estructura granular le otorga al almidón propiedades fisicoquímicas y funcionales características, lo que permite que sea utilizado con una gran diversidad de propósitos (Ariza et al., 2013). Sin embargo, se ha demostrado que las propiedades del almidón de achira difieren entre ecotipos de la misma especie y la etapa de maduración del rizoma, además, del segmento en el que se realizó la extracción del almidón. (Puncha et al., 2007; Cisneros et al., 2009). Sus características también pueden ser influenciadas por la zona agroecológica y las condiciones del cultivo, lo que puede generar que determinados ecotipos puedan ser utilizados o sean propicios para determinados productos o fines (Yaruro et al., 2021).

A continuación, en la Tabla 3-2, se muestran algunas características y propiedades fisicoquímicas del almidón de Achira, determinados por diferentes autores y por la norma ICONTEC que rige los parámetros de comercialización del almidón de achira en Colombia (NTC-3228 Industrias Alimentarias. Almidón de Achira).

Tabla 3-2. Características del almidón de achira.

Fuente: ICONTEC, 1995; Pérez & Lares, 2005; Puncha et al., 2007; Ariza et al., 2013; Yaruro et al., 2021)

	ICONTEC (1995)	Pérez & Lares (2005)	Puncha et al. (2007)	Ariza et al. (2013)	Yaruro et al. (2021)
Humedad (%)	<20	18,17		13,6-23,4	13,53-14,36
Proteína cruda (%)	<1	0,67	0,06	0,18-0,71	0,21-0,69
Fibra dietética total	<0,2	0,34		0,23-0,53	
Cenizas (%)	<0,5	0,32	0,18-0,33	0,17-0,4	0,11-0,34
pH	<6			5,5-6	6,54-6,78
Amilosa (%)		13	30,9-36,2	30-39	20,98-39,11

3.4.2.1. Descripción de las variables evaluadas

A continuación, se describen las variables evaluadas en esta investigación y su importancia en la calidad del almidón de achira:

- a) Humedad inicial:** Según la Norma Técnica Colombiana NTC 6375 (2019), es la pérdida de masa, expresada en términos de porcentaje.
El contenido de humedad inicial es un parámetro que influye en la tasa de secado, pues a mayor contenido de humedad, mayor cantidad de agua evaporada por unidad de energía. Si los contenidos de humedad son muy elevados se necesita una mayor energía para evaporar el agua de un producto (Dalpasquale et al., 1991).
- b) Actividad de agua (a_w):** Este parámetro determina la cantidad de agua libre en el producto, es decir, el agua que permite desarrollar reacciones químicas y la que está disponible para el crecimiento de hongos, bacterias, microorganismos, etc. Valores menores a 0.6 son óptimos ya que se inhibe el crecimiento microbiano, fúngico, bacteriano, etc. (Belitz et al., 2012)
- c) pH:** El pH de los almidones es un parámetro importante, debido a que se relaciona directamente con posibles cambios en los productos durante su procesamiento o almacenamiento (Bello, 2010). Los pH bajos influyen de forma directa sobre la conservación de alimentos al inhibir el crecimiento microbiano, también influyen de forma indirecta al disminuir la resistencia al calor de los microorganismos (Caballero, 2008). Este parámetro es importante para este producto, según varias fuentes (Yaruro, 2018; ICONTEC, 1991), el almidón de achira presenta un pH ácido, valores entre 5.5 y 6.7, lo que previene y/o retarda el crecimiento microbiológico, lo que ayuda a prolongar su conservación (Alzamora et al., 2004).
- d) Parámetros de color:** El color es un parámetro importante para evaluar la calidad del producto, debido a que el oscurecimiento en la superficie de productos se relaciona principalmente con la oxidación de contenidos fenólicos, lo que se refleja en la pérdida de valor nutritivo del producto (Mishra et al., 2013).
- e) Índice de blancura (IB):** Este índice expresa por medio de un intervalo de 0 a 100 la blancura de un producto, en donde 0 es negro y 100 blanco (Yaruro, 2018).

- f) Análisis proximal:** El análisis proximal o también conocido como análisis Weende, es el conjunto de parámetros que se deben determinar para caracterizar un producto alimenticio para verificar si es pertinente en una dieta como fuente de proteína o de energía (Olivera et al., 1993). Este análisis incluye los siguientes parámetros:
- **Proteína cruda:** Su determinación y evaluación permite controlar la calidad y cantidad de los insumos proteicos que el alimento es capaz de suministrar.
 - **Lípidos crudos:** Elementos de reserva y protección que son necesarios para la salud, pero en pequeñas cantidades debido a su valor calórico (Carbajal, 2013).
 - **Ceniza:** Se considera como el contenido de minerales totales o material inorgánico que posee un producto alimenticio.
- g) Densidad aparente del almidón:** La densidad aparente es la relación que existe entre el peso del producto con el volumen que ocupa, este parámetro tiene en cuenta los espacios intersticiales que se pueden presentar principalmente en granos. La determinación de este parámetro es importante principalmente para el diseño de equipos y procesos en los que se deba manipular un producto (Guerrero, 2005).
- h) Temperatura de gelatinización del almidón:** Cuando se calientan los almidones en solución (agua- almidón), alcanzan una temperatura específica en la cual los gránulos que lo componen se hinchan; esta temperatura es denominada temperatura de gelatinización (Aristizábal et al., 2007). Este proceso es importante ya que los polímeros del almidón que se ven afectados impactan el procesamiento, la calidad y la estabilidad del almidón y los subproductos (Acuña, 2012). Este parámetro decide el potencial de uso del almidón ya que, si presenta altas temperaturas de gelatinización, es recomendable su inclusión en productos o procesos que presenten temperaturas altas. Por el contrario, almidones con bajas temperaturas de gelatinización son más propicios para preparaciones o procesos que requieren bajas temperaturas.
- i) Tamaño y morfología de partícula:** La determinación de este parámetro es importante debido a que el tamaño de partícula influye directamente en las características funcionales del almidón (Yaruro. 2018). Por ejemplo, almidones con tamaño de partículas grandes, presentan una mayor viscosidad, lo que puede influir en sus posibles usos y propósitos. La información que se encuentra en la

literatura con respecto al tamaño es muy diversa, debido a que este es un parámetro que está directamente relacionado con el origen, la madurez del producto y el método de extracción del almidón (Pérez & Lares 2005). Con respecto a la morfología del almidón de achira, varios autores de diferentes nacionalidades describen de manera similar los gránulos, en los que predominan formas ovalada alargada y de disco, junto con algunos gránulos circulares e irregulares (Quiroga, 2009; Watcharatewinkul et al., 2009; Andrade et al., 2012).

- j) Capacidad de retención de agua (CRA):** La determinación de estos parámetros funcionales es de importancia para conocer el potencial y comportamiento del almidón en sus posibles usos, tanto alimenticio como industrial. Estas propiedades están directamente influenciadas por el ecotipo o variedades, la edad de la planta, la época de cosecha, la fertilidad del suelo y las condiciones agroecológicas, entre otros factores (Surco, 2004).
- k) Difusividad efectiva:** La difusividad efectiva es una propiedad que dimensiona la resistencia interna de un producto a la transferencia de materia hacia un medio (Polo, 2003), los valores que toma este parámetro se relacionan de forma inversamente proporcional a la resistencia interna, es decir, entre mayor sea la difusividad efectiva las resistencias internas del producto son menores y viceversa. Según García et al. (2016) los valores de difusividad efectiva en alimentos oscilan generalmente entre 10^{-6} y 10^{-11} m²/s.
- l) Energía de activación:** Representa la energía necesaria para que se produzca una reacción determinada en los alimentos, su valor relaciona el efecto que la temperatura tiene sobre una determinada reacción, es decir, cuanto más elevado sea su valor, la temperatura ejercerá una mayor influencia en los procesos y reacciones (Ibarz et al., 2010). Para el caso específico de secado de productos agrícolas, la energía de activación determina la influencia de la temperatura sobre la difusividad del agua desde el interior del producto hacia la superficie (Vega et al., 2006).

3.4.3. Uso del almidón

Debido a sus características y composición el almidón de Achira puede ser utilizado con diferentes propósitos, en diversidad de industrias.

- a) **Industria gastronómica:** El almidón es principalmente utilizado como materia prima en diversidad de recetas y productos en la industria alimentaria. En Colombia es principalmente usado en la elaboración de un bizcocho, conocido como “Achira”, además de pan, maicena, entre otros, mientras que, en algunos países, especialmente asiáticos, lo utilizan en la producción de fideos transparentes (Ariza et al., 2013). Su utilidad en el desarrollo de recubrimientos o películas biodegradables ha sido estudiada por Hernández et al. (2008), Andrade et al. (2012), entre otros, ya que ha presentado un mejor comportamiento a diferencia de películas desarrolladas con almidón de otros tubérculos, debido a las propiedades mecánicas obtenidas, además de su baja permeabilidad y solubilidad.
- b) **Como aditivo:** El almidón de achira puede ser utilizado para cambiar las propiedades de diferentes sustancias. En perforaciones profundas el almidón puede ser utilizado como espesante, al aumentar la viscosidad del lodo y para el control de su filtrado, presentando incluso mejor comportamiento en comparación con productos comerciales específicos, esto es posible gracias al tamaño y forma de sus partículas (Andrade et al., 2012; Ariza et al., 2013).

3.5. Identificación del problema

En Colombia, las familias productoras de almidón de achira basan la mayor parte de su actividad económica en este cultivo, debido especialmente a la venta de los diferentes productos y recetas derivados. Sin embargo, la venta y distribución de estos productos se encuentran regionalizadas y limitadas a unos cuantos municipios de la región Andina. En los últimos años se han desarrollado múltiples iniciativas que buscan generar empresa en torno a los diferentes derivados del almidón al darle un valor agregado al producto y

buscar comercializar los productos de forma nacional o internacional, con el objetivo de descentralizar su nicho de mercado y generar el crecimiento de la economía por medio de un ingreso adicional a las familias productoras de la región (Linares & Rey, 2018).

