

**ESTUDIO PRELIMINAR PARA DESHIDRATACIÓN SOLAR DE MANGO
(*Mangifera Indica L. var. Común*) EN COLOMBIA**

CARLOS ARMANDO BUITRAGO HUERTAS

1075625400

**UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA – UNAD
ESCUELA DE CIENCIAS BÁSICAS, TECNOLOGÍA E INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE PROCESOS DE ALIMENTOS Y
BIOMATERIALES**

BOGOTÁ, COLOMBIA

2014

**ESTUDIO PRELIMINAR PARA DESHIDRATACIÓN SOLAR DE MANGO
(*Mangifera Indica L. var. Común*) EN COLOMBIA**

CARLOS ARMANDO BUITRAGO HUERTAS

1075625400

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
Especialista en Ingeniería de Procesos de Alimentos y Biomateriales**

Director

Harvey Andrés Mílquez Sanabria

MSc. Ingeniero Químico

**UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA – UNAD
ESCUELA DE CIENCIAS BÁSICAS, TECNOLOGÍA E INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE PROCESOS DE ALIMENTOS Y
BIOMATERIALES
BOGOTÁ, COLOMBIA**

2014

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma de jurado

Firma de jurado

DEDICATORIA

A mi madre quién me ha apoyado incansablemente en mis empresas y sueños. Dios te guarde, me permita honrarte y darte toda la felicidad posible cada día desde cualquier lugar del mundo.

A mi padre y hermano quienes cuentan con la enorme capacidad de tolerar mi personalidad de viento huracanado.

AGRADECIMIENTOS

*A Dios, quien cual Padre experto me
Regala rienda suelta o fuerte reprensión según
Conveniencia de los caminos que audazmente asumo.*

*A la vida, travesía infinita
Que simplemente nos deja hacer
Cuanto queremos y nunca niega nada a
Quien con corazón sincero se entrega por sus sueños.*

*Al cuerpo docente de la especialización
Por su apoyo, compromiso y afecto en la
Construcción de mi formación integral.*

*Al Ing. Harvey Milquez
Quien me ayudó a abrir la mente
A nuevos campos del conocimiento en
El momento oportuno y de manera clara.*

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	14
1. INTRODUCCIÓN	15
1.1. Justificación	15
1.2. Objetivos	17
2. MERCADO MUNDIAL DE SNACKS SALUDABLES	18
2.1. Introducción	18
2.2. Subsectores	19
2.2.1. Frutas tropicales	19
2.2.2. Snacks de otros productos y presentaciones	20
2.2.3. Snacks libres de gluten	22
2.3. Demanda	23
2.3.1. Caracterización general de nichos de mercado	23
2.3.2. Países industrializados	24
2.3.2.1. EE.UU.	24
2.3.2.2. Unión Europea	25
2.3.3. Países en vía de desarrollo	27
2.4. Oferta	28
2.4.1. Competidores	28
2.4.1.1. España	28
2.4.1.2. Perú	29
2.4.1.3. Ecuador	29
2.4.1.4. México	30
2.4.2. Tecnología de secado utilizadas	31
2.4.2.1. Liofilización	31
2.4.2.2. Secado en horno	32
2.4.3. Canales de distribución	32
2.4.3.1. Las multinacionales	33
2.4.3.2. Los importadores	33
2.4.3.3. Las tiendas especializadas	34
2.4.3.4. Las grandes superficies	35
2.5. Colombia	35
2.5.1. Estado del sector	35
2.6. Conclusiones	37
3. CADENA AGROINDUSTRIAL DEL MANGO EN COLOMBIA	38
3.1. Introducción	38

3.2.	El mango	40
3.2.1.	Generalidades	40
3.2.2.	Variedades presentes en Colombia	42
3.3.	La variedad común o hilacha	45
3.4.	Eslabón primario	46
3.4.1.	Estructura del subsector agrícola del mango	46
3.4.2.	Zonas de producción del país	47
3.4.3.	Estrategia de encadenamiento	53
3.5.	Eslabón secundario	55
3.5.1.	Productos industrializados	55
3.5.2.	Estructura de la industria de frutas y derivados	59
3.5.3.	Empresas del sector	59
3.5.4.	Estrategia de encadenamiento	61
3.6.	Eslabón terciario	62
3.6.1.	Distribución en mercados meta	62
3.7.	Exportaciones	64
3.8.	Perspectivas y política pública del sector	66
3.9.	Conclusiones	67
4.	SECADORES SOLARES INDUSTRIALES	68
4.1.	Interés y fundamentos	68
4.2.	Generalidades técnicas	70
4.2.1.	Colector y ángulo de colección	71
4.2.2.	Alimentación de energía alterna	76
4.2.3.	Cámara de secado	76
4.2.4.	Materiales constructivos	77
4.2.5.	Otros aspectos	78
4.2.6.	Condiciones operativas de producción	78
4.3.	Tipos de secadores solares. Avances	79
4.4.	Uso industrial	91
4.5.	Avances en industria agroalimentaria	96
4.6.	Conclusiones	105
5.	INGENIERÍA PARA SECADO SOLAR DE MANGO COMÚN	106
5.1.	Introducción	106
5.2.	Propiedades del mango	107
5.2.1.	Composición físico-química	107
5.2.2.	Termodinámicas	108
5.2.3.	Otras	108
5.3.	Ingeniería de diseño	109
5.3.1.	Capacidad operativa requerida	109
5.3.2.	Selección del secador	110
5.3.3.	Lugar de operación y características	112

5.3.4. Balance de materiales	112
5.3.5. Balance de energía	114
5.3.6. Fenómenos de transporte	115
5.3.6.1. Masa	116
5.3.6.2. Energía	117
5.3.6.3. Cantidad de movimiento	117
5.3.6.4. Solución de ecuaciones	119
5.3.7. Colección solar	120
5.3.8. Dimensionamiento y especificaciones constructivas	122
5.3.8.1. Colector	122
5.3.8.2. Cámara	125
5.3.8.3. Sistema de calentamiento auxiliar	126
5.4. Modelos matemáticos para secado de frutas	127
5.5. Conclusiones	129
CONCLUSIONES	130
RECOMENDACIONES	132
BIBLIOGRAFÍA	133

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición nutricional promedio en 100 gr de pulpa de las variedades de mango presentes en Colombia.....	45
Tabla 2. Descripción peso y calibre para mango NTC 5139.....	46
Tabla 3. Estacionalidad de la producción de mango en Colombia por Departamento.....	50
Tabla 4. Precio promedio del mango común y Tommy en la central mayorista de abastos en Bogotá durante 2014.....	53
Tabla 5. Vías de encadenamiento de la producción de mango en Colombia.....	54
Tabla 6. Productos de la industrialización del mango.....	56
Tabla 7. Grandes empresas dedicadas a la producción de jugos y néctares de frutas.....	60
Tabla 8. Las diez empresas más grandes por nivel de ingresos operacionales del sector CIIU 1521. Conservas.....	60
Tabla 9. Algunas empresas dedicadas a la producción de otros derivados de frutas.....	60
Tabla 10. Vías de encadenamiento industria manufacturera productos hortofrutícolas.....	61
Tabla 11. Descripción de la venta al consumidor final en diferentes canales.....	62
Tabla 12. Aspectos clave en las exportaciones de productos frutícolas.....	65
Tabla 13. Empresas colombianas exportadoras de mango fresco y/o procesado en 2012.....	66
Tabla 14. Avances en el uso industrial de secadores solares.....	92
Tabla 15. Avances en secado solar por tipo de alimento agrícola.....	98

Tabla 16. Avances en secado solar en otros sectores alimentarios.....	104
Tabla 17. Composición físico-química y nutricional de 100 gr de pulpa de mango común fresca.....	107
Tabla 18. Propiedades termodinámicas del mango.....	108
Tabla 19. Propiedades reológicas de la pulpa de mango a 25°C.....	108
Tabla 20. Ángulo horario para trabajo de 8:00 a.m. hasta 4:00 p.m.....	121
Tabla 21. Modelos matemáticos de secado.....	128
Tabla 22. Modelos de secado utilizados en estudios con productos agrícolas....	128

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Presentación comercial de Snacks de mango en EE.UU., cifras en US\$.....	19
Figura 2. Barras y mixturas de vegetales en EE.UU., cifras en US\$.....	20
Figura 3. Mixtura de granos secos en EE.UU.....	21
Figura 4. Galletas orgánicas y mixturas de granos en EE.UU., cifras en US\$.....	22
Figura 5. Muffins y pan tajado libre de gluten en EE.UU.....	23
Figura 6. Sello del certificado libre de gluten.....	23
Figura 7. Revista Snacks. Circulación mundial.....	25
Figura 8. Logotipo empresa ecuatoriana WILAPA.....	30
Figura 9. Liofilizador industrial.....	31
Figura 10. Fresas liofilizadas.....	32
Figura 11. Deshidratador por aire caliente.....	32
Figura 12. Logotipo multinacional kellogg's.....	33
Figura 13. Logotipo tienda especializada en Guadalajara, México.....	35
Figura 14. Grande superficie y <i>retailer</i> más importante del mundo.....	35
Figura 15. Logotipo FRUANDES.....	36
Figura 16. Logotipo Andiproducs. Andiequip Ltda.....	37
Figura 17. Cadena productiva agroindustrial.....	39
Figura 18. Partes del fruto del mango.....	41
Figura 19. Formas comunes del mango.....	42
Figura 20. Variedades criollas pequeñas.....	43
Figura 21. Variedades criollas grandes.....	44
Figura 22. Variedades mejoradas.....	44

Figura 23. Distribución departamental de la producción de mango.....	48
Figura 24. Mapa de distribución del cultivo de mango en Colombia.....	49
Figura 25. Evolución de la producción de mango. Toneladas.....	50
Figura 26. Promedio producción principales municipios productores 2007-2011.....	51
Figura 27. Distribución municipal promedio producción de mango.....	51
Figura 28. Evolución de la producción 2007-2011 principales municipios.....	52
Figura 29. Rendimientos medios 2007-2011 principales departamentos productores de mango. Tonelada/hectárea.....	52
Figura 30. Procesamiento industrial de frutas frescas.....	55
Figura 31. Variación anual del PIB de la rama industrial vs. Sector de procesamiento y conservación de frutas.....	59
Figura 32. Países destino exportaciones mangos y mangostanes, 2013.....	65
Figura 33. Transferencia de energía en secadores solares.....	70
Figura 34. Transferencia de masa en secadores solares.....	70
Figura 35. Colector solar.....	71
Figura 36. Colector de placa plana con cubierta.....	73
Figura 37. Colector con concentrador parabólico.....	73
Figura 38. Colector de placa plana sin cubierta.....	74
Figura 39. Colector solar de tubos de vacío de flujo directo.....	75
Figura 40. Colector solar de tubo de vacío heat pipe.....	76
Figura 41. Esquema: Tecnología de secadores solares.....	79
Figura 42. Secadores estilo tienda.....	80
Figura 43. Secador directo estilo cabina.....	81

Figura 44. Esquema de secador pasivo tipo invernadero.....	82
Figura 45. Secador tipo anaquel.....	82
Figura 46. Dispositivos medidores en secador de chimenea.....	83
Figura 47. Esquema secador solar con cámara tipo invernadero.....	84
Figura 48. Secador activo tipo invernadero.....	85
Figura 49. Secador tipo túnel.....	86
Figura 50. Secador mixto.....	87
Figura 51. Secador de doble paso.....	87
Figura 52. Esquema secador solar híbrido: sol/GLP.....	88
Figura 53. Mecanismos de almacenamiento energético.....	89
Figura 54. Esquema de secador solar industrial tipo recámara.....	111
Figura 55. Esquema del balance de materiales en la cámara de secado.....	114
Figura 56. Diagrama de solución ecuaciones fenómenos de transporte.....	120

RESUMEN

Para resolver la pregunta de investigación, ¿Es posible usar secadores solares industriales para procesar mango común en Colombia? Se estudió el mercado mundial de snacks saludables, la cadena agroindustrial del mango en Colombia, el avance tecnológico en secadores solares, y a nivel teórico se propuso una escala y condiciones técnico operativas para secar mango común con secadores solares.

Los hallazgos más representativos son:

- a. El mercado de Snacks saludables más atractivo es el de los Estados Unidos con \$ USD 1,4 mil millones anuales.
- b. Muy pocas son las empresas colombianas que exportan snacks de frutas tropicales. FRUTAS FRUANDES LTDA. Es una empresa colombiana dedicada a producir entre otros productos, frutas tropicales deshidratadas con tecnología de secado convencional. De esta empresa se conoce que en 2012 realizó exportaciones totales por \$ USD 126932.
- c. La cadena agroindustrial del mango en Colombia no está consolidada y las mayores dificultades pertenecen al eslabón primario.
- d. En el sector hortofrutícola (e incluyendo hierbas y especias) los secadores solares han sido utilizados para procesar: banano mango, pimiento para pimentón, arroz, maíz, carioca, manzana, mandioca, piña, ciruelas, fresa, tomate limón, uvas, cebolla, papas, patatas dulces, tomillo, menta, jengibre, zanahoria, setas, chili rojo, chícharos, entre otros.
- e. Teóricamente para procesar 1640 kg/día de mango fresco mediante secador solar en las condiciones de altitud, velocidad media del viento y radiación solar media, del municipio de Anapoima, Cundinamarca, se requieren 650690,84 kJ, de los cuales la colección solar puede aportar el 70% y el 30% restante mediante un sistema auxiliar de calentamiento a partir de GLP que para lograrlo se requiere la combustión de 0,00047 kg de GLP/día.

Por todo lo anterior se puede decir de forma preliminar que sí es posible usar secadores solares industriales para procesar mango común en Colombia. Pero para efectos de factibilidad deberá realizarse la evaluación financiera, logística y demás pertinentes.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación

La motivación primera de este trabajo fue comprender e interrelacionar el potencial de la tecnología en secadores solares industriales con la realidad y perspectiva del negocio del mango en Colombia, enfocándose en la variedad común porque es la más difundida y por ende la que se encuentra en parcelas de la mayoría de pequeños productores frutícolas en probables condiciones de pobreza [1]; además que en la apuesta exportadora del país esta variedad sólo se contempla vía transformación por la industria nacional (en forma de pulpa inicialmente) y esta industria aún es incipiente [2]; y finalmente porque de conocimiento propio del autor, ese fruto se pierde en los cultivos por fallos estructurales de la cadena de producción-comercialización, especialmente en las zonas apartadas que sólo cuentan con caminos de herradura o vías terciarias en precarias condiciones.

El uso de la energía solar mediante secadores podría ser una oportunidad de desarrollo económico en Colombia y el sector hortofrutícola uno de los grandes beneficiados. Con esta tecnología se pueden obtener productos deshidratados que encajan en la categoría de snacks saludables, cuya demanda se encuentra en ascenso en el mundo [3, 4].

De otro lado, el mango es uno de los productos bandera del programa de transformación productiva nacional. La cadena agroindustrial del fruto en el país es incipiente pero con mucho potencial y se viene haciendo un importante esfuerzo por sacarla adelante y llevarla a competir con los mejores productores mundiales [5]. El mango deshidratado de diferentes países emergentes (México, Perú, Ecuador, India) es comercializado en mercados de alto valor como los Estados Unidos, preferiblemente orgánico [4].

Según datos del “Plan de Negocios de Mango”, a 2011 Colombia producía 221000 t/año con un área de cosecha de 18573 Ha; concentrando el 62,2% de la producción en Tolima y Cundinamarca, destacando los municipios de El Espinal y El Guamo (Tolima) y Anapoima (Cundinamarca). En cuanto a la distribución de variedades el mango común o hilacha representa al 39% del área cultivada y la mayoría son plantaciones silvestres sin tecnificación [39].

En consecuencia para comprender si es viable deshidratar mango común en Colombia mediante secado solar se estudió: el mercado mundial de snacks saludables; la cadena agroindustrial del mango en Colombia; el avance de la tecnología de secadores solares industriales y posteriormente se realizó una

proposición de condiciones técnicas para aplicar el secado solar al mango en escala industrial.

De otro lado, la industria agroalimentaria está utilizando la energía solar de forma “innovadora” en sus operaciones. El avance de la tecnología de secadores solares ha evolucionado por la necesidad de utilizar los recursos disponibles más económicos y lograr el máximo aprovechamiento. Aspecto muy útil en medio de la coyuntura económica actual.

Y este avance está siendo orquestado por el interés de enfrentar: el cambio climático (que obliga la disminución del consumo de energía fósil) y la reducción de costos para alcanzar complejos mercados con mejor rentabilidad [43].

También el avance en secadores solares industriales es importante a partir de las últimas tres décadas y abarca productos por fuera de la industria agroalimentaria. Incluso al interior de esta se utiliza en diferentes subsectores como: carnes, pescados y mariscos; hortofrutícola; granos y cereales; entre otros [28].

De todo lo anterior se desprende que Colombia está desaprovechando la oportunidad de ingresar en un mercado en pleno crecimiento (sin actores consolidados), donde el país puede obtener enormes ventajas competitivas a nivel de: logística, trato arancelario preferencial, posición geopolítica, estacionalidad de la cosecha, entre otros. Además si se considera que para producir mango deshidratado la tecnología de secadores solares industriales podría ofrecer una respuesta según intereses del mercado nacional e internacional al tiempo que sea accesible a las capacidades productivas y de financiamiento de las regiones, estaríamos ante una interesante oportunidad de incrementar el PIB agrícola y/o agroindustrial regional. También debe apuntarse que las características del proceso de fabricación pueden facilitar los procesos de certificación en sellos ecológicos, orgánicos y de comercio justo.

Finalmente mencionar que través de este estudio se buscaba resolver la pregunta de investigación, ¿Es posible usar secadores solares industriales para procesar mango común en Colombia?

1.2. Objetivos

1.2.1. General

Evaluar preliminarmente la viabilidad de deshidratar mango común en Colombia mediante secado solar.

1.2.2. Específicos

- i. Identificar los avances tecnológicos mundiales en secadores solares.
- ii. Revisar las tendencias del mercado mundial de snacks saludables.
- iii. Analizar la cadena agroindustrial del mango común en Colombia.
- iv. Establecer la escala y condiciones técnico-operativas para secar mango común aplicando secadores solares.

2. MERCADO MUNDIAL DE SNACKS SALUDABLES

2.1. Introducción

Se proyecta que a 2015 el comercio mundial de snacks (conocidos también como: bocados, botanas, paqueticos, etc.) alcance los US\$ 334 mil millones con un crecimiento anual promedio de 7% [6], liderado por el segmento de saludables donde entran las frutas tropicales deshidratadas.

La alimentación saludable es una tendencia que crece fuerte, de forma marcada en las economías industrializadas pero también en las emergentes, destacando las de Asia-Pacífico. Gran parte de la explosión comercial de los productos saludables es motivada por las alarmantes cifras de obesidad que afectan prácticamente por igual a los habitantes de todas las economías del globo. El sedentarismo y malnutrición son factores clave para este deplorable fenómeno [7, 8] y la industria alimentaria tiene la obligación de contribuir en esta lucha.

Las frutas y hortalizas deshidratadas emergen como renglón significativo dentro de los alimentos saludables comercializables internacionalmente porque ofrecen beneficios similares a las presentaciones en fresco sin los problemas de conservación y logística. Del mismo modo, mercados como el estadounidense obliga a los empresarios a diseñar y ofertar alimentos ajustables a estilos de vida agitada.

Así es como aparece el creciente mercado de los snacks saludables, productos que pueden definirse como: alimentos en presentaciones pequeñas como bocados, constituidos con materias primas que aportan sustancias nutritivas y benéficas para la salud a diferencia de los snacks convencionales con elevado valor calórico y bajo valor nutritivo. Estos “nuevos” productos contribuyen a mitigar el problema de alimentación inadecuada sin chocar con los esquemas culturales de consumo de alimentos que se han desarrollado en las últimas décadas en las economías consolidadas. Los snacks saludables son una categoría que enmarca desde las tradicionales nueces, maní, almendras y avellanas, hasta las sofisticadas frutas y hortalizas orgánicas deshidratadas u horneadas.

Las frutas tropicales deshidratadas están teniendo un interesante desarrollo en el naciente mercado de los snacks saludables, individualmente son un renglón minoritario pero atractivo, novedoso y con elevado potencial. Este fenómeno es una oportunidad para las economías de la América Tropical donde se cultivan frutas extensamente; Así papayas, melones, mangos y demás se insertan en este negocio con mercados de alto valor y generando riqueza para nuestras cadenas de producción agroindustrial.

2.2. Subsectores

Las diferentes categorías de snacks saludables obedecen a las necesidades de los consumidores en términos de salud y nutrición. La seguridad de los alimentos también influye en la concepción psicológica de snack saludable, en general en estos productos se busca: ausencia de pesticidas, ausencia de sustancias químicas perjudiciales para la salud, libres de gluten y fabricados sin organismos genéticamente modificados o sus derivados.

2.2.1. Frutas tropicales

La categoría de snacks de frutas tropicales no está consolidada. Es un renglón que surge encabezado por mangos, papayas y melones. La demanda se concentra en Estados Unidos de Norteamérica y la Unión Europea [9]; la oferta presenta gran potencial desde las economías en desarrollo de Asia y América.

En el caso específico del mango, como se verá en numeral 4.1, países como la India, México, Brasil, Ecuador y Perú presentan gran potencial como exportadores en este renglón porque en la actualidad son los países con mayor producción y exportación en fresco [9]. La debilidad de la mayoría de estas naciones es la capacidad para instalar industria procesadora, por múltiples factores.



Figura 1. Presentación comercial de Snacks de mango en EE.UU., cifras en US\$

Fuente: www.abesmarket.com

El mango gracias a que se puede consumir verde, pintón y maduro está permitiendo en desarrollo de productos diferenciales aprovechando cada estado de maduración. El mango es uno de las primeras frutas tropicales que surge como snack independiente; la inclusión de las frutas tropicales en esta categoría inició con mezclas tipo granola con los snacks convencionales donde ofrecían un sabor innovador pero no ocupaban lugar de distinción dentro de la proporción de ingredientes.

2.2.2. Snacks de otros productos y presentaciones

En el concepto de snacks saludables entra una gamma diversa de alimentos. Desde los tradicionales frutos secos como maní, nueces y avellanas, atravesando por los vegetales deshidratados como: espinacas, patatas, plátanos. Frutas de diferentes características como: manzanas, uvas, ciruelas, peras, etc.

El mercado de snacks o bocados saludables actualmente no innova en líneas de producto, su fortaleza radica en la incorporación de tecnología y materias primas con atributos saludables y nutritivos en las presentaciones convencionales de los snacks; chips, crispis, galletas, mixturas, barras, son presentaciones predominantes.



Figura 2. Barras y mixturas de vegetales en EE.UU., cifras en US\$

Fuente: www.abesmarket.com

Barras, son porciones individuales en promedio de 10-12 gramos aunque se consiguen paquetes con presentaciones por 12 o 24 unidades. Este segmento está enfocado en el desarrollo de productos con proteína de alto valor biológico y fibra. Su mercado son deportistas, personas con actitud deportiva y niños [10].

La mixtura, es la presentación por excelencia porque permite la incorporación de múltiples productos de sabor novedoso en una sola porción. No pertenecen a la categoría de cereales para desayuno pero pueden llegar a ser parte de este renglón a futuro. La mixtura puede ser de una solo grupo de alimentos: granos, frutas, vegetales, o mezclas de ellos; pueden tener presentación personal o familiar.



Figura 3. Mixtura de granos secos en EE.UU.

Fuente: [11]

Galletas, es uno de los renglones de mayor innovación, desde la utilización de trigo no modificado genéticamente, grasas con menor contenido de colesterol y ácidos grasos saturados, hasta la incorporación de concentrados o chips de productos vegetales para nuevos atributos organolépticos y nutricionales.



5 OZ

Peanut Butter Mini Organic Sandwich...

By: Late July

\$3.59



ADD



5.5 OZ

Multi Grain Sprouted Tortilla Chips

By: Way Better Snacks

\$3.49



ADD

Figura 4. Galletas orgánicas y mixturas de granos en EE.UU., cifras en US\$

Fuente: www.abesmarket.com

2.2.3. Snacks libres de gluten

Es uno de los sectores de mayor desarrollo y fortaleza. Lo motiva el interés por disminuir la incidencia de la enfermedad celiaca y la intolerancia al gluten por parte de algunos grupos humanos. Esta categoría aparte de considerarse saludable se le atribuye la capacidad de contribuir a la construcción de dietas para bajar de peso [12].

Pizzas, panes y bollería en general se mueven hacia esta tendencia,



Figura 5. Muffins y pan tajado libre de gluten en EE.UU.

Fuente: [12]

Para diferenciar la categoría y garantizar a los consumidores un producto verdaderamente libre de gluten se crea el sello de certificación, reconocido para toda la Unión Americana:



Figura 6. Sello del certificado libre de gluten

Fuente: [12]

2.3. Demanda

La demanda es heterogénea a nivel global, se concentra en los países desarrollados, potenciada por el interés del cuidado de la salud y el mejoramiento de la nutrición bajo las condiciones de la sociedad contemporánea donde el sedentarismo obliga a reducir las dietas ricas en calorías.

2.3.1. Caracterización general de nichos de mercado

El nicho de mercado actual para los snacks saludables es bien definido, la apuesta es por ampliar el nicho a otros grupos humanos. El consumidor fuerte de bocados saludables se ubica en los países industrializados, en Estados Unidos de Norteamérica, La unión Europea y de lejos las potencias económicas de Asia-

Pacífico. Es un consumidor con alto poder adquisitivo; afianzado en la cultura de los snacks; informado sobre los productos y las normas comerciales; valora los sellos de calidad; tiene conciencia de las prácticas de comercio justo y está dispuesto a pagar el valor agregado de un producto benéfico para su salud.

2.3.2. Países industrializados

2.3.2.1. EE.UU

Los Estados Unidos de Norteamérica son el país con mayor volumen de producción y consumo de Snacks a nivel mundial, se estima que el mercado de aperitivos es de US\$ 6 mil millones [13], el mercado total de snacks a 2013 es de US\$ 70 mil millones con un crecimiento promedio de 4% y la categoría de saludables actualmente asciende a US\$ 1,4 mil millones [4]. Lo anterior auspiciado por la cultura que permitió un desarrollo vigoroso de la industria del snack durante el siglo XX; hoy se estima que en promedio un estadounidense consume snacks 3-4 veces al día [14] con una ingesta media anual de 0,9 kg [15].

De acuerdo con el informe de la agencia de investigación NPD (National Purchase Diary) en 2012, los consumidores estadounidenses con las dietas más sanas comían 26% más snacks saludables o fruta fresca al año que el consumidor promedio, consumidores "moderadamente saludables" comían 1% menos snacks saludables que la media, mientras que aquellos con las dietas "menos saludables" tenían 29% menos de ingesta de snacks saludables que la media [13].

El estadounidense es un consumidor sofisticado con alto poder adquisitivo. El mercado de los snacks también se afectó por la crisis económica del 2008 y actualmente se recupera gracias al impacto que están teniendo los snacks saludables sobre la conciencia del consumidor norteamericano y las buenas cifras generales de la economía [14].

El consumidor prefiere la compra de estos productos a las empresas pequeñas y tiendas especializadas que a las multinacionales de distribución [16]. Industrias de gran calado como Kellogs Co, con movimientos financieros, logra mantenerse en la competencia estableciendo alianzas y reorganizando su imagen al tiempo que piensan en el desarrollo de productos dentro de este segmento.

La publicación U.S. Snack World Magazine, especializada del sector para los consumidores norteamericanos ofrece información de mercados, tendencias,

innovaciones. En la edición de mayo de 2013 reportó que el consumo de snacks saludables jalonaba la industria con un 6,4% de crecimiento acumulado [4]. A su vez, la asociación del mercado de productos orgánicos canadiense reportó para el mismo periodo un crecimiento del 4% en su país [4].

2.3.2.2. Unión Europea

La unión europea es un mercado bastante diferente al norteamericano, de entrada las disparidades entre países, disponibilidad de alimentos y dieta histórica de los pueblos de los estados miembro no dan el sentido de unidad que se tiene en el mercado norteamericano. No todos los estados de la Unión Europea tienen una férrea cultura del snack, sin embargo, los países con tradición de *snacking* jalonan el consumo mundial. Actualmente todos los países están sumandos a la tendencia por la comida saludable y reducción de la obesidad a través de la mejora de los alimentos industrializados [17].

El valor del mercado de snacks europeo asciende aproximadamente a US\$ 147 mil millones [3]. En la zona Euro existe una industria del snack consolidada y agremiada en la Asociación Europea del Snack, página web: <http://www.esa.org.uk/>. Esta asociación tiene medio de publicación propio de los avances e intereses del sector.



Figura 7. Revista Snacks. Circulación mundial
Fuente: [17]

En este mercado la presentación habitual del mango deshidratado es el chip, disponible en mezclas con otros frutos deshidratados; esta fruta representa menos

del 0,5 de las frutas deshidratadas comercializadas en Europa. El consumo promedio de mango es de 2500 t/año (t, toneladas), con aproximadamente 20% de origen biológico-orgánico [18].

Reino Unido, Alemania, Holanda y Suiza son los importadores más significativos de mango deshidratado. Se estima que entre 16-20 son los importadores que comercializan las frutas en estos países a través de cadenas de supermercado, detallistas, tiendas especializadas y la industria. La U.E. es un mercado maduro, exigente, conocedor, respetuoso del comercio justo, la denominación de origen, preocupado por la salud y seguridad de los alimentos que consume [18].

El comercio justo y la producción orgánica son de alto valor en el mercado europeo, el consumidor europeo se compromete con un desarrollo económico mundial equitativo y para ello, son aceptadas etiquetas de comercio equitativo como: FLO, MAX HAVELAAR. El etiquetado FLO es el común para frutas tropicales y una alianza con la cadena de tiendas OXFAM es la mejor estrategia para entrar a comerciar con éxito en Europa productos bajo esta etiqueta. Específicamente para Holanda se cuenta con la importadora Agrofair Benelux BV [18].

En la actualidad el producto más apetecido, 50% del mercado, es el mango proveniente de países de África del sur, variedades Kent o keitt, preferido por calidad y agradable color amarillo-naranja. Es comercializado a 18% de humedad con cualidades gustativas excelentes. Tailandia y Filipinas se llevan el segundo puesto al cubrir el 35% del mercado con el mango “confit”; a este se le aplica una etapa de pre-azucarado que mejora la palatabilidad pero pierde aprecio ante el consumidor por el elevado aporte de calorías. Burkina-Faso y Malí cubren el 15% restante del mercado europeo con mango orgánico, la mayor dificultad es la calidad y características de palatabilidad, el producto de estos países toma coloración café durante el transporte, es pegajoso y pierde mucho sabor [18]. Variedades más fibrosas (como mango común) no se encuentran reportadas en datos de mercado. Sin embargo, es conveniente que sean puestas a menor humedad, 12%, para evitar la sensación de goma de mascar y que no se pegue al paladar.

De otro lado, la industria de la Unión Europea demanda frutas tropicales secas para configurar postres o barras con sabores “exóticos” como los muesli [18].

Los dos grandes canales de comercialización son los importadores y las multinacionales. Para reducir el impacto sobre el precio al consumidor final la mejor opción son los importadores que tengan como clientes a tiendas especializadas, detallistas o la industria [18].

Desde Colombia la posición arancelaria para ingresar a la Unión Europea guayabas, mangos y mangostanes frescos o secos es 0804500000. Tiene derechos de importación de beneficio por el TCL suscrito y régimen preferencial por país en vía de desarrollo, mayor información se puede consultar en http://exporthelp.europa.eu/thdapp/index_es.html [18].

2.3.3. Países en vía de desarrollo

Los consumidores de los países emergentes son un mercado potencial importante, se deben observar las economías latinoamericanas y asiáticas por separado, China e India como economías emergentes vigorosas son mercados atractivos, sus tendencias de consumo se mueven hacia el estilo de las economías desarrolladas occidentales [19], las economías latinoamericanas traen un ritmo de desarrollo de tiempo atrás.

En la India el mercado global de snacks, que agrupa saludables y convencionales se tasó en US\$ 685 millones para 2013. Con un significativo aporte de los productos convencionales en la categoría extruidos, 29% del total; este impulso se da de la mano de la Multinacional Frito-Lay [19].

China ofrece el otro mercado más atractivo, sin embargo es una economía dispar con grandes centros urbanos por un lado y territorios rurales convencionales por el otro. Las preferencias por categorías de snacks también son dispares, las barras son el tipo de producto menos apetecido mientras que chips y galletas presentan mejor desempeño [20].

En los países latinoamericanos la tendencia es fuerte y vigorosa, el valor del mercado latinoamericano de snacks dulces y salados sobrepasa los US\$ 4000 millones [21], el específico de saludables de US\$ 240 millones y el crecimiento reportado para 2013 es de 20% [22]. Todo lo anterior, a pesar que en la mayoría de países existe una voluminosa oferta de productos a base de frutas que se sirven como bocados o porciones para picar, estos no encajan concretamente en la categoría de snacks aunque son competencia directa.

Por ejemplo, para el caso colombiano se pueden mencionar las frutas en fresco, dulces, bollería, bizcochos artesanales, porciones de quesos, bocadillos, etc. todo el surtido de productos alimenticios que culturalmente se sirven en las diferentes regiones de Colombia a manera de pasabocas o comida intermedia. Muchos de ellos se comercializan de forma ambulante y dentro de la economía informal, por ende no se considera que tienen la característica del snack pero sí son competencia en la misma categoría.

Una dificultad en las economías emergentes latinoamericanas es la alta sensibilidad al precio y baja cultura de aprecio por el valor agregado. Son mercados inmaduros, con dificultades para la innovación y la formación de valor agregado con sus industrias nacionales.

