

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Mecánica



Diseño, construcción e implementación de un secador solar para disminuir el contenido de humedad del grano de maíz (*Zea mays*) en el municipio de Chiantla, departamento de Huehuetenango, Guatemala

Trabajo de graduación en modalidad de trabajo profesional presentado por

Mayarí Pérez Tay

para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería Mecánica Industrial

Guatemala

2017

Diseño, construcción e implementación de un secador solar para disminuir el contenido de humedad del grano de maíz (*Zea mays*) en el municipio de Chiantla, departamento de Huehuetenango, Guatemala

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Mecánica



Diseño, construcción e implementación de un secador solar para disminuir el contenido de humedad del grano de maíz (*Zea mays*) en el municipio de Chiantla, departamento de Huehuetenango, Guatemala

Trabajo de graduación en modalidad de trabajo profesional presentado por

Mayarí Pérez Tay

para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería Mecánica Industrial

Guatemala

2017

Vo.Bo.:

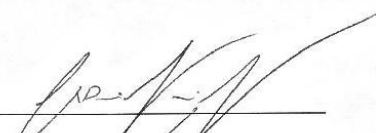
(f) 

(Victor Hugo Ayerdi)

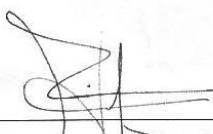
Tribunal Examinador:

(f) 

(Victor Hugo Ayerdi)

(f) 

(Andrés Viaú)

(f) 

(Rony Herrarte)

Fecha de aprobación: Guatemala 7 de diciembre, 2017 ✓

PREFACIO

En este trabajo se expone mi experiencia trabajando desde el diseño hasta la implementación de un secador enfocado a una población de escasos recursos. El proyecto se trabajó en conjunto con el megaproyecto del departamento de ingeniería en ciencias de los alimentos de UVG titulado: “Análisis y propuesta de mejora del manejo post cosecha de maíz (*Zea mays*) para la reducción de aflatoxinas y fumonisinas en el maíz cultivado y consumido en el Departamento de Huehuetenango, Guatemala.” Adicionalmente se contó con el apoyo de la ONG SHARE, de la Universidad de Nebraska-Lincoln, de la Universidad Estatal de Kansas y de USAID.

Durante el proyecto se presentaron diversos retos, sin embargo, haber podido compartir con Don Gabriel (agricultor de maíz en Huehuetenango), personas de la ONG SHARE, estudiantes de UVG de otras carreras e ingenieros de universidades extranjeras fue sumamente enriquecedora. Tuve la oportunidad de poner los conocimientos adquiridos durante mi carrera al servicio de otras personas y poder desarrollar un secador con gran potencial para causar un impacto social en el país.

Agradezco a mis padres y familia, por su incondicional apoyo.

A Andreia Bianchini (de la Universidad de Nebraska-Lincoln), Carlos Campabadal (de la Universidad Estatal de Kansas) y Walfer Martínez (de SHARE)

A los catedráticos de UVG, sobre todo al ingeniero Victor Hugo Ayerdi, al ingeniero Manuel Ruano, a la ingeniera Ana Silvia Colmenares y a Edgar Castillo.

A la UVG por apoyar trabajos de este tipo.

ÍNDICE

	Página
PREFACIO	v
LISTA DE ILUSTRACIONES	vii
LISTA DE TABLAS.....	viii
RESUMEN	ix
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	2
III. JUSTIFICACIÓN	3
IV. MARCO TEÓRICO	4
V. ANTECEDENTES	21
VI. METODOLOGÍA	25
VII. RESULTADOS.....	37
A.EXPERIMENTO 1: PRUEBAS UVG	37
B.EXPERIMENTO 2: PRUEBA HUEHUETENANGO	39
VIII. DISCUSIÓN	48
IX. CONCLUSIONES	49
X. RECOMENDACIONES.....	50
XI. BIBLIOGRAFÍA	51
XII. ANEXOS	54