La mayoría de los estudios y modelos empresariales para el almidón de achira y sus subproductos no son factibles, debido a que día a día el mercado de productos agrícolas se está enfocando en nichos de mercado más especializados, que son más exigentes con los parámetros de calidad, lo que lleva a sobrecostos en la producción, empaque, almacenamiento y transporte (Galindo, 2017). La mayoría de los productores son pequeños y no cuentan con recursos suficientes para este tipo de manejo y al no contar con un sistema tecnificado de extracción, acondicionamiento y almacenamiento, no hay como comprobar que el producto cumple con la calidad mínima que exigen estos mercados para su comercialización. Por lo anterior, se planteó el análisis de las características fisicoquímicas del almidón de achira producido artesanalmente, para verificar la calidad final del producto y evaluar si se cumple con requerimientos de estos mercados, para poder mejorar las opciones de comercialización e ingresos de los productores.

3.6. Materiales y métodos

A continuación, se describen los materiales y métodos utilizados en esta investigación.

3.6.1. Secado

Para este capítulo, se recopiló información para realizar una comparación de las características fisicoquímicas del almidón de achira obtenido en tres secadores diferentes. Para esto se caracterizó el producto antes del proceso de secado y se monitorearon los tres tipos de secado, generando las curvas de secado, con lo cual se obtuvo la difusividad efectiva y la energía de activación.

Los secadores usados fueron: los dos secadores mencionados en el capítulo 2 (solar artesanal y solar de tipo armario) y el secador convectivo de laboratorio con las siguientes especificaciones: Horno convectivo Haratherm OMS100 (Thermo Scientific, Alemania), el cual cuenta con temperatura programable y con flujo de aire interno de 3 m/s (Figura 3-6).



Figura 3-6. Horno convectivo Haratherm OMS100.

Fuente: Thermo Scientific- Alemania.

Con el secador convectivo se realizaron 3 ensayos de secado a diferentes temperaturas 35, 45 y 55°C. El objetivo fue determinar las diferencias significativas entre las condiciones en natura (iniciales) y del producto obtenido después del proceso de secado (finales). Además, determinar si las diferentes temperaturas también pueden influenciar en las variables de estudio.

Todos los ensayos se realizaron en la Universidad Nacional de Colombia en el laboratorio de Poscosecha de productos agrícolas y el laboratorio de Análisis Físico-Químico de Alimentos del Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos – ICTA.

3.6.2. Variables evaluadas

Para todas las variables se tomaron tres muestras por triplicado por cada método de secado, para el secador convectivo, se hizo para las tres temperaturas evaluadas. Las propiedades determinadas fueron:

- a) Humedad inicial:** se determinó mediante el secado en estufa o método gravimétrico, por medio de la ecuación (1), en el cual el producto se sometió a $130^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ durante $120 \text{ min} \pm 5 \text{ min}$ según la NTC 6375 “Cereales y productos cereales. Determinación del contenido de humedad” (ICONTEC, 2019).

$$H_{\text{inicial}} = \frac{\text{Pérdida de humedad (g)}}{\text{Peso original muestra (g)}} * 100 \quad (1)$$

Donde, H_{inicial} es la humedad inicial (%).

- b) Actividad de agua (a_w):** se obtuvo por medio del Hydrolab C1 (Hygrolab 3, Rotronic, Suiza).
- c) pH:** El pH fue determinado siguiendo el método oficial de la AOAC 943.02. (AOAC, 2012). Se utilizó un medidor de pH HI8521 (Hanna instruments, USA), introduciendo el electrodo en una mezcla agitada de almidón y agua destilada, hasta que la lectura se estabilizó.
- d) Parámetros de color:** Para cada muestra se determinó el color utilizando un colorímetro (CR-400, Konica Minolta, Japón), configurado en la escala CIE- $L^*a^*b^*$; donde L^* es luminosidad, a^* representa la coordenada verde (-) a rojo (+), y b^* representa la coordenada azul (-) a amarillo (+).
- e) Variación de color (ΔC):** se obtuvo por medio de la Ecuación (2) en donde las variables con subíndice “0” son los datos de color de la muestra natural y las variables sin subíndice son los datos de color de la muestra seca (Resio & Nilda, 1999).

$$\Delta C = \left| \left(\sqrt{L^{*2} + a^{*2} + b^{*2}} - \sqrt{L_0^{*2} + a_0^{*2} + b_0^{*2}} \right) / \sqrt{L^{*2} + a^{*2} + b^{*2}} \right| \quad (2)$$

donde, ΔC es la variación de color, los parámetros de color L^* , a^* y b^* sin subíndice son del estado final y los parámetros de color L^* , a^* y b^* con subíndice son del estado inicial.

- f) Índice de blancura (IB):** se obtuvo por medio de la Ecuación (3). Este índice expresa por medio de un intervalo de 0 a 100 la blancura de un producto, en donde 0 es negro y 100 blanco (Yaruro, 2018). Se utilizó un colorímetro CR-400 (Konica

Minolta, Japón), configurado en la escala CIE-L*a*b*; donde L* es luminosidad, a* representa la coordenada verde (-) a rojo (+), y b* representa la coordenada azul (-) a amarillo (+).

$$IB = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + (a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (3)$$

donde, IB es el índice de blancura, L*, a* y b* son los parámetros de color.

- g) **Contenido de proteínas:** se determinó a través del método Kjeldahl, según los métodos AOAC 992.23 y AACC 46-10 (AOAC, 2000).
- h) **Contenido de grasa:** se determinó mediante el método gravimétrico con extracción con éter de petróleo según el método AOAC 945.16 (AOAC, 1990).
- i) **Contenido de cenizas:** se determinó usando el método gravimétrico mediante incineración según el método AOAC 942.05 (AOAC, 2005).
- j) **Densidad aparente del almidón:** La determinación de la Densidad aparente se llevó a cabo por el método de Smith (1967), el cual utiliza la relación entre el peso del almidón y su volumen. Se realiza utilizando un recipiente de volumen y peso conocido, en el cual se debe introducir el producto, teniendo cuidado de no aplicar fuerzas que lo puedan comprimir, y procurando que el recipiente quede totalmente lleno. Se recomienda dar pequeños golpes por debajo del recipiente mientras se esté llenando para que el producto se acomode y asiente efectivamente. Una vez lleno el recipiente se procede a tomar el peso y a calcular la densidad por medio de la Ecuación 4.

$$\rho \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{\text{Peso total (g)} - \text{Peso del recipiente (g)}}{\text{Volumen del recipiente (cm}^3\text{)}} \quad (4)$$

donde, ρ es densidad aparente $\left(\frac{g}{cm^3} \right)$, Peso total es el peso del recipiente lleno (g).

- k) **Temperatura de gelatinización del almidón:** La temperatura de gelatinización se obtuvo de acuerdo con el método utilizado por Grace (1977). El cual se basa en el hecho de que el almidón es insoluble en agua fría y que, al aumentar progresivamente la temperatura del agua con almidón, cuando el almidón llegue a la temperatura de gelatinización va a requerir calor latente, debido a la

solubilización del almidón, es decir, la temperatura va a ser constante durante un periodo de tiempo. De acuerdo con lo anterior se realizó un montaje experimental en el que, en un baño a María, en donde la temperatura del agua presentaba un valor constante de 60°C, se colocó la mezcla de agua con almidón. Su temperatura fue monitoreada durante el proceso de calentamiento y los datos obtenidos fueron graficados y analizados. En el punto en el que la temperatura presentó valores constantes durante un periodo de tiempo, se determinó la temperatura de gelatinización.

- l) Tamaño y morfología de partícula:** Se determinó por medio de micrografías electrónicas, utilizando un microscopio electrónico de barrido (SEM) Tescan Vega - 3 SB (TESCAN ORSAY HOLDING, Republica Checa), a un potencial de aceleración de 25 Kv y una magnificación de 500x y 2000x. Las muestras fueron colocadas sobre un soporte metálico con cinta de doble cara y revestida con oro para mejorar su conductividad (Leonel, 2007).
- m) Capacidad de retención de agua (CRA):** se determinó según la metodología mencionada por Bryant y Hamaker (1997) en la cual se introducen 0,5 g de almidón en un tubo de centrifuga pesado previamente, agregando posteriormente 6 ml de agua destilada a 30°C. Luego se llevó a baño térmico con agitación a una temperatura de 30 °C durante 30 minutos. Luego se centrifugó a 3000 rpm durante 20 min. Se retiró el sobrenadante y se pesa el gel retenido en el tubo, mientras del sobrenadante extraído se toman 2 ml para llevarlo dentro de una caja Petri a un horno a 90°C durante 4 horas. La obtención de estos parámetros se realizó con las ecuaciones 5, 6 y 7.

- Ecuación 5: Índice de absorción de agua o CRA:

$$CRA \left(\frac{g \text{ absorbido}}{g \text{ harina}} \right) = \frac{\text{Peso del gel (g)}}{\text{Peso de la muestra (g)}} \quad (5)$$

donde, *CRA* es el Índice de absorción de agua $\left(\frac{g \text{ absorbido}}{g \text{ harina}} \right)$,
Peso de la muestra es el peso inicial de la muestra (*g*).

- Ecuación 6: Índice de solubilidad:

$$ISA(\%) = \frac{\text{Peso seco sobrenadante (g)}}{\text{Peso de la muestra (g)}} * 100 \quad (6)$$

donde, *ISA* es el Índice de solubilidad (%), *Peso de la muestra* es el peso inicial de la muestra (*g*).

- Ecuación 7: Poder de hinchamiento:

$$PH = \frac{\text{Peso gel (g)}}{\text{Peso de la muestra (g)} - \text{Peso seco sobrenadante (g)}} \quad (7)$$

donde, *PH* es el poder de hinchamiento, *Peso de la muestra* es el peso inicial de la muestra (*g*).

n) Difusividad efectiva: Según lo observado por Mesa & Zambrano (2018), la determinación de la difusividad efectiva se realiza adecuando las curvas de secado a la segunda ley de Fick para placa plana de 3 términos por medio de las ecuaciones 8,9 y 10 (López et al., 2019).

$$Y = \frac{xbs_i - x_{eq}}{xbs_f - x_{eq}} \quad (8)$$

$$Y = \frac{\left(8 * \frac{1}{25 * \exp(25 * k * \pi^2 * t) + \left(\frac{1}{9 * \exp(9 * k * \pi^2 * t)} \right) + \exp(-k * \pi^2 * t)} \right)}{\pi^2} \quad (9)$$

$$Deff = 4 * k * L^2 \quad (10)$$

donde, *Y* es el adimensional de humedad por tratamiento, *xbs_i* es la humedad inicial en base seca del tratamiento ($\frac{g}{g}$), *xbs_f* es la humedad final en base seca ($\frac{g}{g}$), *x_{eq}* es la humedad de equilibrio en base seca ($\frac{g}{g}$), *t* es el tiempo (*s*), *k* es la constante de secado, *L* es el espesor de la muestra (*m*), *Deff* es la difusividad efectiva ($\frac{m^2}{g}$).