Observando a México, es un mercado atractivo por el elevado consumo de snacks, el crecimiento de la categoría de saludables se estimó del 5% para 2013 y con perspectiva similar para 2014. La fuerte lucha contra la obesidad y la comida chatarra juegan a favor de estos “nuevos” alimentos [23].

También Ecuador, decidido exportador de fruta deshidratada tiene en expansión su mercado interno. No obstante al crecimiento viene impulsado por el turismo de europeos o el retorno de nacionales que han vivido en países industrializados. Las frutas de mayor demanda en el mercado interno son uvilla, piña, banano y mango [24].

2.4. Oferta

La oferta presenta competidores tanto de países industrializados como en vía de desarrollo. A continuación se relacionan algunos de los países jugadores más significativos, las tecnologías que están utilizando actualmente para secar y/o deshidratar los alimentos e igualmente los canales de distribución comunes a este tipo de productos.

2.4.1. Competidores

Al ser un mercado en crecimiento no existen jugadores consolidados pero ya se configura un reducido grupo de jugadores que encabezan la lista de productores y comercializadores de snacks saludables en el mercado internacional.

2.4.1.1. España

España un importante competidor en la categoría de snack de frutas liofilizadas para el mercado doméstico y la exportación, el mercado interno español alcanzó US\$ 2,6 mil millones en 2013 y en este ocupa la mayor parte de la producción [25].

Snack Saludable es una empresa dedicada a la innovación en este sector con los ojos puestos en los mercados de sus vecinos europeos y las economías emergentes de Asia-Pacífico; Casual Fruit es su marca más reciente a través de la cual se ponen frutas y verduras deshidratadas en porciones individuales de 15 gramos o 27 gramos [26]. Snack Saludable, centra su esfuerzo en la innovación de producto, tamaño de la porción para cada tipo de cliente y selección de canales de distribución para impactar los nichos de mayor dinámica [26].

2.4.1.2. Perú

Las exportaciones de mango deshidratado del Perú se tasan en 1500 toneladas/año como promedio. Su crecimiento es de los más altos del sector a nivel mundial con 25%. Perú entrega materias primas de alta calidad, pero no entrega mezclas de snacks, en un gran competidor en este producto frutícola de valor agregado [27].

Sus clientes son: Inglaterra, Alemania, Suiza y Estados Unidos, a los cuales llega con las empresas: Procesos Agroindustriales y Sunshine Export. Los mangos deshidratados del Perú tienen una cotización internacional que oscila US\$ 6-10 por kilo, obteniendo mejor pago que los mangos mexicanos cotizados alrededor de los US\$ 6 por kilo [27].

A nivel interno este mercado ha resultado muy provechoso porque en momentos que el precio internacional del mango se ubica tan bajo como US\$ 0,20 /kilo, el precio nacional del mango para deshidratación puede sostenerse en US\$ 0,25-0,3 /kg [27].

2.4.1.3. Ecuador

Es un jugador en expansión. Busca ganar mercados en los momentos que la producción Mexicana se retira y donde la producción de los países de centro oriente no puede llegar con precios competitivos, las exportaciones de frutas deshidratadas en 2012 sumaron US\$ 1,6 millones, de los cuales el 75% corresponde a exportaciones para Alemania, Francia y España [24]. El Reino Unido es su apuesta más reciente.

No tiene una estructura sólida para el comercio internacional de frutas tropicales deshidratadas, sin embargo, dado su nivel de producción tiene gran potencial y

puede llegar a ser un gran jugador en corto tiempo. Busca extenderse con la ayuda de certificaciones de comercio justo y global GAP, las cuales conoce suficientemente de su experiencia en la comercialización de las frutas en fresco [28].

Biolcom, Cevera Fruits, Fruvesol, Agroapoyo, Sumak Mikuy y Álvaro Niño conformar la asociación empresarial Ecu-Dehyd. Constituida para solidificar el sector de cara a los mercados internacionales de frutas deshidratadas [24].

Wilapa, es un emprendimiento muy recientemente creado, exclusivamente para apuntar a los mercados internacionales con snacks saludables de materias primas típicas de los pueblos andinos y bajo el esquema de comercio justo [29].



Figura 8. Logotipo empresa ecuatoriana WILAPA

Fuente: [29]

2.4.1.4. México

Tiene como principal mercado los Estados Unidos, es uno de los competidores más aventajados en la medida que también tiene un mercado interno en crecimiento. Los estados de Sinaloa y Campeche son los principales productores de mango fresco y deshidratado.

Para el procesamiento de mango deshidratado a gran escala existen empresas como Frutas Tropicales de Campeche, S.A. de C.V. con una capacidad de producción de 400 toneladas de mango deshidratado para consumo nacional. Adicionalmente se procesa piña, papaya y plátano tanto para consumo interno como exportación [30].

También Terrafertil y su marca de snacks saludables Nature's Heart ha logrado el extraordinario crecimiento de un 800% en 4 años, difundiendo su marca en el mercado interno, la capacidad de gestión de sus directivos tienen a la firma en una interesante posición dentro de distribuidores como: Walmart, Chedraui, Comercial

mexicana y Soriana, Liverpool y Sears, GNC, Nutrisa, La Europea, Farmacia San Pablo y Starbucks [23].

2.4.2. *Tecnologías de secado utilizadas actualmente por los competidores*

Para el secado de frutas, vegetales y granos es posible recurrir a diversos métodos, pero para producción industrial en un mercado competitivo las opciones se reducen, allí la calidad y los costos juegan un papel fundamental en la toma de decisiones. Las técnicas actualmente más utilizadas por los países productores de frutas deshidratadas son la liofilización y el secado en horno. A continuación una corta descripción de los métodos a título orientador:

2.4.2.1. Liofilización

La liofilización es la técnica de secado que al aplicar sublimación al vacío sobre la humedad presente en un producto congelado esta es removida y el alimento queda seco a porcentajes de humedad tan bajos como 3%. La técnica ofrece productos de alta calidad sensorial, nutricional y estructuralmente estables, la desventaja notoria es el elevado costo de inversión y mantenimiento. El procesamiento se lleva a cabo a temperaturas de -40°C y presiones alrededor de 1/1000 atmósferas.

En una primera etapa se congelan a alta velocidad los alimentos, seguido ocurre la formación de vacío por caída de presión y posteriormente se induce la sublimación para remover el agua libre.



Figura 9. Liofilizador industrial

Fuente: <http://drycol.co/marcas-propias-lioflizacion-deshidratacion-procesamiento-alimentos>



Figura 10. Fresas liofilizadas
Fuente: [31]

2.4.2.2. Secado en horno

Hornos con control de temperatura, velocidad de aire y distribución son los equipos de uso común para secado de vegetales y frutas a escala industrial. La calidad del producto final es menor a la obtenida por liofilización pero la inversión inicial y proceso presentan menor complejidad. Las temperaturas convencionales para secado de productos agrícolas en estos equipos oscilan entre 50-60°C.



Figura 11. Deshidratador por aire caliente

Fuente: <http://drycol.co/marcas-propias-liofilizacion-deshidratacion-procesamiento-alimentos>

2.4.3. Canales de distribución

La selección de canales de distribución depende si se trata de un proceso de exportación o simplemente un proceso de distribución a través de la red interna de

los países, también existen asimetrías entre países para la selección de los canales eficaces en función de los objetivos de las industrias.

Como se introdujo en una sección 3.2.2 del mercado Europeo, que es extrapolable al mercado norteamericano; los grandes canales de entrada son las multinacionales y los importadores, aunque estratégicamente puede resultar conveniente establecer alianzas con tiendas especializadas de pequeño y mediano formato, es difícil el contacto y la posibilidad de saltar los asuntos logísticos con costos que no eleven sustancialmente el precio al consumidor final cuanto se contrata con estas últimas.

2.4.3.1. Las multinacionales

Compran grandes volúmenes y cuentan con la capacidad para saltar todos los asuntos logísticos desde las plantas procesadoras e incluso algunas cuentan con sus propias plantas y compran materia prima en los cultivos directamente. Son exigentes: se debe contar con certificaciones de calidad, producción en grandes volúmenes y sostenibles, músculo financiero suficiente para tolerar oscilaciones de precio

Como ventaja tienen que permiten el acceso a los mercados más remotos con calidad estándar y siempre a precio competitivo. Una corporación líder de esta categoría es Kellogg's.



Figura 12. Logotipo multinacional Kellogg's

Fuente: <http://www.clubdarwin.net/seccion/ingredientes/kellogg-s-innova-para-adaptarse-al-ritmo-de-vida-de-sus-consumidores>

2.4.3.2. Los importadores

Algunos importadores compran a multinacionales otros de forma directa, la selección del importador depende de la zona, producto y características de

mercado que se quiere impactar. Los importadores también se especializan en mercados orgánicos, de comercio justo, entre otros; así existen opciones para cada tipo de producto y empresa exportadora.

Algunos importadores estadounidenses de frutas deshidratadas son:

Sun-Maid Growers Of California www.sunmaid.com , Teléfono: 1-559-896-8000; dirección: 13525 S Bethel Avenue Kinsburg, CA. 93631-9232. Se interesa en alimentos orgánicos, exóticos, para consumidores norteamericanos y latinos.

United Food Ingredients Llc www.redriverfoods.com , Dirección: Oficina de California, 9020 Stony Point Pkwy, Ste 380 Richmond, VA 23235 USA, Tel. (804) 320-1800. Contacto directo, necesario ofrecer volumen y estabilidad en el año y entre años; poca importación frutas tropicales, elevada para frutos secos tradicionales.

Carlson Sa Inc www.sacarlson.com , Dirección: 160 Camfield Road Yakima, WA 98908. Tel. (509) 965-8333. Toda clase de procesados con frutas. Requiere volumen y complejos requisitos logísticos.

Pacific Grain and Foods www.pacificgrainfoods.com , Dirección: 4067 W, Shaw Ave. #116 Fresno, CA 93722. Tel. 559-276-2580. Altísimo volumen para contratar; ventas para la costa Oeste estadounidense; necesario ser producto orgánico y libre de organismos genéticamente modificados.

2.4.3.3. Las tiendas especializadas

Son el canal correcto para los consumidores que se podrán fidelizar rápidamente si se llega con el marketing mix adecuado, estos establecimientos ofrecen toda la experiencia y atención personalizada para impactar los clientes, son socios estratégicos para la incursión de cualquier producto/servicio en mercados muy detallados [32] La mayor dificultad es vencer los costos logísticos, para ello se requiere de músculo financiero o estructuración de la cadena logística para llevar los productos a precio competitivo.



Figura 13. Logotipo tienda especializada en Guadalajara, México

Fuente: <https://es-es.facebook.com/AmorOrganicoGdl>

2.4.3.4. Las grandes superficies

La característica distintiva es que sus instalaciones ocupan más de 2500 m², pueden acoplarse en centros comerciales, tiendas de almacenes o tiendas por departamento. Los competidores de talla mundial son simultáneamente multinacionales muy poderosas, tienen capacidad de producir marcas propias, controlar procesos completos de logística con recursos propios o a precios diferenciales muy ventajosos, compran volumen, distribuyen en mercados de volumen y especializados [32], exigen músculo financiero y acompañamiento en marketing, son difíciles de acceder para micro, pequeños y medianos empresarios.



Figura 14. Grande superficie y *retailer* más importante del mundo

Fuente: <http://www.walmart.com/>

2.5. Colombia

2.5.1. Estado del sector

La estructura interna de los oferentes de snacks se compone de la multinacional Frito lay (de PepsiCo) con 60% del mercado y firmas nacionales: Colombina S.A., Nacional de Chocolates S.A., Comestibles Ricos S.A. y Yupi S.A., como las más destacadas [33]. El mercado colombiano de esta categoría se tasa en US\$ 500 millones anuales con tendencia al alza [34, 35], no se dispone de cifras

específicas para el grupo de saludables. La demanda interna de snacks saludables y frutas deshidratadas está construcción impulsada por el consumo de los adultos jóvenes que buscan nuevas experiencias y cuidar su salud [34].

En cuanto a la demanda externa, para los intereses de Colombia, Turquía está observando con ojos de interés la producción de frutas tropicales frescas y secas como un paquete conexo que puede adquirirse junto con el café, producto estrella colombiano en el cual están sumamente interesados. Es una relación comercial en fase de aproximación y reconocimiento pero que promete a futuro [36].

La oferta colombiana en el renglón específico del snack saludable con fruta deshidratada y la fruta tropical deshidratada es incipiente y con vocación exportadora, las empresas emprendedoras en este renglón son son: Andiequip, Tropickit, Frutireyes, Caribbean Exotics, Tomacol, Fruta Fresca Verona, Signa Grain, Ocati, Andes ExportCompany, TheHealty Snack, Frutar Limitada y Alimentos Naranja Verde [37].

C. I. ANDIEQUIP S.A.S. exporta frutas deshidratadas (especialmente uchuva), mango, guayaba, piña, banano, coco, papaya, pitahaya, etc. a los mercados Europeos y norteamericanos [38]. Frutas FRUANDES exporta fruta orgánica deshidratada (uchuvas, mangos, bananitos, piñas, pitahayas, panelas granuladas, cocos y cacaos) hacia Inglaterra, Canadá, Italia, EE. UU. Y Chile y actualmente realizan acercamientos para ingresar a Suiza, España y Alemania, el 95% de su producción es con destino a la exportación [39].



Figura 15. Logotipo FRUANDES

Fuente: <http://www.bcorporation.net/community/fruandes>

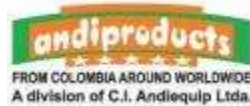


Figura 16. Logotipo Andiproducs. Andiequip Ltda.

Fuente: <http://catalogo.proexport.com.co/en/agro-industry/agroindustrial/ci-andiequip-sas.aspx>

Sin embargo, el potencial del país es enorme, gracias a la posición geográfica y la diversidad de suelos y climas, el país cuenta con la posibilidad de producir toda suerte de frutas y gracias a los recientes TLC's suscritos tiene la posibilidad de acceder a mercados de alto valor en condiciones ventajosas [9]. Además está la ventaja competitiva de ser el único país suramericano con puertos en el pacífico y en el Atlántico por lo cual es más fácil acceder a los mercados de Norteamérica Europa y Asia que los demás países suramericanos.

2.6. Conclusiones

El mercado mundial de snacks saludables está en crecimiento y es muy atractivo para la industria alimentaria de los países productores de frutas tropicales.

Colombia presenta un interesante potencial en el segmento de frutas deshidratadas para el mercado internacional pero debe incrementar esfuerzos para consolidar una oferta competitiva.

Ecuador, Perú y México son pioneros y fuertes competidores en producción de frutas deshidratadas destino a snacks saludables en los mercados que a Colombia le pueden interesar.

3. CADENA AGROINDUSTRIAL DEL MANGO EN COLOMBIA

3.1. Introducción

El mango es un fruto procedente del continente Asiático, se presume que surge al noreste de la India y al norte de Burna, en las proximidades de la cordillera del Himalaya. Es un cultivo ancestral del cual se tiene información en los libros sagrados hindúes de más de 4000 años de antigüedad [40].

El cultivo se extendió hacia el suroeste asiático, posteriormente al archipiélago Malayo. La extensión hacia el resto del mundo solo llegó hasta el siglo XVI gracias a la rutas comerciales marítimas. Así los portugueses lo introducen al África y Brasil, luego desde el país suramericano se extiende por toda la América hasta México, donde los españoles también lo llevaron. Después se produce la introducción a la Florida en los Estados Unidos [40].

En Colombia está presente desde la conquista pero sólo hasta el siglo XX se le empezó a valorar como producto para explotación económica [40]. Actualmente el cultivo se extiende por 16 departamentos encabezados por Tolima y Cundinamarca; el cultivo está presente desde el nivel del mar hasta los 1650 metros. Ha logrado excelente adaptación a las condiciones agronómicas del país, tanto que existe el mango naturalizado colombiano o criollo, este fenómeno se produjo por la polinización cruzada dando origen a más de 200 ecotipos nacionales [41].

El cultivo de mango en 2012 generó aproximadamente 11682 empleos, que comprende el 0,49% del empleo generado por cultivos permanentes y transitorios, con capacidad de 108 jornales por hectárea año, en ciclo productivo [41].

En cifras de producción, el área cosechada de mango en el país tuvo un crecimiento de 4% entre 2007 y 2011, pasando de 17826 a 18573 hectáreas. La producción durante el mismo periodo creció un 19% partiendo desde 185000 toneladas hasta alcanzar más de 221000. Sin embargo, el promedio de rendimiento productivo del cultivo en el país es muy bajo alcanzando un 11,1 t/ha [1].

La distribución geográfica del cultivo en el país la conforma: Tolima 31,3%, Cundinamarca 30,8%, Magdalena 11,5%, Bolívar 7,3%, Antioquia 5,8%, resto del país 13,4% [1].

El encadenamiento productivo es deficiente, la industria procesadora es insuficiente y la vocación exportadora sólo presenta acciones esporádicas, aisladas y de bajo impacto en el mercado mundial [1].

La estructura de la cadena productiva agroindustrial colombiana se exhibe en el siguiente esquema:

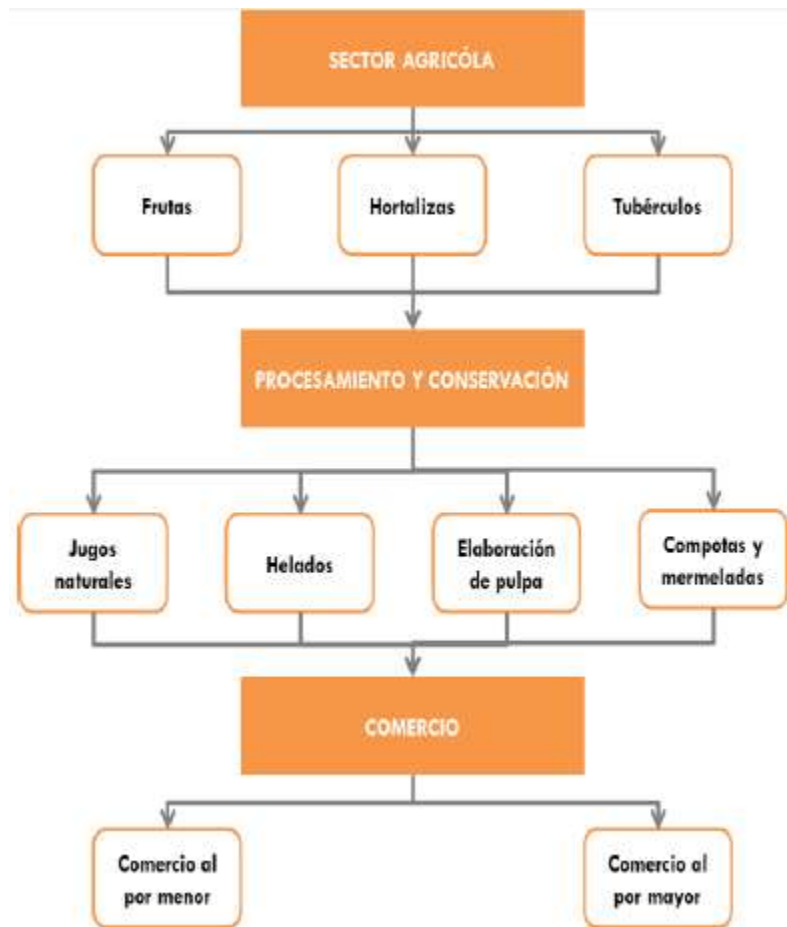


Figura 17. Cadena productiva agroindustrial

Fuente: [2]

El eslabón de procesamiento y conservación está disperso por el país: Bogotá, Antioquía y Valle del Cauca son los principales centros de producción y consumo. Empresas como Alpina S.A., Postobón S.A., Colombina S.A., Conservas California S.A., son algunas de las más representativas.

El eslabón de procesamiento actualmente no dispone de capacidad suficiente para absorber toda la oferta procedente del sector primario que a su vez no está

apropiadamente estructurado para garantizar oferta permanente y estandarizada en cantidad y calidad [1].

3.2. El mango

3.2.1. Generalidades

Nombre científico: *Mangifera Indica L.*

Familia: Anacardianaceae

Nombres comunes: En español, inglés e italiano: mango; en francés: manguier; En portugués: manga o manguiera [40].

Típicamente es un árbol de 10 a 30 metros de altura, sistema radicular de 6 a 8 metros de profundidad y extensión lateral de hasta 10 metros de la base del tronco. A continuación algunas especificaciones tomadas de [40].

Tronco: recto, cilíndrico y hasta 1 metro de diámetro, corteza color gris o café, con grietas longitudinales poco profundas. Algunas variedades exudan resina.

Hojas: alternas, espaciadas irregularmente, de forma oblongolanceoladas, color verde oscuro brillante por el haz y verde amarillento por el envés. En estado inmaduro son color violeta rojizo.

Flores: dispuestas en una panícula ramificada y terminal de aspecto piramidal, con raquis o tallo rosado o morado. En una misma inflorescencia pueden coexistir flores masculinas y hermafroditas.

Fruto: es una drupa, de forma y dimensiones variables, generalmente es ovoide oblonga, aplanada, redondeada y obtusa en los extremos, de color verde, verde-amarillo o amarillo; algunas variedades con matices rojos, morados o anaranjados.

Cáscara o pericarpio: uniforme, lisa e interrumpida por glándulas circulares, llamadas lenticelas.

Mesocarpio o pulpa: de color amarillo o anaranjado, jugoso, con fibrosidad variable.

Endocarpio: grueso, leñoso y cubierto por una capa fibrosa externa.

Semilla: en forma aplanada y compuesta por cotiledones. Puede ser monoembriónica o poliembriónica.

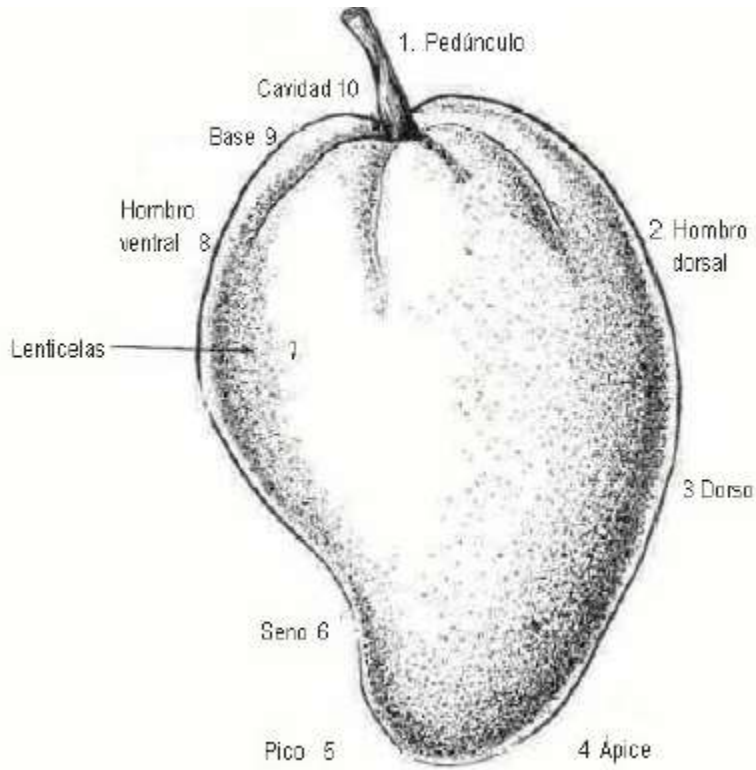
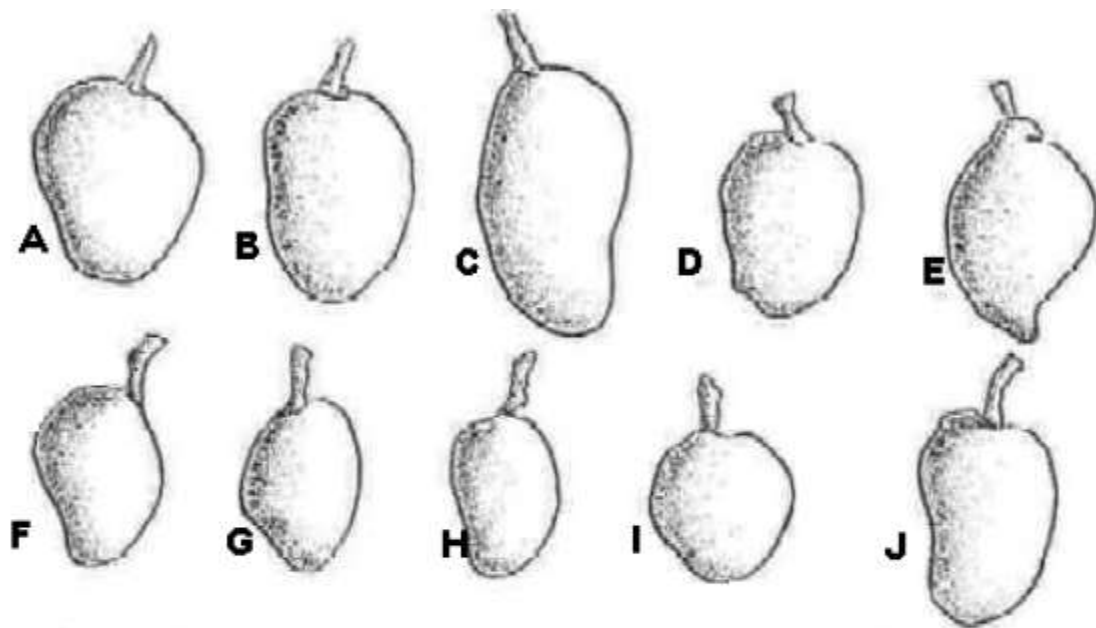


Figura 18. Partes del fruto del mango

Fuente: [40]

EL mango posee un grupo numeroso de variedades, por ende hasta la actualidad es difícil establecer a plenitud todas las existentes, sin embargo existen características comunes que han permitido agrupar los diferentes hallazgos a la fecha.

Una de ellas consiste en la forma de las diferentes variedades:



- | | |
|--------------------------------|-----------------------------|
| A. Ovada reniforme | F. Ovada cortada |
| B. Ovada oblicua | G. Oblonga |
| C. Orbicular oblicua reniforme | H. Oblonga oval |
| D. Oval | I. Ovada orbicular |
| E. Ovicular ápice recto | J. Oblonga compresa lateral |

Figura 19. Formas comunes del mango

Fuente: [40]

3.2.2. Variedades presentes en Colombia

La diversidad de especies en el país es numerosa. 16 variedades principales de acuerdo con los estudios de CORPOICA-ASOHOFrucol son agrupadas en dos categorías.

Grupo 1. Variedades criollas:









			
AZUCAR	CORAZON	PAJARITO	HILACHA
			
GUEVETORO	CHANCLETO	MANGO MACHO	PIÑA

Figura 20. Variedades criollas pequeñas

Fuente: [41]






		
<p align="center">REINA</p>	<p align="center">PICUDA</p>	<p align="center">FILIPINO</p>
		
<p align="center">MARIQUITEÑO</p>	<p align="center">NARIZON</p>	

Figura 21. Variedades criollas grandes

Fuente: [41]

Grupo 2. Variedades mejoradas procedentes de la Florida (EE.UU.).



Figura 22. Variedades mejoradas

Fuente: [41]

Se estima que la distribución del cultivo de acuerdo a las diferentes variedades existentes es: 39% común o hilacha, 20% Tommy Atkins, 11% Keitt, 5% mango de azúcar y el excedente para las demás variedades existentes [1].

Del mismo modo el mango es considerado como una fruta de sabor agradable, buena fuente de vitamina A y C, gran potencial comercial como alimento funcional. En la siguiente tabla se relaciona la composición nutricional de la pulpa de mango.

Tabla 1. Composición nutricional promedio en 100 gr de pulpa de las variedades de mango presentes en Colombia

Componente	Unidad	Cantidad
Agua	g	81,7
Calorías	kcal	66
Proteínas	g	0,7
Grasa	g	0,4
Carbohidratos	g	16,8
Calcio	mg	10
Fósforo	mg	10
Hierro	mg	0,4
Sodio	mg	7,0
Potasio	mg	189
Manganeso	mg	18
Vitamina A	U.I.	1000-6000
Vitamina B1	mg	50
Vitamina B2	mg	50
Vitamina B3	mg	1100
Vitamina C	mg	35

Adaptada de: [40]

3.3. La variedad común o hilacha

En Colombia, el 39% del área ocupada con la fruta corresponde a mango común o hilacha, en su mayoría sin tecnificación y en plantaciones pequeñas [1].

De acuerdo con la NTC 5139-5140 para mangos criollos. Los requisitos específicos para la variedad hilacha para consumo en fresco y procesamiento industrial son [41]:

- Enteros, con la forma característica
- De aspecto fresco, consistente y firme
- Sanos, libres de ataques de insectos y enfermedades

- Limpios, exentos de olores, sabores o materias extrañas visibles
- Libres de magulladuras, fisuras o daños mecánicos, humedad exterior anormal
- Exentos de daño causado por variaciones de temperatura
- Los residuos de plaguicidas no deben exceder los límites máximos permitidos por el Códex Alimentarius.
- La altura máxima del empaque debe ser de 250 mm y la capacidad máxima de 25 kg.
- Las medidas de base de los empaques deben ser submúltiplos de las estibas de 1200 mm * 800 mm y 1200 mm * 100 mm.
- Los materiales de cartón deben construirse utilizando impermeabilizantes (retardantes de humedad), cuya proporción confiera resistencia en condiciones de almacenamiento (temperatura y humedad relativa).

Tabla 2. Descripción peso y calibre para mango NTC 5139

Hilacha		Tolerancia
Peso (gramos)	Calibre	
<101	40	10% en número o peso de mangos que tenga la mitad de la diferencia del calibre inmediatamente superior e inferior al especificado en el empaque.
101-130	28	
131-160	24	
161-200	18	
201-250	18	
>250	15	

Adaptada de: [40]

3.4. Eslabón primario

3.4.1. Estructura del sub-subsector agrícola del mango

El cultivo del mango como actividad económica en Colombia tiene un panorama difícil frente a competidores de talla mundial por volumen de producción, distribución en el territorio nacional, comercialización, entre otros [1].

El enorme potencial de la fruticultura colombiana y del cultivo del mango en particular se ven obstruidos por problemas estructurales. El subsector del mango está en una fase incipiente de desarrollo, no existe el tejido empresarial que sustente el avance del sector [1].

El eslabón primario presenta poca vocación exportadora, débil integración vertical, fuerte tendencia al individualismo y renuencia de los contratos a largo plazo, también tiene elevada atomización (muchos predios de tamaño pequeño y dispersos), escasa mecanización, dificultad para acceso a: paquetes tecnológicos, crédito e insumos a precios competitivos, poco capital humano capacitado y como consecuencia bajos rendimientos medios en comparación con los principales productores mundiales [1].

También se presenta dificultad coyuntural por la baja presencia de las variedades comercializadas a nivel internacional, sumada a numerosas pérdidas pre y poscosecha (20% y 8% respectivamente según la FAO [42]). Del mismo modo, la investigación aplicada es aun deficitaria y existe gran dificultad para transformarla en paquetes tecnológicos a precios accesibles por los productores [1].

Finalmente, las condiciones de infraestructura y logística del país agravan la situación del sector, estos dos factores son especialmente significativos sobre los intereses de mejorar los sectores agroalimentarios del país. Los tiempos y procedimientos inadecuados causados por las deficiencias de infraestructura vial y logística de transporte generan pérdidas numerosas y elevan los costos a niveles que imposibilitan la competencia internacional [1].

3.4.2. Zonas de producción en el país

Tolima y Cundinamarca son de lejos los principales departamentos productores de mango del país, ambos suman el 62,1% de la producción [1].

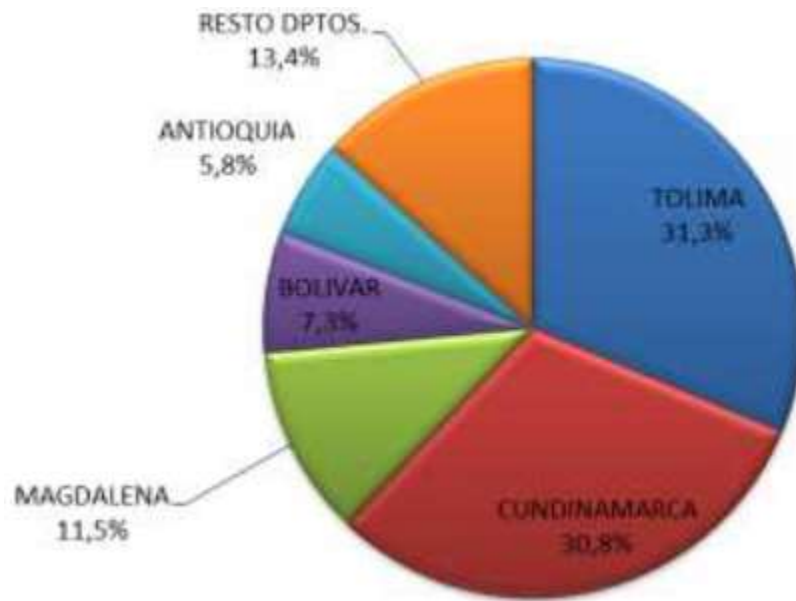


Figura 23. Distribución departamental de la producción de mango

Fuente: [1]

La distribución en el mapa del país se puede encontrar en la siguiente figura.



Figura 24. Mapa de distribución del cultivo de mango en Colombia
Fuente: [1]

Se observa claramente que departamentos de la zona Andina seguidos por algunos de la zona Atlántica concentran la inmensa mayoría de la producción de mango nacional.