LISTA DE ILUSTRACIONES

	Página
Ilustración 1. Producción nacional de maíz 2007 a 2014	5
Ilustración 2. Precios promedio mensuales de maíz blanco 2011 a 2014	6
Ilustración 3. Ciclo de cultivo del maíz.....	7
Ilustración 4. Distribución de la radiación solar	11
Ilustración 5. Flujo solar a nivel mundial	12
Ilustración 6. Radiación solar media en Guatemala	12
Ilustración 7. Brillo solar mensual, estación Huehuetenango, Huehuetenango	13
Ilustración 8. Colector solar de placa plana	17
Ilustración 9. Métodos de transferencia de calor	17
Ilustración 10. Sistema de resistencias térmicas para un colector de placa plana	18
Ilustración 11. diagrama de flujo para un trade study.....	19
Ilustración 12. Ejemplo del método AHP	19
Ilustración 13. Ejemplo del método Pugh	20
Ilustración 14. Ejemplo del método KT	20
Ilustración 15. Modelo de secador para megaproyecto 2014 a 2015.....	24
Ilustración 16. Diseño preliminar del secador	26
Ilustración 17. Proceso de diseño.....	27
Ilustración 18. Modelo 3D del secador.....	28
Ilustración 19. Explosión del secador	28
Ilustración 20. Listado de partes del secador	29
Ilustración 21. Construcción del colector solar	30
Ilustración 22. Construcción del gabinete, vista frontal	30
Ilustración 23. Vista interna del gabinete	30
Ilustración 24. Construcción del intercambiador de calor	31
Ilustración 25. Construcción de bandejas	32
Ilustración 26. Puntos de medición	34
Ilustración 27. Secador armado, UVG	34
Ilustración 28. Secador armado, Huehuetenango	35
Ilustración 29. Bandeja con maíz negro desgranado	35
Ilustración 30. Colocación de mazorcas en el secador	37
Ilustración 31. Ventilador colocado en la chimenea	38
Ilustración 32. Condensado dentro del intercambiador de calor	38
Ilustración 33. Temperatura en bandejas día 1	39
Ilustración 34. Temperaturas en el colector día 1	40
Ilustración 35. Temperatura en el gabinete día 1	41
Ilustración 36. Distribución de temperatura en bandejas día 2	42
Ilustración 37. Temperaturas de transición entre colector y gabinete día 2	43
Ilustración 38. Distribución de temperatura en bandejas día 3	44
Ilustración 39. Temperaturas de transición entre colector y gabinete día 3	45
Ilustración 40. Comparación de temperaturas en el colector	45
Ilustración 41. Comparación de temperaturas en gabinete	46

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Producción de maíz blanco en Guatemala.....	4
Tabla 2. Aflatoxinas y fumonisinas en maíz de Guatemala.....	8
Tabla 3. Fisuras en granos de maíz según reducción de humedad.....	9
Tabla 4. Comparación de secadores.....	10
Tabla 5. Tipos de secadores solares.....	14
Tabla 6. Cadena de promotores para muestreo.....	23
Tabla 7. Matriz de valoración de los tipos de secadores de acuerdo a sus características.....	25
Tabla 8. Costo del secador.....	29
Tabla 9. Puntos de medición.....	33
Tabla 10. Temperaturas máximas y mínimas día 1.....	40
Tabla 11. Resumen de temperaturas por bandeja día 2.....	42
Tabla 12. Resumen de temperaturas por bandeja día 3.....	44
Tabla 13. Eficiencia método 2.....	47

RESUMEN

El presente trabajo de investigación consistió en la implementación de un secador híbrido solar conectado a una estufa ahorradora de leña para el secado de granos de maíz. El estudio se llevó a cabo en la comunidad de San Antonio Las Nubes en Chiantla, Huehuetenango. Según el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA), en Huehuetenango se producen 1,560,176 quintales de maíz anualmente. La comunidad de San Antonio Las Nubes comprende pequeños y medianos agricultores, tanto de subsistencia como excedentarios, pero sin acceso ni posibilidades de adquirir un secador comercial de granos. El secador fabricado debía tener la capacidad de reducir el contenido de humedad del grano a 12-14%, rango aceptado por la Organización para la Alimentación y Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) para un almacenamiento adecuado. El contenido de humedad en los granos repercute directamente en el crecimiento de hongos, los cuales a su vez producen micotoxinas (toxinas producidas por los hongos) - las cuales son nocivas para la salud y persisten aún después de la cocción de los alimentos-. La contaminación del maíz en Guatemala es un problema serio pero ignorado en salud pública.

El secador construido, con un colector solar de 5 m² de área y un factor de eficiencia de 58.62%, permitió reducir la humedad del maíz de 22.4% a 14.5% en 12.5 horas solares (2 días). La eficiencia total del secador fue de 10.6% y la eficiencia del proceso de secado fue de 28.5%. Las dimensiones del secador fabricado permiten el secado de 1 quintal de maíz por semana, adecuado para el consumo familiar en el área rural.

La incorporación del calor proveniente de las estufas ahorradoras de leña a un secador solar de granos no incrementa significativamente el calor total de secado. El modelo fabricado puede usarse como prototipo para elaborar secadores a escala semi-comercial y comercial, que formen parte de las acciones de gobierno u organizaciones interesadas en mejorar la salud pública resultante de la contaminación con micotoxinas en maíz.

I. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo buscó aplicar tecnología adecuada para mejorar las prácticas de manejo post cosecha del maíz. Específicamente se diseñó, construyó y evaluó un prototipo de una máquina secadora de maíz, que sea de beneficio para pequeños agricultores sin acceso a energía eléctrica o capacidad económica para la compra de secadores de granos comerciales.

En Guatemala durante el manejo post cosecha del maíz, el secado es una etapa que suele obviarse o que se desarrolla de forma inadecuada, repercutiendo directamente en la calidad del grano, así como en la salud de quienes lo consumen. La mayoría de pequeños agricultores no secan el maíz o lo secan en tapancos, lo cual resulta ineficaz e ineficiente, por lo que se identificó una necesidad de tecnologías de secado de bajo costo.