Se debe aclarar que normalmente el parámetro L es la mitad del ancho de la muestra, ya que se asume que la transferencia de masa ocurre desde el centro de la placa hacia las caras, sin embargo, como el proceso de secado solar se realiza de manera pasiva y el almidón está dispuesto sobre una superficie poco permeable, se asume que L es igual al ancho de capa.

- o) Energía de activación:** Cuando el coeficiente de difusividad efectiva se considera constante se utiliza la ecuación de Arrhenius (Ecuación 11), para determinar la energía de activación (Salcedo et al., 2014).

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{R * T}\right) \quad (11)$$

donde, D_{eff} difusividad efectiva $\left(\frac{m^2}{g}\right)$, D_0 es un factor pre-exponencial (factor de Arrhenius) $\left(\frac{m^2}{g}\right)$, E_a es la energía de activación $\left(\frac{KJ}{mol}\right)$, R es la constante universal de los gases $\left(\frac{KJ}{molK}\right)$, T es la temperatura (K) .

3.6.3. Diseño experimental

Ya que el proceso de secado en los secadores solares no puede ser replicable debido a que se ve afectado directamente por las condiciones ambientales de temperatura y humedad relativa, no se pudo realizar un análisis estadístico más robusto, porque no se pudo tener control de estas variables.

Debido a que esta variedad de achira solo provee una cosecha al año, se realizó un proceso de secado en cada secador solar, seleccionando un diseño experimental completamente al azar (DCA). Se recolectaron 3 muestras por triplicado de 20 g en cada secador solar. Para cada variable de respuesta para cada condición de secado: dos secadores solares y secador convectivo de laboratorio a tres temperaturas diferentes y así poder realizar el análisis estadístico posterior.

3.6.4. Análisis estadístico

Para determinar los valores de cada variable, en cada ensayo se realizaron tres repeticiones. El análisis estadístico fue realizado mediante el software RStudio. Primero se verificó si los datos recolectados cumplían con el supuesto de normalidad, por medio

de la prueba de Shapiro-Wilk. También se verificó el supuesto de homogeneidad de la varianza por medio del test de Levene. Una vez realizadas las verificaciones de los supuestos, se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA) y una prueba de comparación de tratamientos, mediante pruebas de Tukey al nivel del 5% de significancia para determinar si los parámetros de calidad del almidón seco determinados para el producto de cada secador presentaron diferencias estadísticas significativas.

3.7. Resultados y análisis

Aunque el proceso de secado en cada secador se llevó a cabo hasta el contenido de humedad en equilibrio del almidón de achira, en el secado convectivo, las muestras para el análisis se tomaron cuando el producto alcanzó una humedad (bh) del 9% aproximadamente. Esto se realizó con base en la información descrita por varios autores, como se muestra en la tabla 3-2 del numeral 3.4.2, donde se menciona el porcentaje de humedad mínimo de almacenamiento, para el cual no se ven afectadas las características físicas y químicas del almidón.

A continuación, se presentan los análisis y resultados obtenidos para todas las variables mencionadas en la metodología.

3.7.1. Contenido de humedad inicial del producto

La humedad inicial fue similar para todos los grupos de muestras ya que no presentó diferencias significativas ($p > 0,05$), lo cual garantiza que el contenido de humedad inicial del almidón no fue un parámetro que influyó en los resultados del proceso de secado.

El almidón fresco presentó condiciones del contenido de humedad promedio de $47,15\% \pm 0,30\%$.

3.7.2. Contenido de humedad final del producto

A continuación, se presentan en la Tabla 3-3, los resultados de contenido de humedad final del almidón para los dos secadores solares.

Tabla 3-3. Valores medios¹ del contenido de humedad final del almidón en los dos secadores solares.

Variable de respuesta	Secador Artesanal	Secador Tipo Armario
Contenido de humedad final (%)	16,81±0,43 ^b	14,95±0,22 ^c

¹ Media ± ds

Medias seguidas de letras distintas en el mismo parámetro, en la misma fila, indican diferencias significativas, según prueba de Tukey ($P \leq 0,05$)

Aunque las muestras analizadas presentaron diferencias significativas, siendo el secador Tipo Armario el que presentó un mejor comportamiento, de acuerdo con la NTC 3228 (ICONTEC, 1991), las dos condiciones de humedad se encuentran dentro del rango permitido.

3.7.3. Actividad de agua

A continuación, en la tabla 3-4, se presentan los resultados de la actividad de agua para los 3 secadores junto con el contenido de humedad final, ya que estas dos se encuentran directamente relacionadas.

Tabla 3-4. Resultados medios¹ de actividad de agua y contenido de humedad final para cada secador

Variable de respuesta	Contenido de humedad final (%)	Actividad de agua
Secador Convectivo	55°C	8,79±0,29a
	45°C	8,83±0,19a
	35°C	8,77±0,11a
Secador Artesanal		16,81±0,43b
Secador Tipo Armario		14,95±0,22c

¹ Media ± ds

Medias seguidas de letras distintas en el mismo parámetro, en la misma columna, indican diferencias significativas, según prueba de Tukey ($P \leq 0,05$)

Ya que los valores por debajo de 0,6 son seguros para el almacenamiento de un producto por periodos de tiempo prolongados (Caballero, 2008), se observa que los valores de actividad de agua del producto secado en el secador convectivo son óptimos y no presentan diferencias significativas entre sí.

En cuanto a los secadores solares, el secador Tipo Armario presenta mejores resultados que el artesanal, ya que la actividad de agua es menor a 0,6. Por el contrario, el producto secado en el secador artesanal se encuentra por encima de niveles recomendados por lo que, si se almacena este producto, su vida útil se va a ver afectada por el crecimiento de hongos levaduras y bacterias (Man y Jones, 2000).

3.7.4. pH

Los valores medios de las muestras de almidón en natura no presentaron diferencias significativas entre ellos, por lo que se entiende que este valor inicial no influye sobre los resultados obtenidos después del secado. El almidón fresco presentó un valor de pH promedio de $5,029 \pm 0,402$.

Este parámetro presentó diferencias significativas para el secado convectivo a 45°C y el secador artesanal, mientras que el resto de los métodos de secado presentaron valores de pH más ácidos los cuales no cuentan con una diferencia significativa entre sí, como se observa en la Tabla 3-5.

Tabla 3-5. Resultados medios¹ del pH para el almidón de achira seco en los tres secadores.

Variable de respuesta		pH
Secador Convectivo	55°C	4,573±0,183a
	45°C	4,745±0,121b
	35°C	4,634±0,067a
Secador Artesanal		4,914±0,024c
Secador Tipo Armario		4,620±0,078a

¹ Media ± ds

Medias seguidas de letras distintas en el mismo parámetro, en la misma columna, indican diferencias significativas, según prueba de Tukey (P ≤ 0,05)

Dados estos resultados, el análisis sobre las posibles razones o parámetros que pueden influir en los resultados de esta variable, no es concreto, ya que no se aprecia una relación, entre el método de secado y los resultados de esta variable. Sin embargo, cabe resaltar que los resultados obtenidos no concuerdan con valores de pH encontrados en la literatura, ya que el almidón que se analizó en este trabajo tuvo un carácter más ácido.

Según la literatura valores altos de pH en almidones, pueden presentarse debido a la proliferación y crecimiento de hongo, los cuales liberan amoniaco e incrementan el pH, por el contrario, valores bajos se atribuyen a una fermentación ácida del almidón, la cual pudo ocurrir durante el proceso de lavado del almidón, al dejar el producto por mucho tiempo sumergido (Aristizábal et al., 2007), sin embargo, hasta el momento no se ha reportado en literatura si la fermentación del almidón de achira genera algún cambio en sus propiedades, por lo que no se puede definir como una afectación.

Según Caballero (2008), la mayoría de los alimentos ácidos no representan un problema para la salud humana y se encuentran en zona de alta estabilidad (Figura 3-7), ya que el carácter ácido inhibe el crecimiento de microorganismos patógenos, sin embargo, en estos rangos de pH pueden desarrollarse microorganismos que afecten la textura y apariencia del producto.

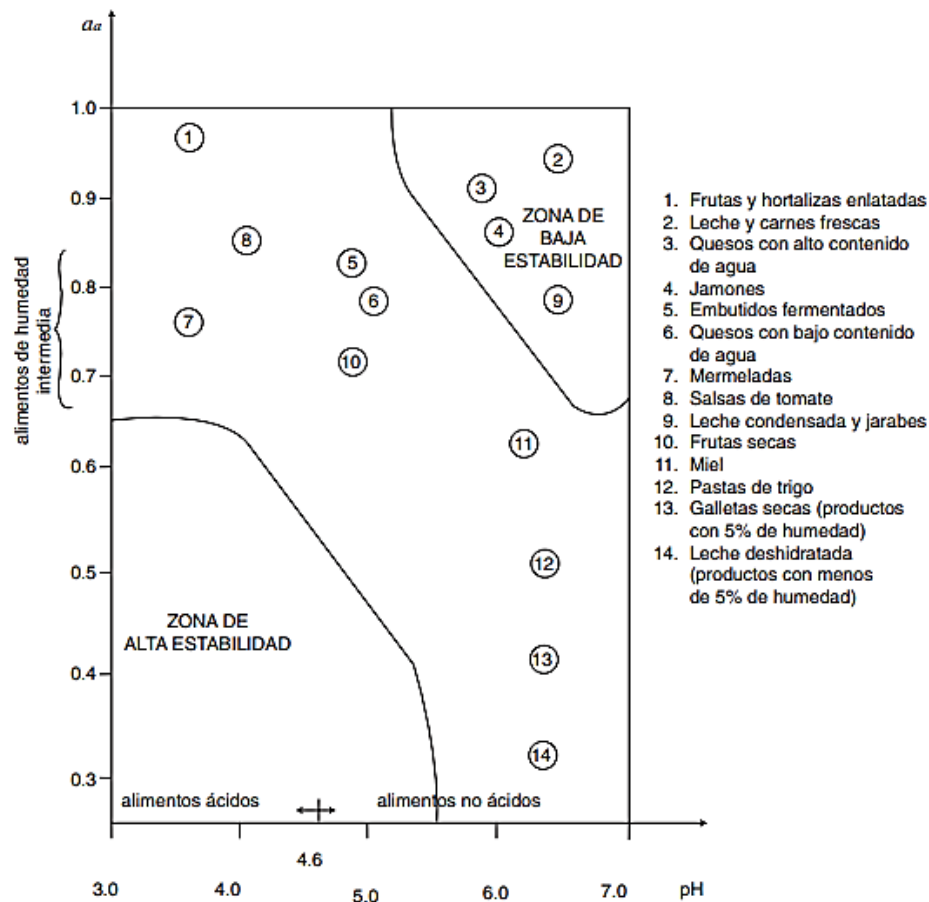


Figura3-7. Estabilidad de los alimentos con respecto a la actividad de agua y el pH.
Fuente: Caballero, 2008.