A su vez, la estacionalidad de la cosecha de mango en Colombia se aprecia en la siguiente tabla:

Tabla 3. Estacionalidad de la producción de mango en Colombia por Departamento

Departamento	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Antioquia	Azul	Azul	Azul	Verde	Rojo	Rojo	Rojo	Rojo	Rojo	Verde	Azul	Azul
Atlántico	Azul	Azul	Azul	Verde	Rojo	Rojo	Verde	Azul	Azul	Azul	Azul	Azul
Bolívar	Azul	Azul	Azul	Verde	Rojo	Rojo	Rojo	Verde	Azul	Azul	Azul	Azul
Cundinamarca	Rojo	Verde	Azul	Verde	Rojo	Rojo	Verde	Azul	Azul	Verde	Rojo	Rojo
Magdalena	Azul	Azul	Azul	Verde	Rojo	Rojo	Rojo	Verde	Azul	Azul	Azul	Azul
Tolima	Rojo	Verde	Azul	Verde	Rojo	Rojo	Verde	Azul	Azul	Verde	Rojo	Rojo

Fuente: [43]

Rojo: Oferta abundante

Verde: Transición

Azul: Escasez

Así mismo la evolución de la producción entre los años 2007-2011 de los departamentos líderes, se observa a continuación:

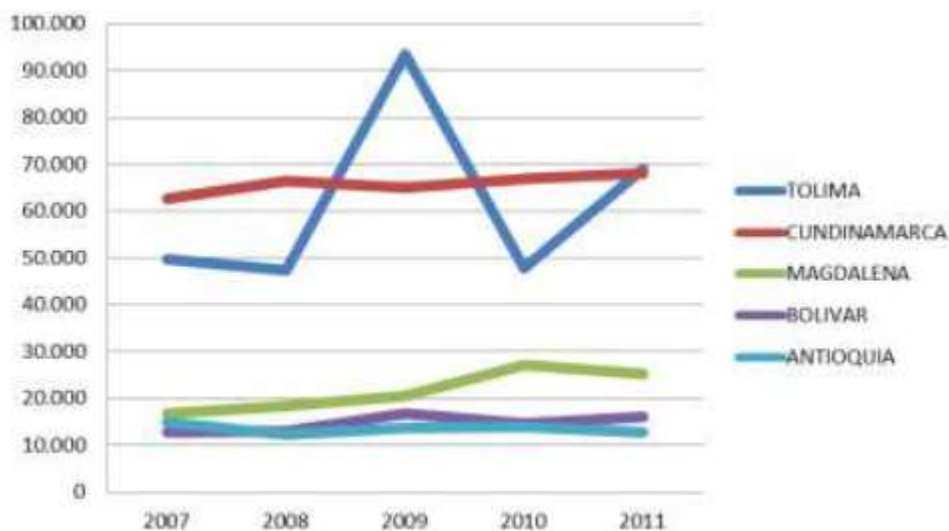


Figura 25. Evolución de la producción de mango. Toneladas

Fuente: [1]

Observando la evolución por municipios, tenemos:

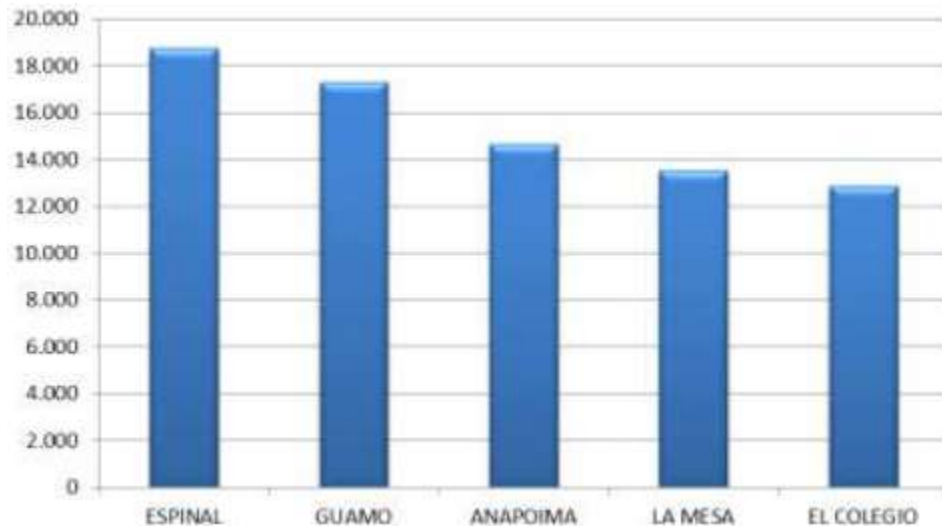


Figura 26. Promedio producción principales municipios productores 2007-2011. Toneladas.
Fuente: [1]

Así mismo, la distribución porcentual por municipios de la producción de mango 2007-2011. Respecto al total.

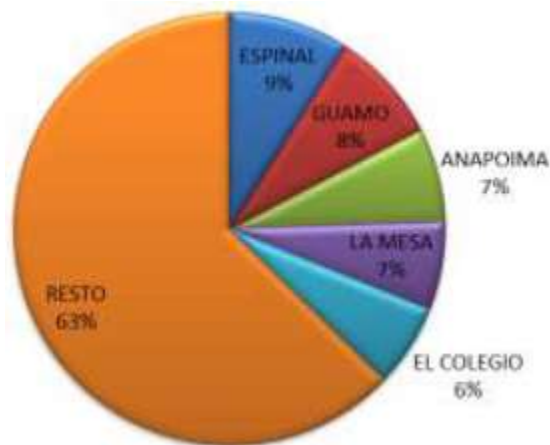


Figura 27. Distribución municipal promedio producción de mango
Fuente: [1]

En consecuencia los 5 principales municipios productores concentraron alrededor del 37% de la producción durante el periodo referenciado. Esto permite entrever que gran parte de la producción nacional se encuentra dispersa y que los clústeres deben desarrollarse en la zona nororiente del Tolima y Suroccidente de Cundinamarca.

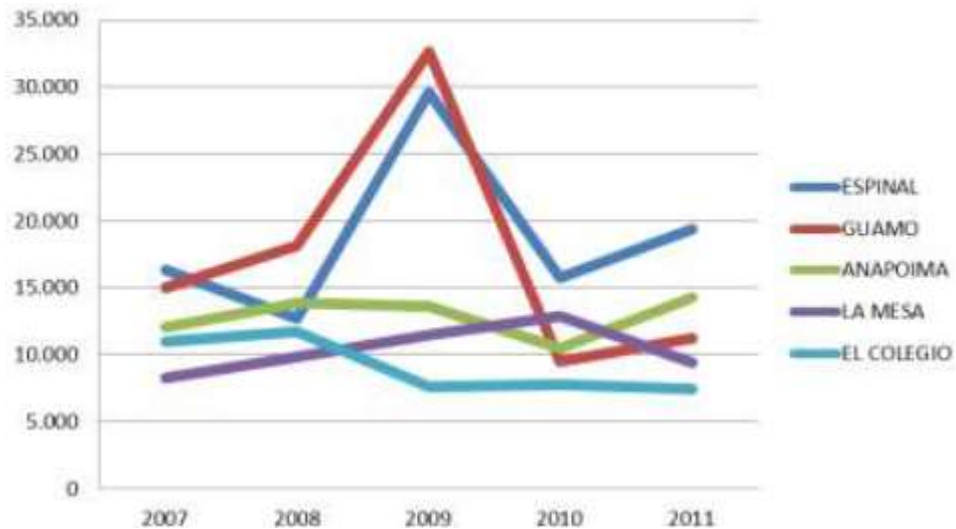


Figura 28. Evolución de la producción 2007-2011 principales municipios productores de mango, toneladas
Fuente: [1]

Espinal y Anapoima registraron en el periodo incrementos del 19% y 18% respectivamente.

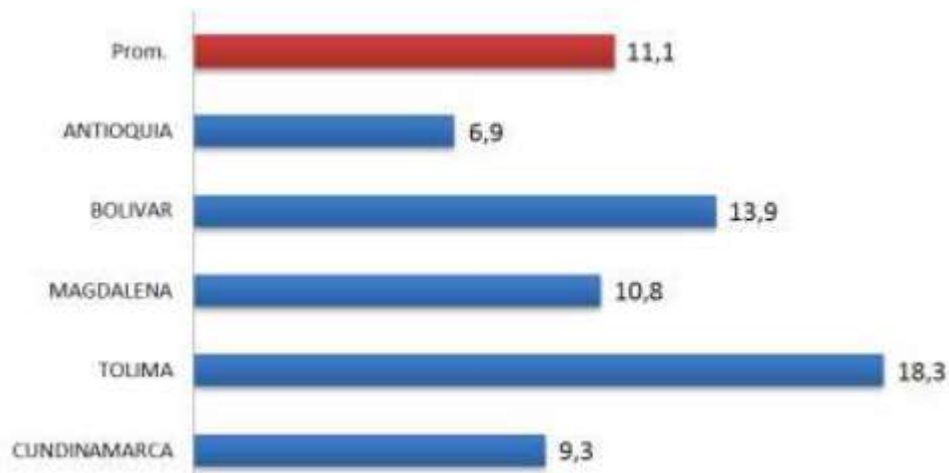


Figura 29. Rendimientos medios 2007-2011 principales departamentos productores de mango. Tonelada/hectárea
Fuente: [1]

Los esfuerzos en investigación y desarrollo hechos por el departamento del Tolima se ven recompensados en las mejores cifras de rendimiento aunque tampoco deben desconocerse otros factores ventajosos que permiten rendimientos superiores a los demás departamentos. El centro de investigación CORPOICA-NATAIMA es núcleo de la investigación del fruto en Colombia.

Finalmente, la evolución del precio promedio del mango Tommy y común en la central mayorista de abastos en Bogotá se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 4. Precio promedio del mango común y Tommy en la central mayorista de abastos en Bogotá durante 2014

Mes	Precio por kg. Mango Tommy (\$USD)*	Precio por kg. Mango Común (\$USD)
Enero	0,77	0,7
Febrero	0,93	0,7
Marzo	0,91	0,84
Abril	1,57	0,47
Mayo	1,06	0,36
Junio	1,11	0,36
Julio	1,09	0,86
Agosto	1,89	0,96

Fuente: El autor, con base: SIPSA, Ministerio de Agricultura y Desarrollo rural-DANE.

*Tasa representativa del mercado aplicada, COP 1900/ 1 USD

3.4.3. Estrategia de encadenamiento

Como se comentó anteriormente el encadenamiento es una de las principales falencias de la producción frutícola colombiana. La mayor parte de la producción nacional se destina a la plaza de mercado, tanto en los mercados municipales como hacia las centrales de abasto de las capitales. Un fenómeno fuerte y que tiene impacto significativo en el precio al consumidor final es la intermediación.

Tabla 5. Vías de encadenamiento de la producción de mango en Colombia

Vía	Características
Plaza de mercado	Es la ruta histórica de destino de la producción agrícola nacional. A nivel municipal es una ruta sin valor agregado pero la más sencilla de alcanzar para los pequeños productores.
Intermediario	Es recurrente en diversas zonas del país y nace de la dificultad logística para unir las zonas de producción a la industria o alcanzar los grandes centros urbanos.
Industria	La figura del intermediario incrementa el precio al consumidor final y en algunos casos deteriora la calidad del producto en fresco.
Grandes superficies y supermercados	Es difícil de alcanzar por ubicación geográfica, volumen demandado, estacionalidad de la producción y otros factores estructurales. Sólo una reducida parte de la producción llega de manera directa a la industria y se considera formalmente encadenada hacia mercados de alto valor agregado. Gran parte de la producción que alcanza la industria, lo hace a través de los intermediarios.
Comercializadora internacional	Las grandes superficies son un mercado complejo de alcanzar por parte del productor promedio. Estas compañías imponen las condiciones de negociación y exigen soporte complementario que implica un robusto músculo financiero. Los supermercados regionales pueden ser accesibles por pequeños y medianos productores, sin embargo: el precio, regularidad y condiciones comerciales no son muy disímiles a las presentadas en las plazas de mercado. Son alianzas en proceso de desarrollo.
	Es el ideal para la producción en fresco. Su presencia es mínima y las posibilidades de acceso igualmente reducidas para productores individuales. La vocación exportadora de esta vía ya sea por capacidad propia o a través de empresas externas obliga a mantener altos estándares de calidad, difícilmente alcanzables por el grueso de las explotaciones existentes en el país.

3.5. Eslabón secundario

3.5.1. Productos industrializados

La industria procesadora de productos hortofrutícolas presentó un crecimiento del 3,8% anual a julio de 2013 [2]. Los productos convencionales de la industrialización del mango se pueden observar en el siguiente diagrama:

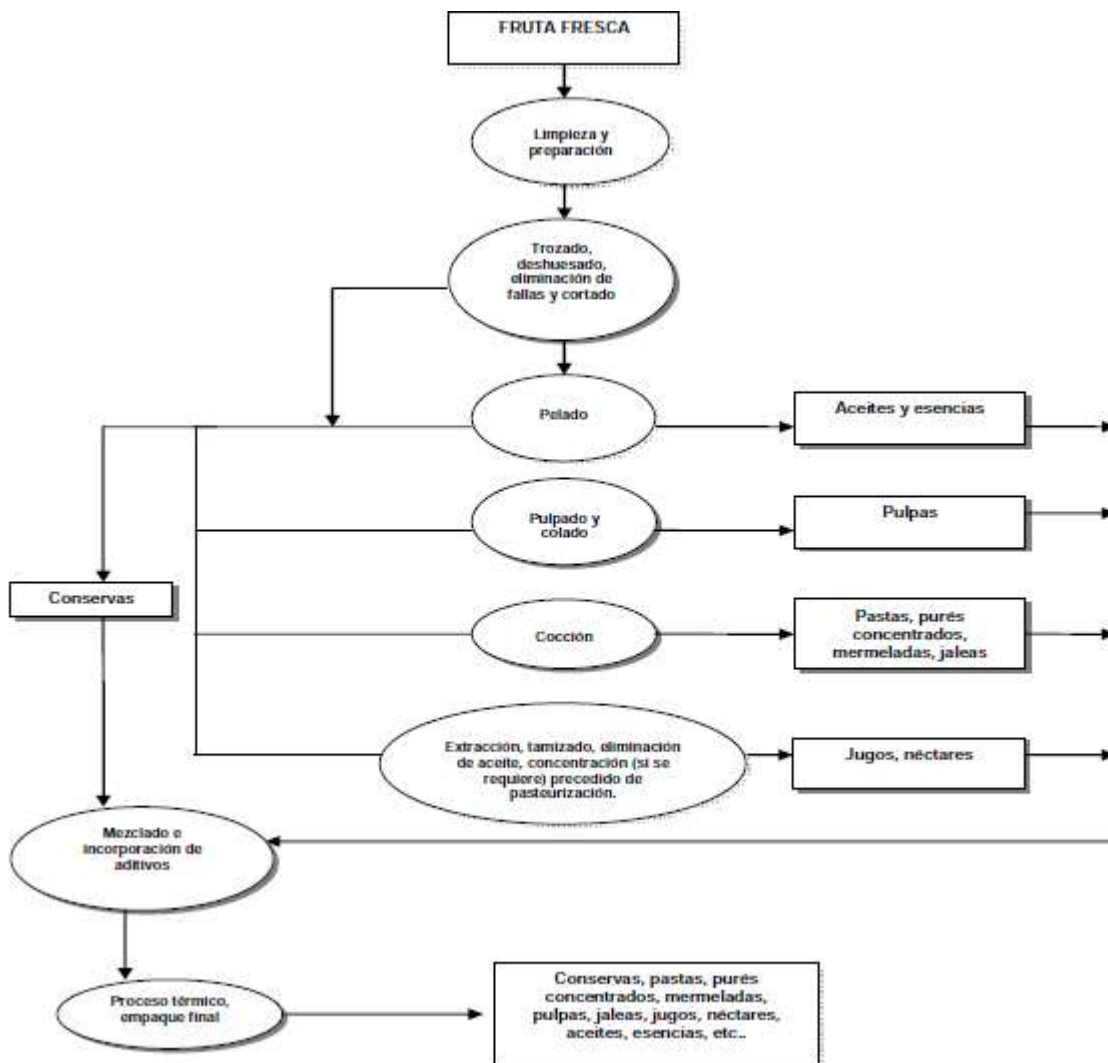


Figura 30. Procesamiento industrial de frutas frescas

Fuente: [44]

A partir del mango pueden ser creados los siguientes tipos de productos:

Tabla 6. Productos de la industrialización del mango

Producto	Descripción	Imagen
Pulpa y Concentrada	<p>pulpa La pulpa es la extracción plena del mesocarpio del fruto, presenta un promedio de 13°Bx. La concentración de la pulpa se produce por evaporación. Se concentra convencionalmente hasta 40-50 °Bx.</p>	
Conserva	<p>Preparación de fruta u hortaliza, entera o troceada, precocidad y empacada junto con un medio hipertónico azucarado y/o acidulado que modifica sus características fisicoquímicas y alarga la vida útil.</p>	
Compota	<p>Es la cocción por corto tiempo de fruta entera o troceada, endulzada y/o aromatizada, espesada o no, con o sin adición de preservantes.</p>	
Néctar	<p>Es el preparado bebible compuesto por pulpa y adicionado de agua, edulcorante y demás ingredientes permitidos en diferentes proporciones.</p>	

Fuente: www.iberexpress.es

Fuente: www.spanish.alibaba.com

Fuente: www.revistalabarra.com

Fuente: <http://cmacoloespa.com/bebidas.php>

Fruta cristalizada

Es un tipo de fruta confitada, en la cual trozos pequeños expuestos a soluciones concentradas de azúcar de forma sucesiva hasta alcanzar una solución de 90°Bx. Obteniendo un producto con humedad inferior a 10%. [45].



Fuente: www.spanish.alibaba.com

Cubos y tajadas

Es la preparación y troceado conveniente del fruto en porciones y presentación lista para consumo. Se asocia al empaque en atmósfera modificada y controlada.



Fuente: www.cadenahortofruticola.org

Deshidratado

Es la remoción de humedad hasta un punto microbiológicamente estable y agradable para consumo, generalmente entre 10-15%.



Fuente: www.elclub.ning.com

Mermelada

Es la preparación concentrada de pulpa, edulcorantes, pectina y demás ingredientes permitidos hasta una concentración cercana a 70°Bx, adicionada o no de trozos de fruta.



Fuente: www.lima-dist.allbiz

Pulverizado

Producto obtenido de la concentración y posterior pulverización de la pulpa hasta una granulometría y humedad convenientes.



Fuente: www.puebloorganico.mx

Liofilizado

Deshidratación de la fruta en diferentes formas y tamaños por sublimación al vacío.



Fuente: www.spanish.alibaba.com

Concentrado para yogurt

Preparado base de pulpa con o sin trozos de fruta, edulcorante y demás ingredientes permitidos, concentrado y listo para mezclar con yogurt base.



Fuente: www.essuper.com.do

Bebidas alcohólicas

Productos obtenidos por fermentación etanólica de los azúcares naturales del fruto, con diferente graduación alcohólica según tipo de producto, oscila entre 7-22°.



Fuente: www.licor-de-fruta.uvinum.es

3.5.2. Estructura de la industria de frutas y derivados

La mayor concentración de la industria manufacturera de frutas y derivados se encuentra en las empresas líderes y dichas empresas se ubican en: Bogotá, Antioquia y Valle del Cauca, siendo la capital del país de lejos el principal centro de producción y consumo [44].

Sin embargo, existe una numerosa y dispersa micro y pequeña industria dedicada a los diferentes productos del procesamiento para mercados regionales. Este fenómeno ocurre por la dispersión y bajo volumen de la producción agrícola por regiones; las posibilidades de estas empresas de competir a nivel nacional e internacional son reducidas.

El desempeño de la industria de procesamiento y conservación de frutas ha sido mejor que el desempeño global de las industrias manufactureras del país en cifras del 2012 y primer semestre de 2013:

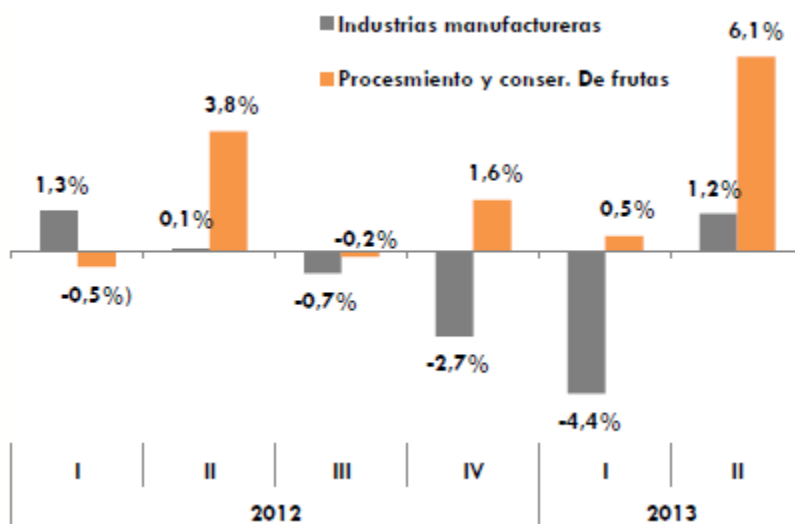


Figura 31. Variación anual del PIB de la rama industrial vs. Sector de procesamiento y conservación de frutas

Fuente: [2]

3.5.3. Empresas del sector

El conjunto de empresas dedicadas al procesamiento de productos frutícolas se puede dividir en productoras de: jugos y néctares, conservas, pulpas y otros derivados.

Tabla 7. Grandes empresas dedicadas a la producción de jugos y néctares de frutas

Empresa	Marcas
Alpina S.A.	Frutto, frutto desayuno
Postobón S.A.	Hit, Hit vital, Tutti frutti, Hit buenos días, Tutti frutti sunfrut.
Colombina S.A.	Petit, Cosecha pura, Jugazzo.
Coca Cola Company	Del valle fresh

De las empresas dedicadas al procesamiento y conservación de frutas, las más importantes durante el 2012 se pueden relacionar a continuación:

Tabla 8. Las diez empresas más grandes por nivel de ingresos operacionales del sector CIU 1521. Conservas

Empresa	Ingresos operacionales (\$COL)
Conservas California S.A.	60.274.129.000
Productos Alimenticios Bari S.A.	38.840.328.000
Compañía envasadora del Atlántico S.A.S.	36.346.605.000
Frigorífico de la Costa S.A.S.	31.201.457.000
Industrias La Coruña LTDA.	30.584.860.000
C.I. Agrofrut S.A.	25.497.800.000
Pulpafruit S.A.	19.301.044.000
Productora de jugos S.A.S.	18.717.811.000
C.I. Comexa S.A.	15.042.478.000
Alimentos SAS S.A.	11.831.763.000

Tabla 9. Algunas empresas dedicadas a la producción de otros derivados de frutas

Empresa	Productos
Fruandes LTDA.	Fruta deshidratada, pulpas
Andiequip LTDA.	Fruta deshidratada
Frutas colombianas de exportación S.A.S.	Fruta en trozos, pulpas
Pulpas ONI S.A.S.	Pulpas
Jumex Colombia S.A.S.	Jugos
Industria vallecaucana de pulpas de frutas LTDA.	Pulpas
Trópico de las frutas del valle LTDA.	Pulpas, concentrados
Pulpas Premium LTDA.	Pulpas
Procesadora de jugos y pulpas productos ALSOL S.A.S.	Pulpas, néctares y jugos
Pomelos S.A.S.	Jugos, refrescos
Pulpas naturales LTDA.	Pulpas
Fruiland LTDA.	Pulpas, jugos

3.5.4. Estrategia de encadenamiento

La industria nacional tiene como destino de su producción el consumidor final nacional y extranjero y para lograrlo se vale de las siguientes vías:

Tabla 10. Vías de encadenamiento industria manufacturera productos hortofrutícolas

Vía	Características
Grandes superficies y supermercados	<p>Para las empresas líderes es una salida beneficiosa porque se manejan los mismos estándares, procedimientos y existe el músculo financiero de soporte para las actividades de marketing y control financiero.</p> <p>Para micro, pequeñas y algunas medianas reviste dificultad el acceso a este canal.</p>
Minimercados y tiendas de barrio	<p>Es un canal accesible para todo tipo de empresa, es estratégico para mercados regionales, pero inadecuado para alcanzar el mercado nacional a menos que se cuente con la logística necesaria.</p>
Puntos de venta directa	<p>Facilita la fidelización del cliente y la atención personalizada. Requiere altos costos de instalación y sostenimiento.</p>
Exportación directa	<p>En algunas empresas micro y pequeñas la planta de producción puede ser contigua al punto de venta.</p> <p>Disponible actualmente para grandes empresas y medianas asociadas. Requiere gran músculo financiero y alianzas estratégicas con jugadores comerciales de talla mundial: navieras, empresas aeronáuticas, retailers, etc.</p>
Exportación por comercializadora	<p>Canal disponible para múltiples niveles de empresa. Requiere el cumplimiento de las exigencias de los mercados meta y el establecimiento de alianzas para garantizar volumen y estandarización de productos, la mayor dificultad son los costos de transporte y logísticos</p>

Sector institucional	<p>hasta alcanzar las instalaciones de la comercializadora.</p> <p>Las instituciones públicas: ICBF, Fuerzas Militares, Hospitales, etc. y las privadas: Hoteles, Restaurantes, Clubes, ONG's, etc. son un interesante nicho de mercado en volumen. El nivel de exigencia varía según cada cliente.</p>
-----------------------------	---

3.6. Eslabón terciario

3.6.1. Distribución en mercados meta

El comportamiento de la distribución en el comercio hacia los mercados meta, se diferencia de acuerdo al canal seleccionado:

Tabla 11. Descripción de la venta al consumidor final en diferentes canales

Canal	Mecanismo de venta al consumidor final
Grandes superficies (<i>retailers</i>)	<p>El producto fresco o procesado es expuesto en góndolas, estantes, lineales, etc. promocionado o no por personal contratado por la empresa fabricante.</p> <p>El entorno logístico de la compra es agradable, sofisticado, con posibilidad de devolución en algunos tipos de productos, garantía de calidad, sanidad e inocuidad de producto.</p> <p>A nivel nacional se cuenta con empresas como: Éxito, Alkosto, Makro, Jumbo, Metro, Olímpica, entre otros.</p>
Supermercados	<p>Se diferencia del anterior en el nivel de sofisticación, atención e impacto sobre el consumidor. Son marcas de nivel regional o nacional, por ende están limitados al país.</p> <p>Se especializan en comprender clientes regionales. Gracias a la marcada cultura de las diferentes regiones es compleja la</p>

	<p>estandarización para todas las zonas del país bajo un mismo criterio.</p>
Minimercados y tiendas de barrio	<p>Casos particulares de nivel nacional son las cajas de compensación Cafam y Colsubsidio cuyos establecimientos conservan el formato de supermercado pero con atención y logística al estilo de grande superficie.</p> <p>Son especializados, muy conocedores de los clientes, atención personalizada y amena. Son estratégicos para fidelizar clientes nacionales.</p>
Plazas de mercado	<p>Son numerosas. La atención no es estandarizada, existe la posibilidad del regateo, la logística de la venta no es sofisticada, son un mercado viable para regiones y municipios pero no para mercados de alto valor, consumidores conocedores y dispuestos a pagar valor agregado.</p>
Tiendas especializadas	<p>Atrapan consumidores de alto valor agregado, la atención es personalizada y sofisticada. El cliente de estos establecimientos sabe lo que quiere y cuánto cuesta. A nivel nacional son un sector creciente.</p>
Instituciones	<p>En la decisión de compra puede pesar más el precio que la calidad. El consumidor final adquiere un producto acorde a las especificaciones que la institución señale.</p> <p>Hoteles de alto nivel pueden ser los clientes con mayores exigencias porque su clientela también exige altos estándares en los productos que consume.</p>

3.7. Exportaciones

Las exportaciones son la apuesta más significativa para la producción de mango colombiana, tanto en fresco como procesado. Este es un proceso dispendioso y para el cual el país aún no se encuentra preparado de la mejor manera.

Las exportaciones en fresco presentan mayores dificultades que las procesadas. Barreras arancelarias y no arancelarias hacen parte de los obstáculos a vencer para soñar verdaderamente con alcanzar los mercados de gran poder adquisitivo y obtener recompensa por elaborar productos de alto valor agregado.

En 2012 las exportaciones de mangos y mangostanes sumaron US\$ 258.503, presentando una reducción del 49,4% con respecto al año inmediatamente anterior cuando sumó un total de US\$ 511.060 y analizando el periodo 2010-2012 se presentó un descenso promedio anual de 18,7%. Así mismo, la balanza de pagos se muestra deficitaria con tendencia a bajar hacia el equilibrio porque las importaciones durante 2012 sumaron US\$ 1.136.676 mientras que en 2011 eran por US\$1.318.283 [46]. Lo cual expone los enormes esfuerzos que deberá hacer el sector para adentrarse en el comercio internacional eficazmente.

La distribución de las exportaciones colombianas de mango por países destino en el 2013 se observa en la siguiente figura:

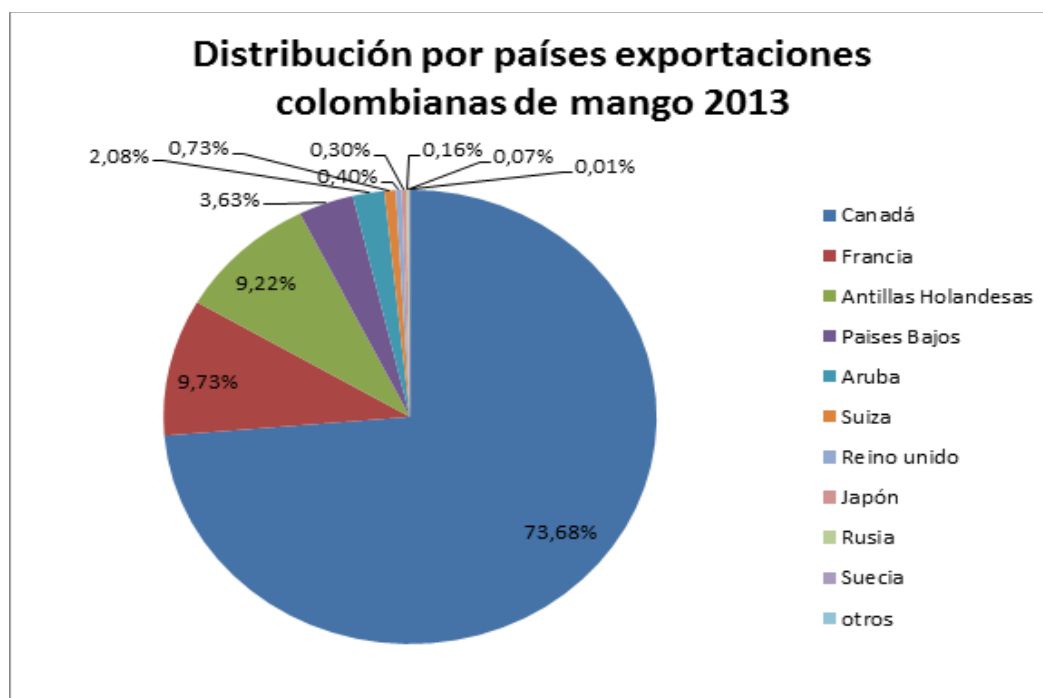


Figura 32. Países destino exportaciones mangos y mangostanes, 2013

Fuente: El autor con base en datos de AGRONET.

Del mismo modo, aunque cada país presenta sus propios requisitos para comerciar, existen reglas comunes que son de observancia obligatoria especialmente en los mercados de alto valor y muy en particular el estadounidense.

Tabla 12. Aspectos clave en las exportaciones de productos frutícolas

Trámite	Características
Control aduanero	Fase de documentación y fase de inspección en puerto. La rigurosidad depende de cada país.
Control arancelario	Impuestos a las importaciones de los países destino. Los TLC disminuyen su impacto.
Control fitosanitario (alimento fresco)	En EE.UU. la APHIS
Control de sanidad (alimento procesado)	En EE.UU. la FDA
Requisitos de etiquetado	Según cada país. EE.UU. y la U.E utilizan un sistema equivalente.
Declaración de país de origen	Según cada país, se usa para evitar dumping. No todos lo piden.
Registro y notificación anti-bioterrorismo	Obligatoria para EE.UU. requisito complejo y dispendioso.
Sellos especiales	Declaración de zona de producción, orgánico, comercio justo, libre de Organismos genéticamente modificados, entre otros sellos. Estos son importantes para los mercados de alto valor, no son obligatorios pero muy convenientes.

Tabla 13. Empresas colombianas exportadoras de mango fresco y/o procesado en 2012

Empresa exportadora	Valor FOB USD
C.I. frutos de los Andes FRUANDES LTDA.	126.932
Sociedad de comercialización internacional de frutas COMERCI Caro y Comp piscícola Carolina S en C	43.229
Comercializadora Castillo Estupiñan y Asociados	27.590
OCATI S.A.	16.556
Comercia Caribe S.A.S.	13.565
C.O. Tecnología de Alimentos de Colombia S.A.	12.173
NULL	10.014
Comercializadora internacional L & G S.A. C. I.	5.964
NOVACAMPO S.A. Sociedad de comercialización internacional	1.284
C.I. Las María's S.A.S.	622
Santana Fruits S.A.S.	553
Country Fruits Colombia LTDA.	20
Total exportaciones	1
	258.503

Tomado de: [46]

3.8. Perspectiva y política pública para el sector

Aunque en la actualidad no existe una política general, de Estado, para el fomento del sector hortofrutícola, un primer intento para el fomento de la producción de mango en Colombia se expresa a través del Plan de Negocios de Mango, del Programa de Transformación Productiva [1, 5].