Existe gran variedad de modelos de secadores, por lo cual se realizó un estudio preliminar (“trade study”) para definir cual se trabajaría. Se escogió un secador híbrido cuya fuente principal es la radiación solar y utiliza como fuente de calor auxiliar una estufa ahorradora de leña. Con base en un requerimiento de secado de 100 lb diarias se estimó el área del colector solar, en 6.8 m².

Con el área estimada del colector solar, se diseñó el secador utilizando modelado 3D (con el software de diseño mecánico Autodesk Inventor). Luego de obtener los planos del modelo se construyó el secador utilizando materiales con disponibilidad en el mercado local.

Se realizó una prueba piloto con dicho prototipo en el campus central de Universidad del Valle (UVG), durante el mes de diciembre de 2015. En enero de 2016, se llevó el prototipo a Chiantla, Huehuetenango donde se realizaron pruebas de campo para evaluar el desempeño del mismo.

El secador construido posee una capacidad de secado de 40.6 lb en 12.5 horas solares (2 días), con un colector solar con un área de 5 m². La temperatura de secado fue mayor a 40°C durante 5 horas al día, con un máximo de 67.6°C. El costo del secador fue de Q5,784.53, sin tomar en cuenta la mano de obra.

II. OBJETIVOS

A. General:

Diseñar, construir y evaluar el funcionamiento de un secador de granos de maíz, que no requiera de energía eléctrica, que permita reducir la humedad relativa del grano a un 14%.

B. Específicos:

- Evaluar la zona de implementación del secador, investigando el contexto agrícola y socio cultural.
- Diseñar un secador que cumpla con los siguientes requerimientos de diseño:
 - Disminuir el contenido de humedad del maíz a 14% ¹en un período menor a 24 horas mediante² un secado lento.
 - Utilizar materiales locales para mantener el costo del secador por debajo de Q8,000.00³
 - Calentar aire a temperatura ambiente para alcanzar una temperatura de secado de por lo menos 40°C para un secado eficaz.
 - Alcanzar una eficiencia del proceso de secado de por lo menos 30% para que el secador sea viable.
- Evaluar la viabilidad del diseño en términos de manufactura y costos.
- Construir y validar el secador, según los requerimientos de diseño, mediante pruebas de campo.

¹ Valor mínimo aceptado por la Organización para la Alimentación y agricultura

² Período común para evaluar secadores solares

³ Valor tope fijado en referencia a megaproyecto “Análisis y propuesta de mejora del manejo post cosecha de maíz (*Zea mays*) para la reducción de aflatoxinas y fumonisinas en el maíz cultivado y consumido en el Departamento de Huehuetenango, Guatemala” trabajado con anterioridad en el tema de secado post cosecha

III. JUSTIFICACIÓN

El cultivo de maíz es de gran importancia en Guatemala, ocupando 803 mil hectáreas (cerca del 90%) de la superficie de cultivos anuales (Instituto Nacional de Estadística, 2014) y constituye el principal alimento de la dieta y de la seguridad alimentaria en el país. Sin embargo, este cultivo es susceptible al crecimiento de levaduras y hongos; este último grupo produce metabolitos secundarios que resultan tóxicos para el humano, denominados micotoxinas. (World Health Organization, 2012)

Las micotoxinas, especialmente las llamadas aflatoxinas, están fuertemente relacionadas con el cáncer hepático. Recientemente, las micotoxinas también se han relacionado con retraso en el crecimiento (“stunting”) donde la prevalencia en Guatemala se sitúa en el puesto cinco a nivel mundial y el primero en América. (Reurings, y otros, 2013). Otros estudios indican que las fumonisinas (otro tipo de micotoxinas) juegan un papel importante en el desarrollo de cáncer esofágico y defectos en el tubo neural. Estudios en Guatemala indican que Quiché, Alta Verapaz y Huehuetenango son los departamentos con mayor riesgo a exposición a aflatoxinas, mientras que se han reportado altos consumos de fumonisinas tanto en el área urbana como en el área rural. (World Health Organization, 2012)