De acuerdo con la a_w y según su pH, el almidón de achira que fue secado en el secador solar de tipo armario y el convectivo, se encuentra dentro de la zona de alta estabilidad, por otro lado, el del secador artesanal, aunque cumple con el criterio de pH no alcanza a estar en zona de alta estabilidad debido a que no cumple con el criterio de a_w .

3.7.5. Parámetros de color

Para esta sección se dividen los resultados del almidón fresco y el almidón seco.

3.7.5.1. Almidón fresco

Los resultados de los análisis realizados a las muestras recolectadas del almidón de achira natural sometido a diferentes procesos no presentaron diferencias significativas entre ellas, por lo que se entiende que sus condiciones iniciales (Tabla 3-6) no influyen en los resultados posteriores al secado.

Tabla 3-6. Parámetros medios¹ de color del almidón de achira fresco.

Parámetros de color- Almidón fresco	
L*	69,36±4,17
a*	-1,11±0,16
b*	4,11±0,56
<i>IB</i>	69,06±4,16

¹ Media ± ds

3.7.5.2. Almidón seco

La variación o delta de color (ΔC) representa el cambio de color generado por el proceso. Este parámetro generalmente es utilizado para dimensionar la pérdida de color de algún producto por lo que si toma valores cercanos a cero se evidencia que el proceso no afecta de manera considerable el color. A continuación, en la Tabla 3-7, se presentan los resultados de los parámetros de color para el almidón de achira seco en los tres secadores.

Tabla 3-7. Valores medios¹ de los parámetros de color del almidón de achira seco.

Variable de respuesta		L*	a*	b*	ΔC	IB
Secador Convectivo	55°C	84,74±1,80a	(-)1,38±0,07a	4,23±0,50ade	0,15±0,05a	84,40±1,22a
	45°C	83,83±1,77a	(-)1,40±0,06a	4,23±0,16ab	0,14±0,06a	83,22±1,72a
	35°C	84,45±2,52a	(-)1,37±0,07a	4,52±0,21ace	0,15±0,06a	83,73±2,44a
Secador Artesanal		88,67±0,36b	(-)1,26±0,10b	3,98±0,08bd	0,25±0,04b	87,93±0,35b
Secador Tipo Armario		88,50±0,13b	(-)1,51±0,04c	4,49±0,03ce	0,21±0,03b	87,56±0,12c

¹ Media \pm ds

Medias seguidas de letras distintas en el mismo parámetro, en la misma columna, indican diferencias significativas, según prueba de Tukey ($P \leq 0,05$)

Sin embargo, para este análisis, partiendo del hecho que el almidón fresco presentó valores inferiores de IB que el producto seco, el análisis de la variación de color es diferente. Valores mayores representan un mayor cambio de color, lo que representa mayor IB, lo que se entiende como un mejor comportamiento. Los secadores solares, especialmente el secador artesanal, obtuvieron mejores resultados que los ensayos realizados en el secador convectivo.

Se observa que entre las diferentes temperaturas del secador convectivo no se presentaron diferencias significativas, lo que significa que la temperatura no influye de manera directa en parámetros de color. Además, los valores de IB obtenidos por este método se secado, son significativamente más bajos que los obtenidos en los secadores solares.

En cuanto a los secadores solares, los cuales, si presentan diferencias significativas entre sí, el secador que presenta mejor desempeño es el secador Artesanal. Además, con base en las coordenadas de color, se aprecia que la diferencia se encuentra en las coordenadas a^* y b^* , las cuales representan los colores primarios. Se entiende que los valores altos de humedad relativa dentro del secador Tipo Armario, afectaron claramente el proceso del secado en su etapa inicial y gracias a las condiciones desfavorables, cabe la posibilidad de que hayan ocurrido procesos que pudiesen afectar este parámetro como la actividad enzimática.

Se observa que los parámetros obtenidos para el almidón en natura representan un color más grisáceo o menos blanco que el producto seco.

3.7.6. Análisis proximal

A continuación, en la Tabla 3-8 se muestran los datos obtenidos del análisis proximal para estos parámetros, en el laboratorio del Instituto de Ciencia y Tecnología.

Tabla 3-8. Análisis proximal de almidón de Achira obtenido en diferentes métodos de secado.

Variable de respuesta	Secador Convectivo			Secador Artesanal	Secador Tipo Armario
	55°C	45°C	35°C		
Proteína (%)	0,13	0,11	0,14	0,09	0,11
Cenizas (%)	0,22	0,19	0,21	0,28	0,25
Carbohidratos (%)	92,2	90,6	90,4	82,5	85,1
Calorías (kcal/100g)	369	362	362	330	340

Se observa que los datos relacionados en la tabla coinciden con algunos datos reportados por la literatura (Pérez & Lares, 2005; Ren, 2017; Yaruro, 2018). Aunque este análisis se realizó con un fin de caracterizar los almidones obtenidos, estos resultados son solo informativos, ya que la cantidad de muestras analizadas no es suficiente para realizar un análisis estadístico, ni mucho menos para generar conclusiones con base en estos datos obtenidos.

3.7.7. Densidad aparente del almidón

A continuación, en la tabla 3-9 se presentan los resultados para la densidad aparente del almidón.

Tabla 3-9. Valores medios¹ para la densidad aparente del almidón de achira obtenido en los 3 secadores.

Variable de respuesta	Secador Convectivo			Secador Artesanal	Secador Tipo Armario
	55°C	45°C	35°C		
Densidad aparente (gr/cm³)	0,70±0,10a	0,73±0,15a	0,75±0,14a	0,72±0,12a	0,71±0,14a

¹ Media ± ds

Medias seguidas de letras distintas en el mismo parámetro, en la misma columna, indican diferencias significativas, según prueba de Tukey ($P \leq 0,05$)

Se observa que la densidad aparente, no presentó diferencias significativas entre los diferentes tipos de secado. Los valores obtenidos coinciden con valores encontrados por León, (2015).

3.7.8. Temperatura de gelatinización del almidón

A continuación, en la Tabla 3-10, se presentan los resultados para temperatura de gelatinización del almidón seco en los tres secadores.

Tabla 3-10. Resultados medios¹ de temperatura de gelatinización para el almidón de achira seco en los tres secadores.

Variable de respuesta		Temperatura de gelatinización (°C)
Secador Convectivo	55°C	69,85±1,39a
	45°C	70,24±1,50a
	35°C	69,64±1,18a
Secador Artesanal		70,13±1,06a
Secador Tipo Armario		70,02±1,09a

¹ Media ± ds

Medias seguidas de letras distintas en el mismo parámetro, en la misma columna, indican diferencias significativas, según prueba de Tukey ($P \leq 0,05$)

Dados los resultados no se observan diferencias significativas en ningún secador, lo que significa que las temperaturas de inicio de gelatinización, donde los gránulos de almidón comienzan a hincharse y requieren calor latente para realizar este proceso, es similar.

Debido a que este parámetro no se determinó por los métodos de calorimetría diferencial de barrido (DSC) o por medio de un perfil de viscosidad, los cuales son los métodos actuales de obtención, no es prudente comparar estos resultados con los de la literatura, sin embargo, los valores obtenidos son similares a los encontrados en literatura como en la investigación realizada por Yaruro (2018).

3.7.9. Tamaño y morfología de partícula

Por medio de las imágenes obtenidas por micrografía electrónica de barrida (Figura 3-8), la morfología observada concuerda con la reportada en literatura (Yaruro, 2018), ya que se presentan granulos con forma ovalada e irregular, con tamaños variados, como se observa en los histogramas de distribución. También se observa que la superficie de los granulos es lisa y no presenta accidentes o corrugaciones, lo que evidencia que la extracción del almidon se realizo de manera adecuada.