A su vez, el fruto también se favorece de la política expresada a través del Documento Conpes Social 113 de 2007. Política Nacional de Seguridad Alimentaria y Nutricional (PSAN), en el sentido que este documento expresa prevalencia de deficiencia de vitaminas A y C en Colombia. Siendo el mango una importante fuente de pro-vitamina a partir del betacaroteno presente en cáscara y pulpa, por ello queda incluido en los intereses del país.

Lo anterior, la creciente demanda y el potencial del cultivo para el país hacen prever que con un esfuerzo mancomunado Colombia será un gran jugador mundial décadas adelante.

3.9. Conclusiones

La cadena agroindustrial del mango en Colombia debe ser mejorada, fundamentalmente en los eslabones primario y secundario.

En el eslabón primario debe solucionarse un problema estructural de prácticamente todos los aspectos productivos y competitivos. A su vez, se espera que gran parte de las dificultades coyunturales del eslabón secundario se resolverán cuando el eslabón primario mejore, porque prácticamente la totalidad de lo procesado proviene de la producción nacional.

El proceso para lograr exportaciones de gran volumen será un área de múltiples esfuerzos mancomunados y que requiere elementos de política pública e inversión estratégica.

La logística e infraestructura vial actuales son palos en las ruedas; estos aspectos deben mejorarse para pensar en ser competidores de talla mundial.

4. SECADORES SOLARES INDUSTRIALES

4.1. Interés y Fundamentos

El hombre hace uso de la energía solar desde tiempos inmemoriales. El *secado al sol* consiste en la simple exposición de los productos a la radiación solar a cielo abierto, sin protección del viento, la lluvia o agentes contaminantes y es común en todos los lugares de la tierra; sin embargo, actualmente se encuentra en proceso de construcción una tecnología para el uso de la energía solar de forma más eficiente y que ofrezca productos de mayor calidad; esta se reconoce como *secado solar* y cuyo objeto es el diseño, construcción y operación de equipos denominados *secadores solares*, tanto a pequeña escala como industrial.

La tecnología de secadores solares se impone al secado al sol por las siguientes ventajas: reducción de pérdidas por secado defectuoso; ausencia de contaminación por polvo, hongos o insectos; evita la invasión de aves o roedores; permite afrontar de mejor forma los cambios de clima; requiere menos espacio en tierra para procesar la misma cantidad de alimento; mayor eficiencia energética con menores tiempos de proceso; relativo bajo costo inicial; bajo costo de mantenimiento y comercialmente viable [47].

También, el secado solar a escala industrial aparece para tratar de desplazar el uso de combustibles fósiles en los procesos productivos. Su desarrollo es común en industrias como la madera y el tratamiento de efluentes. Por ejemplo, la empresa **EcoSol Solar** (Cuba, <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/energia30/HTML/articulo02.htm>).

Desarrolla, construye y comercializa secadores solares para madera en la isla, mientras la compañía **Yacutec** (Mexico, http://www.yacutec.com/areas-actividad/areas-actividad_secado-solar-lodos.asp). Trabaja en el tratamiento de lodos residuales de industrias agroalimentarias.

En industrias como la cerámica y la de textiles también se observa un importante potencial porque sus procesos son a baja temperatura, en un rango que coincide con los rangos generados en los secadores solares [47].

Entre las dificultades que existen para la masificación del secado solar se encuentran: la falta de conocimiento en la formulación de procesos a gran escala y la poca evaluación de la relación costo-beneficio en grandes volúmenes; la falta de apropiada y suficiente información técnica y finalmente la falta de experiencia local en los países donde mayores posibilidades de implementación existen [48].

Los equipos de secado solar se pueden clasificar en: activos y pasivos, de acuerdo al manejo que se hace del aire de secado, activos cuando operan con convección forzada y pasivos cuando es convección natural. Los secadores solares activos muestran mayor eficiencia de secado y productos más uniformes porque el aire recircula de forma homogénea y llega con temperatura y capacidad de absorción a todos los productos en la cámara de secado mientras que en los equipos pasivos aparecen puntos muertos en la cámara donde no se presenta un secado apropiado [49, 50, 51].

Los equipos bajo convección natural dependen exclusivamente de las condiciones medioambientales donde se ubican y del momento del día. La intensidad de la radiación, nubosidad, velocidad del viento son factores clave para la convección natural [50]. Los equipos diseñados con esta tecnología son de primera generación y de fácil manejo, permitiendo ser operados por personal con baja formación, en zonas apartadas y con poco espacio.

En equipos de convección forzada, dependiendo de la rigurosidad y la disponibilidad de recursos tecnológicos y financieros existen secadores desde aquellos con sistemas de ventilación simple hasta los más complejos con sensores electrónicos para control en tiempo real de: temperatura, velocidad del aire, ángulo de ataque y otras variables de interés [50, 52].

Los principios físicos que rigen el secado son independientes de la fuente de energía utilizada, la mayor parte de la energía es consumida para la transformación del agua líquida en vapor (2258 kJ/kg a 101,3 kPa) [53]. Así en el secado solar se presenta coordinada y secuencialmente transferencia de calor por radiación (del sol a la placa colectora), conducción-convección (de la placa al aire) y finalmente convección del aire sobre la superficie del alimento.

En cuanto a las consideraciones de transferencia de calor en el alimento debe tenerse presente que en el secado de láminas de pequeño espesor, el tiempo en el cual el alimento queda isotérmico es prácticamente de segundos, por ende se considera solo de transferencia de masa y queda explicado por la ley de difusión de Fick [54].

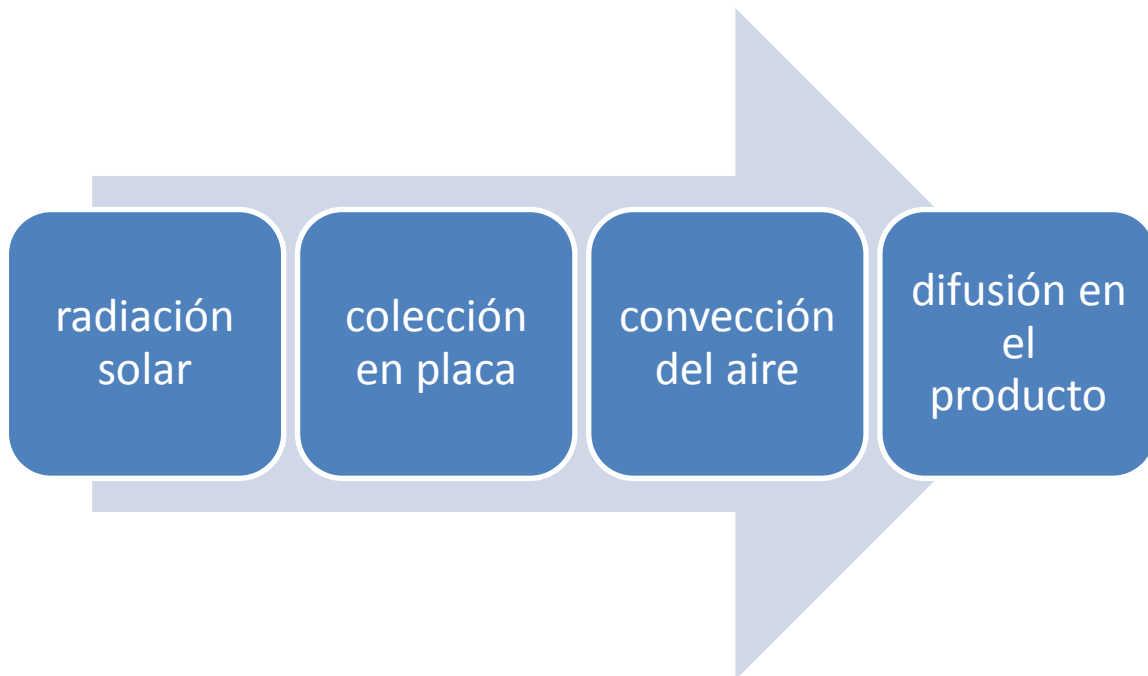


Figura 33. Transferencia de energía en secadores solares
Fuente: Autor

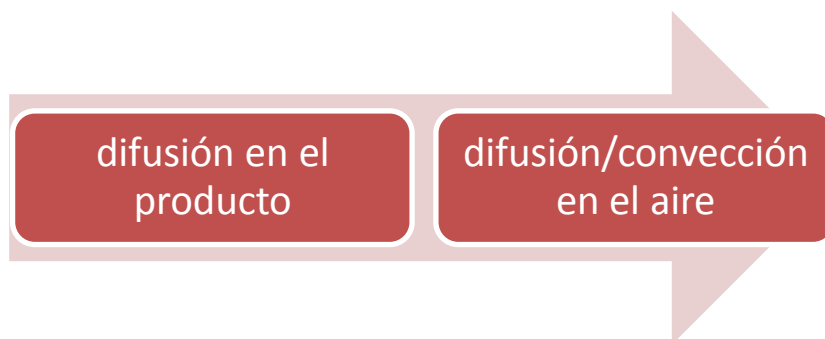


Figura 34. Transferencia de masa en secadores solares
Fuente: Autor

4.2. Generalidades técnicas

La tecnología del secado solar a diferencia del tradicional secado al sol tiene fundamentos científicos definidos para diseño y operación de equipos, también en que está pensada para garantizar alta calidad de los productos procesados. En el caso de los alimentos, la tecnología se formula y desarrolla de forma que garantice obtener un producto apto para consumo humano según estándares de la industria y normatividad vigente.

Los aspectos técnicos de la tecnología pueden ser agrupados en seis categorías: colector y ángulo de colección, alimentación alterna de energía, cámara de

secado, condiciones operativas de producción, materiales constructivos y otros aspectos.

4.2.1. Colector y ángulo de colección

El colector solar es un equipo que básicamente consta de cuatro elementos: 1. Un absorbente pintado de negro, 2. Una cubierta transparente, 3. Aislamiento en la parte posterior y a los lados del absorbente y 4. Una cubierta para el absorbente y su aislamiento.

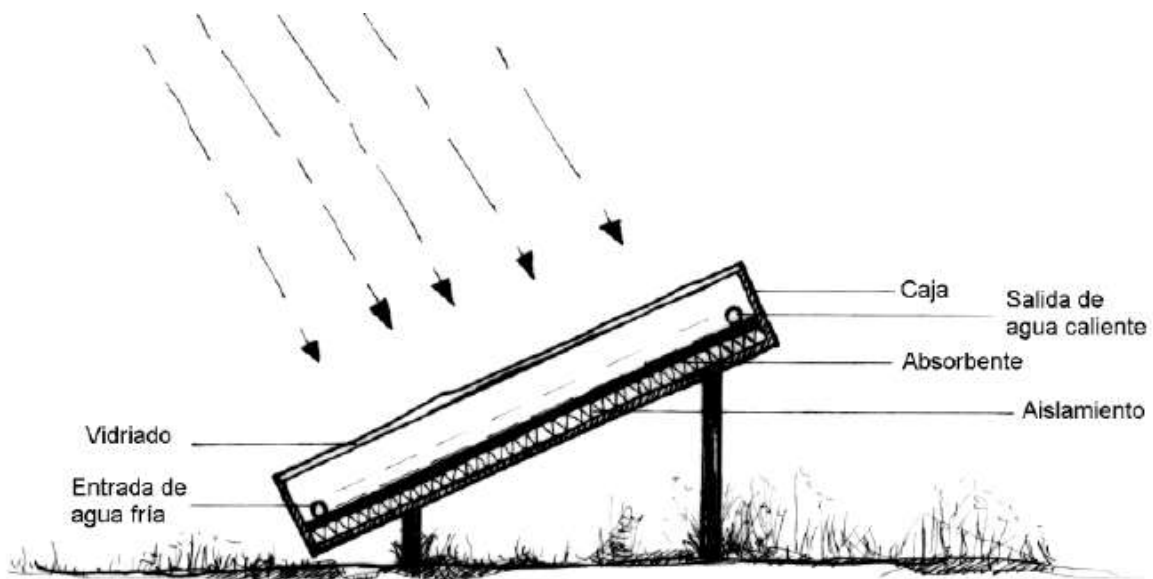


Figura 35. Colector solar

Fuente: [55]

El absorbente es la pieza que se calienta por acción de la energía solar. Por defecto para asegurar el máximo calentamiento esta es pintada de negro y se suele construir de: cobre, aluminio o acero. Es primordial que el material tenga excelente conductividad, sea fácil de utilizar y económico. La eficiencia del absorbente es función de diferentes variables como: grosor de la placa –el grosor aumenta la eficiencia-, aislamiento y método de conexión de la placa a la estructura [55].

La cubierta transparente: vidriada o plástica es selectiva para el espectro visible, luego permite el paso de la energía radiante del sol y restringe la pérdida de calor del absorbente

El ángulo de colección de la energía solar. Estudios en general promueven la teoría de que la incidencia solar debe ser a 10° superior a la latitud del lugar en dirección noroeste [56, 57]

Para asegurar el ángulo se pueden utilizar superficies reflectoras en los costados (concentradores) y frente a la superficie colectora para incrementar la radiación incidente. Alas laterales han sido algunos de los diseños más aceptados porque incrementan significativamente la cantidad de radiación absorbida al tiempo que son fácilmente acoplables al diseño de equipos de pequeña escala.

El formulismo al cual recurren los países para la construcción de cartas solares y con ellos determinar el potencial solar del país suele ser el modelo de Liu y Jordan [57]:

$$\frac{\overline{H}_\beta}{\overline{H}} = \left(1 - \frac{\overline{H}_d}{\overline{H}}\right) * \overline{R}_D + \frac{\overline{H}_d}{\overline{H}} * \frac{(1 + \cos \beta)}{2} + \rho * (1 - \cos \beta) \quad \text{Ecuación 8}$$

Siendo \overline{H}_β , \overline{H}_d y \overline{H} los valores medios de irradiación estimada sobre un plano inclinado un ángulo β , la difusa y la global. \overline{R}_D es el factor geométrico de la relación entre la radiación directa sobre el plano inclinado y la horizontal, dada por:

$$\overline{R}_D = \frac{\cos(\phi - s) \cos \delta \sin \overline{\omega}_\beta + \left(\frac{\pi}{180}\right) \overline{\omega}_s \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \sin \overline{\omega}_s + \left(\frac{\pi}{180}\right) \overline{\omega}_s \sin \phi \sin \delta} \quad \text{Ecuación 9}$$

ρ es el albedo de la superficie ubicada delante del plano y varía en función del tipo de cobertura y época del año. Para ángulos pequeños con superficie despejada suele asignársele el valor de 0,2 [57].

Del mismo modo, los colectores como equipo se clasifican en:

- De placa plana con cubierta: son los más utilizados para operaciones con demanda energética entre 30-70°C. Este colector se compone de los elementos básicos: absorbedor, cubierta transparente, marco y aislación. La cubierta evita la pérdida de calor y el deterioro de la placa del absorbedor por causas meteorológicas; así mismo, los aislamientos más comunes son: espuma de poliuretano, lana mineral, fibra de lana de vidrio, etc [58].



Figura 36. Colector de placa plana con cubierta
Fuente: [58]

- Con concentradores parabólicos: se diferencian de los colectores anteriores porque son colectores y cuentan con concentradores parabólicos compuestos lo que permite obtener mayor temperatura y rendimiento -50% aproximadamente- [58].



Figura 37. Colector con concentrador parabólico
Fuente: [58]

- De placa plana sin cubierta: son los equipos más sencillos y permiten obtener temperaturas hasta 20°C superior a la del aire ambiente, estos equipos pierden por convección gran parte de la energía colectada por efecto de la convección a falta de la cubierta. Los absorbedores son contruidos de plástico negro o metal ennegrecido [58].



Figura 38. Colector de placa plana sin cubierta
Fuente: [58]

- De tubos de vacío: son equipos donde se dispone dentro de un tubo de vacío una placa absorbedora selectiva o de color negro que recoge la energía y la transfiere al fluido calo-portador. Gracias al vacío tiene la capacidad de reducir enormemente las pérdidas, lo que permite alcanzar temperaturas entre 77-177°C y son 30% más eficiente que los colectores planos. Por ello son los equipos de uso común en aplicaciones de alta temperatura [58]. Estos a su vez se clasifican de acuerdo al mecanismo mediante el cual se produce el intercambio de calor entre la placa y el fluido calo-portador.

- De flujo directo: se compone de un grupo de tubos que llevan en su interior una aleta de aluminio que absorbe la radiación solar e inhibe la pérdida de calor radiante. Esta se conecta a un tubo metálico – convencionalmente de cobre- a través del cual circula el fluido a calentar [58].



Figura 39. Colector solar de tubos de vacío de flujo directo
Fuente: [58]

- Con tubo de calor (heat pipe): son el sistema más eficiente. Consta de tubos de vacío que contienen un fluido vaporizante que recircula entre dos extremos, en uno de los cuales se realiza la transferencia de calor al material de interés. Requieren ser dispuestos en un ángulo de inclinación de 25° para garantizar que el fluido una vez condensado retorne a la zona de absorción de calor [58].



Figura 40. Colector solar de tubo de vacío heat pipe
Fuente: [58]

4.2.2. Alimentación alterna de energía

La tecnología para ser implementada a nivel industrial debe garantizar la alimentación energética en horas que no hay radiación solar, como en la noche, días nublados, etc. Como solución aparecen los secadores híbridos, equipos que utilizan la energía solar como fuente principal y se valen de quemadores de combustible o resistencias eléctricas para compensar la insuficiencia solar en días de invierno y de noche [59, 60].

Otra opción -como se verá más adelante-, es el desarrollo de colectores solares acoplados a *celdas fotovoltaicas* que permitan la conversión de los excedentes de radiación a energía eléctrica que posteriormente se utilizará calentando el aire de secado; así se asegura el uso de la energía solar en más de un 99% de la operación del equipo [61]. Esta última tecnología reporta especial interés si se disemina a pequeña escala en poblaciones apartadas donde la energía eléctrica no se encuentra disponible como se revela para algunas regiones de Etiopía [62].

4.2.3. Cámara de secado

Las dimensiones y características de la cámara de secado vienen impuestas por el tipo de secador. Esta puede ser desde una caja con tamaño regular y uniforme en

el secador de cabina, hasta enormes estructuras parabólicas en los secadores de invernadero y túnel.

En grandes secadores tipo túnel se suele utilizar una distribución con entradas frontales y salidas laterales. Todas las cámaras se encuentran aisladas térmicamente [63].

Los secadores tipo túnel al ser los más grandes hasta ahora tienen cámaras de secado que permiten disponer los productos en carros que contienen bandejas y con capacidad de carga variable. Un secador de túnel con capacidad para 6 carros con 15 bandejas de 1 m² cada una puede soportar una carga total de aproximadamente 500 kg [63].

4.2.4. *Materiales constructivos*

Los materiales para construcción de la superficie colectora son: aluminio, hierro y acero inoxidable. Las propiedades termodinámicas y ópticas del material, especialmente la *absorbancia* juegan un papel fundamental en la elección, sin embargo, para alimentos también se tienen en cuenta aspectos de tipo sanitario porque los materiales que se utilizan deben ser inocuos hacia estos. Por economía suele primar el uso del aluminio en secado de alimentos [64].

En el material colector actúan simultáneamente tres efectos de la radiación: reflexión, transmisión y absorción, se caracteriza por presentar alta absorbancia, baja emitancia, baja reflectividad y alta conductividad térmica. Por ello, para incrementar la capacidad de la placa colectora se aplican tratamientos selectivos a la superficie como el diseño de placa: tipo sándwich, metálica con tubos o de plástico [65].

El material de cubierta es fundamental para evitar pérdidas por convección, vidrio y vidrio acrílico son de alto uso en equipos de pequeña escala pero su alto costo, peso y riesgo de rompimiento lo han retirado de equipos a escala industrial. En su reemplazo se utiliza policarbonato, un material que presenta propiedades ópticas similares a las del vidrio y es mucho más económico, liviano, seguro y manejable. El policarbonato permite el cubrimiento total de secadores tipo invernadero y se estima que su vida útil es de poco más de 3 años y con un retorno de inversión de aproximadamente 4 meses [66, 67].

Cuando se usa como cobertura material plástico transparente y no se está en países del trópico debe tenerse en cuenta la estación del año para establecer el grosor o número de capas que se deben utilizar porque en invierno y primavera se suelen presentar mayores pérdidas de calor en el equipo [53]

La estructura de soporte del secador puede ser construida de materiales tan diversos como: metales, madera o plástico. Depende de los recursos económicos disponibles, del tamaño y seguridad del equipo, si es fijo o móvil, entre otros [65, 63].

4.2.5. *Otros aspectos*

Algunos diseños se construyen con sistema de bandejas rotatorias para incrementar la eficiencia del secado y un resultado final uniforme, en ellos se puede usar convección natural o forzada y el sistema de movimiento del rotor se puede activar con energía fotovoltaica, esta innovación permite viabilizar el diseño en lugares donde no se dispone de electricidad pero solamente para escalas pequeña y semi-industrial [68, 69, 70].

4.2.6. *Condiciones operativas de producción*

La carta psicrométrica es la guía para la construcción del diseño operativo del secador y esta carta se ve fuertemente influenciada por las propiedades termodinámicas del producto a secar. De lo anterior se desprende que secador es prácticamente exclusivo para cada tipo de alimento a las condiciones operativas fijadas, por ello el uso de sensores y de tecnologías de control adicional optimizan estos equipos porque permiten excelente desempeño para variados productos sin tener que realizar importantes modificaciones a la estructura del equipo.

Los aspectos de mayor relevancia en la carta psicrométrica para la construcción y operación de secadores solares industriales son: la humedad relativa y las temperaturas de bulbo húmedo y seco [71, 72]. Este instrumento permite la determinación de las isotermas de sorción y una estimación de la rata de secado característica del producto [53]. A su vez, las ecuaciones con mayor aceptación para describir la sorción en productos alimenticios son las de BET (Brunauer, Emmet y Teller) y GAB (Guggenheim, Anderson y Boer) donde la absorción se presenta por fenómeno de multicapa pero guardan en esencia las consideraciones de la ecuación de Langmuir para monocapa [53].

Por otro lado, la cinética de secado en equipos de pequeña escala puede verse afectada por fenómenos de reabsorción o acumulación de humedad en lugares de difícil acceso para el aire de secado o cuando este no se calienta lo suficiente. La estructura de las cámaras de secado y la disposición de las bandejas en todos los diseños no asegura plenamente que los productos obtengan la misma cantidad de aire secador en cualquier ubicación; además, como los equipos sencillos no

cuentan con sistema de rotación de bandejas es muy complejo conseguir un diseño óptimo para secar rápidamente la producción [65].

Así mismo, la elección de convección natural o forzada depende de las condiciones climáticas del lugar y del proyecto desarrollado. En lugares donde la velocidad del viento permite buenos resultados con convección natural se reducen los costos de instalación y funcionamiento del sistema de aire forzado. En el mismo sentido la selección de equipo directo, indirecto, mixto o híbrido se influencia mayoritariamente por intereses del proyecto como: nivel de producción y tiempo de entrega [68]. No obstante la intensidad de la radiación solar y capacidad de colección también juegan un papel importante.

4.3. Tipos de secadores solares. Avances

Como se mencionó anteriormente la forma de clasificación más general que se puede establecer es aquella donde se agrupan en dos: por un lado los secadores activos y por el otro los pasivos.

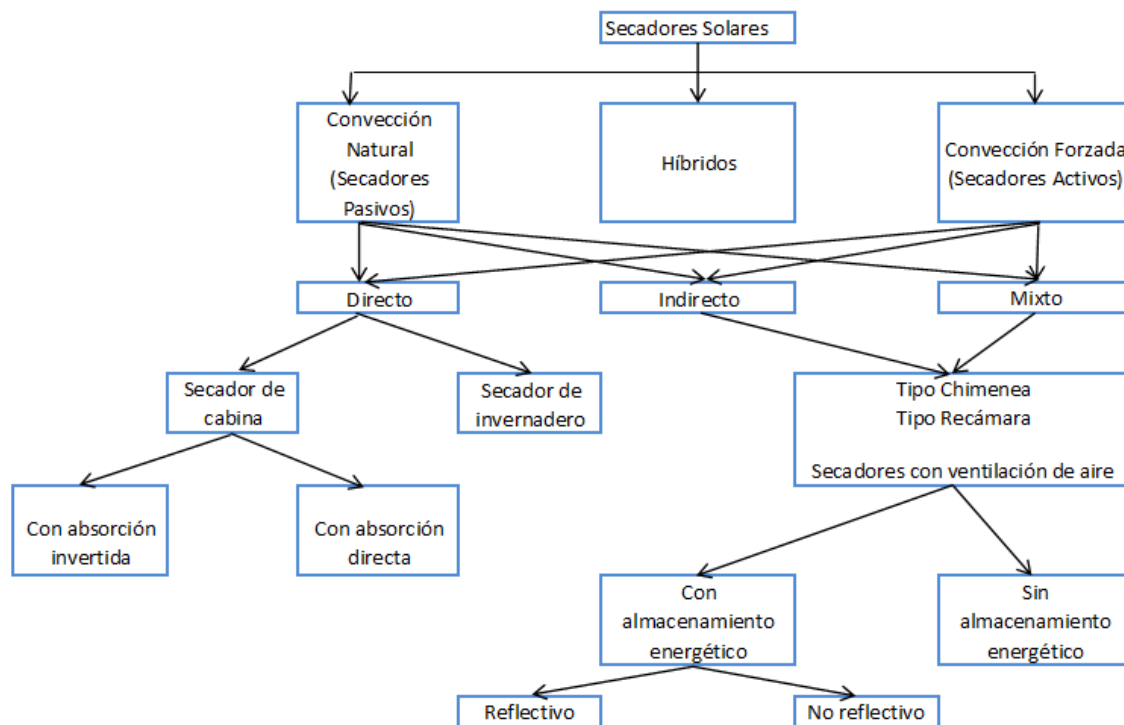


Figura 41. Esquema: Tecnología de secadores solares

Fuente: Adaptado y traducido de [73]

Entre los equipos pasivos más representativos se encuentra:

- Secador de cabina: es la forma más elemental de un secador. Puede ser cubierto con vidrio o plástico transparente e igualmente puede tener armazón o simplemente ser una tienda de campaña instalada en un lugar apropiado, construido generalmente para capacidad entre 10-20 kg en un área de 1-2 m² [53]. Este es el tipo de secador más usado en poblaciones apartadas, según el diseño desarrollado permitirá operar una o múltiples materias primas.

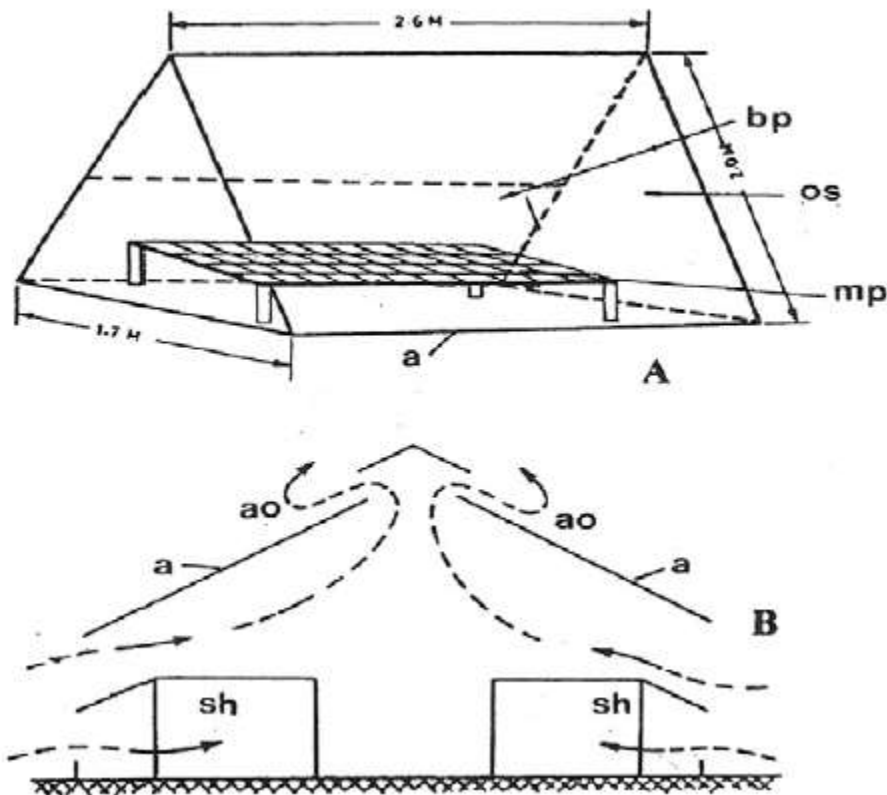


Figura 42. Secadores estilo tienda.

Fuente: [53]

Sharma et al. [74] Desarrollaron un modelo matemático que describe la temperatura instantánea al interior de un secador de cabina en estado transitorio. Sreekumar et al. comenta el desarrollo de un secador con bi-compartimiento: el primero específicamente para coleccionar-almacenar energía y el segundo para realizar el secado [75].

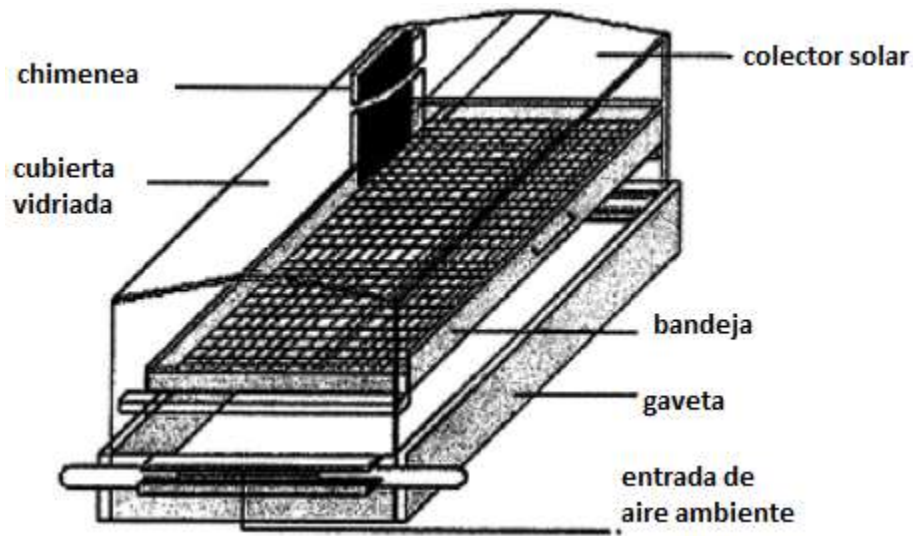


Figura 43. Secador directo estilo cabina

Fuente: Adaptado y traducido de [76]

- Secador tipo invernadero: Es la versión aumentada del secador de cabina estilo tienda. Se caracteriza por tener la posibilidad de colectar radiación por todos los costados, por costo necesariamente deben cubrirse de material plástico transparente. El aire ingresa por los laterales a través de mallas o mediante tuberías, recircula por acción del efecto invernadero y finalmente es extraído por un sistema de succión o liberado a través de chimenea. La colección de calor de los costados se incrementa si se construyen con una inclinación de 60° [53]. Este equipo es de uso común a nivel industrial para productos agrícolas y maderas.

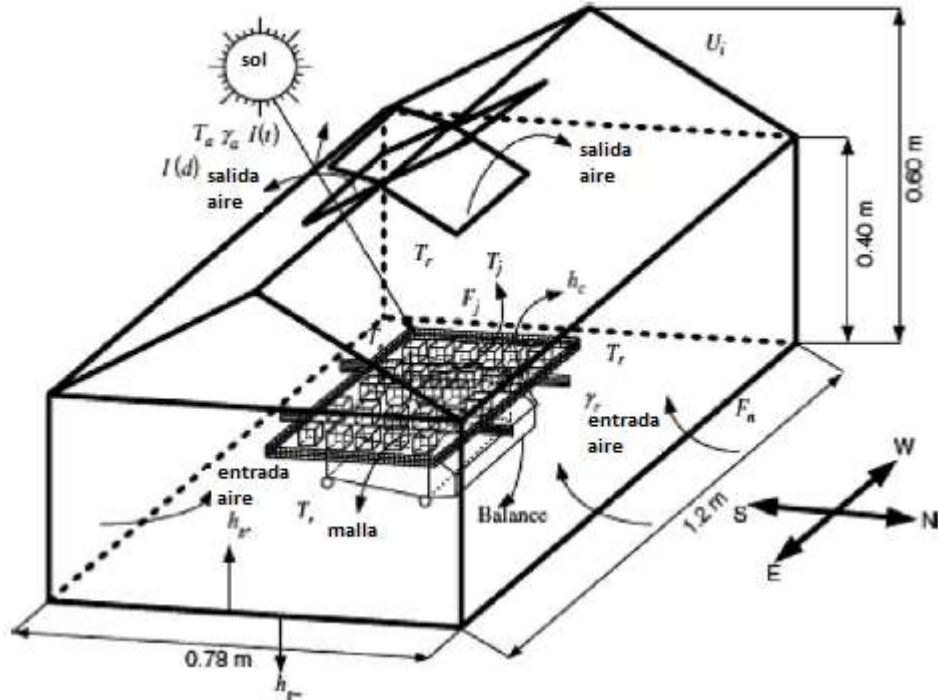


Figura 44. Esquema de secador pasivo tipo invernadero
Fuente: Adaptado y traducido de [77]

- Secador tipo anaquel: realmente es un equipo que puede ser pasivo, activo o mixto según los aditamentos que posea. Se caracteriza por una única entrada de aire que se calienta al pasar frente al colector y posteriormente pasa a la recámara de secado donde se encuentra un sistema de gavetas y bandejas con el producto a secar, finalmente el aire se evacúa por una chimenea [53].