Para reducir la exposición a las micotoxinas pueden tomarse tres enfoques: modificación de patrones de consumo, mejoras pre-cosecha y mejoras post-cosecha. La dieta del guatemalteco incluye maíz en forma de tortilla, con un consumo anual de 159 kg al año por habitante, siendo así el principal grano de consumo (Instituto Nacional de Estadística, 2006). Por lo anterior, resulta particularmente difícil modificar los patrones de consumo en Guatemala donde, adicionalmente, el maíz es considerado sagrado y una fuente de seguridad alimentaria. Un cambio en los patrones de consumo también implica que la persona o familia posea cierto nivel económico para comprar otros alimentos. En muchos casos, sobre todo en el área rural, se recurre al cultivo de maíz para autoconsumo y la escasez del mismo obliga a las familias a ingerir maíz de baja calidad (significativamente contaminado con micotoxinas). Para disminuir las micotoxinas en la pre-cosecha se puede utilizar ingeniería genética para tener cultivos resistentes al daño provocado por insectos y resistencia a hongos, o controles biológicos; sin embargo, estos resultan caros y polémicos socialmente. Actualmente no se ha tenido mucho éxito para producir variedades de maíz resistente a aflatoxinas. (Bhat & Miller). Por último, el manejo post-cosecha incluye descartar (manualmente) los granos que han sido dañados por insectos u otros, métodos adecuados de secado, almacenamiento en condiciones apropiadas para evitar la proliferación de hongos y producción de micotoxinas y, nixtamalización (cocinado del maíz con cal).

El presente trabajo busca la reducción de micotoxinas al realizar una intervención en el manejo post-cosecha del maíz, específicamente durante la etapa del secado que, si se combina con una adecuada selección del grano y un almacenamiento apropiado, puede tener un impacto significativo en la calidad del mismo. Para ello, se plantea la construcción y evaluación de un secador artificial, que pueda secar rápidamente y por completo (hasta el contenido de humedad recomendado por FAO de 14%) la cosecha, sin hacer uso de energía eléctrica, poco disponible en las áreas rurales más remotas.

Los secadores de granos utilizan aire caliente para reducir el contenido de humedad en el grano de forma convectiva, por lo que su consumo energético es proporcional al incremento de temperatura que se quiera alcanzar. Un secado muy rápido (más de un 5% de reducción de humedad por hora) o con temperaturas muy altas (donde el grano excede los 60°C) puede resultar en daños al grano de maíz y pérdidas de la cosecha. Por lo tanto, el secador debe mantener una temperatura adecuada durante el proceso, así como tener un consumo energético factible para los pequeños y medianos productores de maíz. (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1996)

IV. MARCO TEÓRICO

A. CULTIVO DE MAÍZ EN GUATEMALA

En Guatemala el cultivo del maíz tiene grandes implicaciones sociales, culturales, económicas, nutricionales, de salud, etc. De los granos básicos cultivados en el país, el maíz es el principal, aportando un 37.7% de energía y un 36.5% de proteína a la ingesta per cápita. A enero de 2015, el Instituto Nacional de Estadística (INE) reportó el costo diario de las tortillas de maíz de la canasta básica de alimentos (para una familia) en Q35.73, representando el 33% del costo total diario de la canasta. Sin embargo, su rendimiento promedio nacional es bajo (1.77 t/ha), lo cual se debe a factores como: poco acceso a la tecnología, uso de tierras no adecuadas, vulnerabilidad al cambio climático, sequías o lluvias muy fuertes, falta de infraestructura de riego, mercado, entre otros. (Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícola, 2002) (Instituto Nacional de Estadística, 2015)

El maíz se cultiva en los 22 departamentos del país, sin embargo, sólo 10 de ellos producen suficiente para satisfacer la demanda. Entre ellos cabe resaltar que Petén, Alta Verapaz, Quiché, Izabal y Baja Verapaz cuentan con un excedente que se vende en otros departamentos vecinos. (Fuentes-López, Van Etten, Vivero Pol, & Ortega Aparicio, 2005)

Tabla 1. Producción de maíz blanco en Guatemala

DEPARTAMENTO	PRODUCCIÓN MAÍZ BLANCO (QUINTALES)	PORCENTAJE DE PRODUCCIÓN TOTAL
GUATEMALA	723,693	2.11%
EL PROGRESO	365,795	1.06%
SACATEPÉQUEZ	219,645	0.64%
CHIMALTENANGO	1,262,929	3.68%
ESCUINTLA	1,474,521	4.29%
SANTA ROSA	1,836,756	5.35%
SOLOLÁ	421,688	1.23%
TOTONICAPÁN	468,368	1.36%
QUETZALTENANGO	1,094,371	3.18%
SUCHITEPÉQUEZ	1,331,037	3.87%
RETALHULEU	1,903,258	5.54%
SAN MARCOS	1,501,428	4.37%
HUEHUETENANGO	1,560,176	4.54%
QUICHÉ	1,984,908	5.78%
BAJA VERAPAZ	704,663	2.05%
ALTA VERAPAZ	3,599,658	10.48%
PETÉN	7,061,740	20.55%
IZABAL	1,262,494	3.67%
ZACAPA	630,229	1.83%
CHIMQUIMULA	1,136,717	3.31%
JALAPA	1,030,393	3.00%
JUTIAPA	2,786,091	8.11%
TOTAL	34,360,558	100.00%