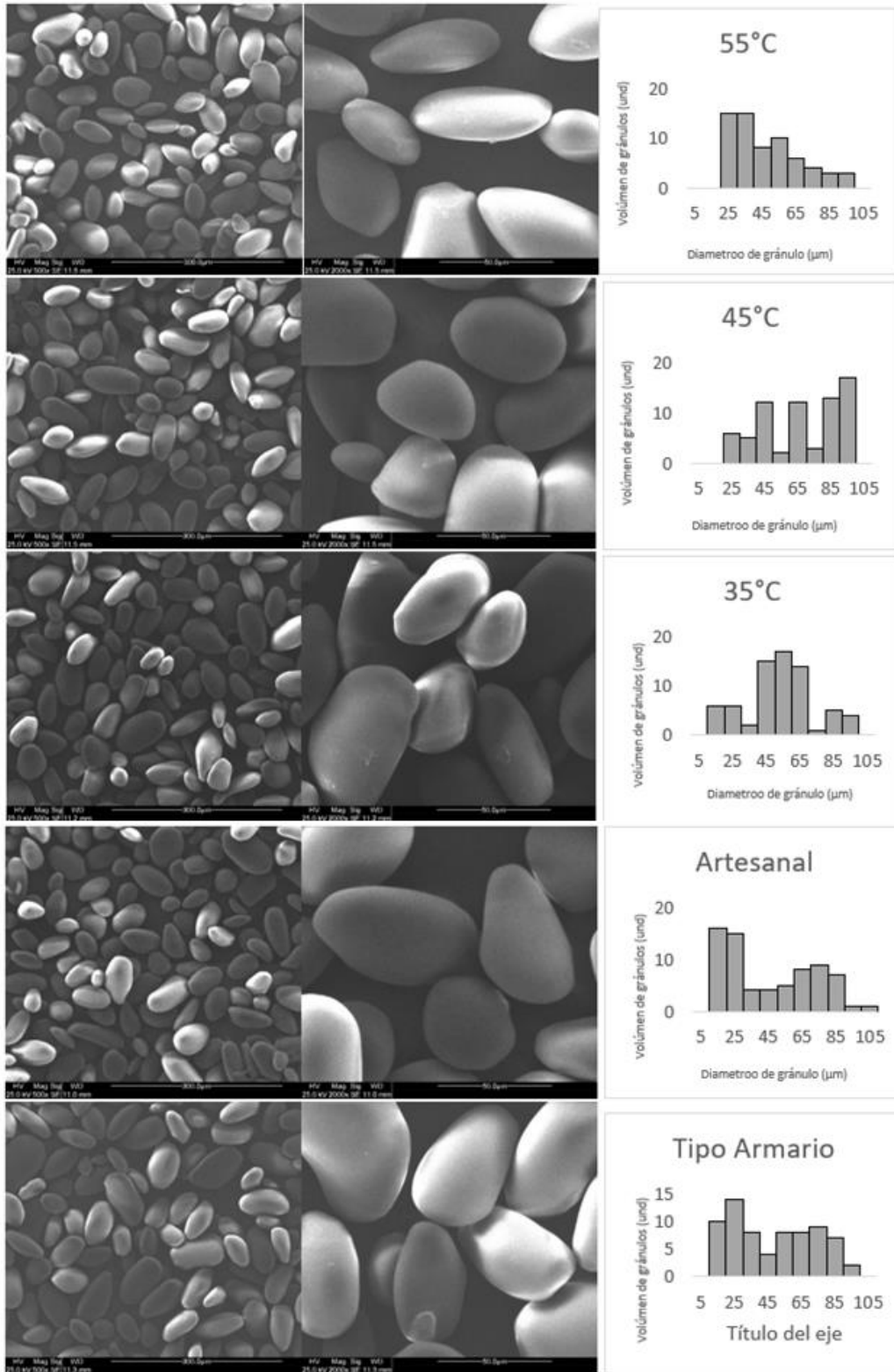


Figura 3-8. Resultados de micrografía electrónica de barrido y grafica de distribución de tamaño.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en la Tabla 3-11, se presentan los resultados del tamaño promedio de los gránulos de almidón obtenidos por cada método de secado.

Tabla 3-11. Tamaño promedio de gránulo de almidón de achira obtenidos por cada método de secado.

		Tamaño promedio (µm)	Tamaño global (µm)	Distribución de gránulos (%)		
				Gránulos pequeños (<10 µm)	Gránulos medianos (10 µm-30 µm)	Gránulos grandes (>30 µm)
Secado Convectivo	55°C	62,47±18,51	10,20-93,12	0	29,35	70,7
	45°C	76,64±19,70	23,35-94,34	0	9,35	90,7
	35°C	61,58±24,31	10,75-99,61	0	16,29	83,7
Secador Artesanal		61,49±24,27	14,29-100,89	0	44,89	55,1
Secador Tipo Armario		56,09±22,33	11,68-98,79	0	34,39	65,6

Como se observa en la Tabla 3-11, el almidón analizado presenta una distribución de tamaños amplia, aunque se considera un almidón que posee gránulos grandes, de acuerdo con la clasificación mencionada por Ren (2017), debido a que la mayor proporción de los gránulos que la masa de almidón supera los 30 µm de diámetro. Los tamaños promedio de gránulo no presentan diferencias significativas entre los distintos secadores, principalmente por la distribución amplia de tamaños, lo que resulta en valores altos de la desviación estándar.

3.7.10. Capacidad de retención de agua, porcentaje de solubilidad y poder de hinchamiento.

A continuación, en la Tabla 3-12, se presentan los resultados de capacidad de retención de agua del almidón de achira en los tres secadores.

Tabla 3-12. Resultados medios ¹ de capacidad de retención de agua del almidón de achira en los tres secadores.

Variable de respuesta		Capacidad de Retención de Agua (g gel/g)	Índice de Solubilidad (%)	Poder de Hinchamiento (g/g)
Secador Convectivo	55°C	1,95±0,14a	0,20±0,08a	2,44±0,17a
	45°C	1,90±0,08a	0,19±0,03a	2,35±0,10a
	35°C	1,86±0,41a	0,20±0,04a	2,33±0,48a
Secador Artesanal		1,46±0,13b	0,23±0,06a	1,90±0,16b
Secador Tipo Armario		1,46±0,14b	0,25±0,04a	1,95±0,16b

¹ Media ± ds

Medias seguidas de letras distintas en el mismo parámetro, en la misma columna, indican diferencias significativas, según prueba de Tukey ($P \leq 0,05$)

Se observa que los valores obtenidos en los ensayos del secador convectivo no presentaron diferencias significativas entre sí, pero son significativamente más altos que los obtenidos por los secadores solares. Esto aplica para la capacidad de retención de agua como para el poder de hinchamiento.

Los valores de Capacidad de Retención de Agua y Poder de Hinchamiento son similares a los obtenidos por de León (2015), pero son significativamente menores a los obtenidos por Yaruro (2018). La temperatura está directamente relacionada con la solubilidad, debido a que una mayor temperatura facilita la absorción de agua por parte de los gránulos y por ende su capacidad de retener agua (Huang et al., 2015). Por esta razón se presentaron diferencias entre los resultados obtenidos en esta investigación y los obtenidos por Yaruro, quien realizó el proceso con baños térmicos a mayores temperaturas.

De acuerdo con lo reportado por Fonseca et al. (2016) el almidón de achira con gránulo grande, mayor o igual a 45,4 μm presentó valores altos de parámetros como poder de hinchamiento, lo que indica que la estructura interna de las partículas del almidón es más abierta por lo que aumenta la absorción de agua por parte de los gránulos y así aumentar el hinchamiento de los gránulos.

Este parámetro se encuentra directamente relacionado con el ecotipo del cultivo de la achira, las condiciones de crecimiento del cultivo, la madurez a la cual se cosecho el rizoma y la manera de extracción del almidón, razón por la cual, al comparar resultados de esta investigación con resultados expuestos en la literatura, pueden llegar a presentarse diferencias. Sin embargo, el hecho de que los resultados de esta investigación no coincidan con la información presentada por otro autor también puede deberse a los métodos de cuantificación de las variables (Aprianita et al., 2014).

3.7.11. Difusividad efectiva y Energía de activación

Estos parámetros fueron determinados para los ensayos realizados en el secador convectivo.

Como se observa en la Tabla 3-13, la difusividad efectiva se correlaciona directamente con la temperatura, lo que concuerda con los resultados obtenidos por Salcedo et al. (2014), Acosta & López (2019), Meza y Zambrano (2018), entre otros.

Tabla 3-13. Difusividad efectiva en función de la temperatura.

T°C	D _{eff} (10 ⁻⁸ m ² /s)	R ²	Ea (kJ/mol)	R ²
55	7,34±0,97	0,992		
45	6,32±0,56	0,989	62,32±2,92	0,990
35	5,41±0,69	0,991		

En la tabla se observan también coeficientes de determinación (R²) altos, por lo que se puede afirmar que el proceso experimental y los cálculos realizados están muy bien correlacionados, además se evidencia que el modelo de difusión de Fick utilizado describe satisfactoriamente la transferencia de materia.

La comparación de este parámetro con datos registrados en literatura se encuentra limitada, debido a que, actualmente no se encuentran datos relacionados con la matriz alimentaria estudiada en este documento. Meza & Zambrano (2018), realizaron una investigación basada en la harina de cáscara de Maracuyá, en la cual se encontraron para el producto valores de difusión efectiva entre 1,8 y 9,4x10⁻⁸ m²/s, y el proceso también presentó una alta correlación con el modelo de difusión de Fick para placa plana.

También se encuentran datos de secado de rebanadas de yuca de 2 cm de espesor (Salcedo et al., 2014), obtenidos en función de diferentes temperaturas y velocidades del aire de secado. En cuanto a la difusividad efectiva, este producto presentó valores inferiores a los obtenidos por el almidón, aproximadamente $2,5 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, mientras que la energía de activación para las rebanadas de yuca presentó valores entre 12,7 y 110KJ/mol, el valor obtenido para el almidón se encuentra dentro de este rango.

3.7.12. Curvas de secado

Como se mencionó anteriormente, para los secadores solares se realizaron las curvas de secado hasta el contenido de humedad en equilibrio, mientras que, para el secado convectivo, la curva de secado se realizó hasta obtener un contenido de humedad del 9% (bh) que corresponde en las gráficas al contenido de humedad (bs) de 0,10. A continuación se presentan las curvas de secado correspondientes a cada secador y su respectivo análisis.

3.7.12.1. Secador solar artesanal

Se monitorearon 3 sectores del secador, cada una con 3 bandejas distribuidas como se observa en la Figura 3-9.



Figura 3-9. Sectores monitoreados en el secador artesanal.

Elaboración propia.

A continuación, en la Figura 3-10, se observa el comportamiento de la humedad en base seca con respecto al tiempo de los 3 sectores monitoreados.