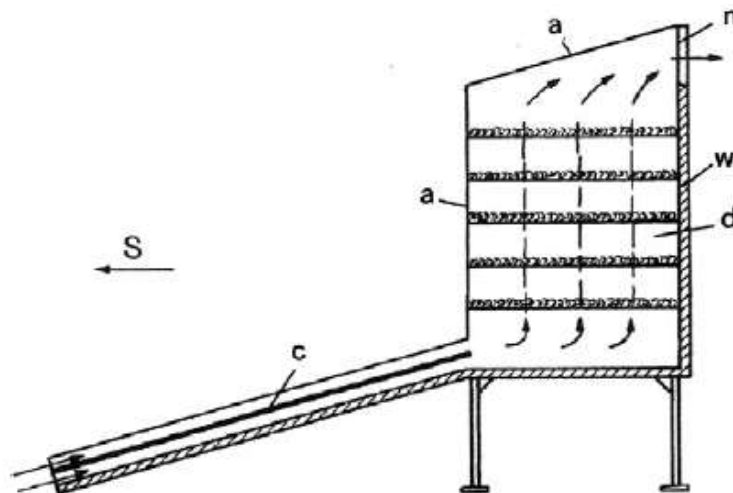


Figura 45. Secador tipo anaquel
Fuente: [53]

- Secador de chimenea: La chimenea más que un modelo de secador es una forma como se libera el aire húmedo. Tiene la característica de proveer al secador un mecanismo para incrementar la convección natural cuando se utilizan múltiples bandejas con producto y así lograr un secado más uniforme. Una modificación en diseño incluye la inserción de pequeños “recipientes” para almacenamiento de calor, con lo cual se asegura temperatura constante del aire al interior de la cámara. Modelos de predicción y optimización del secado en equipos de chimenea también se han desarrollado [53].

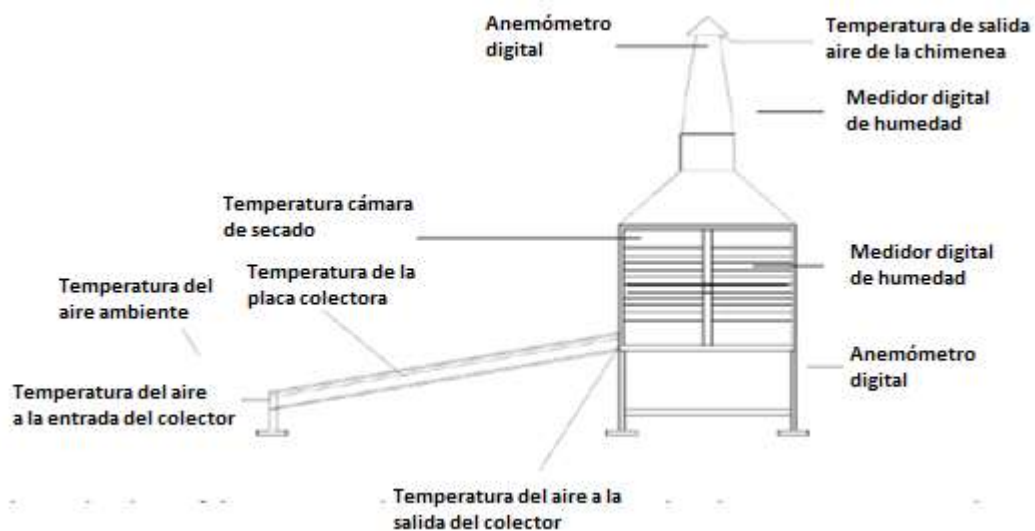


Figura 46. Dispositivos medidores en secador de chimenea
Fuente: Adaptado y traducido de [70]

Con respecto a los equipos activos que a continuación se comentan, estos permiten el procesamiento de mayor cantidad de producto por unidad de área y tiempo. Sin embargo tienen mayores requerimientos de equipo auxiliar para la circulación del aire. Lo anterior motiva el desarrollo de modelos para optimizar el proceso. Existen:

- Secador de convección forzada tipo cámara invernadero: En este el aire es calentado de forma pasiva al cruzar por los colectores y posteriormente inyectado por el sistema de ventilación. Este equipo puede presentar productos sobre secados cuando la distribución de aire no es uniforme o no llega con el mismo calor a todas las bandejas. No obstante la velocidad de secado es mayor y el tiempo de proceso se reduce significativamente en comparación con el equivalente secador pasivo [53].

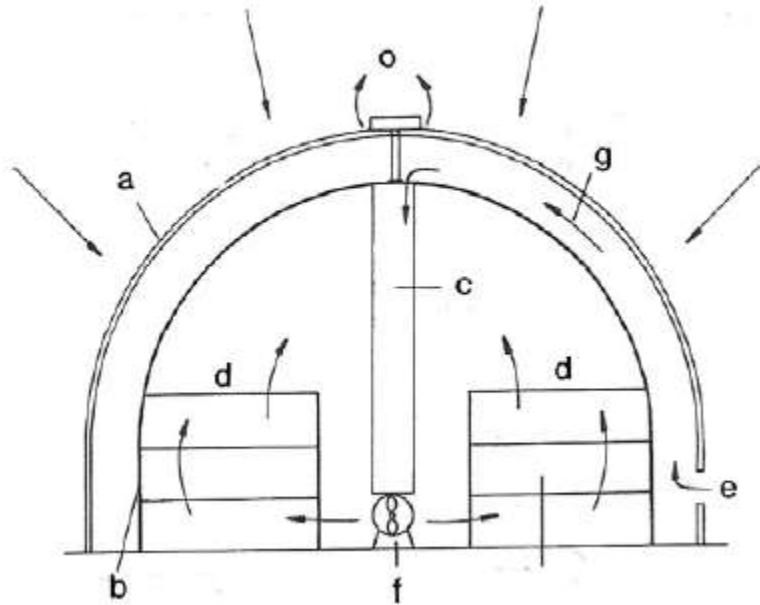


Figura 47. Esquema secador solar con cámara tipo invernadero
Fuente: [53]

- Secador solar con colector tipo invernadero: en general son equipos con forma de túnel, tienen configuración para utilizar convección natural y forzada, combinadas; siempre son muy largos y en la cabeza se ubica la cámara de secado para favorecer el ascenso del aire caliente. El piso de la base del túnel está cubierta con plástico negro para garantizar la máxima absorción de calor; todo el tiraje se soporta en arcos de acero y para forzar el aire se utiliza un sistema de ventilación. Son equipos para procesamiento de madera y productos agrícolas [53].



Figura 48. Secador activo tipo invernadero

Fuente: [66]

- Secador de túnel: son equipos de forma semiesférica con techo y costados dispuestos como colectores con material plástico transparente. Los productos son dispuestos en bandejas y estas en carros que se ubican dentro del túnel. El aire es forzado desde los colectores hasta la zona de secado a través del sistema de ventilación. El desarrollo de modelos matemáticos y simulación de secado en túnel así como la automatización de este tipo de secador son líneas fuertes de trabajo [53].



Figura 49. Secador tipo túnel
Fuente: [53]

Un secador de túnel diseñado para operación en zonas de desierto es adaptado para operar bajo condiciones de clima tropical, incorporando un horno de biomasa y un intercambiador de calor para operar en días nublados o de lluvia; puede entenderse como un secador híbrido que mejora la eficiencia del secado en 40% según Amir et al [78].

- Secadores mixtos: Forson et al. desarrollan un modelo matemático para un secador solar de alimentos por convección natural usando un calentador solar de aire de doble ducto y paso sencillo; el cual mejora la temperatura y la relación de humedad del aire así como la temperatura y contenido de humedad del producto procesado [79].

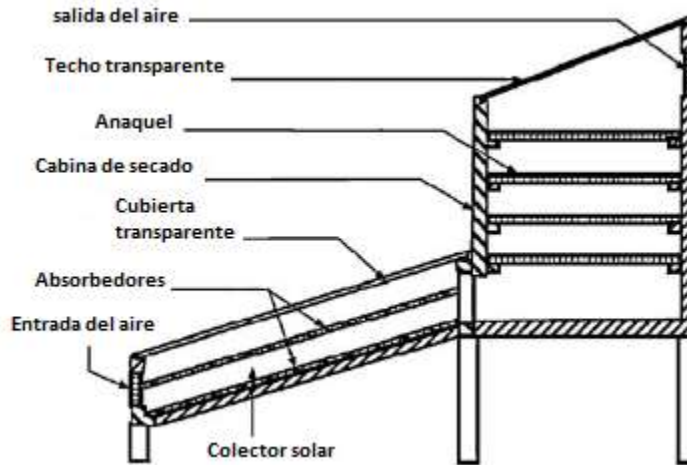


Figura 50. Secador mixto
Fuente: Adaptado y traducido de [76]

- Secadores de paso múltiple y de paso reverso: Los desarrollos más significativos se utilizan en el secado de cereales. Para secado de arroz se usó un secador solar inclinado con paso múltiple y acoplado con sistema de almacenamiento de energía, posteriormente se modeló el equipo y se encuentra que el proceso se diferencia según el número de pasos o de bandejas que se utilicen [48].

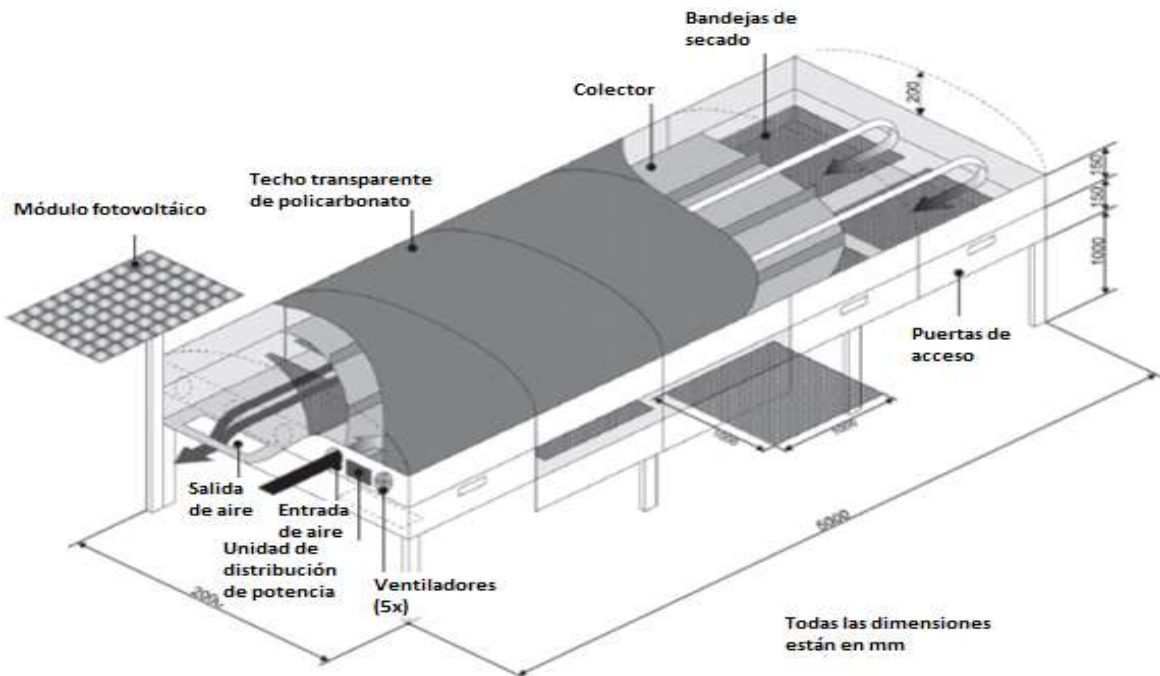


Figura 51. Secador de doble paso
Fuente: Adaptado y traducido de [80]

También existen los secadores híbridos, estos operan fundamentalmente a partir de energía solar (50-60% de los procesos de secado) y el restante a partir de una alimentación energética convencional que por lo general es gas. Son equipos de alta demanda comercial porque garantizan disponibilidad energética 24 horas diarias, tienen opción de recirculación, chimenea y equipo de ventilación. Para el secado de productos agrícolas en equipos híbridos es fundamental el conocimiento del comportamiento del producto a procesar bajo las condiciones dadas [53]. Bena y Fuller relacionan el diseño de secadores solares adaptados con sistema de quemador de biomasa como fuente de calentamiento auxiliar [81].

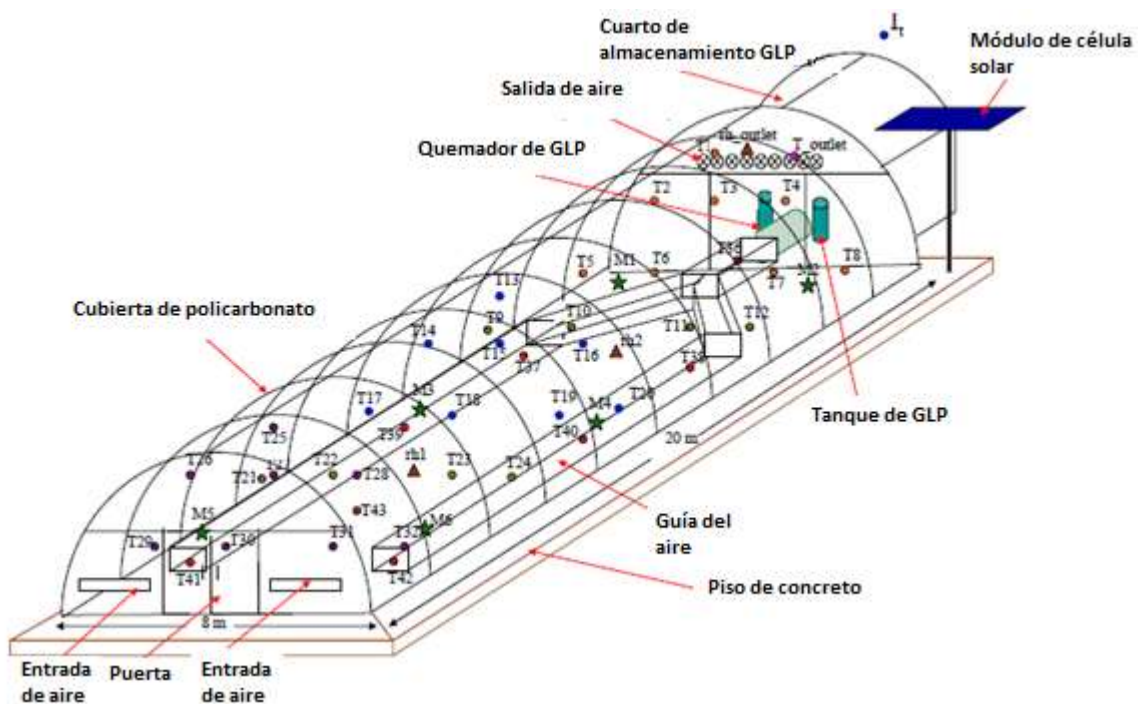


Figura 52. Esquema secador solar híbrido: sol/GLP

Fuente: Adaptado y traducido de [66]

De otro lado, hay avances en los desarrollos de mecanismos de almacenamiento de energía porque algunos productos y/o mercados obligaron a desarrollar formas para obtener producción estandarizada y operación 24 horas del día.

Los sistemas de almacenamiento de calor incrementan el costo de instalación del secador pero permiten regular procesos en productos sensibles a altas temperaturas, evitar excesos de secado en productos de rápido secado y operar de noche o en días opacos. Los medios de almacenamiento pueden ser líquidos o sólidos, el agua es el medio líquido por excelencia; roca, arena u otro material

sólido también son utilizados para almacenamiento energético [53]. Shalaby et al. [82] Recopilan numerosos estudios al respecto.

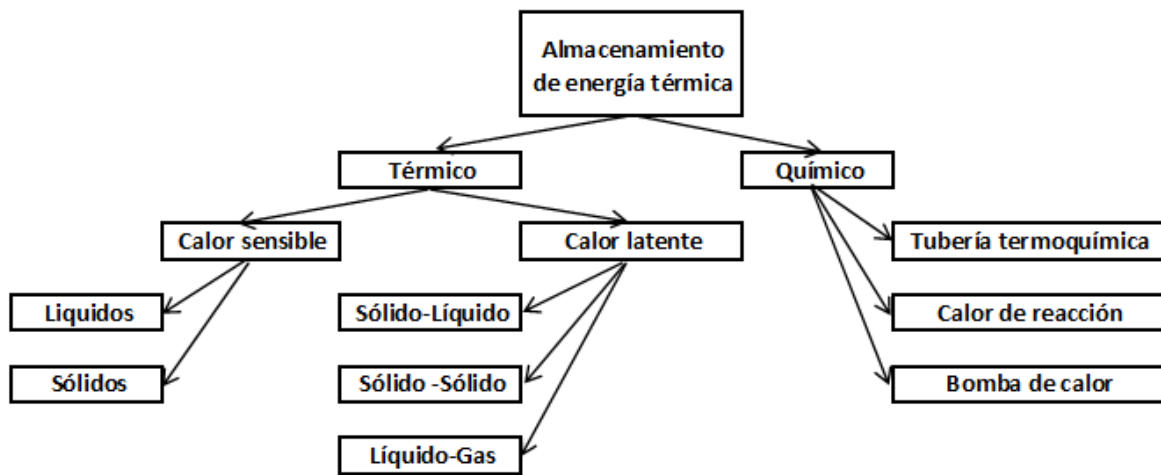


Figura 53. Mecanismos de almacenamiento energético

Fuente: Adaptado y traducido de [83]

Así mismo, los avances en colectores solares -esencia de esta tecnología- se centran en la eficiencia energética y económica. Las superficies delgadas vidriadas o las de plástico cumplen cabalmente requisitos de ambos enfoques [53], materiales metálicos son usados solamente en casos puntuales previa evaluación de conveniencia.

La mayoría de equipos secadores operan en producción por lote y las dimensiones del colector deben ser calculadas en función de la demanda energética que exige cada tipo de producto especialmente durante la primera fase de secado. Garg et al. [84] Mencionan un colector solar de células solares acoplado a una lámina potenciadora; así mismo los libros de Goswami et al [85] y Duffie & Beckman's [86] son significativos en el tema de desarrollos y diseños en colectores para secadores solares [53].

Los aspectos más estudiados sobre colectores son: forma, ángulo y grosor, material de construcción, evaluación de la eficiencia térmica, modelamiento de la difusión de calor en el interior, modelamiento para diseño con base en el principio de mínima entropía, materiales de almacenamiento de calor, incremento de potencia para procesamiento en ciclo continuo, entre otros [53].

Para el análisis y mejoramiento de un colector solar de doble paso con aletas se establecen predicciones con modelo matemático y validadas experimentalmente, descubriendo que la eficiencia energética depende de la rata de flujo másico y es

proporcional al incremento de la radiación solar, la mejor eficiencia hallada es 77% a un flujo másico de 0,09 kg/h. Del mismo modo, tanto el factor de remoción de calor como el coeficiente global de transferencia de calor son proporcionales al incremento de la radiación [87].

Complementando lo anterior, López Vidaña et al. calculan la eficiencia de un secador híbrido gas-solar operando en estado transitorio [88]. Allí, la eficiencia térmica del colector se afecta por el flujo de masa de aire, el ángulo de colección y la diferencia de temperatura entre el ambiente y el interior del colector. La combinación de secado gas-solar produce una máxima eficiencia del 71% y un producto final de alta calidad.

Lamnatou et al. [89] Evalúan el funcionamiento de un colector solar con tubo de evacuación, prototipo desconocido en la industria del secado solar. Lo acoplan a un secador solar indirecto con acción convectiva. Posteriormente desarrollan modelos y pronostican variables como el ratio de humedad y la tasa de secado; así mismo, realizan un análisis energético y exergético del proceso. Los resultados obtenidos sugieren que este tipo de colector puede resultar conveniente para aplicaciones a nivel industrial.

De otro lado, Afriyie et al. [90] Para la optimización de la ventilación en un secador solar de alimentos con chimenea-dependiente encuentran que la longitud de la chimenea y tamaño de la cámara de secado son dos variables que se deben ajustar a las condiciones geográficas. Se concluye que en lugares sobre la línea ecuatorial una cámara grande con chimenea corta es conveniente mientras que en lugares apartados del paralelo ecuatorial es mejor una cámara pequeña con chimenea larga. Del mismo modo, la simulación realizada aproxima adecuadamente la ventilación del equipo. Luego, el modelo matemático que desarrollan los mismos autores en 2013 [91] permite optimizar la ventilación del equipo evaluando variaciones en la inclinación del techo de la chimenea y la altura de los anaqueles de la recámara de secado. El modelo presenta variaciones entre 1,5%-10% con relación a los valores experimentales pero el final del ciclo de secado es aproximado apropiadamente.

Igualmente, un mecanismo matemático para la correlación y predicción de la transferencia de calor convectivo para los secadores solares más comunes es propuesto por Singh y Kumar [92], encontrando que la rata de flujo de aire es el parámetro de mayor influencia sobre la transferencia en cualquier equipo y que la mejor estrategia para realizar los cálculos es a través de números adimensionales.

4.4. Uso industrial

La asociación de energía solar El-Paso (www.epsea.org/dry.html) recopila y provee de guías para uso apropiado de diferentes tecnologías basadas en la radiación solar [53]. Las industrias que avanzan en el uso de la energía solar para sus procesos de secado son: alimentos, textiles, maderas, desalinización de agua, calentamiento de agua, entre otros [48].

Los desarrollos más importantes de los últimos años provienen de países y regiones como: Tailandia, Nepal, India, Turquía y Europa Central. Del mismo modo países en los cuales se tienen avances en su reconocimiento e implementación a pequeña y mediana escala son: Barbados, Jamaica, Papua Nueva Guinea, Arabia Saudita, Camboya, Chile [48].

Múltiples estudios de propiedades termodinámicas de los productos, -especialmente alimentos- durante el secado, se centran en el cálculo del coeficiente de difusión y los coeficientes convectivos de transferencia de masa y calor; estos son calculados de forma experimental en cada caso [48].

En productos agrícolas está claramente definido que la expansión de la tecnología encontrará cabida en las pequeñas explotaciones productivas [48]. En los países tropicales se tienen cifradas grandes esperanzas. Lo mismo se puede suponer para el uso en productos pesqueros.

A nivel práctico la energía solar se aplica mediante:

- Secado natural o al sol. Allí los productos son sometidos directamente a la radiación solar y a las condiciones medioambientales sin ningún tipo de protección.
- Secador solar directo. En este equipo el producto es ubicado en un compartimiento cubierto con material transparente a través del cual pasa la radiación y se produce el secado del producto por convección natural y radiación directa.
- Secador solar indirecto. Puede ser de convección natural o forzada. Se caracteriza porque existe una zona de recepción y almacenamiento de la energía incidente a través de la cual circula el aire y este se desplaza hasta una recámara de secado donde se dispone el producto de interés.
- Secador solar mixto. Es una combinación del secador directo e indirecto con el fin de garantizar continuidad en el proceso y una tasa de secado mayor.
- Secador solar híbrido. Es un equipo que utiliza como fuente principal de calentamiento la energía solar y se suple de combustibles fósiles u otra

forma de energía como reserva para los días nublados y las noches, de forma que sea posible la operación 24 horas al día a temperatura constante.

En la tabla 14 se relacionan los avances más significativos.

Tabla 14. Avances en el uso industrial de secadores solares

Autor	Aspecto desarrollado
El-Sebaili y Shalaby [93]	Revisión del secado solar en productos agrícolas.
Pangavhane et al. [94]	Diseño, construcción y operación de equipo multipropósito de secado en cámara. Puede ser operado con convección natural o forzada y utilizado para frutas o vegetales.
Al-Juamily et al. [95]	Diseño y construcción de secador solar indirecto con convección forzada que consta de: calentador de aire, absorbedor/ventilador de aire caliente y cámara de secado. Cabina de secado compuesta por seis compartimientos separados por malla metálica. Equipo es utilizado para secar uvas, albaricoques y frijoles.
Karim y Hawlader [96]	Determinan que la eficiencia del colector de aire independientemente de su geometría es función de la tasa de flujo de aire. Una tasa de flujo de 0,035 kg/m ² s es considerada óptima para el secado solar de productos agrícolas.
Dissa et al. [97]	Formulan un modelo matemático para secado de mango en tajadas en un secador solar indirecto de capa delgada.
Sarsilmaz et al. [98]	Secan albaricoques en un secador cilíndrico de columna rotatorio. El equipo se compone del sistema de ventilación, el colector solar y la cámara rotatoria de secado.
Chauhan et al. [99]	Encuentran que el contenido de humedad en semillas de coriandro disminuye de 28,2% a 11,4% en tres días en equipo de secado solar indirecto simple y en 31 horas en secador acoplado con lecho de roca como medio de almacenamiento energético.
Jain [100]	Determina que la temperatura el interior del grano de arroz es proporcional al ancho, largo y ángulo de inclinación del colector solar.
El-Sebaili [101]	Desarrolla un secador solar indirecto con arena como medio de almacenamiento energético. Resultados satisfactorios para el secado de: frijoles verdes, manzanas, tomates, uvas e higos; encontrando que

	<p>en promedio se surte una reducción de 12 horas en el tiempo de secado usando arena.</p> <p>Aplica un tratamiento previo a los alimentos consistente en la inmersión de porciones regulares en una mezcla de 0,4% de aceite de oliva y 0,3% de NaOH por 1 minuto; este reduce el tiempo de secado de 60 a 8 h.</p>
Shanmugam y Natarajam [102]	<p>Desarrollaron un secador solar indirecto que incluye desecante, Aproximadamente el 60% de la humedad era removida por acción de la energía solar y el 40% restante por acción del desecante.</p> <p>La inclusión de un espejo reflector favoreció la pronta recuperación del material desecante e incrementó su capacidad potencial en un 20%.</p>
Bolaji y Olalusi [103]	<p>Diseñan un equipo mixto para alta temperatura durante las horas de oscuridad. Este equipo mixto logra una temperatura al interior del colector y de la cámara más elevada que en el ambiente externo. Logró mantener una tasa de secado de 0,62 kg/h durante la noche lo que permitió concluir que es un sistema rápido para secar alimentos.</p>
Tripathy y Kumar [104]	<p>Construyen un secador solar mixto para secado de papas provisto de cámara de secado en la cúpula y alimentación indirecta a través de un sistema colector de lámina plana inclinada.</p>
Simate [105]	<p>Desarrolla dos tipos de secador por convección natural, uno mixto y otro indirecto, el indirecto con cobertura opaca y el mixto de cobertura transparente. La producción del secador mixto es 15% superior.</p>
Singh et al [106]	<p>Diseño de secador solar por convección natural compuesto por un sistema de múltiples bandejas, vidrio removible, placa de sombrero y bandejas es un equipo recomendado para zonas apartadas por su fácil implementación y bajo costo</p>
Omojaro y Aldabbagh [107]	<p>Comparan la eficiencia energética de un equipo de doble paso para calentamiento de aire contra uno de paso sencillo, encuentran que el equipo con doble paso es 7-9% más eficiente.</p>
Karim y Hawlader [96]	<p>Determinan que los colectores de aire de acanaladura en V son más eficientes que los de lámina plana. La mejor eficiencia térmica del colector de acanaladura en V (70%) se logra al operar un flujo de aire de 0,031 kg/m²s.</p>
Akpinar y Kocyigit [108]	<p>La eficiencia de un colector solar depende de la radiación, la geometría de la superficie y la extensión de la línea de flujo de aire.</p>

Sahu y Bhagoria [109]	El coeficiente de transferencia de calor aumenta al utilizar en el colector láminas ásperas en comparación al uso de láminas lisas cuando se opera con un flujo a número de Reynolds elevado.
Prokash y Kumar [77]	Revisión sobre secado solar en equipo tipo invernadero.
Jain y Tiwari [110]	Equipo pasivo. Determinación del coeficiente convectivo de transferencia de masa. Encuentran que con el secador invernadero pasivo se obtiene un valor similar que por secado al sol.
Tiwari et al. [111]	Análisis de secado de alimentos de baja humedad inicial. En la primera fase el valor del coeficiente convectivo de transferencia de masa es alto, posteriormente empieza a decrecer.
Farhat et al. [112]	Secado de pimienta logrando reducción de humedad del 83% en equipo con cobertura de polietileno.
Koyuncu [113]	Diseño de un secador 2,5 veces más eficiente en tiempo que el secado al sol para procesar pimienta. Opera en convección natural.
Kumar y Tiwari [114]	El coeficiente convectivo de transferencia de masa se afecta tanto en equipo pasivo como activo pero el efecto es menor en el último por causa de la convección forzada.
Sacilik et al. [115]	Prueban 10 modelos matemáticos para secado de tomate en túnel y al sol. Obteniendo un producto más higiénico y nutritivo mediante el secado en túnel y una buena aproximación a la difusión ocurrida en el proceso.
Tiwari et al. [116]	Realizan una evaluación energética y exergética para secado de pescado. Proponen una aproximación teórica con buena relación a los resultados experimentales.
Ronoh et al. [117]	Comparación en el secado de granos en secador de tendalero y secado natural, obteniendo mejores resultados en tiempo de secado y calidad nutricional de producto en el proceso de secador de tendalero.
Prakash y Kumar [118]	Adaptan un sistema de inferencia neuro-difusa para predecir variables térmicas de un proceso de secado en equipo de invernadero.
Condori y Saravia [119]	Estudian la rata de evaporación de pimienta en dos secadores invernaderos activos. Uno con una cámara de secado y otro con dos. El equipo de dos cámaras es 87% más eficiente.
Condori et al. [63]	Secado de pimienta y ajos en secador tipo túnel. Buenos resultados en el valor de la rata de secado.

Condori y Saravia [120]	Estudio matemático de secador túnel-invernadero. Se concluye que la colección solar y la temperatura de salida son proporcionales a la radiación global incidente.
Kumar y Tiwari [114]	Modelo matemático para predecir variables térmicas en proceso de secado en secador de invernadero. Resultados satisfactorios en la evaluación experimental.
Hossain y Bala [121]	Evaluación de un secador mixto tipo túnel para procesar chili rojo y verde. Los resultados en tiempo de secado en comparación con el secado natural son superiores.
Kumar y Tiwari [122]	Evaluación del efecto de la carga de cebollas en secador tipo invernadero. El coeficiente convectivo de transferencia de masa incrementa con el aumento de la carga de cebollas.
Kooli et al. [123]	Estudio de laboratorio en secador tipo invernadero y secado al sol para pimienta roja. Se establecen parámetros de secado.
Nayak y Tiwari [124]	Estudio energético y exergético de secador invernadero acoplado de celdas fotovoltaicas. Predicción y validación experimental.
Barnwal y Tiwari [125]	Comparación de secado natural con secado en secador híbrido invernadero-fotovoltaico para procesar uvas. Mejores resultados con el equipo híbrido.
Janjai et al [60]	Evaluación del secado de longan y bananos en secador invernadero, los impulsores de aire operan con energía fotovoltaica. Mejores resultados que con secado al sol.
Rathore y Panwar [126]	Evaluación del secado de uvas sin tratamiento químico en secador solar de túnel cilíndrico activo y comparando con secado al sol. Mejores resultados con secador de túnel y se destaca el menor tiempo de encogimiento.
Janjai et al [127]	Desarrollo y evaluación de un secador solar con piso de concreto negro y estructura parabólica cubierta de policarbonato, capacidad 1000 kg. Probado con banano, chile y café mostrando siempre mejores resultados que el secado al sol.
Bennamoun [128]	Recopila diferentes avances del secado solar en el tratamiento de aguas residuales, su uso común es para reducir la masa y volumen de los lodos de desecho, el secador activo tipo invernadero es el equipo de mayor uso. Sin embargo, no puede ser utilizado para el secado de todo tipo de aguas

	residuales ya que la presencia de determinadas sustancias afecta el proceso o el equipo.
Fudholi et al. [129]	Realizan un análisis energético y exergético al secado solar de algas rojas marinas. Diseñan, construyen y evalúan un prototipo que llevó la humedad de 90% a 10% en 15 horas; posteriormente analizan contra modelos teóricos los resultados encontrados y establecen que el modelo de Page es el más aproximado.
Flores et al. [130]	Para la industria cerámica desarrollan un prototipo de secador solar indirecto. Evalúan el equipo con 32 moldes de yeso, logrando una eficiencia de secado de $0,29 \pm 0,02\%$, el secado se alcanza en 132 horas. Mejor a los 21 días del método convencional.
Mohajer et al. [131]	Desarrollo de equipo doble función para operar como secado solar y simultáneamente como calentador de agua, la fuente de energía externa es electricidad. El equipo cumple cabalmente con las dos funciones propuestas.
Singh y Kumar [132]	Modelo matemático basado en el algoritmo de Levenberg-Marquart para predecir el consumo de energía específica y la mitigación de emisiones de dióxido de carbono al utilizar secado solar.
Wu et al. [133]	Diseño y construcción de un mecanismo de secado solar para prendas de vestir. Es una adaptación a un secador de gabinete.

4.5. Avances en industria agroalimentaria

Desde el inicio de la tecnología de secado solar industrial esta se usó para el procesamiento de productos agrícolas. Las frutas han tenido un lugar preponderante en los diseños. Las necesidades y oportunidades que se derivan de estos alimentos son valoradas y constituyen una sub-línea de investigación completa que se masifica por las numerosas variedades de frutas disponibles a nivel tropical.

En Chile desde tiempo atrás se tienen estudios para secado de uvas mediante esta tecnología y se cuenta con un acervo interesante. Existe revisión de documentos que hacen relación a variados diseños de equipo: Para uso industrial: secadores solares de gabinete, de invernadero, indirecto; para uso doméstico: secador tipo "sunworks SFD", secador de coquillage y secador de gabinete. Estos últimos todos para uso doméstico [51].