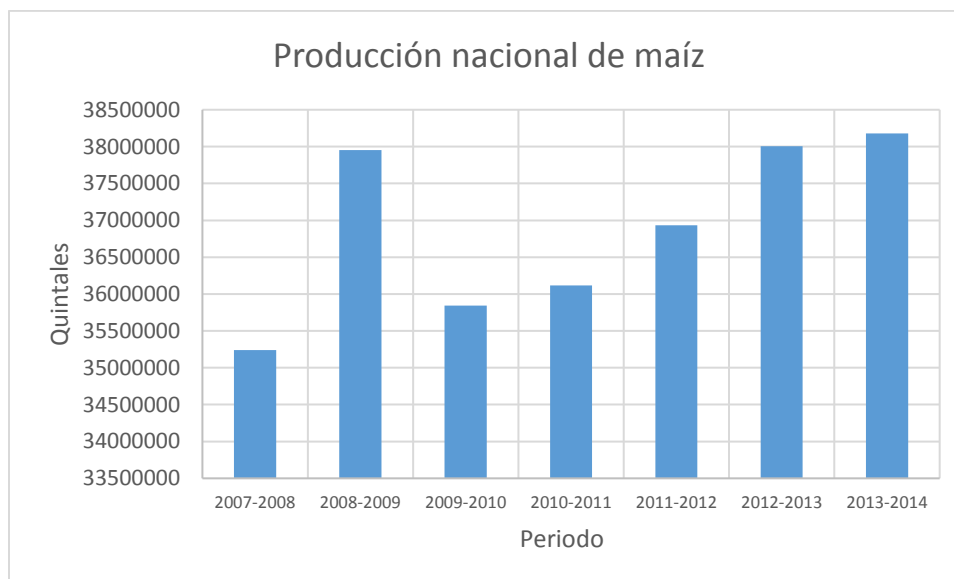
(Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, 2014)

El sistema de producción se basa en una época de siembra y otra de cosecha, la cual puede variar según la ubicación geográfica y factores climáticos. Generalmente la época de siembra se planifica en función de la época lluviosa. Las zonas ubicadas por debajo de los 1400 msnm suelen sembrar en los meses de mayo y junio, y una siembra de segunda en septiembre. Mientras que, en el Altiplano, que posee ubicaciones por encima de los 1500 msnm, se realiza una única siembra entre abril y mayo. (Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícola, 2002)

Algunos de los factores de mayor influencia para el crecimiento y desarrollo de este cultivo son: el fotoperiodo, agua, temperatura y el suelo. En promedio la planta de maíz requiere de 13.5 horas luz, por lo que se conoce como una planta de días cortos. La falta de luz o alteración del fotoperiodo puede llegar a retrasar la iniciación de la espiga. El agua es fundamental para todos los cultivos. El maíz requiere de mayor cantidad de agua durante la fase de pre y post floración; de ser insuficiente, la planta sufrirá de estrés y se verá afectado el rendimiento. La producción de grano también se ve fuertemente afectada por la sequía o limitación de agua. Se requiere de por lo menos 500 a 700 mm de lluvia durante el ciclo del cultivo para tener una cosecha de granos; sin embargo, el nivel mínimo de lluvia dependerá de la capacidad de retención del suelo. A pesar de que el maíz crece bajo distintas condiciones de suelo, aquellos que son arcillosos o arenosos no le favorecen. Los suelos arcillosos tienden a acumular demasiada agua inundándose, mientras que los suelos arenosos pierden agua rápidamente. Un suelo ideal posee una textura media, fertilidad, capacidad de drenado, profundidad y buena retención del agua. Por último, la temperatura juega un rol importante en el desarrollo de la planta de maíz; si la temperatura es muy alta (mayor a 35°C) se genera estrés térmico y disminuye la tasa de fotosíntesis, afectando directamente el rendimiento. Asimismo, si la temperatura es muy baja, la parte vegetativa y reproductiva pueden verse dañadas, afectando negativamente el rendimiento. (Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícola, 2002)

La producción de maíz entre el año 2013 y 2014 fue entre 38 y 40 millones de quintales, de los cuales la gran parte (35 millones) fueron de maíz blanco. De 2009 a 2014 la producción de maíz ha incrementado gradualmente de forma sostenida; en el periodo 2013-2014 aumentó un 2.9% en relación a 2012-2013. Adicionalmente se importa maíz, principalmente de México y Estados Unidos, y se exporta a El Salvador y Nicaragua. En la siguiente gráfica se puede apreciar la tendencia a incrementar la producción nacional, desde el año 2007 a 2014:

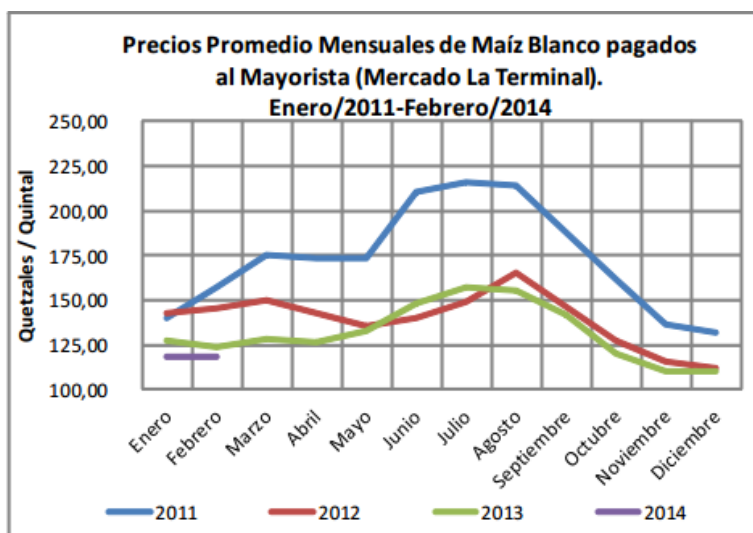
Ilustración 1. Producción nacional de maíz de 2007 a 2014



(Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, 2014)

El precio de venta del maíz puede afectar a la población de diversas maneras. Para los consumidores, un precio alto afecta negativamente su presupuesto ya que deben consumir menos maíz o dejar de consumir otros productos. Por otro lado, para los productores (excedentarios), los precios altos aumentan sus ingresos, por lo que pueden comprar mayor cantidad o calidad de productos. De la siguiente gráfica podemos apreciar que el año 2011 presentó precios bastante más elevados que los años subsiguientes. Adicionalmente, de mayo a agosto, los precios presentan un incremento, pues es la época en la cual bajan las reservas de grano.

Ilustración 2. Precios promedio mensuales de maíz blanco 2011 a 2014

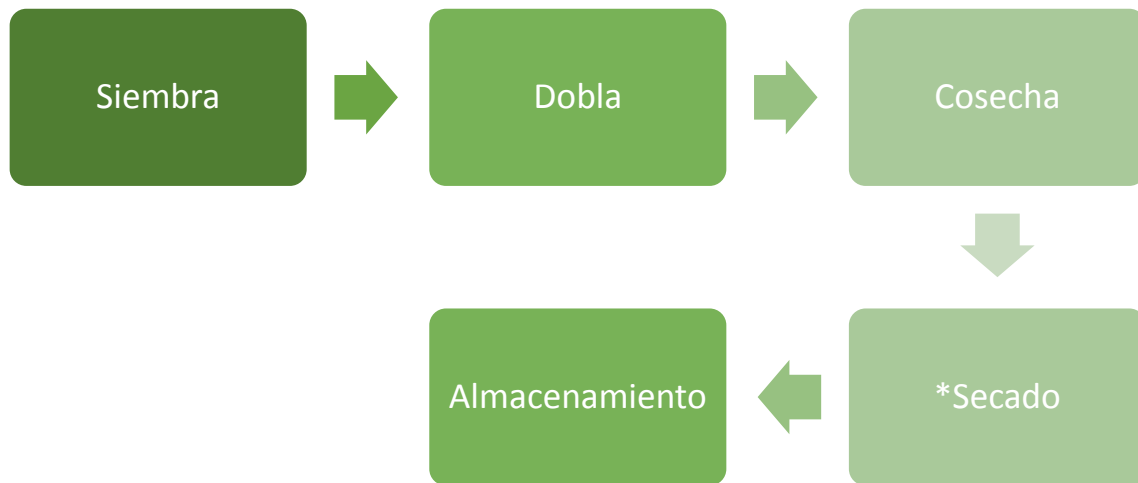


(Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, 2014)

B. PROBLEMAS ASOCIADOS AL CULTIVO DEL MAÍZ

La producción de maíz tiene distintas etapas, como se muestra en el esquema a continuación. Inicialmente se prepara el terreno y se realiza la siembra, para lo cual es importante el control de plagas y malezas. Una vez el follaje se ha tornado de un color amarillo pálido, el agricultor sabe que el cultivo ha alcanzado su madurez fisiológica, por lo que procede a la “doble”; que consiste en doblar la oreja de maíz con el fin que esta se empiece a secar. Si durante esta fase se deja mucho tiempo el maíz en el campo, puede haber pérdidas o daños significativos; posteriormente se efectúa la cosecha, la cual, de no realizarse en el momento o de forma adecuada, puede afectarse por daño por roedores y pájaros, pudrición y germinación de la semilla y/o proliferación de hongos. Una vez cosechado el maíz, debería ser secado para disminuir su humedad de 20-24% a 12-14% aproximadamente, sin embargo, en la práctica esto no suele llevarse a cabo. Posteriormente el maíz puede ser almacenado; un mal almacenamiento puede conllevar más pérdidas en cuanto a peso, calidad y propiedades nutricionales. De ser vendido este maíz, dichas pérdidas y daños representan una fuerte disminución de los ingresos. (Anacafé, 2004)

Ilustración 3. Ciclo de cultivo del maíz



(Elaboración propia)