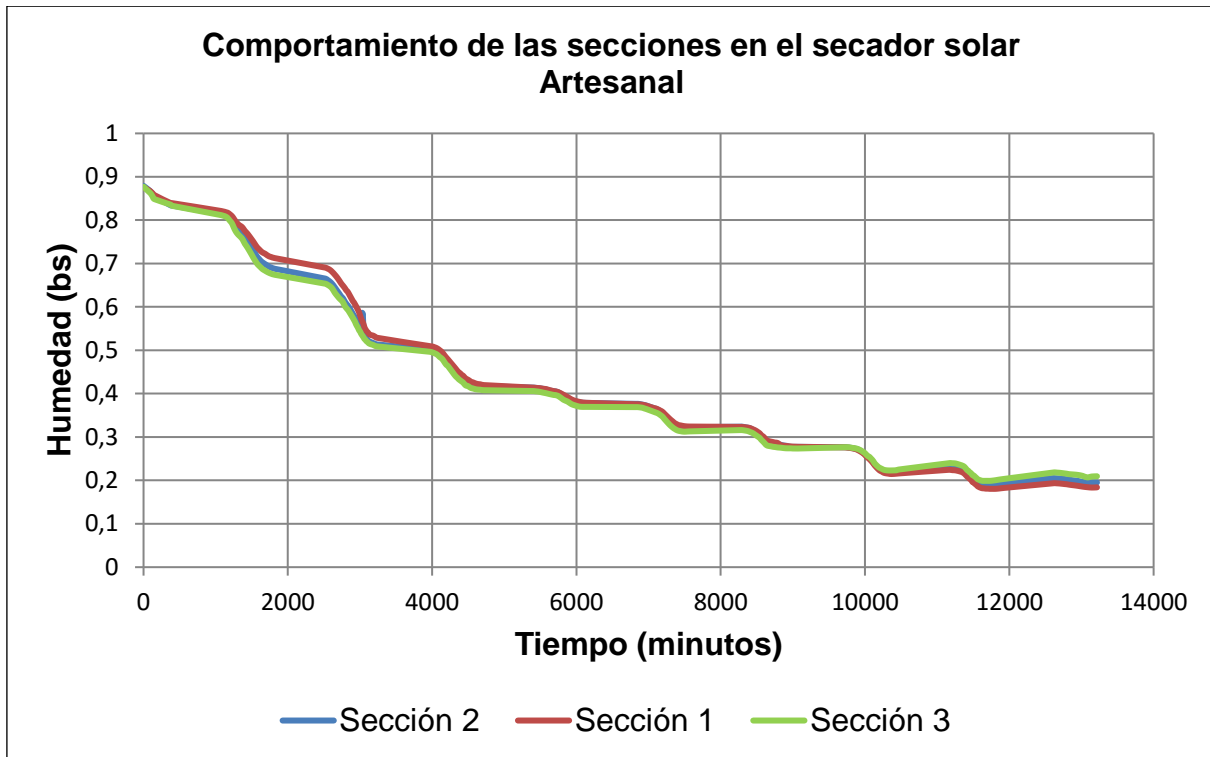


Figura 3-10. Comportamiento de la humedad (bs) de las secciones monitoreadas en el secador artesanal.

Se pueden observar valles en las curvas de secado, que corresponden a horas nocturnas en las que el proceso de secado parece detenerse y continúa a medida que la temperatura ambiental vuelve a subir.

No se observan diferencias en el comportamiento de las secciones por lo que se entiende que la masa del producto se secó de forma uniforme en todo el secador.

3.7.12.2. Secador solar tipo armario

Se monitorearon 3 sectores del secador como se observa en la Figura 3-11.



Figura 3-11. Sectores monitoreados en el secador tipo armario.

Elaboración propia.

A continuación, en la figura 3-12, se observa el comportamiento de la humedad en base seca con respecto al tiempo de los 3 sectores monitoreados del secador tipo armario.

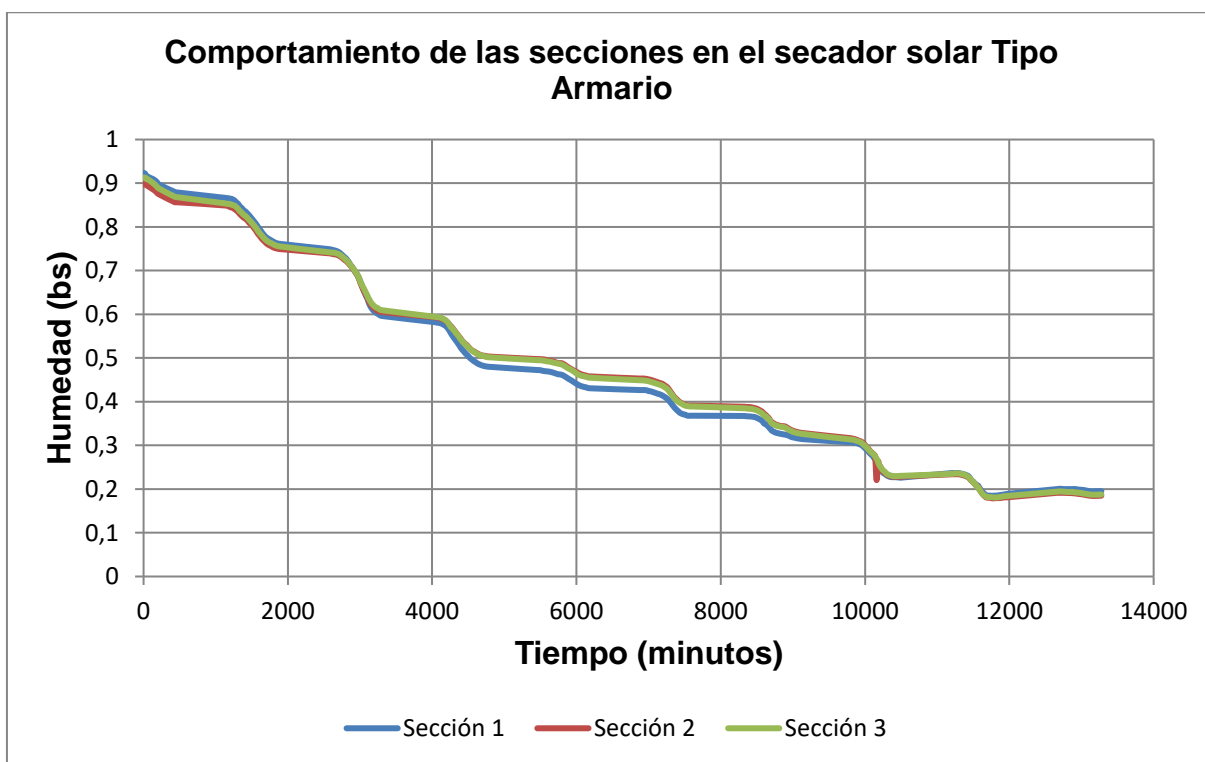


Figura 3-12. Comportamiento de la humedad (bs) de las secciones monitoreadas en el secador tipo armario.

Al igual que en las curvas del secador artesanal, el proceso de secado disminuye notablemente en las horas de la noche, debido a las bajas temperaturas y a que los secadores no conservan suficiente calor para continuar con el proceso de secado uniformemente.

No se observan diferencias significativas en el comportamiento de las secciones por lo que se entiende que la masa del producto se secó uniformemente.

3.7.12.3. Secador convectivo

El secador contenía dos bandejas que se monitorearon simultáneamente, la diferencia de humedad medida entre las bandejas no fue considerable, la masa de las dos bandejas se asumió como una sola para cada ensayo.

A continuación, en la Tabla 3-14, se presentan los resultados de la humedad de equilibrio y el tiempo de proceso de secado en el secador convectivo, en las tres temperaturas evaluadas.

Tabla 3-14. Valore medios¹ de contenido de humedad en equilibrio y tiempo de proceso de secado del almidón de achira en el secador convectivo.

Temperatura en °C	55	45	35
Tiempo de secado (horas)	21,51±3,03a	29,58±6,44b	41,31±14,34c
Heq (%)	1,25±0,86a	3,18±0,54b	6,66±0,39c

¹ Media ± ds

Medias seguidas de letras distintas en el mismo parámetro, en la misma fila, indican diferencias significativas, según prueba de Tukey ($P \leq 0,05$)

Como se observa en la Tabla 3-14, entre las tres temperaturas utilizadas en el secador convectivo, se presentaron diferencias significativas para las dos variables, tiempo de secado y humedad de equilibrio. Se observa una influencia de la temperatura de secado en los dos parámetros, debido a que, a mayor temperatura mejoran las condiciones psicrométricas del aire de secado, lo que aumenta la velocidad de extracción, además de tener la capacidad de retirar una mayor cantidad de humedad al producto.

A continuación, en la Figura 3-13, se observan las curvas de secado obtenidas.