En México se estudió el efecto del secado solar en nopal encontrando que las características difieren sustancialmente de las exhibidas cuando se aplica el secado convencional en hornos eléctricos o de combustión. Estas características son favorables en pro de obtener un producto alimenticio sano, libre de residuos de volátiles o generación significativa de compuestos inconvenientes; así mismo expone atributos superiores a los obtenidos mediante el tradicional secado al sol directo [134].

Mangos y piñas han sido tratados en estudios de secadores solares industriales evaluando el perfil de evolución del secado, comparando la cinética y el rendimiento con el obtenido por secados convencionales [135, 136, 137]. Los resultados se estiman satisfactorios y replicables.

Lúcuma también fue secada mediante secado solar industrial, encontrando como aspecto significativo que no era necesario el sulfitado para garantizar la blancura del producto final y que el secado aplicado se ajustaba convenientemente a las características reológicas del alimento, respetaba las características organolépticas naturales y ofrecía el aspecto de snack [138]. Aspectos muy importantes en el interés de lograr alimentos saludables y sin sustancia adicionadas.

Una de las variables coyunturales del secado solar a nivel industrial es el tiempo de exposición necesario para conseguir el punto final de secado del alimento. Las horas de exposición fluctúan en función de las características del alimento, del pre-tratamiento al secado, pero principalmente de los factores medioambientales [67, 60, 61, 66]. La intensidad del brillo solar, presencia de nubosidad, humedad relativa, presión y altitud están entre los más significativos. La media de secado de tajadas o rodajas de 4 mm en variadas frutas (mango, piña, manzana y otras) u hortalizas (tomate, pimiento y otras) se encuentra entre 1,5 y 3,5 días, equivalentes a 15-34 horas de radiación solar.

La temperatura de exposición desarrollada al interior del secador y por sectores también es de interés para el diseño de equipos. Poco influye el producto a secar en las temperaturas desarrolladas, pero sí existe una marcada diferencia en los rangos de sensibilidad a la temperatura de los diferentes tipos de alimentos, la mayoría de los alimentos experimentados (mango, manzana, menta, piña, banano y otros) toleran adecuadamente rangos de temperatura entre 30-65°C, aunque las mejores temperaturas de operación están entre 45-55°C [139, 140, 71, 141].

En la tabla 15 se relacionan los avances significativos por tipo de alimento.

Tabla 15. Avances en secado solar por tipo de alimento agrícola

Alimento y año	Aspecto desarrollado
Kokam (2012)	El rendimiento en el secado depende significativamente del estado de maduración [142].
Banano (2009)	En tajadas como en pulpa la convección forzada es más conveniente al igual que el uso de un secador horizontal para incrementar los parámetros cinéticos de secado [140]
Mango (2003)	El impacto sobre el contenido de betacarotenos registra un importante incremento de los isómeros <i>cis</i> . Las características propias de cada variedad determinan la conformación porcentual de los isómeros como la estabilidad al calor de los mismos [137].
Pimiento para pimentón	Se analiza la influencia estacional del momento del secado sobre las cualidades organolépticas, el color especialmente. Se concluye la necesidad de aplicar tratamientos adicionales para obtener resultados óptimos [143].
Diversos productos agrícolas y tecnología del secado solar (2011)	Revisión del avance en temáticas relacionadas con el secado solar en productos agrícolas [53].
Diversos productos agrícolas (2012)	Revisión del avance en secadores solares por tipo de producto [48].
Arroz (1989, 1994, 1996, 2007)	<p>Desarrollo de un secador solar híbrido con celdas fotovoltaicas para alimentación de los impulsores de aire y otras aplicaciones. También desarrollo de equipo con doble paso y modelos matemáticos para el secado de arroz [144].</p> <p>Diseño de una bomba de calor solar acoplada a un sistema de secado de arroz, con este mecanismo combinado se logró un control más preciso de temperatura y humedad. [145]</p> <p>Formulación de ecuaciones semi-empíricas para el secado de arroz por tres diferentes sistemas; la mejor rata de secado se obtuvo con un secador mixto [146]</p>

	<p>Desarrollo de un mecanismo mediante el cual puede ser calculado el área del colector para secar arroz mediante secado de convección forzada en equipo híbrido [147]</p> <p>Explicación de un sistema para secar arroz combinando calentamiento solar y eléctrico en una cámara de secado rotario para operar de forma semicontinua [148]</p>
Maíz (2003)	Secado en equipo indirecto y equipo mixto, los rendimientos en producción favorecen al equipo indirecto pero en costos al equipo mixto [105]
Carioca (1976)	Análisis y mejoramiento en diseño del colector inclinado para secado de frutos de "carioca". Proposición de modelo para describir el secado en capa delgada [149].
Mangos y bananos (2009)	Evaluación del secado de mangos y bananos en secador solar directo y evaluación de resultados experimentales con modelos teóricos; el modelo de Henderson y Pabis es el que mejor se ajusta [150].
Manzana (2009)	Desarrollo de un equipo combinado de secador solar con bomba de calor para procesar manzanas. Se calculan los valores de tasa de secado [151].
Mandioca (1996)	Evaluación del secado de mandioca en Nigeria donde las condiciones ambientales son muy dificultosas [152].
Piña (2003)	Secado de piña en secador de túnel, obteniendo un producto de calidad equiparable a los obtenidos por secado industrial convencional [153].
Ciruelas (2007)	Aplicación de pre-tratamiento químico para reducir la fortaleza de la capa cerosa e incrementar la permeabilidad en el secado de ciruelas [154].
Fresas (2007)	Aplicación de pre-tratamiento químico para reducir la fortaleza de la capa cerosa e incrementar la permeabilidad en el secado de fresas [155].
Tomate (2006, 2012, 2013, 2014)	Desarrollo de un proceso de secado para tomates orgánicos en secador solar de túnel con resultados exitosos [115]

	<p>En Argelia. Secado de tomate en equipo indirecto de convección forzada, la variable de mayor influencia es el grosor de las tajadas. [156].</p> <p>Desarrollo de un concentrador solar para secado de tomate, el diseño propuesto logra un 21% de reducción en el tiempo de secado [157]</p> <p>Desarrollo de un concentrador solar para secado de tomate, el diseño propuesto logra un 27% de reducción en el tiempo de secado. [158]</p> <p>Secado de tomate en equipo indirecto con convección natural y forzada a 45°C y 40°C, respectivamente. La eficiencia de la cámara de secado fue de 17% y la del colector 30%. [159]</p>
Limón (2005)	<p>Ensayos con tajadas de limón en secador de cabina con resultados sensorialmente exitosos [160].</p>
Uvas (2002, 2005, 2008, 2009, 2011)	<p>Desarrollo de variados secadores solares para procesar uvas con resultados satisfactorios a nivel laboratorio que se ven opacados por la incapacidad de obtenerlos también a nivel industrial [161].</p> <p>Las mayores dificultades para el avance de la tecnología en el procesado de uvas tiene que ver con la producción en masa, el retorno de la inversión y algunos factores socio-culturales [162].</p> <p>Secado solar de uvas variedad Sultana en túnel tipo invernadero utilizando convección natural. Resultados satisfactorios y competitivos [163].</p> <p>Construcción y evaluación de un secador tipo invernadero-fotovoltaico con capacidad de 100 kg para secado de uvas sin semilla - variedad Thompson-. Registro de variables operativas del entorno externo e interno del equipo y evaluación de las transferencias de</p>

	<p>calor y masa [125].</p> <p>Estudio de la cinética del secado de uvas sin semillas en secador solar con superficie de colección de aire expandida, un colector con fase de cambio material y cámara de secado con efecto de torbellino. Resultados satisfactorios. Luego se compara la curva de secado con modelos teóricos dando que el modelo de Midilli se ajusta mejor a los resultados [164]</p>
Cebolla (2007)	<p>Comparación del secado de hojuelas de cebolla al sol y en secador solar tipo invernadero estudiando el efecto del nivel de carga sobre el coeficiente convectivo de transferencia de masa, se concluye que afecta significativamente [165].</p> <p>Evaluación de un secador por convección forzada considerando: la incidencia de la rata de flujo de aire, la temperatura del aire y la fracción del aire recirculado en el secado de rebanadas de cebolla. Se encuentra que la demanda energética del proceso si se usa recirculación del aire esta entre 12,040-38,777 MJ/kg y sin recirculación entre 23,548-62,117 MJ/kg [166].</p>
Papas (2008, 2013)	<p>Desarrollo de un método para la determinación del coeficiente convectivo de transferencia de calor a partir de balances de energía en un secador mixto de convección natural para secado de cilindros y tajadas de papa. Concluyen que la geometría de cilindro favorece un mayor valor de coeficiente convectivo de transferencia de calor [104]</p> <p>Análisis del funcionamiento de dos secadores solares híbridos para tajadas de papa. Un equipo solar-eléctrico contra uno solar-fotovoltaico, encontrando mayor eficiencia energética con el último equipo [167].</p>
Patatas dulces (1993, 2007)	<p>Evaluación del secado de seis variedades de patatas dulces en secador solar aplicando y sin aplicar pre-tratamiento de blanqueo, el cual resultó benéfico para el procedimiento</p>

	<p>porque favorecía el encogimiento homogéneo y la apariencia final [168].</p> <p>Secado y modelamiento del proceso de tajadas de patatas dulces. La temperatura efectiva de secado y el grosos de las tajadas son las variables que más afectan el proceso [169]</p>
Hierbas y especias (2005)	Hierbas medicinales y otros productos agrícolas son secados solarmente en equipos con eficiencia de secado del 35% [170].
Tomillo y menta (2013)	Secado en equipo indirecto bajo convección forzada con resultados satisfactorios. Comparación de los resultados experimentales contra modelos teóricos, concluyendo que el modelo de Midilli y Kucuk corresponde apropiadamente al secado de menta y los modelos de Page y Page modificado describen mejor la curva de secado del tomillo. El costo de procesamiento estimado es de 0,025 euros/kg y 0,087 euros/kg para menta y tomillo, respectivamente [171].
Menta (2013)	Secado de menta en dos prototipos de secador idénticos donde uno opera en convección natural y el otro en convección forzada. Mejores resultados en el equipo de convección forzada, un coeficiente de difusividad efectiva entre $1,2 \times 10^{-11}$ y $1,33 \times 10^{-11}$ m ² /s. El modelo que mejor aproxima la difusión del proceso es el de Verma [172].
Alimento para animales (1998)	Un sistema de secado compuesto por dos secadores individuales denominados: secador solar radiactivo-convectivo y secador solar de caldera fueron desarrollados en Jordania para el secado de alimento para animales. Sistema eficiente y producto final acorde a la norma de alimento para pollos [173].
Jengibre (2014)	Evaluación de las condiciones de operación para el secado de jengibre silvestre en secador solar tipo invernadero utilizando tres arreglos: secador vacío y utilizando dos niveles de carga. El mejor resultado es obtenido secando 60 kg de tajadas a 47,2°C durante 30 horas, logrando una eficiencia energética del 8% y un consumo total de

	energía de 29 MJ/kg vapor retirado [174].
Zanahoria (2013)	Diseño y evaluación de secador solar con doble paso de aire colector, bomba de calor y unidad fotovoltaica. Se encuentra que la eficiencia del equipo está comprendida entre 60-78%. Tajadas de zanahoria se secan en 220 minutos [175].
Setas (2013)	<p>Se secan setas para evaluar tres sistemas de secado: solar, con bomba de calor y combinado, controlados mediante sistema automatizado PCL, se encuentra que el menor tiempo de secado se logra en el sistema combinado (190-230 minutos) [176].</p> <p>Evaluación del secado de setas variedad París en un secador híbrido, se encuentra que el nivel de radiación solar es la variable de mayor impacto sobre la temperatura de salida del aire secador. El proceso global también se afecta por el grosor de las tajadas y la cantidad de aire recirculado [177].</p>
Chili rojo (2014)	Análisis energético y exergético en el secado de chili rojo, obteniendo consumo de energía específica de 5,26 kWh/kg de producto. La eficiencia del colector solar es de 28% trabajando con un promedio de radiación solar de 420 W/m ² y una tasa de flujo másico de 0,07 kg/s. Este sistema seca 49% más rápido el producto que el secado al sol [178].
Chícharos (2013)	Con chícharos fue probado un secador solar acoplado de lecho fluidizado y se comparó contra el secado tradicional al sol, todas las variables evaluadas fueron mejores en el equipo secador y se destaca que la capacidad de rehidratación de los chícharos mejora [179].
Andrographis paniculata (2012)	Para secar este vegetal es usado un secador solar tipo túnel con diseño parabólico. La reducción de humedad desde 75% hasta 7% es lograda entre 2-3 días con fluctuaciones de temperatura entre 35-75°C. La calidad y uniformidad del producto final es satisfactoria [180].

En la siguiente tabla se muestran los desarrollos que se tienen en otras industrias alimentarias.

Tabla 16. Avances en secado solar en otros sectores alimentarios

Autor	Aspecto desarrollado
Banout et al. [181]	En el secado de carne cecina y de eland (tipo de antílope) mediante secado solar se logra reducir de 72% a 30% la humedad en un total de 8 horas; mejorando en 2 horas los resultados obtenidos en horno de laboratorio donde el procedimiento tardaba 10 horas para alcanzar el punto final. Los parámetros organolépticos son satisfactorios.
Kituu et al. [182]	Desarrollo un modelo para simular el secado en capa delgada del pez tilapia en secador solar de túnel. La conclusión más representativa es la importante reducción del tiempo de secado. El modelo se encontró apropiado para predecir el cambio de temperatura durante el secado experimental.

4.6. Conclusiones

El avance en secadores solares es importante en todas las escalas. Empiezan a observarse avances significativos en la escala industrial especialmente en equipos tipo invernadero de convección forzada.

El desarrollo de secadores solares ha encontrado en las materias primas agrícolas un campo fructífero con interesantes proyecciones a futuro.

Los secadores solares de convección forzada, con sistemas de almacenamiento de energía y/o híbridos se imponen en los prototipos y diseños de escala industrial. Son costosos de instalar pero con rápidas tasas de retorno.

El estudio de colectores y concentradores es vital para optimizar los equipos y mejorar la eficiencia energética de la colección solar. Por ello son líneas de trabajo investigativo muy dinámicas.

5. INGENIERÍA PARA SECADO SOLAR DE MANGO COMÚN (*Mangifera Indica L. Var. común*)

5.1. Introducción

Para obtener resultados satisfactorios secando productos agrícolas mediante el uso de la tecnología de secadores solares, es preciso conocer en profundidad las características del alimento a procesar. Experiencias en el secado de banano, mango, pimienta para pimentón y otros, lo confirman (ver tabla 13).

Por otro lado, entre las dificultades para el desarrollo de la tecnología a escala industrial están: el costo de inversión y los rendimientos de producto. La mejor manera para reducir los costos de inversión es el correcto dimensionamiento del equipo y el perfeccionamiento de la cinética de secado del producto a procesar [183]. Para impactar los rendimientos de producto pueden combinarse lotes de productos (misma o diferente especie) con rendimiento medio conveniente y establecer mecanismos para la mínima generación de pérdidas.

La ingeniería de los secadores solares es un campo de estudio en pleno crecimiento, los trabajos más representativos mencionados en el capítulo anterior exponen que los avances más significativos provienen de regiones del mundo geográficamente apartadas de Colombia, países de Norteamérica, Centro Oriente y Asia Pacífico abanderan los avances en la tecnología. Sin embargo Colombia, por su posición en el globo terráqueo dispone también de un importante nivel de irradiación (promedio diario multianual $4,5 \text{ kWh/m}^2$ y total promedio multianual $10130 \text{ kWh/m}^2/\text{año}$ [184]), reportando un potencial similar al de aquellos países donde se avanza ávidamente por entender y aprovechar este recurso energético renovable y limpio.

A continuación se proponen pautas iniciales para que en futuros estudios se diseñe y/o construya un prototipo de secador solar industrial para mango bajo condiciones específicas de un municipio colombiano de: baja altitud, región Andina, con niveles de irradiación y velocidad del viento entre el rango medio-bajo nacional.

5.2. Propiedades del mango

5.2.1. Composición físico-química

Tabla 17. Composición físico-química y nutricional de 100 gr de pulpa de mango común fresca

Componente	Cantidad
Agua	81,7 g
Energía	65 kcal
Proteína	0,51 g
Grasa	0,27 g
Carbohidratos	17 g
Fibra dietaria total	1,8 g
Cenizas	0,5 g
Calcio	10 mg
Hierro	0,13 mg
Magnesio	9 mg
Fósforo	11 mg
Potasio	156 mg
Sodio	2 mg
Zinc	0,04 mg
Cobre	0,11 mg
Manganeso	0,027 mg
Selenio	0,6 mcg
Vitamina C	27, 2 mg
Tiamina	0,056 mg
Rivoflavina	0,57 mg
Niacina	0,584 mg
Ácido pantoténico	0,16 mg
Vitamina B6	0,160 mg
Folato total (forma aniónica ácido fólico)	14 mcg
Vitamina A (equivalente retinol)	389 mcg
Vitamina E	1,120 mg ATE
Tocoferol alfa	1,12 mg
Ácidos saturados	0,066 g
Ácidos insaturados	0,101 g
Ácidos poliinsaturados	0,051 g
Aminoácidos	
Triptófano	0,008 g
Treonina	0,019 g
Isoleucina	0,018 g
Leucina	0,031 g
Lisina	0,041 g
Metionina	0,005 g
Fenilalanina	0,017 g

Tirosina	0,01 g
Valina	0,026 g
Arginina	0,019 g
Histidina	0,012 g
Ácido aspártico	0,042 g
Alanina	0,051 g
Ácido glutámico	0,06 g
Glicina	0,021 g
Prolina	0,18 g
Vitamina A (IU)	3894

Tomado de: [185]

5.2.2. Termodinámicas

Tabla 18. Propiedades termodinámicas del mango

Propiedad	Valor
Punto de congelación alto (P.C.)	-0,9 °C—30,3 °F
Calor específico	0,85 BTU/lb °F
Temperatura de almacenamiento	55°F
Calor específico sobre el P.C.	0,85 BTU/lb °F
Calor específico bajo el P.C.	0,44 BTU/lb °F
Calor latente	117 BTU/lb
Índice de respiración (55°)	15-22 ml CO ₂ /kg h

Adaptado de: [186]

5.2.3. Otras

Tabla 19. Propiedades reológicas de la pulpa de mango a 25°C

Propiedad	Valor
Índice de flujo (n)	0,3343
Índice de consistencia (k)	8150
Viscosidad cinemática (μ)	2853,3 mPa*s [187]

5.3. Ingeniería de diseño

A continuación se presenta un caso a nivel teórico para explicar cómo se procede al diseño de un equipo de secado solar industrial que cumpla con los requerimientos de proceso.

5.3.1. Capacidad operativa requerida

La capacidad operativa se calculará a partir de la oportunidad que representa la producción del municipio de Anapoima (Cundinamarca) (ver. Sección 3.4.2.). El cual presentó hasta 2011 una producción de aproximadamente 15000 t/año. Con una tasa de crecimiento medio de 4,5%. Así, siendo conservador, dadas las dificultades climáticas de los últimos años estímesese un crecimiento del 4% anual para 2012-2013, obteniendo así una producción actual de 16224 t/año.

Suponiendo que en el municipio se respete la distribución de variedades del nivel nacional, 39% de la producción será mango común [1], es decir 6327 t/año.

Como no se encontró información consolidada sobre ventas de mango común para industria o consumo en fresco; establézcase que el total del párrafo anterior corresponda al 72% de la producción, basándose en los reportes de pérdidas en agricultura y poscosecha para frutas en países de América Latina, que emite la FAO, según el cual las pérdidas ascienden aproximadamente al 28% (20% agricultura y 8% poscosecha) [42]. Así la producción total de mango común para el municipio asciende a 8787,5 t/año, siendo 2460,5 t/año las pérdidas.

Considérese ahora que la totalidad de las actuales pérdidas poscosecha pueden recuperarse hacia industrialización vía secado solar; obteniendo así una base de producción de 196,84 t/año. Pero la producción anual se divide en dos cosechas de aproximadamente dos meses cada una, la producción anual real se reduce a 120 días, luego la base promedio diaria de mango para secar es 1,64 t.

De lo anterior, surge una inquietud curiosa: ¿qué uso se le dará al equipo que se establezca, durante los 245 días restantes del año? La respuesta de tal inquietud no hace parte de los objetivos de este estudio. Pero sí se puede indicar que como alternativa de solución podrá recurrirse a un estudio de factibilidad del negocio considerando la producción de deshidratados de diferentes frutas, verduras o hierbas aromáticas presentes en la región y que pueden tener espacio en mercados, no necesariamente snacks. Algunos productos presentes en la región y

que pueden evaluarse con este fin son: piñas, papayas, guayabas, plátanos, tomate.

Se reitera que para fines comerciales es fundamental establecer un sistema de producción para garantizar el cubrimiento de la capacidad operativa para todo el año. Posiblemente se requiere el procesamiento de múltiples productos en diferentes épocas del año de acuerdo con su correspondiente cosecha.

A su vez, la posibilidad de recurrir al almacenamiento refrigerado para procesamiento posterior queda inicialmente descartada porque el costo de inversión, operación y mantenimiento de esa infraestructura es virtualmente imposible para una zona competitivamente débil del país, en la actualidad. Como experiencia se tiene que solamente tras ingentes esfuerzos a penas se cuenta con este tipo de equipamiento en los puertos marítimos internacionales de las costas colombianas.

5.3.2. Selección de secador

La enorme capacidad operativa requerida obliga al uso de un equipo de gran capacidad procesadora, con una prominente colección solar e híbrido para garantizar operación 24 horas, porque intentar la operación sin medio de almacenamiento de calor o sin sistema de calentamiento suplementario provocaría una rápida acumulación de materia prima que finalmente deberá desecharse.

Con base en la literatura recopilada en el capítulo anterior se establece que un equipo para viabilizar el procesamiento de la capacidad operativa definida puede ser: *el secador solar híbrido tipo cámara, con colección solar independiente, convección natural, sin recirculación de aire*. Este secador permite procesar grandes volúmenes, operación 24 horas al día, control automatizado de las variables del proceso (temperatura, humedad relativa, velocidad del aire) y tiene un costo de instalación relativamente alto.

Como referente del tipo de instalación que se propone para el caso de Anapoima se tiene el siguiente esquema del secador estudiado por Condori et al. en Huacalera, Argentina [63]:

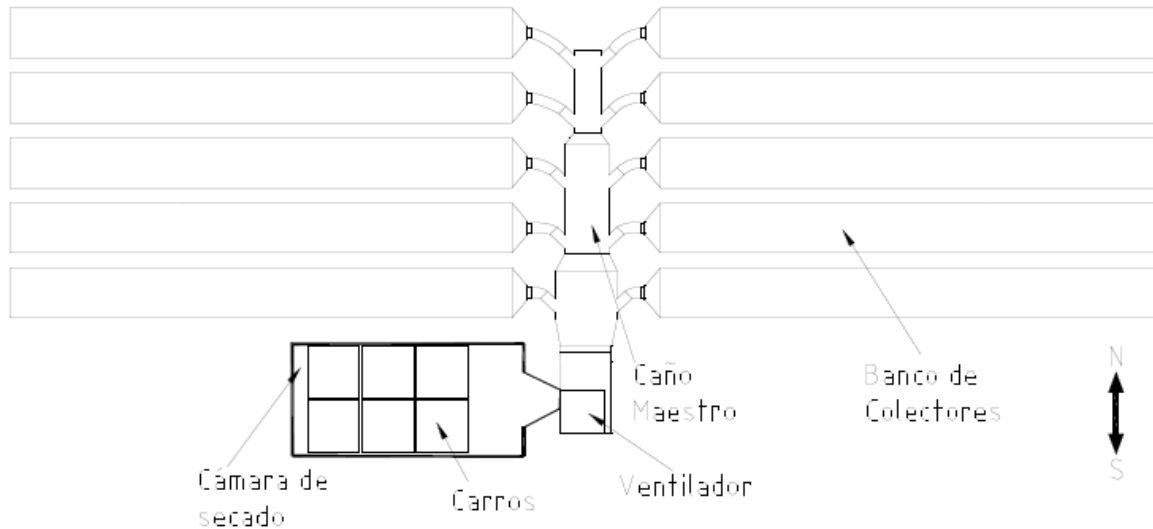


Figura 54. Esquema de secador solar industrial tipo recámara

Fuente: [63]

El esquema anterior muestra el banco de 10 colectores solares dispuestos en dos grupos de 5 a izquierda y derecha del caño maestro en dirección norte-sur. El caño es un sistema de transporte de aire caliente que se acopla por un lado a la tubería de salida de los colectores y por la otra al ventilador que impulsa el aire hacia la cámara de secado. Los colectores solares más el caño maestro suman 150 m^2 de superficie.

La cámara de secado tiene superficie de 10 m^2 , las medidas internas son: 1,85 m alto, 4,5 m largo y 2,5 m ancho; también tiene un aislamiento de 5 cm de lana de vidrio; posee dos puertas frontales para ingreso de producto fresco y una lateral para salida de producto seco; puede ser cargada hasta con 6 carros (2 filas de 3 carros), y cada carro tiene capacidad para transportar 15 bandejas de 1 m^2 cada una, separadas de a 10 cm. Las bandejas son metálicas, perforadas y se disponen con una densidad de carga de $5,5 \text{ kg/m}^2$, logrando así 84 kg de carga por cada carro.

Este secador referenciado posee solamente capacidad para secar 0,5 t/día, bajo las condiciones geográficas y climatológicas del estudio en Argentina. También debe tenerse en cuenta que este secador no posee sistema de almacenamiento de energía ni sistema suplementario de calentamiento para operar de noche o en días de nublados. Por ello, es que para el caso que aquí se estudia es necesario contemplar los sistemas suplementarios para lograr el procesamiento de las 1,64 t/día.

Así mismo, para el caso de Anapoima, no debe descartarse como alternativa de solución la instalación de múltiples secadores que sumados puedan cubrir la demanda de procesamiento en lugar de establecer una sola infraestructura con envergadura astronómica.

5.3.3. Lugar de operación y características

El lugar donde se dispone el secador solar es vital para la definición de los parámetros constructivos porque las variables determinantes de una colección solar eficiente se afectan fuertemente por la latitud, inclinación del terreno, condiciones climáticas, día del año, entre otros muchos factores.

El municipio de Anapoima, Cundinamarca, se encuentra a 4,55° de latitud norte - 74,54° longitud oeste y 710 metros de altitud sobre el nivel del mar.

Del mismo modo, de acuerdo con el mapa solar la disponibilidad promedio multianual de energía solar para la región Andina es de 1,643 kWh/m²/año, del mismo mapa se estima que el valor de irradiación del municipio está entre 4.0-4.5 kW/m²/día [184]. También es necesario tener presente que la velocidad media del viento en superficie que le corresponde a Anapoima se encuentra entre 2.0-2.5 m/s [188].

5.3.4. Balance de materiales

Bajo la premisa de procesar las 1,64 t/día propuestas y llevando el producto hasta un 12% humedad final (base húmeda), quedando listo para empacar. Los sólidos totales de la pulpa de mango son aproximadamente 18,3% (W_d), la humedad máxima a retirar (W_w) viene dada por:

$$W_w = 1,64 - (1,64 * 0,183) = 1,34 \text{ t/día}$$

Sin embargo, por la humedad final establecida se debe retirar solamente la humedad (W), la cual corresponde a la fracción de agua evaporable:

$$W = 1,64 - \left[\frac{1,64 - 1,34}{0,88} \right] = 1,30 \text{ t/día}$$

Luego la masa de producto final seco (p) a 12% humedad es:

$$p = 1,64 - 1,30 = 0,34 \text{ t/día}$$

Siendo la temperatura media de Anapoima de 26°C, El aire a la entrada del colector contará aproximadamente con humedad específica de 0,020 kg agua/kg de aire, y esperando que a la salida alcance una temperatura de 70°C, al saturarse dentro de la cámara de secado podrá arrastrar hasta 0,330 kg agua/kg aire.

La demanda de aire para calentar el mango hasta 70°C es:

$$m_{aire} C_{p_{aire}} = m_{mango} C_{p_{mango}}$$

C_p mango 0.85 BTU/lb °F = 3.55844 kJ/kg K

El calor específico del aire a presión atmosférica es 1,0045 kJ/kg K

$$m_{aire} = \frac{1640 \text{ kg} * 3,55844 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}}{1,0045 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}} = 5809,69 \text{ kg}$$

Asumiendo que la transferencia de masa inicia únicamente cuando la totalidad de la masa de mango alcanza los 70°C. La demanda de aire (x) para remover la humedad es:

$$x = \frac{1300 \text{ kg agua}}{(0,330 - 0,020) \text{ kg agua}} = 4193,54 \text{ kg aire}$$

El balance global de cada operación es:

Entrada,

$$1640 \text{ kg mango fresco} + 10003,23 \text{ kg aire seco caliente} = 11643,23 \text{ kg}$$

Salida,

$$340 \text{ kg mango seco} + 5493,54 \text{ kg aire húmedo frio} + 5809,69 \text{ kg aire seco frio} \\ = 11643,23 \text{ kg}$$

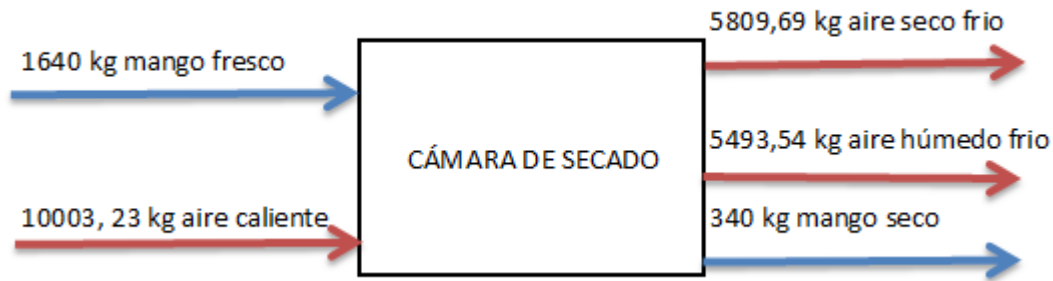


Figura 55. Esquema del balance de materiales en la cámara de secado

Fuente: el autor

5.3.5. Balance de energía

Primero se realiza el balance de energía en el colector y posteriormente el balance en la cámara de secado.

Anteriormente se comentó que la temperatura inicial del lugar es 26°C y se espera obtener aire a 70°C a la salida del colector. También se supondrá que el aire se comporta como gas ideal caloríficamente perfecto y que el proceso ocurre en estado estacionario.

El balance energético global del colector es:

$$Q_{abs} = Q_{util} + Q_{perd} + \frac{du}{dt}$$

Despreciando du/dt , el calor absorbido es igual al calor útil más el calor perdido (radiación, convección y conducción).

Luego la energía que requiere absorber el aire para alcanzar la temperatura de salida, la cual deberá ser suministrada por la placa absorbidora (Q_{util}), viene dada por:

$$Q_{util} = -m[cp * (T_e - T_s)]$$

$$Q_{util} = -10003,23 \text{ kg} \left[1,0045 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} * (299,15 - 343,15)\text{K} \right] = 442122,75 \text{ kJ}$$

Respecto a la cámara de secado, consideremos que el calentamiento es uniformemente distribuido entre todos los espacios, luego el balance energético viene dado por:

$$Q_c = \text{calor calentamiento mango} + \text{calor de vaporización de agua}$$

$$Q_c = m c_p \Delta T + (w * h)$$

La entalpía de vaporización del agua a 1 atm y 70°C es 293 kJ/kg, entonces:

$$Q_c = \left[1640 \text{ kg} * 3,55844 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} * (343,15 - 299,15)\text{K} \right] + \left(1300 \text{ kg} * 293 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

$$Q_c = 637677,03 \text{ kJ}$$

En la bibliografía las pérdidas de calor en la cámara se reportan en valores absolutos bajo unidades de energía y relacionados con el coeficiente global de pérdida de calor (U_t) [91, 78, 80]. En consecuencia, como para los fines de este trabajo no aplica evaluación experimental para obtener los parámetros que facilitan el cálculo de U_t y realizar una estimación del calor total, se asumirá un porcentaje de pérdidas de 2% en la cámara, el cual deberá ser corroborado mediante experimentación en estudios posteriores o en su defecto obtener el valor de los parámetros para el cálculo de U_t .

$$Q_T = \frac{637677,03 \text{ kJ}}{0,98} = 650690,84 \text{ kJ}$$

5.3.6. Fenómenos de transporte

El secado es una operación unitaria con comportamiento característico independientemente de la tecnología aplicada para lograr el objetivo de reducción de humedad. Transferencia de energía, masa y cantidad de movimiento se presentan de forma simultánea haciendo complejo el proceso.

A continuación se relacionan las ecuaciones que describen los fenómenos de transporte que se presentan en el interior del secador solar en los diferentes componentes. Las ecuaciones no serán resueltas pero en el apartado 5.3.6.4, se referenciarán los métodos numéricos y procedimientos mediante los cuales puede hallarse solución aproximada.

5.3.6.1. Masa

La transferencia de agua en forma de vapor durante el secado es el fenómeno de transferencia de masa más importante. La ecuación del balance del agua dentro de la cámara de secado es la que lo representa y viene dada por:

$$\rho_a V \frac{dH}{dt} = A_{in} \rho_a H_{in} v_{in} - A_{out} \rho_a H_{out} v_{out} + D_p A_p \rho_p \frac{dM_p}{dt} \quad [66]$$

Que explícitamente quiere decir que:

La tasa de acumulación de humedad en el aire al interior del secador = tasa de humedad que entra en el aire ambiente – la tasa de humedad que sale con el aire del secador + la tasa de humedad retirada del producto dentro del secador.