Los cultivos pueden verse afectados tanto antes como después de la cosecha, especialmente por la proliferación de hongos. Los hongos generan metabolitos secundarios tóxicos, conocidos como micotoxinas, que contaminan los alimentos. Las condiciones de almacenamiento y otras prácticas post-cosecha pueden favorecer el crecimiento de dichos hongos y, por ende, la producción de micotoxinas. Algunas enfermedades que atacan a la planta, aunadas a ciertas condiciones climáticas (como lluvias atemporales, sequías u otras) pueden agravar el problema. (Bhat & Miller)

El maíz se ve principalmente afectado por aflatoxinas y fumonisinas. Las aflatoxinas son producidas por los hongos *Aspergillus flavus* y *A. parasiticus*, que proliferan en climas cálidos y durante sequías que estresan a la planta de maíz; las fumonisinas provienen de 24 especies distintas de *Fusarium*. Las implicaciones de la contaminación de alimentos con micotoxinas sobre la salud humana son variadas. Se han relacionado las micotoxinas con hepatitis aflatóxica en India y Kenia, ergotismo entérico en India, ergotismo vascular en Etiopía. Las aflatoxinas se creen estar asociadas a cáncer hepático y esofágico, síndrome de Reye, cirrosis infantil, gastritis crónica, kwashiorkor y algunas enfermedades respiratorias ocupacionales. (World Health Organization, 2012) En la siguiente tabla se puede apreciar la concentración de aflatoxinas y fumonisinas en muestras de maíz recolectadas en 2012 en Guatemala:

Tabla 2. Aflatoxinas y fumonisinas en maíz de Guatemala

Department	Aflatoxin B ₁ (ng/g) ²			Fumonisin B ₁ (µg/g) ³		
	Mean (SEM)	Range	Positive/total	Mean (SEM)	Range	Positive/total
Alta Verapaz	151 (51)	0-1,677	22/39	1.6 (0.3)	0.02-8.5	51/51
Baja Verapaz	21 (9)	0-127	7/20	1.4 (0.3)	0.07-5.3	24/24
Chimaltenango	21 (18)	0-302	3/17	0.7 (0.3)	0.02-5.0	17/17
Chiquimula	9 (6)	0-194	9/33	3.2 (0.5)	0.2-13.2	33/33
El Progreso	5 (3)	0-64	4/23	1.3 (0.2)	0.07-3.3	24/24
Escuintla	12 (5)	0-46	6/12	2.7 (0.7)	0.02-13.5	21/21
Guatemala	13 (6)	0-259	17/52	1.8 (0.3)	0.01-14.6	54/54
Huehuetenango	31 (16)	0-289	6/19	0.7 (0.3)	0.01-4.1	20/20
Izabal	28 (20)	0-157	4/8	1.8 (0.3)	0.2-4.9	15/15
Jalapa	2 (2)	0-42	1/21	1.5 (0.2)	0.1-4.1	21/21
Jutiapa	0.4 (0.4)	0-22	1/51	3.1 (0.4)	0.2-17.1	51/51
Petén	243 (74)	0-1,994	26/31	2.8 (0.3)	0.6-9.1	39/39
Quetzaltenango	0 (0)	0-0	0/9	0.7 (0.3)	0-2.4	8/9
Quiché	108 (51)	0-707	10/14	0.9 (0.2)	0.02-3.0	15/15
Retalhuleu	10 (3)	0-60	12/23	0.9 (0.3)	0.04-5.8	27/27
Sacatepéquez	8 (4)	0-119	9/38	0.7 (0.1)	0-3.8	47/48
San Marcos	26 (16)	0-158	3/10	1.2 (0.5)	0.06-6.0	12/12
Santa Rosa	2 (1)	0-58	4/42	2.7 (0.3)	0.2-9.3	42/42
Sololá	16 (15)	0-162	3/11	2.1 (1.1)	0.08-12.3	11/11
Suchitepequeúz	178 (48)	0-1,951	42/54	1.6 (0.2)	0.1-7.4	60/60
Totonicapan	13 (7)	0-88	3/16	0.4 (0.2)	0-3.2	11/16
Zacapa	198 (122)	0-2,656	14/29	1.7 (0.5)	0.2-13.1	30/30
Total	63 (10)	0-2,655	206/572	1.8 (0.09)	0-17.1	633/640

¹ The 'positive/total' for fumonisin B₁ includes all samples, whereas the 'positive/total' for aflatoxin B₁ is only the analysis of non-mouldy samples. The number of samples that were defined as mouldy is the difference between the 'total' for fumonisin B₁ and aflatoxin B₁ (n=68 total).

² The method for aflatoxin extraction and analysis was the same as for fumonisin but utilized external standardisation using a certified reference mixture from Supelco (Bellafonte, PA, USA). The limit of detection for aflatoxin B₁ was 5 ng/g maize, and the recovery based on analysis of a 7 µg/kg and 29 µg/kg reference material of naturally contaminated maize from Trilogy Analytical Labs (Washington, MO, USA) was 76±7% (n=10).