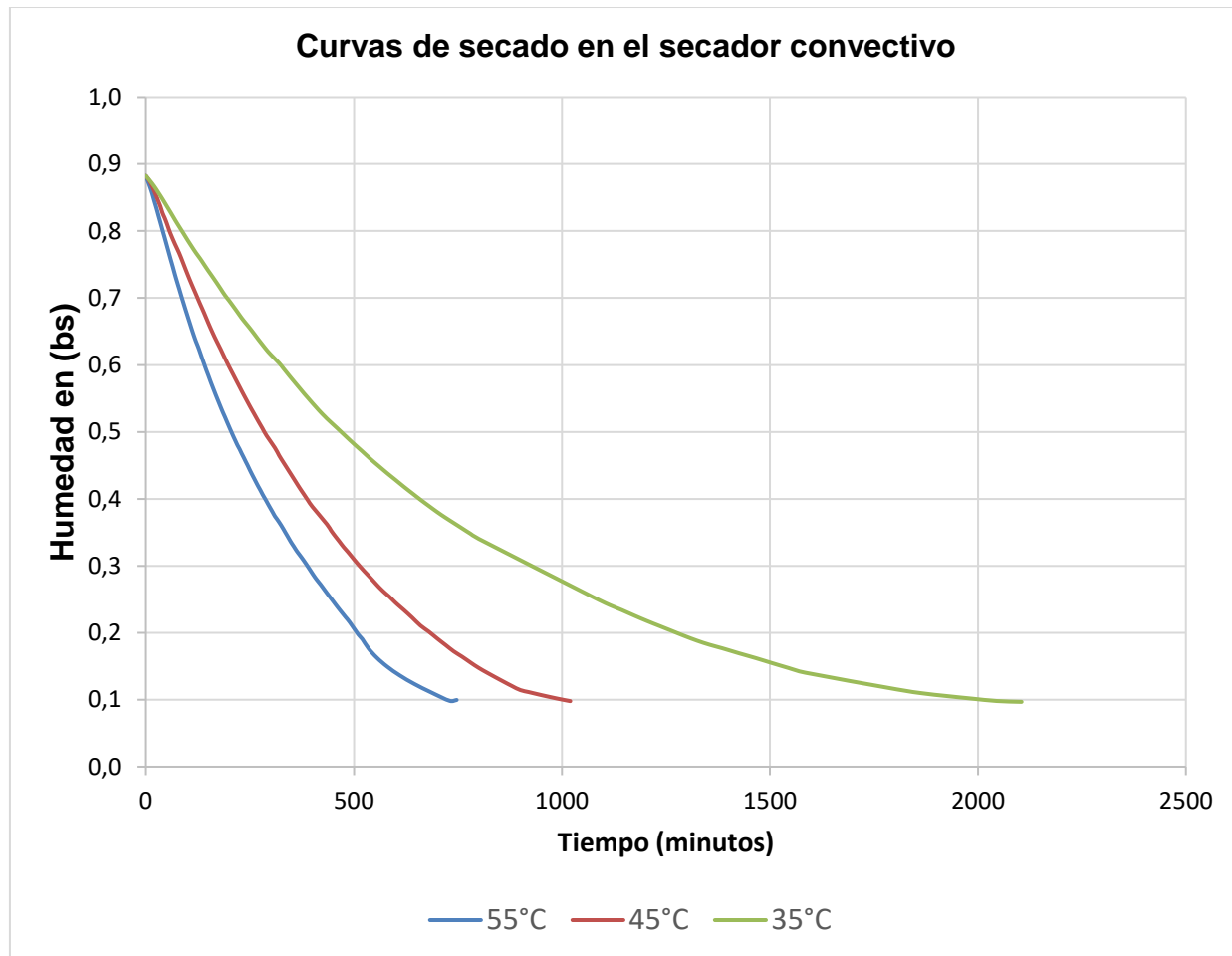


Figura 3-13. Curvas de secado del almidón de achira en el secador convectivo a temperaturas de 35, 45 y 55°C.

Debido a que el secado solar no ofrece las condiciones para llevar el producto a humedades por debajo del 9% y al no tener evidencia bibliográfica de los posibles daños de estructura y calidad del almidón de achira a humedades menores, el producto que llegó a humedad de equilibrio en el secador convectivo no se usó para evaluar las variables enunciadas en esta investigación.

Por este motivo, cuando el almidón presentó el 9% de contenido de humedad, se retiró producto necesario para realizar los ensayos requeridos y se registró el tiempo hasta esta humedad. A continuación, en la Tabla 3-17, se presentan los resultados de tiempo de secado para las temperaturas evaluadas en el secador convectivo.

Tabla 3-15. Tiempo de secado requerido para que el almidón de achira alcance un contenido de humedad de 9% en el secador convectivo en las tres temperaturas de ensayo.

Temperatura (°C)	55	45	35
Tiempo de secado (horas)	12,34±1,38	17,11±0,67	37,86±5,62

3.7.13. Parámetros finales del proceso de secado

A continuación, en la Tabla 3-15, se presenta el tiempo de secado medio para los secadores solares.

Tabla3-16. Valores medios¹ del tiempo de secado para los dos secadores solares.

Variable de respuesta	Secador Artesanal	Secador Tipo Armario
Tiempo de secado (horas)	220,25±1,65 ^a	221,25±1,59 ^a

¹ Media ± ds

Medias seguidas de letras distintas en el mismo parámetro, en la misma fila, indican diferencias significativas, según prueba de Tukey ($P \leq 0,05$)

El tiempo de secado entre los dos secadores solares no presentó diferencias significativas, esto es debido a que las condiciones internas del secador solar Tipo Armario, como se analizó en el capítulo anterior, afectaron el proceso de secado en su etapa inicial. Este hecho influyó directamente en la velocidad de secado, por lo que el proceso se realizó en tiempos similares. A continuación, en la Tabla 3-16, se presentan los resultados del contenido de humedad final del producto en los dos secadores solares.

Tabla 3-17. Valores medios¹ del contenido de humedad final del producto en los dos secadores solares.

Variable de respuesta	Secador Artesanal	Secador Tipo Armario
Contenido de humedad final (%)	16,81±0.43 ^b	14,95±0.22 ^c

¹ Media ± ds

Medias seguidas de letras distintas en el mismo parámetro, en la misma fila, indican diferencias significativas, según prueba de Tukey ($P \leq 0,05$)

Aunque las muestras analizadas presentaron diferencias significativas, siendo el secador Tipo Armario el que presentó un mejor comportamiento, de acuerdo con la NTC 3228 (ICONTEC, 1991), las dos condiciones de humedad se encuentran dentro del rango permitido.

3.8. Conclusiones

Teniendo como base la NTC 3228, en la cual se establecen los parámetros mínimos para la comercialización del almidón de Achira en el país, los dos secadores solares ofrecen las condiciones necesarias para llevar el producto a un contenido de humedad adecuado para su consumo, siendo el secador tipo armario el que presentó un mejor comportamiento al alcanzar un contenido de humedad de equilibrio de 14,95%, mientras que en el secador artesanal la humedad de equilibrio fue de 16,81%.

El hecho de que entre los secadores no se presenten diferencias significativas entre los resultados de tiempo de secado, pero si entre la humedad final confirma que las condiciones proporcionadas por el secador tipo armario son mejores, por lo que, al considerar las recomendaciones expuestas en esta investigación, el proceso de secado, especialmente el tiempo de secado, tendrán un mejor desempeño.

La actividad de agua tuvo un comportamiento esperado, ya que está directamente relacionada con los resultados del contenido de humedad del producto. Sin embargo, el valor de 0,61 obtenido en el secador artesanal, significa que no es un producto que se pueda almacenar por periodos prolongados de tiempo, ya que presenta un mayor riesgo de incidencia de hongos, patógenos, microorganismos, entre otros, aunque no se descarta la posibilidad de que se encuentre en condiciones propicias para su consumo en un corto tiempo. El secador Tipo Armario, presentó un valor de actividad de agua de 0,51, el cual se considera adecuado para un almacenamiento prolongado, siempre y cuando sea adecuado.

En el caso del secador Artesanal en el cual el contenido de humedad en equilibrio fue 16,81%, valor permitido por la NTC, presentó valores de actividad de agua que no son propicios para su comercialización, por lo que se recomienda establecer valores máximos permitidos de humedad con base en la actividad de agua.

La variabilidad en el tamaño y morfología del gránulo del almidón obedecen a que se realizó la extracción de este, sin realizar una clasificación exhaustiva del sector del rizoma que se iba a procesar.

Parámetros como capacidad de retención de agua y poder de hinchamiento, estos no son relevantes para la conservación de la calidad del almidón. Estos parámetros se consideran en sus posibles aplicaciones, por lo que según el propósito puede definirse el método de secado del almidón.

Contenido de humedad final y actividad de agua presentaron diferencias significativas entre los métodos de secado solar con respecto al secador convectivo, pero cumplen con los valores mínimos requeridos según literatura para su consumo.

De acuerdo a lo anterior, se concluye que los dos secadores solares sirven como alternativa de secado para el almidón de achira para los productores de zonas rurales y el haber comprobado la utilidad del secado solar para acondicionar una matriz alimentaria como el almidón de achira, la cual es compleja debido a su alto contenido de humedad inicial, su textura y requerimientos productivos, valida la versatilidad del método y lo ubica como una gran opción y herramienta para la implementación de un modelo de producción familiar diversificada.

3.9. Bibliografía

- Acosta, E. & Castro A. (2019). Efecto de la temperatura de secado en la difusividad efectiva y fenoles totales en residuos de alcachofa criolla (*Cynara scolymus*). Revista científica Ciencia Agro Alimentaria. 1(1): 4 – 10.
- Acuña, H. (2012). Extracción, caracterización y aplicación de almidón de ñame variedad blanco (*dioscorea trifida*) originario de la región amazónica colombiana para la elaboración de productos horneados. Universidad Nacional de Colombia. 80p.
- Agronet. (2014). Estadísticas agrícolas: Área, producción y rendimiento nacional por cultivo. Ministerio de Agricultura. Colombia. Link de consulta: <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=3>. [Ultimo acceso: 04 de abril de 2021]

- Alzamora, S.; Guerrero, S.; Nieto, A.; Vidales, S. (2004). Conservación de frutas y hortalizas mediante tecnologías combinadas. Manual de capacitación. Servicios de Tecnologías de Ingeniería Agrícola y Alimentaria (AGST), Dirección de Sistemas de Apoyo a la Agricultura (AGS), FAO. 76p.
- Andrade, M., Pelissari, F., Tapia, D., Menegalli, F. (2015). Achira as a source of biodegradable materials: Isolation and characterization of nanofibers. *Carbohydrate Polymers*. 123: 406 – 415.
- Andrade, M., Tapia, D., & Menegalli, F. (2012). Development and optimization of biodegradable films based on achira flour. *Carbohydrate Polymers*. 88(2): 449 – 458.
- AOAC. (1984). *Official Methods of Analysis*(13thed.). Arlington, VA (USA): AOAC International.
- AOAC. (1990). *Official Methods of Analysis*(15thed.). Arlington, VA (USA): AOAC International.
- AOCC. (1999). *Approved Methods of Analysis* (11thed.). St. Paul, MN (USA): AACC International.
- AOAC. (2000). *Official Methods of Analysis*(17thed.). Arlington, VA (USA): AOAC International.
- AOAC. (2005). *Official Methods of Analysis*(18thed.). Arlington, VA (USA): AOAC International.
- AOAC. (2012). *The Official Methods of Analysis*, 19th ed. Kenneth Helrich International, AOAC.
- Aprianita, A., Vasiljevic, T., Bannikova, A., Kasapis, S. (2014). Physicochemical properties of flours and starches derived from traditional Indonesian tubers and roots. *J. Food* 106 Evaluación de las propiedades físicoquímicas, térmicas y microestructurales del almidón de achira (*Canna edulis*) *Sci. Technol*. 51: 3669 – 3679.
- Aristizábal, J., Sánchez, T., Mejía, D., (2007). Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca, *Boletín de servicios agrícolas de la FAO* 163. FAO. 153p.
- Ariza, E., Castro, A., & Gómez, J. (2013). Factibilidad del uso del almidón de achira como agente controlador de filtrado en lodos de perforación base agua. *Revista ION. Investigación, Optimización y Nuevos procesos de Ingeniería*. 26(1): 63 – 71.
- Belitz, H.; Grosch, W.; Schieberle, P. (2012). *Química de los Alimentos*. 3 ed. Acibia. 319p.