Dónde:

ρ_a Es la densidad del aire

V el volumen del aire

$\frac{dH}{dt}$ El diferencial de humedad en el aire en el tiempo t

A_{in} Área de entrada del colector de aire

H_{in} Humedad del aire a la entrada

v_{in} Velocidad del aire a la entrada

A_{out} Área de la salida del aire de la cámara

H_{out} Humedad del aire a la salida

v_{out} Velocidad del aire a la salida

D_p Coeficiente de difusividad del mango

A_p Área superficial del mango

ρ_p Densidad del mango

$\frac{dM_p}{dt}$ Diferencial de masa del mango en el tiempo t

5.3.6.2. *Energía*

La difusión de calor en el proceso puede ser estudiada con base en el balance de energía del producto al interior de la cámara de secado. Y establece las diferentes relaciones a las cuales está expuesto el producto dentro de la cámara de secado, así:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = A_p h_{c,p-a} (T_a - T_p) + D_p A_p \rho_p [L_p + C_{pv} (T_a - T_p)] \frac{dM_p}{dt}$$

Explícitamente es:

La tasa de acumulación de energía térmica del producto = tasa energía térmica transferida entre el aire y el producto debido a la convección + tasa de pérdida de energía térmica del producto debido a la pérdida debido a las pérdidas de calor sensible y latente del producto.

Dónde:

m_p , masa del producto

c_p , calor específico del producto

$\frac{dT_p}{dt}$, diferencial de temperatura del producto en el tiempo t

A_p , área superficial del producto

$h_{c,p-a}$, coeficiente convectivo de transferencia de calor entre el aire y el producto

T_a , temperatura del aire

T_p , temperatura del producto

D_p , difusividad del agua en el producto

ρ_p , densidad del producto

$\frac{dM_p}{dt}$, diferencial del masa del producto en el tiempo t

5.3.6.3. *Cantidad de movimiento*

El aire presenta desplazamiento de forma vertical y horizontal, en consecuencia se presenta transferencia de momento lineal tanto en x como en y. de forma que las ecuaciones que describen el fenómeno de transporte vienen dados por:

Momento lineal en x:

$$\rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right] = - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right] \quad [189]$$

Momento lineal en y:

$$\rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right] = - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right] + g\beta_T(T - T_\infty) + g\beta_M(C - C_\infty) \quad [189]$$

Siendo:

ρ , densidad

u , velocidad del aire

ν , viscosidad cinemática

g , aceleración de la gravedad

β_T , coeficiente de expansión térmica

β_M , coeficiente de expansión másica

$T - T_\infty$, diferencia de temperatura entre el punto estudiado y las paredes de la cámara

$C - C_\infty$, diferencia de concentración de humedad entre el punto estudiado y las paredes de la cámara

$\frac{\partial u}{\partial t}; \frac{\partial v}{\partial x}$, diferencial de velocidad del aire o la viscosidad cinemática, en el tiempo t

$\frac{\partial u}{\partial x}; \frac{\partial v}{\partial x}$, diferencial de velocidad del aire o la viscosidad cinemática, en la dirección x

$\frac{\partial u}{\partial y}; \frac{\partial v}{\partial y}$, diferencial de velocidad del aire o la viscosidad cinemática, en la dirección y

$\frac{\partial p}{\partial y}$, diferencial de presión del aire, en la dirección y

$\mu \frac{\partial u}{\partial x}; \mu \frac{\partial v}{\partial x}$, producto de la viscosidad aparente por el diferencial de la velocidad del aire o la viscosidad cinemática, en la dirección x

$\mu \frac{\partial u}{\partial y}; \mu \frac{\partial v}{\partial y}$, producto de la viscosidad aparente por el diferencial de la velocidad del aire o la viscosidad cinemática, en la dirección y

5.3.6.4. Solución de ecuaciones

Las ecuaciones anteriores para ser resueltas de forma simultánea debe recurrirse a métodos numéricos como: diferencias finitas, elementos finitos o volúmenes finitos y/o mediante la utilización de software de dinámica de fluidos computacional (CFD, de sus siglas en inglés). Así mismo, las propiedades dinámicas, termodinámicas y difusivas del aire y del mango pueden obtenerse de la literatura o algunas deben ser obtenidas de forma experimental para las condiciones propias del lugar del estudio.

A continuación se plantea un diagrama de flujo para la solución de las ecuaciones:

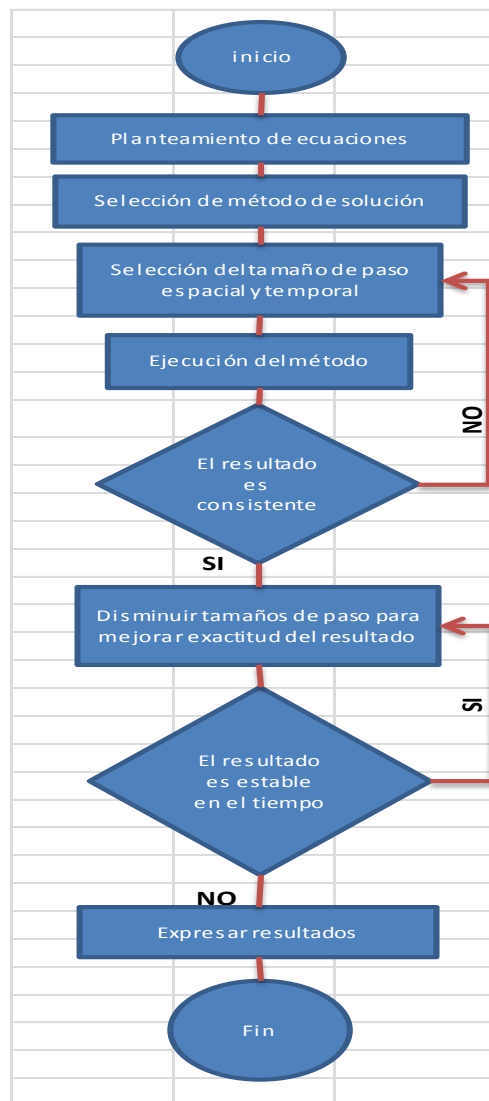


Figura 56. Diagrama de solución ecuaciones fenómenos de transporte

Fuente: el autor

5.3.7. Colección solar

Para que el proceso sea considerado de naturaleza solar debe existir mínimo un 70% de participación de la energía solar en la demanda energética global.

Para lograr la colección es necesario calcular diferentes ángulos para ubicar el colector y re-direccionarlo a lo largo del día y entre días porque la intensidad, dirección y potencia de la energía solar es instantánea y cambia significativamente en el tiempo.

El primero es el ángulo de declinación solar δ , que está relacionado con el fenómeno de rotación de la tierra. Este ángulo se forma entre la línea que une los centros del sol y la tierra y el plano ecuatorial. El ángulo de rotación terrestre es de $23,45^\circ$ con respecto a la normal del plano de la eclíptica [190].

$$\delta = 23,45 * \sin \left[360 * \frac{284 + n}{365} \right]$$

Donde n es el día del año.

Seleccionamos arbitrariamente la operación para el día primero de agosto, día 213.

$$\delta = 23,45 * \sin \left[360 * \frac{284 + 213}{365} \right] = 17,91^\circ$$

Ángulo horario, ω , se define como el ángulo que pasa por entre dos planos que pasan por el eje de rotación de la tierra, pasando uno por una localización específica de la tierra y el otro por el sol. El ángulo horario en el cenit, 12 horas solares, es 0° y contará con ángulos negativos antes y positivos posteriores al cenit a razón de 15° por hora [190].

Es decir que para operar el secador desde las 8 a.m. hasta las 4 p.m. deberá tomarse a cuenta el ángulo solar en el siguiente rango:

Tabla 20. Ángulo horario para trabajo de 8:00 a.m. hasta 4.00 p.m.

Hora	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00
Ω	-60	-45	-30	-15	0	15	30	45	60

Altura solar, α , se define como el ángulo que existe entre la horizontal y la línea que une al observador con el sol [190].

$$\alpha = a \sin(\sin \phi * \sin \delta + \cos \phi * \cos \delta * \cos \omega)$$

Donde ϕ es la latitud del lugar. Para el caso de Anapoima es $4,55^\circ$ Norte.

Luego, a manera de ejemplo, el ángulo para ubicar el colector a las 8:00 a.m. el día primero de agosto es:

$$\alpha = a \sin(\sin 4,55 * \sin 17,91 + \cos 4,55 * \cos 17,91 * \cos -60) = 29,91^\circ$$

El ángulo complementario de la altura solar se denomina ángulo cenital, Θ_z ,

$$\theta_z = 90 - \alpha$$

Para el caso particular,

$$\theta_z = 90 - 29,91 = 60,08^\circ$$

El ángulo azimutal, γ_s se define como aquel que se forma entre la proyección de la línea que une el sol con el observador sobre la superficie terrestre y la dirección sur. Este ángulo es 0° cuando el sol se ubica en dirección sur, valores negativos para orientación al oriente y positivos para occidente. Se calcula a partir de la altura solar o el ángulo cenital, ángulo horario y declinación [190].

$$\gamma_s = a \sin\left(\frac{\cos \delta * \sin \omega}{\cos \alpha}\right) = a \sin\left(\frac{\cos \delta * \sin \omega}{\sin \theta_z}\right)$$

Calculando,

$$\gamma_s = a \sin\left(\frac{\cos 17,91 * \sin -60}{\cos 29,91}\right) = -71,93^\circ$$

El ángulo de salida y puesta de sol, ω_{sh} , es el que forma la línea que une al sol en su salida y su puesta con el observador, y la dirección sur.

$$\omega_{sh} = \text{acos}(-\tan \phi * \tan \delta)$$

Calculando,

$$\omega_{sh} = \text{acos}(-\tan 4,55 * \tan 17,91) = 91,47^\circ$$

Finalmente con los datos anteriores se puede calcular la duración del día, DD, en horas,

$$DD = \frac{2 * \omega_{sh}}{15^\circ}$$

Para el caso,

$$DD = \frac{2 * 91,47^\circ}{15^\circ} = 12,19 \text{ horas}$$

Para la determinación de la inclinación óptima, β , que debe tener el colector para obtener recibir la máxima radiación perpendicular en el día señalado se procede:

$$\beta_{\text{día}} = \phi - \delta_{\text{día}}$$

$$\beta_{01 \text{ agosto}} = 4,55 - 17,91_{01 \text{ agosto}} = - 13,36^\circ$$

Esto quiere decir que el colector debe inclinarse $13,36^\circ$ en dirección al sur al iniciar el día y deberá desplazarse de forma que garantice todo el día la misma inclinación para coleccionar la máxima radiación.

5.3.8. Dimensionamiento y especificaciones constructivas

5.3.8.1. Colector

Para calcular el área ocupada por el aire durante un día de operación se utiliza,

$$m = A * \rho * v$$

Donde m es la masa de aire que ingresa al colector, ρ es la densidad en kg/m^3 a la temperatura de entrada y v la velocidad del aire a la entrada que se asume $2,3 \text{ m/s}$ como media para Anapoima.

La densidad se calcula a partir de,

$$\rho_{T_a} = \frac{1.293}{1 + 0.00367T_a}$$

$$\rho_{26^{\circ}C} = \frac{1.293}{1 + 0.00367 * 26} = 1,1803 \frac{kg}{m^3}$$

El valor de la masa de aire (m) se debe ajustar así: el equipo funcionará 24 horas diarias (86400 s). Luego el flujo másico de aire que entra al colector es 0,115 kg/s.

Despejando A y calculando,

$$A_{ocupada\ por\ el\ aire} = \frac{m}{\rho * v} = \frac{0,115 \frac{kg}{s}}{1,1803 \frac{kg}{m^3} * 2,3 \frac{m}{s}} = 0,042 m^2$$

Del mismo modo, la placa absorbidora deberá emitir hacia el aire 650690,84 kJ = 180,69 kWh y suponiendo que la potencia efectiva de la radiación captada es de 4,3 kW/m²/día. Sabiendo que en el caso puntual del día 01 de agosto, la duración del día DD, es de 12,19 horas, la radiación de la potencia establecida es:

$$E = 4,3 \frac{kW}{m^2 * día} * \frac{día}{12,19\ horas} = 0,35 \frac{kWh}{m^2}$$

Luego el área efectiva (absorción 100%) que debe tener la placa es de,

$$A_{placa} = \frac{180,69 kWh}{0,35 \frac{kWh}{m^2}} = 515,257 m^2$$

Se observa que el área de colección deberá ser de enorme envergadura, por ejemplo puede proponerse una configuración de 20 bancos de placas colectoras de 25,762 m², compuestos de 5 placas cada uno, las cuales a su vez pueden ser de 2 m de ancho por 2,57 m de largo. Siendo aún unas dimensiones difíciles de lograr en la realidad.

Para solucionar este aspecto es que se recurre a los sistemas auxiliares de calentamiento. En este caso se propone un sistema de GLP (gas licuado de petróleo) que cubra un 30% de la demanda energética diaria y así garantizar que el proceso cumpla con el 70% mínimo de uso de recurso solar.

Bajo estas condiciones se recalcula el área total de las placas para cubrir la demanda energética:

$$A_{placa} = \frac{180,69 \text{ kWh} * 0,7}{0,35 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}} = 361,38 \text{ m}^2$$

Así la configuración de placas absorbedoras se puede establecer de la siguiente manera: 20 bancos de placas colectoras, dispuestas en dos bloques de 10 a izquierda y derecha de la cámara de secado, cada banco compuesto de 5 placas ubicadas en paralelo, cada una con un área de 3,61 m², que se obtiene construyendo placas de 2 m de largo por 1,8 de ancho.

A continuación se sugieren especificaciones constructivas para un prototipo:

Dimensiones de cada placa absorbidora: 2 m de largo; 1,8 m de ancho.

Espesor de la placa absorbidora: 0,002 m

Material de la placa absorbidora: chapa galvanizada ondulada pintada de negro

Distancia entre la placa y la cubierta (altura del área de colección). Esta se calcula dividiendo el área ocupada por el aire a la entrada de los colectores entre el ancho de la placa absorbidora:

$$h_{de \text{ la sección colectora}} = \frac{0,042 \text{ m}^2}{1,8 \text{ m}} = 0,024 \text{ m}$$

Material de la cubierta: lámina de plástico transparente

Espesor de la cubierta: 0,003 m

Dimensiones de la cubierta: 2,05 m de largo; 1,85 m de ancho.

Material del armazón de soporte: chapa galvanizada

Espesor de la lámina de chapa galvanizada: 0,003 m

Espesor del aislamiento del armazón de soporte: 0,025 m

Dimensiones del armazón de soporte: 2,087 m de ancho; 1,887 m de largo; 0,06 m de alto

Observaciones: Tener en cuenta que adicionalmente deberá definirse el mecanismo que permite la inclinación de los colectores al ángulo requerido, la cual se realiza in situ. Del mismo modo, aunque a un elevadísimo costo, se puede crear un sistema automatizado que permita al colector seguir al sol a lo largo del día y así garantizar la máxima absorción diaria.

5.3.8.2. Cámara

A semejanza del esquema trabajado en Argentina y anteriormente explicado, en el cuál cada carro es capaz de cargar 84 kg de producto. De acuerdo con las especificaciones dadas para las bandejas se espera que cada carro tenga las siguientes dimensiones: 1,75 m de alto, 1,003 m de ancho y 1,003 m de largo.

Calculando el requerimiento de carros para la carga de 1640 kg,

$$N_{carros} = \frac{1640 \text{ kg}}{84 \frac{\text{kg}}{\text{carro}}} = 20,5 \approx 21$$

Calculando la superficie ocupada por los carros,

$$A_{carros} = 21 * 1,006 \text{ m}^2 = 21,126 \text{ m}^2$$

Definiendo 3 bloques de 7 carros cada uno, adicionando 0,1 m entre las paredes y los carros y 0,25 m entre el techo de la cámara y los carros con el fin de facilitar la circulación del aire, las dimensiones constructivas del interior de la cámara son:

Ancho: 3,21 m

Largo: 7,22 m

Alto: 2 m

Adicionando 0,05 m de aislamiento de lana de vidrio entre las paredes y techo; la construcción de las paredes como tal será con láminas de chapa galvanizada de 0,003 m de espesor, que guardan en su interior el aislamiento. El techo se construye con diseño de dos aguas (capilla) con un ángulo de inclinación de 15°, que evita la acumulación de suciedad y agentes indeseables.

Las dimensiones externas de la cámara son:

Largo: 7,29 m

Ancho: 3,28 m

Alto cámara: 2,06 m

Alto Techo: $\tan 15^\circ * 1,69 \text{ m} = 0,45 \text{ m}$

Altura total: 2,51 m

5.3.8.3. Sistema de calentamiento auxiliar

Anteriormente se habló de utilizar GLP para cubrir el 30% de la demanda energética diaria del proceso,

$$Q_{GLP} = 180,69 \text{ kWh} * 0,3 = 54,207 \text{ kWh}$$

La capacidad calorífica del GLP es: 47,063 BTU/kg

Convirtiendo a kWh,

$$47,063 \frac{\text{BTU}}{\text{kg}} * 3412,1416 \frac{\text{kWh}}{\text{BTU}} = 160585,62 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$$

Luego la reserva de combustible necesaria:

$$m_{GLP} = \frac{54,207 \text{ kWh}}{160585,62 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}} = 0,00033 \text{ kg}$$

Considerando unas pérdidas por disipación del 30% en el quemador, la masa total que debe ser quemada diariamente es:

$$m_{GLP} = \frac{0,00033 \text{ kg}}{0,7} = 0,00047 \text{ kg}$$

5.4. Modelos matemáticos para secado de frutas

Este apartado se incluye como complemento de la parte de ingeniería porque los modelos de secado son útiles para la optimización de equipos. Los modelos son utilizados para la predicción del comportamiento del secado dentro del equipo, las frutas frescas en general presentan similitud en el proceso de secado.

Los modelos matemáticos ampliamente aceptados para describir los procesos de secado en productos agrícolas se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 21. Modelos matemáticos de secado

Modelo	Ecuación
Newton	$MR = \exp(-kt)$
Page	$MR = \exp(-kt^n)$
Page modificado	$MR = \exp[(-kt)^n]$
Henderson y Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
Logarítmico	$MR = a \exp(-kt) + c$
De dos términos	$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$
Exponencial de dos términos	$MR = a \exp(-k_0t) + (1 - a) \exp(-k_0at)$
Verma et al.	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt)$
Aproximación de difusión	$MR = a \exp(-k_0t) + (1 - a) \exp(-k_0bt)$
Wang y Sing	$MR = 1 + at + bt^2$
Midilli y Kucuk	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$

Adaptado de: [191, 192]

Siendo MR (moisture ratio) la tasa de secado en el tiempo t, mientras que a, b, k, n, g, k₀, k₁ son constantes que se calculan y varían de acuerdo al modelo seleccionado.

En la siguiente tabla se relacionan algunos resultados de estudios realizados con diferentes modelos para el secado de frutas, vegetales y otros productos agroalimentarios en secadores solares, entre ellas el mango:

Tabla 22. Modelos de secado utilizados en estudios con productos agrícolas

Producto	Modelo
Frutas Frescas	Karathanos y Belessiotis utilizaron el modelo de Page para las simulaciones encontrando resultados satisfactorios. [193]
Semillas de uvas	Cakmak encontró que el modelo de Midilli es el más apropiado para describir el secado [164]
Chile picante	Tunde evaluó los modelos de Newton, Henderson-Pabis, logarítmico y de Page; encontrando que el de Page es el más adecuado [194].
Mango	Dissa evaluó 10 modelos de secado en dos variedades de mango encontrando que el modelo de dos términos y el modelo de aproximación de la difusión son los mejores para el caso estudiado [191]
Hojas de menta	Akpinar et al. Establecieron que el modelo que mejor se ajusta a los resultados experimentales del secado es el de Wang y Singh [195], conclusiones similares fueron obtenidas por Lamnatou et al. [89].
Algas marinas rojas	Los modelos de Verma et al. y aproximación de la difusión son los mejor ajustados para el secado de menta en el estudio de Sallam [172]. El modelo de Page es la mejor opción que encontraron Fudholi et al. Para describir el secado solar de este producto [129].
Hongos comestibles	Reyes et al. Definieron que el modelo de Page es el más ajustado a los resultados obtenidos en el secado [177].

Fuente: El autor

5.5. Conclusiones

Como resultado del caso propuesto se encuentra que teóricamente para procesar 1640 kg/día de mango fresco mediante secado solar en las condiciones de altitud, velocidad media del viento y radiación solar media, del municipio de Anapoima, Cundinamarca, se requieren 650690,84 kJ, de los cuales la colección solar puede aportar el 70% y el 30% restante mediante un sistema auxiliar de calentamiento a partir de GLP.

A partir de las ecuaciones para inclinación de los colectores se pudo determinar que un ángulo conveniente para ubicar el colector al iniciar el día 01 de agosto es a $13,36^\circ$ en dirección sur. Esto da por sentado que cada día se debe calcular el ángulo óptimo para captar la máxima radiación.

La cantidad de energía que debe aportar el sistema de calentamiento auxiliar puede ser suplida con la combustión de 0,00047 kg de GLP/día.

Las dimensiones internas sugeridas para un prototipo de cámara de secado son: Ancho: 3,21 m, Largo: 7,22 m y Alto: 2 m, para garantizar la disposición de 3 hileras de 7 carros con capacidad de 80 kg cada uno.

Para optimizar el proceso de secado de mango, será necesaria la construcción de un prototipo a escala conveniente y evaluar la evolución del secado comparando los resultados contra los modelos teóricos referenciados y así definir las variables para mejorar el proceso.

Las ecuaciones de fenómenos de transporte que quedan expuestas pueden ser resueltas por un método conveniente como: diferencias finitas, elementos finitos o volúmenes finitos; más la determinación de datos a partir de ecuaciones teóricas o ensayos experimentales.

CONCLUSIONES

El valor del mercado de snacks combinando Estados Unidos de Norteamérica y la Unión Europea es \$ USD 217 mil millones anuales. De los cuales en Estados Unidos \$ USD 1,4 mil millones corresponden a la categoría de saludables.

Colombia tiene un mercado de snacks por \$ USD 500 millones anuales. Actualmente no se tienen cifras consolidadas de mercado en la categoría saludables.

ANDIEQUIP S.A.S y FRUTAS FRUANDES LTDA. Son las dos empresas nacionales más visibles del sector de frutas tropicales deshidratadas con vocación exportadora. De la segunda se conoce que en 2012 realizó exportaciones totales por \$ USD 126932.

La cadena agroindustrial del mango en Colombia no está consolidada. El eslabón primario tiene fuertes debilidades y es disperso; el eslabón secundario es pequeño y está atomizado, compuesto por unos pocos grandes jugadores y jugadores de pequeña envergadura; finalmente el eslabón terciario opera prácticamente de manera independiente.

El avance del estudio de secadores solares es interesante y significativo en aspectos de: colección, almacenamiento de energía, diseño, prototipo y puesta en marcha de equipos en diferentes escalas y con aplicaciones a necesidades específicas en diferentes lugares del mundo.

En aplicaciones hortofrutícolas los secadores solares han sido utilizados para procesar: banano mango, pimiento para pimentón, arroz, maíz, carioca, mango, manzana, mandioca, piña, ciruelas, fresa, tomate limón, uvas, cebolla, papas, patatas dulces, tomillo, menta, jengibre, zanahoria, setas, chili rojo, chícharos, entre otros.

A nivel industrial los secadores de convección forzada presentan el mayor interés y desarrollo.

Teóricamente para procesar 1640 kg/día de mango fresco mediante secador solar en las condiciones de altitud, velocidad media del viento y radiación solar media, del municipio de Anapoima, Cundinamarca, se requieren 650690,84 kJ, de los cuales la colección solar puede aportar el 70% y el 30% restante mediante un

sistema auxiliar de calentamiento a partir de GLP que para lograrlo se requiere la combustión de 0,00047 kg de GLP/día.

Las dimensiones internas sugeridas para un prototipo de cámara de secado para el proceso con mango son: Ancho: 3,21 m, Largo: 7,22 m y Alto: 2 m, para garantizar la disposición de 3 hileras de 7 carros con capacidad de 80 kg cada uno.

Para los alcances de este estudio y con base en la información obtenida se puede decir de forma preliminar que: por oportunidad de mercado, disponibilidad de oferta de materia prima, potencial solar y conocimiento técnico del proceso con secadores solares: sí es posible usar secadores solares industriales para procesar mango común en Colombia. Sin embargo, para obtener un diagnóstico definitivo es obligatorio analizar la respuesta técnica *in situ* mediante la implementación de un prototipo, igualmente realizar las evaluaciones: financiera y logística.

RECOMENDACIONES

Disponer de software especializados para la solución de ecuaciones diferenciales simultáneas de los fenómenos de transporte o software para la simulación de dinámica de fluidos para comprender mejor el comportamiento del aire y la difusión de humedad durante el proceso.

Avanzar en el estudio del diseño de colectores solares y medios de almacenamiento energético, incluyendo aspectos de costos. Especialmente estudiar los colectores de placa plana, los colectores parabólicos y los medios de almacenamiento energético con materiales de bajo costo como: agua, rocas o arena.

Construir prototipos a escala de planta piloto que permitan contar con información experimental del comportamiento del secador a lo largo del tiempo. Porque aspectos como el régimen de lluvias bimodal que tiene la zona Andina donde se ubica el municipio de Anapoima pueden complicar la viabilidad del proceso en algunos meses del año.

Realizar un diseño de secador solar tipo túnel invernadero-híbrido para el mismo lugar y compararlo con el aquí propuesto para evaluar cuál es más conveniente.

Realizar estudios de pre-factibilidad en los cuales se integre el procesamiento de diferentes frutas de la región que permitan la explotación durante todo el año y lograr así un volumen de producción que posiblemente disminuya costos en operaciones logísticas y de comercio.

Calcular y simular una operación con colectores automatizados que “siguen” al sol, del mismo modo incluir aspectos de costos y viabilidad de disponer de ese tipo de tecnología en Colombia.

Investigar y analizar estratégicamente sí para lograr mayor producción o competitividad, existe otro municipio del Departamento de Cundinamarca donde se pueda implementar la tecnología del secado solar para procesamiento del mango u otras frutas. Esto se propone porque los aspectos de infraestructura de transporte y zonas de concentración productiva pueden variar la conveniencia de seleccionar otro lugar a pesar del importante potencial de energía solar y nivel de producción de mango del municipio de Anapoima.

Establecer una línea de investigación sobre energías renovables dentro de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia, la cual podría tener potencial transversal a varios programas de pregrado en más de una Escuela.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ASOHOFRUCOL, *Plan de negocios de mango*, Bogotá, 2013.
- [2] AKTIVA Servicios Financieros, «La industria del procesamiento y conservación de frutas en Colombia,» Bogotá, 2013.
- [3] INDUSTRIA ALIMENTICIA, «Generalidades del mercado europeo de snacks,» 08 04 2009. [En línea]. Available: <http://www.industriaalimenticia.com/articulos/generalidades-del-mercado-europeo-de-snacks>. [Último acceso: 08 06 2014].
- [4] ORGANIC & WELLNESS NEWS, «Health and wellness lead snacks category,» 08 09 2013. [En línea]. Available: <http://organicwellnessnews.com/en/>. [Último acceso: 08 06 2014].
- [5] ASOHOFRUCOL, *Informe Final. Programa de transformación productiva*, Bogotá, 2013.
- [6] REVISTA INDUSTRIA ALIMENTICIA , «Perspectiva global para el mercado de panificación y snacks,» 01 05 2013. [En línea]. Available: <http://www.industriaalimenticia.com/articulos/86519-perspectiva-global-del-mercado-de-panificacion-y-snacks>. [Último acceso: 07 06 2014].
- [7] FAO, «La nueva carga del mundo en desarrollo: la obesidad,» 01 2002. [En línea]. Available: <http://www.fao.org/focus/s/obesity/obes2.htm>. [Último acceso: 08 06 2014].
- [8] Organización Mundial de la Salud, «Obesidad y sobrepeso,» 05 2014. [En línea]. Available: <https://apps.who.int/infobase/>. [Último acceso: 10 06 2014].
- [9] AGENCIA DE NOTICIAL: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, «Frutas tropicales, prometedor sector para comercio internacional,» 30 09 2013. [En línea]. Available: <http://www.agenciadenoticias.unal.edu.co/ndetalle/article/frutas-tropicales-prometedor-sector-para-comercio-internacional.html>. [Último acceso: 10 06 2014].
- [10] NUTRACEUTICALS WORLD, «Snacks and Bars,» 02 01 2014. [En línea]. Available: <http://www.nutraceuticalsworld.com/>. [Último acceso: 08 06 2014].
- [11] TRAIDCRAFT, «Fair trade snack,» [En línea]. Available: <http://www.traidcraftshop.co.uk/c-209-fair-trade-and-organic-food-and-drink.aspx>. [Último acceso: 10 06 2014].

- [12] Breaking News on Food & Beverage Development - North America, «Health/weight-conscious consumers are driving the gluten free market, not celiacs, says Mintel,» 15 10 2013. [En línea]. Available: <http://www.foodnavigator-usa.com/Markets>. [Último acceso: 07 06 2014].
- [13] PREPARED FOODS, «A Healthy snacks market,» 27 03 2013. [En línea]. Available: <http://www.preparedfoods.com/>. [Último acceso: 10 06 2014].
- [14] IBIS World, «Snack food production in the US: Market research report,» 01 01 2014. [En línea]. Available: <http://www.prweb.com/recentnews/>. [Último acceso: 10 06 2014].
- [15] PROCHILE, «Estudio de mercado snacks de fruta deshidratada EE.UU.,» 2011. [En línea]. Available: http://www.prochile.gob.cl/wp-content/blogs.dir/1/files_mf/documento_08_12_11174052.pdf. [Último acceso: 11 06 2014].
- [16] PREPARED FOOD, «The market of healthy snacks,» 13 09 2013. [En línea]. Available: <http://www.preparedfoods.com/>. [Último acceso: 05 06 2014].
- [17] EUROPEAN SNACKS ASSOCIATION, «Snacks magazine,» [En línea]. Available: <http://www.esaonline.org.uk/snacksmag/Media-pack-2014.pdf>. [Último acceso: 12 06 2014].
- [18] CI Export Marketing Agency, «El mercado europeo del mango y sus subproductos,» Bogotá, 2012.
- [19] EUROPEAN SNACKS ASSOCIATION , «Sweet & Savoury snacks in India,» 05 2014. [En línea]. Available: http://www.euromonitor.com/Sweet_And_Savoury_Snacks?DCMP=AFC-ESA. [Último acceso: 08 06 2014].
- [20] EUROMONITOR INTERNACIONAL, «Snacks bars in China,» 01 2014. [En línea]. Available: http://www.euromonitor.com/packaged-food?__hstc=753710.a44179460e056645e411f320fa9e3de3.1403408303972.1403408303972.1403408303972.1&__hssc=753710.1.1403408303972&__hsfp=4003175905. [Último acceso: 05 06 2014].
- [21] REVISTA INDUSTRIA ALIMENTICIA, «El snack en Latinoamérica,» 30 04 2008. [En línea]. Available: <http://www.industriaalimenticia.com/articles/el-snack-en-latinoamerica>. [Último acceso: 20 06 2014].
- [22] PORTAL FRUTÍCOLA, «Potencial y desafíos de los snacks de frutas en el mercado,» 22 11 2012. [En línea]. Available: <http://www.portalfruticola.com/2012/11/22/potencial-y-desafios-de-los-snacks-de->

frutas-en-el-mercado/. [Último acceso: 08 06 2014].

- [23] CNN EXPANSIÓN, «Emprenden con botanas saludables,» 24 10 2013. [En línea]. Available: <http://www.cnnexpansion.com/expansion/2013/10/17/emprenden-con-botanas-saludables>. [Último acceso: 10 06 2014].
- [24] REVISTA LÍDERES, «La fruta seca suma consumidores locales,» 22 07 2013. [En línea]. Available: <http://www.revistalideres.ec/>. [Último acceso: 07 06 2014].
- [25] EFE. EMPRESAS, «El consumo de aperitivos y snacks crecerá un 15% durante Brasil 2014,» 12 06 2014. [En línea]. Available: <http://www.efeempresas.com/noticia/el-consumo-de-aperitivos-y-snacks-crecera-un-15-durante-brasil-2014/>. [Último acceso: 16 06 2014].
- [26] FRESH PLAZA, «Fresh Plaza: noticias del sector de frutas y verduras,» 18 06 2013. [En línea]. Available: <http://www.freshplaza.es>. [Último acceso: 07 06 2014].
- [27] NOTIAGRO, «Chile se posiciona como el cuarto comprador mundial de mango purano,» 06 06 2014. [En línea]. Available: <http://www.cepes.org.pe/notiagro/>. [Último acceso: 07 06 2014].
- [28] FRESH PLAZA, «Ecuador: Frutas deshidratadas con gran potencial en Reino Unido,» 27 09 2013. [En línea]. Available: <http://www.freshplaza.es/sector/2/Frutas>. [Último acceso: 10 06 2014].
- [29] Universidad de los Hemisferios, «WILAPA, un emprendimiento saludable,» 01 2014. [En línea]. Available: <http://investiga.ide.edu.ec/index.php/revista-perspectiva/228-enero-2014/1002-wipala-un-emprendimiento-saludable>. [Último acceso: 08 06 2014].
- [30] COMUNICA, «FOB se compromete a apoyar certificación de plantaciones de frutas,» 17 07 2013. [En línea]. Available: <http://www.comunicacarmen.com.mx/principal.php>. [Último acceso: 08 06 2014].
- [31] VENTUM, «Artículo: Proceso de liofilización,» [En línea]. Available: <http://www.ventumgourmet.com/contenido/noticias/view/Proceso-de-liofilizacion>. [Último acceso: 10 06 2014].
- [32] D. M. Castaño Jaramillo, Y. Castro Hurtado y C. Hoyos Gómez, «Canal moderno de distribución retail,» 25 06 2011. [En línea]. Available: <http://www.slideshare.net/yenncash/canal-moderno-de-distribucin>. [Último acceso: 10 06 2014].
- [33] KIENYKE, «Las empresas colombianas que le dan la pelea a las multinacionales,» 15 10 2014. [En línea]. Available: <http://www.kienyke.com/economia>. [Último

acceso: 08 06 2014].