- Bryant, C., & Hamaker, B. (1997). Effect of lime on gelatinization of corn flour and starch. *Cereal Chemistry* 74:171 – 175.
- Bello, L., (2010). Extracción, purificación y caracterización del almidón de 21 clones del banco de germoplasma de musáceas del Inia. Elaboración de un producto tipo pudín. Universidad Central de Venezuela. 119p.
- Caballero, A. (2008). Temas de Higiene de los Alimentos. Centro Nacional de Información de Ciencias Médicas. Editorial Ciencias Médicas. 382p.
- Carbajal, A. (2013). Manual de Nutrición y Dietética. Universidad Complutense de Madrid. 367p.
- Chaparro, S., Romero López, W., & Rodríguez, M. (2020). Caracterización del almidón de sagú (*Canna indica*) fermentado para la implementación de procesos agroindustriales. *Revista Sistemas de producción agroecológicos*. 11(2): 23 – 51.
- Cisneros, F., Zevillanos, R., & Cisneros, L. (2009). Characterization of starch from two ecotypes of Andean achira roots (*Canna edulis*). *J. Agric. Food Chem.* 57(16): 7363 – 7368.
- Dalpasquale, V., Marques, D., Sinicio, R. & Oliveira, D. (1991). Secado de granos a altas temperaturas. FAO. 77p.
- de Leon, C. (2015). Caracterización y comportamiento físico químico del almidón de la Achira (*Canna edulis* ker) con relación al almidón de Yuca (*Manihot esculenta* crantz). Universidad de Guayaquil. 89p.
- Estrada, K. (2020). Producción y obtención de almidón de achira *Canna edulis* con fines comerciales en el municipio de Algeciras Huila. Universidad de la Salle. 75p.
- Fonseca, H, Méndez, G., Velazquez, G., Gómez, C. (2016). Thermal study in the interactions of starches blends: Amaranth and achira. *Food Hydrocoll.* 61: 640 – 648.
- Galindo, A. (2017). Estudio de factibilidad para la creación de microempresa productora y comercializadora de bizcocho de Achira. Universidad Santo Tomás (VUAD). 154p.
- García, C., Sierra, M., Miranda, L. (2016). Modelado de la Cinética de Secado en Microondas de Ñame. *Información Tecnológica*. 27(1): 61 – 68.
- García, O., Infante, R. & Rivera, C. (2008). Hacia una definición de fibra alimentaria. *An Venez Nutr.* 21(1): 25 – 30.

- Grace, M. (1977). Elaboración de la yuca. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 116p.
- Hernandez, O., Emaldi, U., & Tovar, J. (2008). In vitro digestibility of edible films from various starch sources. *Carbohydrate Polymers*. 71(4): 648 – 655.
- Huang, J., Zhao, L., Man, J., Wang, J., Zhou, W., Huai, H., Wei, C. (2015). Comparison of physicochemical properties of B-type nontraditional starches from different sources. *Int. J. Biol. Macromol.* 78: 165 – 172.
- Ibarz, R., Pagán, J., Garza, S. & Ibarz, A. (2010). Pardeamiento de zumos clarificados de limón tratados a altas temperaturas. *Scientia Agropecuaria*. 1: 7 – 20.
- ICONTEC. (1991). Norma Técnica Colombiana. NTC 3228. Industrias alimentarias. Almidón de achira. ICONTEC, Bogotá D.C., Colombia.
- ICONTEC. (2019). NTC 6375 Cereales y productos cereales. Determinación del contenido de humedad. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. Bogotá D.C., Colombia.
- Linares, J., & Rey, H. (2018). Almidón de sagú (*Canna edulis ker*), producto colombiano con potencial de comercialización internacional. Universidad Católica de Colombia. 53p.
- Lobo, M., Medina, C., Grisales, J., Yepes, A., & Álvarez, J. (2017). Caracterización y evaluación morfológicas de la colección colombiana de achira, *Canna edulis Ker* Gawl. (Cannaceae). *Corpoica Ciencia & Tecnología Agropecuaria*. 18(1): 47 – 73.
- López, N., Andrade, M., & Martinez, H. (2019). Modelamiento matemático de la cinética de secado de espagueti enriquecido con pulpa de zapallo deshidratada (*Cucurbita moschata*). *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient.* 22(1): e1151.
- Man, C., Jones, A. (2000). Shelf Life Evaluation of Foods. Aspen Publishers Inc., U.S. 321p.
- Meza, J. & Zambrano, M. (2018). Efecto del corte y métodos de secado en las características físicoquímicas de harina de cáscara de maracuyá (*Passiflora edulis Flavicarpa*). Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López. 191p.
- Mishra, B.B., Gautam, S., Sharma, A. (2013). Free phenolics and polyphenol oxidase (PPO): The factors affecting post-cut browning in eggplant (*Solanum melongena*). *Food Chemistry*. 139: 105 – 114.

- Perez, E., Lares, M. (2005). Chemical composition, mineral profile, and functional properties of Canna (*Canna edulis*) and Arrowroot (*Maranta spp.*) starches. *Plant Foods Hum. Nutr.* 60: 113 – 116.
- Polo, G. (2003). Efecto de la contracción en la cinética de secado de músculos de jamón. Universidad Politecnica de Valencia. 370p.
- Puncha, S., Puttanlek, C., Rungsardthong, V., Pathipanawat, W., & Uttapap, D. (2007). Changes in physicochemical properties and morphology of canna starches during rhizomal development. *Carbohydrate Polymers.* 70: 206 – 217.
- Quiroga, C. (2009). Caracterización fisicoquímica de tres fuentes subutilizadas de almidón de la región andina de Bolivia. *Investigación y Desarrollo.* 9: 81 – 94.
- Resio, C., & Nilda, A. (1999). Almidón de amaranto: Obtención y evaluación de sus características fisicoquímicas. Universidad de Buenos Aires UBA. 135p.
- Rodriguez, G., García, H., Camacho, J. & Arias, F. (2003). El almidón de achira o sagú (*Canna edulis Ker*) Manual técnico para su elaboración. Corpoica Tibaitatá. 36p.
- Salcedo, J., Mercado, J., Vanegas, M. Fernando, A. & Vertel, M. (2014). Cinética de secado de la yuca (*Manihot esculenta Crantz*) variedad CORPOICA M-tai en función de la temperatura y de la velocidad de aire. *Revista Ion.* 27(2): 29-42.
- Seminario, J. (2004). Raíces Andinas: Contribuciones al conocimiento y a la capacitación. Serie: Conservación y uso de la biodiversidad de raíces y tubérculos andinos: Una década de investigación para el desarrollo (1993-2003) No. 6. Universidad Nacional de Cajamarca, Centro Internacional de la Papa, Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación. 116p.
- Smith, R. (1967). Characterization and analysis of starches. In Whistler, R.L. & Paschall, E. *Starch: Chemistry and Technology.* Vol II. Industrial Aspects. New York, Academia Press. 593p.
- Sultana, N., Sultana, S., Hassan, A., & Oliur, M. (2019). Morphological and anatomical investigation among six variants of *Canna indica* L. *Bangladesh J. Plant Taxon.* 26(2): 219 – 230.
- Suquilanda, M. (2012). Producción orgánica de cultivos andinos (Manual Técnico). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 199p.

- Surco, F. (2004). Caracterización de almidones aislados de tubérculos andinos: mashua (*Tropaeolum tuberosum*), oca (*Oxalis tuberosa*), olluco (*Ullucus tuberosus*) para su aplicación tecnológica. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. 55p.
- Tagliapietra, B., Ferrari, M., Aparecido, E., Campelo, P., & Pedrosa, M. (2021). Non-conventional starch sources. *Current Opinion in Food Science*. 39: 93 – 102.
- Torres, L. (2004). Tecnología para el cultivo de sagú o achira (*Canna edulis Ker*). Corpoica. Produmedios. 39p.
- Torres, L. (2012). Beneficio de la Achira para la obtención del almidón en Colombia. CORPOICA. 82p.
- Vega, A., Tello, C. & Lemus, R. (2006). Simulación matemática del proceso de secado de la gracilaria chilena (*Gracilaria chilensis*). *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*. 15(1): 55 – 64.
- Warren, F., Gidley, M., & Flanagan, B. (2016). Infrared spectroscopy as a tool to characterise starch ordered structure-a joint FTIR-ATR, NMR, XRD and DSC study. *Carbohydrate Polymers*. 139: 34 – 42.
- Watcharatewinkul, Y., Puttanlek, C., Rungsardthong, V., Uttapap, D. (2009). Pasting properties of a heat-moisture treated canna starch in relation to its structural characteristics. *Carbohydr. Polym.* 75: 505 – 511.
- Yaruro, N. (2018). Evaluación de las propiedades físicoquímicas, térmicas y microestructurales del almidón de achira (*Canna edulis*). Universidad Nacional de Colombia. 133p.
- Yaruro, N., Mahecha, H., de Francisco, A., Vásquez, M., & Diaz, C. (2021). Physicochemical, thermal, microstructural and paste properties comparison of four achira (*Canna edulis sp.*) starch ecotypes. *International Journal of Gastronomy and Food Science*. 25(10): 10 – 38.
- Yepes, A., Grisales, J. (2013). Caracterización y evaluación morfológica de la colección colombiana de achira (*Canna edulis Ker Gawl.*) como instrumento para conocer los atributos presentes en esta y promover su utilización. Universidad Católica de Oriente. 100p.
- Zhu, F. (2020). Underutilized and unconventional starches: Why should we care? *Trends in Food Science & Technology*. 100: 363 – 373.