- [34] DIARIO LA REPÚBLICA, «Snacks venden más de 200000 millones,» 07 10 2013. [En línea]. Available: <http://www.larepublica.co/>. [Último acceso: 10 06 2014].
- [35] REVISTA PORTAFOLIO, «Pasabocas, un mercado crujiente de ventas millonarias,» 27 06 2013. [En línea]. Available: www.portafolio.co. [Último acceso: 08 06 2014].
- [36] M. Diaz Sandoval, «Los planes de Turquía con Colombia,» 11 03 2014. [En línea]. Available: <http://www.elespectador.com/noticias/economia>. [Último acceso: 10 06 2014].
- [37] J. Jimenez, F. Malagón y N. Contreras, *Plan de negocios para el procesamiento y comercialización de fruta deshidratada*, Bogotá: Universidad de la Sabana, 2012.
- [38] C.I. ANDIEQUIP S.A.S., [En línea]. Available: <http://www.andiproductions.com/>.
- [39] FRUANDES, «,» [En línea]. Available: <http://www.fruandes.com/index.php?lang=es>.
- [40] CORPOICA-AGRONET, *Módulo 1. Factores pre-cosecha que inciden en la calidad y post-cosecha del mango*, Bogotá, 2009.
- [41] CORPOICA-ASOHOFrucol, *Modelo tecnológico para el cultivo del mango en el valle del alto Magdalena en el departamento del Tolima*, Bogotá: Prensa-Asohofrucol, 2013.
- [42] FAO, *Pérdidas y desperdicio de alimentos en el mundo*, Suecia-Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2011.
- [43] J. Navarro España y E. Baldovino Villacob, *Perspectivas de mercados internacionales para productos agroindustriales potenciales en Bolívar*, Cartagena de Indias: Cámara de comercio de Cartagena, 2007.
- [44] AGROCADENAS COLOMBIA, «La industria procesadora de frutas y hortalizas en Colombia,» Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural , Bogotá, 2005.
- [45] FAO, *Fruta cristalizada*, San Salvador, 2006.
- [46] LEGISCOMEX.COM, *Inteligencia de mercados-Exportación de frutas exóticas colombianas*, Bogotá, 2013.
- [47] S. Mekhilef , R. Saidur y A. Safari, «A review on solar energy use in industries,» *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 15, pp. 1777-1790, 2011.

- [48] S. VijayaVenkataRaman, S. Iniyan y R. Goic, «A review of solar drying technologies,» *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 16, pp. 2652-2670, 2012.
- [49] A. Haro y Y. Llosas, «Modelo matemático de un colector solar bajo condiciones físicas y meteorológicas de la ciudad de Riobamba.».
- [50] V. Passamai y M. Terán, «Secado solar: Proceso de requerimiento de información y generación de transferencia,» de *XXIII congreso de ASADES*, 2000.
- [51] FONDO DE PROTECCIÓN AMBIENTAL, «Secador solar de frutas,» Ministerio del medio ambiente. Gobierno de Chile, Santiago de Chile.
- [52] A. H. Victoria R. y J. C. Burbano J., «Disponibilidad térmica solar y su aplicación en el secado de granos,» *Scientia et technica 1*, vol. 27, 2005.
- [53] V. Belessiotis y E. Delyannis, «Solar drying,» *Solar energy*, vol. 85, pp. 1665-1691, 2011.
- [54] S. A. Costa R. y S. Ferreira R., «Sistema de secado solar para frutos tropicales,» *Información tecnológica*, vol. 18, nº 5, pp. 49-58, 2007.
- [55] C. Orbegozo y R. Arivilca, Energía solar térmica. Manual técnico para termas solares, GREEN ENERGY, 2010.
- [56] S. Avila y J. Marcelo, «Evaluación de un secador solar inclinado con absorbedor de zeolita para granos de cacao CCN51,» *Diss. Cuenca*, 2013.
- [57] R. Righini y H. Grossi Gallegos, «Mapa de energía solar colectada anualmente por un plano inclinado. Un ángulo óptimo en la república Argentina,» de *Cuarto Congreso nacional-Tercer congreso Iberoamericano hidrógeno y fuentes sustentables de energía*, 2011.
- [58] C. Placco, L. Saravia y C. Cadena, *Colectores solares para agua caliente*, INENCO, UNSa-CONICET.
- [59] I. Vidaña, Q. López y E. César, «Caracterización y evaluación de la eficiencia térmica y de secado en un deshidratador híbrido (solar-gas),» *Diss*, 2011.
- [60] S. Janjai, «Experimental and simulated performance of a PV-ventilated solar greenhouse dryer for drying of peeled longan and banana,» *Solar energy*, vol. 83, nº 9, pp. 1550-1565, 2009.
- [61] B. K. Bala y S. Janjai, «Solar drying of fruits, vegetables, spices, medicinal plants and fish: developments and potentials,» *International solar food processing*

conference, 2009.

- [62] M. Watjira, «Solar drying of fruits and windows of oportunities in Ethiopia,» *African journal of food science*, vol. 4, nº 13, pp. 790-802, 2010.
- [63] M. A. Condori, G. Durán y R. Echazú, «Diseño, construcción y análisis de un secador solar industrial en Huacalera, Quebrada de Humahuaca, Argentina,» de *IV conferencia latinoamericana de energía solar - XVII simposio peruano de energía solar*, Lima, 2011.
- [64] A. Lotfalian , M. A. Ghazavi y B. Hosseinzadeh, «Comparing the performance of two type collectors on drying procces of lemon and orange fruits through a passive and indirect solar dryer,» *Journal American Science*, vol. 6, nº 10, pp. 248-251, 2010.
- [65] «Colector solar,» [En línea]. Available: <http://www.uclm.es/profesorado/ajbarbero/FAA/Solar%20termica2.pdf>. [Último acceso: 20 05 2014].
- [66] S. Janjai, «Greenhouse type solar dryer for small-scale dried food industries: development and dissemination,» *International journal of energy and environment* , vol. 3, nº 3, 2012.
- [67] DE ALIMENTOS Y TECNOLOGÍA, «Innovación en el diseño y construcción de un secador solar para frutas y hortalizas».
- [68] R. Costales, «Aplicación de la energía renovable en el secado. Estado del arte y su potencial en las producciones agrícolas,» de *Sobre los derivados de la caña de azucar*, ICIDCA, 2010, pp. 47-53.
- [69] . B. Lyes y A. Belhamri, «Design and simulation of a solar dryer for agriculture products,» *Journal of food engineering*, vol. 59, nº 2, pp. 259-266, 2003.
- [70] D. Lawrence, C. O. Folayan y G. Y. Pam, «Desing, construction and performance evaluation of a mixed-mode solar dryer».
- [71] Maskan, Aysun, S. Kaya y M. Maskan, «Hot air and sun drying of grape leather (pestil).,» *Journal of food engineering*, vol. 54, nº 1, pp. 81-88, 2002.
- [72] A. Munir, U. Sultan y M. Iqbal, «Development and performance evaluation of a locally fabricated portable solar tunnel dryer for drying of fruits, vegetables and medicinal plants,» *Pak J agric sci*, vol. 50, pp. 493-498, 2013.
- [73] S. Mekhilef, S. Z. Famarzi, R. Saidur y Z. Salam, «The applicationofsolartechnologiesforsustainabledevelopment of agriculturalsector,» *RenewableandSustainableEnergyReviews*, vol. 18, pp. 583-594, 2013.

- [74] V. K. Sharma , A. Colangelo, G. Spagna y F. Pistocchi , «Preliminary economic appraisal of solar air heating system used for drying of agricultural products,» *Energy converse manage*, vol. 35, nº 2, pp. 105-110, 1994.
- [75] A. Sreekumar, P. E. Manikantan y K. P. Vijayakumar, «Performance of indirect solar cabinet dryer,» *Energy converse manage*, vol. 49, nº 6, pp. 1388-1395, 2008.
- [76] A. Fudholi, K. Sopian, M. H. Ruslan, M. A. Alghoul y M. Y. Sulaiman, «Review of solar dryers for agricultural and marine products,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 1-30, 2010.
- [77] O. Prakash y A. Kumar, «Solar greenhouse drying: A Review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29, pp. 905-910, 2014.
- [78] E. J. Amir, K. Grandegger, A. Esper, M. Sumarsono, C. Djaya y W. Muhlbauer, «Development of a multi-purpose solar tunnel dryer for use in humid tropics,» *Renew Energy*, vol. 1, nº 2, pp. 167-176, 1991.
- [79] F. K. Forson, M. A. Nazha, F. O. Akuffo y H. Rajakaruna , «Design of mixed-mode natural convection solar crop dryers: application of principles and rules of thumb,» *Renew energy*, vol. 32, nº 14, pp. 2306-2319, 2007.
- [80] J. Banout, P. Ehl, J. Havlik, B. Lojka, Z. Polesny y V. Verner, «Design and performance evaluation of a Double-pass solar drier for drying of red chilli (*Capsicum annum L.*),» *Solar Energy*, vol. 85, pp. 506-515, 2011.
- [81] B. Bena y R. J. Fuller, «Natural Convection solar dryer with biomass back-up heater,» *Solar energy*, vol. 72, nº 1, pp. 75-83, 2002.
- [82] S. M. Shalaby, M. A. Bek y A. A. El-Sebaili, «Solar dryers with PCM as energy storage medium: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 33, pp. 110-116, 2014.
- [83] L. M. Bal, S. Satya, S. N. Naik y V. Meda, «Review of solar dryers with latent heat storage systems for agricultural products,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 876-880, 2011.
- [84] H. P. Garg, R. K. Agarwal y B. A. Kumar, «The effect of plane booster reflectors on the performance of a solar air heater with solar cells suitable for a solar dryer,» *Energy conversion & management*, vol. 32, nº 6, pp. 543-554, 1991.
- [85] D. Y. Goswami, F. Kreith y J. F. Kreider, *Principles of solar Engineering*, Taylor and Francis, 1999.
- [86] J. A. Duffie y W. Beckman, *Solar engineering of thermal processes*, New York:

Wiley Interscience Publication/John Willey and Sons, Inc., 2006.

- [87] A. Fudholi, K. Sopian, M. Y. Othman, M. H. Ruslan y B. Bakhtyar, «Energy analysis and improvement potential of finned double-pass solar collector,» *Energy Conversion and Management*, vol. 75, p. 234–240, 2013.
- [88] E. C. López Vidaña, L. L. Méndez Lagunas y J. Rodríguez Ramirez, «Efficiency of a hybrid solar–gas dryer,» *Solar Energy*, vol. 93, pp. 23-31, 2013.
- [89] C. Lamnatou, E. Papanicolaou, V. Belessiotis y N. Kyriakis, «Experimental investigation and thermodynamic performance analysis of a solar dryer using an evacuated-tube air collector,» *Applied Energy*, vol. 94, p. 232–243, 2012.
- [90] J. K. Afriyie, H. Rajakaruna, M. A. Nazha y F. K. Forson, «Simulation and optimisation of the ventilation in a chimney-dependent solar crop dryer,» *Solar Energy*, vol. 85, pp. 1560-1573, 2011.
- [91] J. K. Afriyie, H. Rajakaruna, M. A. A. Nazha y F. K. Forson, «Mathematical modelling and validation of the drying process in a Chimney-Dependent Solar Crop Dryer,» *Energy Conversion and Management*, vol. 67, pp. 103-116, 2013.
- [92] S. Singh y S. Kumar, «Development of convective heat transfer correlations for common designs of solar dryer,» *Energy Conversion and Management*, vol. 64, pp. 403-414, 2012.
- [93] A. El-Sebaili y S. M. Shalaby, «Solar drying of agricultural products: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 37-43, 2012.
- [94] D. R. Pangavhane, R. L. Sawheny y p. N. Sarsavadia, «Design, development and performance testing of a new natural convection solar dryer.,» *Energy*, vol. 27, p. 579–90, 579–90.
- [95] K. J. Al-Juamili, A. N. Khalifa y T. A. Yassen, «Testing of performance of fruit and vegetable solar drying system in Iraq.,» *Desalination*, vol. 209, pp. 163-170, 2007.
- [96] M. A. Karim y M. A. Hawlader, «Development of solar air collectors for drying applications,» *Energy conversion and management*, vol. 45, pp. 329-344, 2004.
- [97] A. O. Dissa, J. Bathiebo, S. Kam, P. W. Savadogo, H. Desmorieux y J. Koulidiati, «Modelling and experimental validation of thin layer indirect solar drying of mango slices,» *Renewable energy*, vol. 34, pp. 1000-1108, 2009.
- [98] C. Sarsilmaz, C. Yildiz y D. Pehlivan, «Drying of apricots in a rotary column cylindrical dryer (RCCD) supported with solar energy,» *Renewable energy*, vol. 21, pp. 117-127, 2000.

- [99] P. M. Chauhan, C. Choudhury y H. P. Garg, «Comparative performance of coriander dryer coupled to solar air heater and solar air-heater-cum-rockbed storage,» *Applied thermal engineering*, vol. 16, nº 6, pp. 475-486, 1996.
- [100] D. Jain, «Modeling the system performance of multi-tray crop drying using an inclined multi-pass solar air heater with in-built thermal storage.,» *Journal of food engineering*, vol. 71, pp. 44-54, 2005.
- [101] A. A. El-Sebaii, S. Aboul-Enein, M. I. Ramadan y H. G. El-Gohary, «experimental investigation of an indirect type natural convection solar dryer,» *Energy conversion & management*, vol. 43, pp. 2251-2266, 2002.
- [102] V. Shanmugam y E. Natarajam, «Experimental study of regenerative desiccant integrated solar dryer with and without reflective mirror,» *Applied thermal engineering*, vol. 27, pp. 1543-1551, 2007.
- [103] B. O. Bolaji y A. P. Olalusi, «Performance evaluation of a mixed-mode solar dryer,» *AU journal of technology*, vol. 11, nº 4, pp. 225-231, 2008.
- [104] P. P. Tripathy y S. Kumar, «Determination of temperature dependent drying parameters for potato cylinders and slices during solar drying,» *Energy conversion & management*, vol. 49, pp. 2941-2948, 2008.
- [105] I. N. Simate, «Optimization of mixed-mode and indirect-mode natural convection solar dryers,» *Renewable energy*, vol. 28, pp. 435-453, 2003.
- [106] P. P. Singh, S. Singh y S. S. Dhaliwal, «Multi-shelf domestic solar dryer.,» *Energy conversion & management*, vol. 47, pp. 1799-1815, 2006.
- [107] A. P. Omojaro y L. Y. Aldabbagh, «Experimental performance of single and double pass solar air heater with fins and steel wire mesh as absorber,» *Applied energy*, vol. 87, pp. 3759-3765, 2010.
- [108] E. K. Akpınar y F. Kocyigit, «Energy and exergy analysis of a new flat-plate solar air heater having different obstacles on absorber plates,» *Applied energy*, vol. 87, pp. 3438-3450, 2010.
- [109] M. M. Sahu y J. L. Bhagoria, «Augmentation of heat transfer coefficient by using 90 broken transverse ribs on absorber plate of solar air heater,» *Renewable energy*, vol. 30, pp. 2057-2073, 2005.
- [110] D. Jain y G. N. Tiwari, «Effect of green house on crop drying under natural and forced convection I: evaluation of convective mass transfer coefficient,» *Energy conversion and management*, vol. 45, pp. 765-783, 2004.

- [111] G. N. Tiwari , S. Kumar y O. Prakash, «Evaluation of mass transfer coefficient during drying of jaggery,» *Journal of food engineering*, vol. 63, pp. 219-227, 2004.
- [112] A. Farhat, S. Kooli, C. Kerkeni, M. Maalej, A. Fadhel y A. Belghith, «Validation of a pepper drying model in a polyethylene tunnel greenhouse,» *International journal of thermal sciences*, vol. 43, pp. 53-58, 2004.
- [113] T. Koyuncu, «Investigation of the performance improvement of greenhouse type agricultural dryers,» *Renewable energy*, vol. 31, pp. 1055-1071, 2006.
- [114] A. Kumar y G. N. Tiwari, «Effect of shape and size on convective mass transfer coefficient durign greenhouse drying (GHD) of jaggery,» *Journal of food engineering*, vol. 73, pp. 121-134, 2006.
- [115] k. Sacilik, R. Keskin y A. K. Elicin, «Mathematical modelling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato,» *Journal of food engineering*, vol. 73, pp. 231-238, 2006.
- [116] G. N. Tiwari, T. Das, C. R. Chen y P. Barnwal, «Enery and exergy analyses of greenhouse fish drying,» *International journal of exergy*, vol. 6, n° 5, 2009.
- [117] E. K. Ronoh, C. L. Kanali, J. T. Mailutha y D. Shitanda, «THin layer drying kinetics og amaranth (*amaranthus cruentus*) grains in natural convection solar tent dryer,» *African journal of food agriculture nutrition and development* , vol. 10, n° 3, 2010.
- [118] O. Prakash y A. Kumar, «ANFIS modeling of a natural convection greenhouse drying system of jaggery: an experimental validation,» *International journal of sustainble energy*.
- [119] M. Condori y L. Saravia , «The performance of forced convection greenhouse driers,» *Renewable energy*, vol. 13, n° 4, pp. 453-469, 1998.
- [120] M. Condori y L. Saravia, «Analytical model for the performance of the tunnel-type greenhouse drier,» *Renewable energy*, vol. 22, pp. 467-485, 2003.
- [121] M. A. Hossain y B. K. Bala, «Drying of hot chilli using solar tunnel drier.,» *Solar energy*, vol. 81, pp. 85-92, 2007.
- [122] A. Kumar y G. N. Tiwari, «Thermal modeling and parametric study of a forced convection greenhouse drying system of jaggery: an experimental validation,» *International journal of agricultural research*, vol. 1, n° 3, pp. 265-279, 2006.
- [123] S. Kooli, A. Fadhel, A. Farhat y A. Belghith, «A drying of red pepper in open sun and greenhouse conditions mathematical modeling and experimental validation,» *Journal of food engineering*, vol. 79, pp. 1094-1103, 2007.

- [124] S. Nayak y G. N. Tiwari, «Energy and exergy analysis of photovoltaic/thermal integrated with a solar greenhouse,» *Energy and buildings*, vol. 40, pp. 2015-2021, 2008.
- [125] P. Barnwal y G. N. Tiwari, «Grape drying by using hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) greenhouse dryer: an experimental study,» *Solar energy*, vol. 82, pp. 113-1144, 2008.
- [126] N. S. Rhatore y N. L. Panwar, «Experimental studies on hemi cylindrical walk-in type solar tunnel dryer for grape drying,» *Applied energy*, vol. 87, pp. 2764-2767, 2010.
- [127] S. Janjai, P. Intawee, J. Kaewkiewa, C. Sritus y V. Khamvongsa, «A large-scale solar greenhouse dryer using polycarbonate cover: modeling and testing in a tropical environment of Lao People's Democratic Republic,» *Renewable energy*, vol. 36, pp. 1053-1062, 2011.
- [128] L. Bennamoun, «Solar drying of wastewater sludge: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, p. 1061– 1073, 2012.
- [129] h. Fudholi, K. Sopian, M. Y. Othman y M. H. Ruslan, «Energy and exergy analyses of solar drying system of red seaweed,» *Energy and Buildings*, vol. 68, p. 121–129, 2014.
- [130] J. J. Flores-Prieto, K. M. Aguilar-Castro, M. E. Baltazar-López, G. Alvarez, R. Castillo-Rincón y J. C. Bahena-Bustos, «Indoor indirect solar dryer for ceramic craft industry,» *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 28, nº 1, pp. 349-356, 2014.
- [131] A. Mohajer, O. Nematollahi, M. M. Joybari y S. A. Hashemi, «Experimental investigation of a Hybrid Solar Drier and Water Heater System,» *Energy Conversion and Management*, vol. 76, p. 935–944, 2013.
- [132] S. Singh y S. Kumar, «Solar drying for different test conditions: Proposed framework for estimation of specific energy consumption and CO₂ emissions mitigation,» *Energy*, vol. 51, pp. 27-36, 2013.
- [133] J. Wu, L. Zhao, N. Xie, L. Gao, W. Gao, X. Dai y J. Zhang, «Research on the characteristics of a novel solar drying system and its application,» *Energy Procedia*, vol. 14, pp. 399-404, 2012.
- [134] R. Callejas L. y et al, «Modelado de la cinética de secado del nopal (*Opuntia ficus indica*) con energía solar».
- [135] C. C. Ricardo B. y et al, «energía solar y agricultura en Cuba. Concepción y pruebas de un secador solar de plantas medicinales con cubierta de polietileno,» *Desarrollo*

local sostenible, vol. 10, 2011.

- [136] D. Cabrera M. y G. Muñoz, «El secado directo e indirecto de piña».
- [137] I. Pott y et al, «Quantitative determination of beta-carotene stereoisomers in fresh, dried, and solar dried mangoes (*Mangifera indica* L.),» *Journal of agricultural and food chemistry*, vol. 51, nº 16, pp. 4527-4531, 2003.
- [138] E. Ramirez De F. y et al, «Secado solar técnico de Lúcumá (*Lúcumá ovobata* HPK)».
- [139] A. Ocampo, «Modelo cinético del secado de la pulpa de mango,» *Revista EIA* 5, 2006.
- [140] A. A. Hassanain, «Simple solar drying system for banana fruit,» *World journal of agricultural sciences*, vol. 5, nº 4, 2009.
- [141] A. Waheed D. y et al, «Investigation of solar drying of ginger (*Zingiber officinale*): imperial modelling, drying characteristics and quality study».
- [142] S. H. Sengar, A. G. Mohod y Y. P. Khandetod, «Experimental evaluation of solar dryer for kokam fruit,» *Global journal of science frontier research agricultural & biology*, vol. 12, pp. 83-89, 2012.
- [143] A. Iriarte y et al, «Caracterización del secado de pimiento para pimentón en un tendalero solar activo tipo túnel».
- [144] J. Mumba, «Design and development of a solar grain dryer incorporating photovoltaic powered air circulation,» *Energy converse and management*, vol. 37, nº 5, pp. 615-521, 1996.
- [145] R. Best, W. Soto, I. Pilatowsky y L. J. Gutierrez, «Evaluation of a rice drying system using a solar assisted heat pump,» *Renew energy*, vol. 5, pp. 465-468, 1994.
- [146] M. A. Zaman y B. K. Bala, «Thin layer solar drying of rough rice,» *Solar energy*, vol. 42, nº 2, pp. 167-171, 1989.
- [147] S. Janjai, A. Esper y W. Muhlbauer, «A procedure for determining the optimum collector area for a solar paddy drying system,» *Renew energy*, vol. 4, nº 4, pp. 409-416, 1994.
- [148] A. Zomorodian, D. Zare y H. Ghasemkhani, «Optimization and evaluation of a semi-continours solar dryer for cereals (Rice, etc),» *Desalination*, vol. 209, pp. 129-135, 2007.

- [149] G. Roa y I. C. Macedo, «Grain drying in stationary bins with solar heated air,» *Solar energy*, vol. 18, nº 5, pp. 445-449, 1976.
- [150] K. B. Koua, W. F. Fassinou, P. Gbaha y S. Toure, «Mathematical modelling of the thin layer solar drying of banana, mango and cassava,» *Energy*, vol. 34, nº 10, pp. 1594-1602, 2009.
- [151] M. Aktas, I. Ceylan y S. Yilmaz, «Determination of drying characteristics of apple in a heat pump and solar dryer,» *Desalination*, vol. 239, pp. 266-275, 2009.
- [152] A. A. Olufayo y O. J. Ogunkunle, «Natural drying of cassava chips in the humid zone of Nigeria,» *Bioresource Technology*, vol. 58, nº 1, pp. 89-91, 1996.
- [153] B. K. Bala, M. A. Mondol, B. K. Biswas, B. L. Das Chowdury y S. Janjai, «Solar drying pineapple using solar tunnel dryer,» *Renew energy*, vol. 28, nº 2, pp. 183-190, 2003.
- [154] S. Tarhan, «Selection of chemical and thermal pretreatment combination for plum drying at low and moderate drying air temperatures,» *Journal of food engineering*, vol. 79, nº 1, pp. 255-260, 2007.
- [155] A. El-Beltagy, G. R. Gamea y A. H. Amer Essa, «Solar drying characteristics of strawberry,» *Journal of food engineering*, vol. 78, nº 2, pp. 456-464, 2007.
- [156] S. MANAA, M. YOUNSI y N. Moumami, «Solar drying of tomato in the arid area of TOUAT (Adrar, Argelia),» *Energy Procedia*, vol. 36, pp. 511-514, 2013.
- [157] B. Ringeisen, D. M. Barrett y P. Stroeve, «Concentrated solar drying of tomatoes,» *Energy for Sustainable Development*, vol. 19, p. 47-55, 2014.
- [158] J. Stiling, S. Li, P. Stroeve, J. Thompson, B. Mjawa, K. Kornbluth y D. M. Barrett, «Performance evaluation of an enhanced fruit solar dryer using concentrating panels,» *Energy for Sustainable Development*, vol. 16, pp. 224-230, 2012.
- [159] Varun, Sunil, A. Sharma y N. Sharma, «Construction and performance analysis of an indirect solar dryer integrated with solar air heater,» *Procedia Engineering*, vol. 38, pp. 3260-3269, 2012.
- [160] H. H. Chen, C. E. Hernández y T. C. Huang, «A study of the drying effect on lemon slices using a close-type solar dryer,» *solar energy*, vol. 78, nº 1, pp. 97-103, 2005.
- [161] K. S. Jairaj, S. P. Singh y K. Srikant, «A review of solar dryers developed for grape drying,» *Solar energy*, vol. 83, nº 9, pp. 1698-1712, 2009.
- [162] D. R. Pangavhane y R. L. Sawhney, «Review of research and development work on

solar dryers for grape drying,» *Energy converse and management*, vol. 43, nº 1, pp. 45-61, 2002.

- [163] A. Fadhel , S. Kooli, A. Farhat y A. Bellghith, «Study of the solar drying of grapes by three different processes,» *Desalination*, vol. 185, pp. 535-541, 2005.
- [164] G. Cakmak y C. Yildiz, «The drying kinetics of seeded grape in solar dryer with PCM-based solar integrated collector,» *Food and bioproducts processing*, vol. 89, pp. 103-108, 2011.
- [165] A. Kumar y G. N. Tiwariy, «Effect of mass on convective mass transfer coefficient during open sun and greenhouse drying of onion flakes,» *Journal of food engineering*, vol. 79, pp. 1337-1350, 2007.
- [166] P. N. Sarsavadia, «Development of a solar-assited dryer and evaluation of energy requirement for the drying of onion,» *Renew energy*, vol. 32, nº 15, pp. 2529-2547, 2007.
- [167] S. Chouicha, A. Boubekri, D. Mennouche y M. H. Berrbeuh, «SOLAR DRYING OF SLICED POTATOES. AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION,» *Energy Procedia*, vol. 36, p. 1276 – 1285, 2013.
- [168] M. S. Hatamipour, H. H. Kazemi, A. Nooralivand y A. Nozarpoor, «Drying characteristicsof six varieties of sweet potatoes in different dryers,» *food bioproducts process*, vol. 85, nº 3, pp. 171-177, 2007.
- [169] L. M. Diamante y P. A. Munro, «Mathematical modeling of the thin layer solar drying of sweet potato slices,» *Solar energy*, vol. 92, nº 2, pp. 164-171, 1993.
- [170] S. Janjai y P. Tung , «Performance of a solar dryer using hot air from roofintegrated solar collectors for drying herbs and spices,» *Renew energy*, vol. 30, nº 14, pp. 2085-2095, 2005.
- [171] A. El-Sebail y S. Shalaby, «Experimental investigation of an indirect-mode forced convection solar dryer for drying thymus and mint,» *Energy Conversion and Management*, vol. 74, p. 109–116, 2013.
- [172] Y. I. Sallam, M. H. Aly, A. F. Nassar y E. A. Mohamed, «Solar drying of whole mint plant under natural and forced convection,» *Journal of Advanced Research*, 2013.
- [173] M. N. Nijmeh, A. S. Ragab, M. S. Emeish y B. A. Jubran, «Design and testing of solar dryers for processing food wastes.,» *Applied thermal engineering*, vol. 18, nº 12, pp. 1337-1346, 1998.
- [174] E. Aritesty y D. Wulandani, «Performance of the Rack Type-Greenhouse Effect

Solar Dryer for Wild Ginger (*Curcuma xanthorrhiza* Roxb.) Drying,» *Energy Procedia*, vol. 47, p. 94 – 100, 2014.

- [175] S. Sevik, «Design, experimental investigation and analysis of a solar drying system,» *Energy Conversion and Management*, vol. 68, pp. 227-234, 2013.
- [176] S. Sevik, M. Aktas, H. Dogan y S. Kocak, «Mushroom drying with solar assisted heat pump system,» *Energy Conversion and Management*, vol. 72, pp. 171-178, 2013.
- [177] A. Reyes, A. Mahn, F. Cubillos y P. Huenulaf, «Mushroom dehydration in a hybrid-solar dryer,» *Energy Conversion and Management*, vol. 70, p. 31–39, 2013.
- [178] A. Fudholi, K. Sopian, M. H. Yazdi, M. H. Ruslan, M. Gabbasa y H. A. Kazem, «Performance analysis of solar drying system for red chili,» *Solar Energy*, vol. 99, pp. 47-54, 2014.
- [179] S. Sahin, G. Sumnu y F. Tunaboyu, «Usage of solar-assisted spouted bed drier in drying of pea,» *Food and Bioproducts Processing*, vol. 91, pp. 271-278, 2013.
- [180] N. Srisittipokakun, K. Kirdsiri y J. Kaewkhao, «Solar drying of *Andrographis paniculata* using a parabolic-shaped solar tunnel dryer,» *Procedia Engineering*, vol. 32, pp. 839-846, 2012.
- [181] J. Banout , I. Kucerova y S. Marek, «Using a double-pass solar drier for jerky drying,» *Energy Procedia*, vol. 30, p. 738 – 744, 2012.
- [182] G. M. Kituu, D. Shitanda, C. L. Kanali, J. T. Mailutha, C. K. Njoroge, J. K. Wainaina y V. K. Silayo, «Thin layer drying model for simulating the drying of *Tilapia* fish (*Oreochromis niloticus*) in a solar tunnel dryer,» *Journal of Food Engineering*, vol. 98, p. 325–331, 2010.
- [183] V. R. Ferro Fernández, J. L. Abdalá Rodríguez, S. Fonseca Fonseca, J. Pantoja Enriquez, A. Torres Ten, C. Buergues Ricardo, P. Griñan Villafañe y G. Ibañez Duharte, «Análisis de opciones para el secado solar de café. Parte 2. Aspectos energéticos, de rendimiento y económicos,» *Tecnología Química*, vol. 20, nº 1, pp. 52-57, 2000.
- [184] REPÚBLICA DE COLOMBIA, *Atlas de radiación solar de Colombia*, Bogotá, 2004.
- [185] J. A. Pereañez, «Búsqueda de alternativas terapéuticas para el accidente ofídico en residuos agroindustriales de frutas tropicales,» *VITAE*, vol. 16, nº 3, 2009.
- [186] M. Cabrera, *Capítulo 1*, 2009.

- [187] V. Quintero, G. Giraldo y M. Cortés, «Desarrollo de pulpa de mango común tratada enzimáticamente y adicionada con calcio, oligofructosa y vitamina C,» *Universidad Nacional de Colombia*, pp. 52-63, 2011.
- [188] GOBIERNO DE COLOMBIA MINAMBIENTE Y MINMINAS., *Atlas de viento y energía eólica de Colombia*, Bogota.
- [189] N. Moraga, C. Zambra, P. Torres y R. Lemus-Mondaca, «Modelado de dinámica de fluidos y transferencia de calor y masa en procesos agroalimentarios por método de volúmenes finitos,» *Dyna*, vol. 78, nº 169, pp. 140-149, 2011.
- [190] L. M. d. G. Ricardo, *Simulación y optimización del captador de un secadero solar*, Leganés: Tesis Pregrado. Universidad Carlos III de Madrid, 2012.
- [191] A. Dissa, D. Bathiebo, H. Desmorieux, O. Coulibaly y J. Kouliadiati, «Experimental characterisation and modelling of thin layer direct solar drying of Amelie and Brooks mangoes,» *Energy*, vol. 36, pp. 2517-2527, 2011.
- [192] T. Usub, C. Lertsatitthakorn, N. Poomsa-ad, L. Wiset, S. Siriamornpun y S. Soponronnarit, «Thin layer solar drying characteristics of silkworm pupae,» *food and bioproducts processing*, vol. 88, pp. 149-160, 2010.
- [193] V. Karathanos y V. Belessiotis, «Application of a thin layer equation to drying data of fresh and semi-dried fruits,» *Journal of Agricultural Engineering Resources*, vol. 74, pp. 355-361, 1999.
- [194] A. Tunde, «Mathematical modeling of sun and solar drying of chilli pepper,» *Renewable energy*, pp. 2139-2145, 2011.
- [195] K. Akpinar, «Drying of mint leaves in a solar dryer and under open sun: Modelling, performance analyses,» *Energy conversion and management*, vol. 51, pp. 2407-2418, 2010.
- [196] C. Sivipaucar y et al, Cálculo y construcción de un secador por convección natural para el secado de plantas medicinales no tradicionales, Centro de desarrollo e investigación en termofluidos CEDIT, pp. 18-30.