³ The method for fumonisin extraction and analysis is described in detail in Riley *et al.* (2012a). Briefly, the limit of detection is 0.01 µg/g maize and quantitation was based on recovery of [¹³C] fumonisin B₁ that was added to samples before extraction and isolation on C₁₈ solid-phase extraction cartridges and LCMS of the eluates.

(Torres, y otros, 2015)

Los granos que presentan algún tipo de daño físico, antes del secado, tienen mayor riesgo de tener altos niveles de aflatoxinas. En los departamentos que importan maíz, la presencia de fumonisinas se ve influenciada por condiciones agroecológicas previamente presentes en el lugar de producción. La presencia de aflatoxinas, por otro lado, depende principalmente de las prácticas post-cosecha. Adicionalmente, las fumonisinas presentan mayor prevalencia, por lo que la contaminación del maíz y la ingesta de las mismas es más constante que con aflatoxinas. Por otro lado, la ingesta de aflatoxinas puede disminuir considerablemente al llevar a cabo una selección del grano, separando aquellos que estén dañados o mohosos, y mejorando el manejo post-cosecha. (Torres, y otros, 2015)

C. HUMEDAD EN LOS GRANOS

El contenido de humedad se refiere a la cantidad de agua presente en el grano como un porcentaje del peso total. Este suele ser alto al momento de la cosecha, por lo que es importante secarlos para almacenarlos. Un grano se puede considerar que está seco cuando su contenido de humedad ha disminuido por lo menos a un 15%, dependiendo del tipo de grano y el clima; la humedad debe conservarse entre 10% a 15%. La humedad puede ser medida en base húmeda (cantidad de agua en relación al peso total del grano) o en base seca (cantidad de agua en relación a la cantidad de materia seca). Los humidímetros comunes proveen la humedad en base húmeda. La manera ideal para medir la humedad en granos es tomando una muestra al salir de la secadora, realizar la molienda de la muestra y usar una estufa de humedad; sin embargo, esto puede tomar hasta 24 horas. También existen humidímetros portátiles para realizar pruebas en campo que ofrecen una precisión de $\pm 0.5\%$ de humedad. Para los humidímetros que son portátiles o que funcionan por corriente eléctrica, la muestra debe dejarse enfriar previo a tomar la lectura. (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1996)

La humedad del grano debe ser reducida de forma lenta, de lo contrario el grano puede presentar esfuerzos internos que resulten en fisuras. Esto se debe a que a medida que cambia la temperatura y contenido de humedad del grano, también cambia la visco-elasticidad (comportamiento mecánico de material biológico) lo cual resulta en fragilidad del grano. Para el maíz se recomienda que la tasa de secado no exceda una remoción de humedad mayor al 5% por hora, para evitar la aparición de fisuras. Si la temperatura y el flujo de aire son muy elevados, la estructura en la superficie del grano pasa de ser elástica a ser dura y frágil (como el vidrio), lo cual resulta en fallas en forma de fisuras y pérdidas por calidad del grano. En la siguiente tabla se puede apreciar la formación de fisuras en granos de maíz a medida que se reduce la humedad, para un secado a 71°C. (Maier & Bakker-Arkema, 2002)

Tabla 3. Fisuras en granos de maíz según reducción de humedad

Moisture Reduction (%)	Kernels with Multiple Stress Cracks (%)
22 to 18	5.0
22 to 16	86.9
22 to 14	100.0

(Maier & Bakker-Arkema, 2002)

D. TIPOS DE SECADORES DE GRANOS

Una secadora de granos es aquella máquina o equipo que sirve para disminuir el contenido de humedad del grano, semilla o similar. Para ello comúnmente se hace pasar un flujo de aire a través de una cama o capa de granos. Existen distintos diseños y clasificaciones para las secadoras; esto se debe a la diversidad de la demanda en el mercado, tanto en capacidad como en requerimientos particulares según el producto.

Los secadores comerciales (de gran capacidad) pueden clasificarse en tres grandes grupos (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1996):

- De flujo continuo
 - Verticales
 - Cascada
 - Horizontales
- En tandas
 - Flujo cruzado

- Flujo mixto
- Silos secadores
 - Flujo contracorriente
 - Flujo cruzado

También se les puede clasificar según la temperatura a la que operan (Maier & Bakker-Arkema, 2002):

- Baja: se utiliza el aire a temperatura ambiente para el secado o un aire ligeramente calentado de hasta +8°C.
- Media: utiliza aire caliente que permite mantener la temperatura del grano por debajo de 43°C para semillas y 60°C para granos.
- Alta temperatura: utiliza aire caliente donde el grano puede llegar a alcanzar temperaturas de 82°C, recomendado para granos cultivados para alimento de ganado u otros animales.
- Combinado: utiliza aire tanto de alta como de baja temperatura.

Asimismo, es posible clasificarlos según el flujo de aire en (Maier & Bakker-Arkema, 2002):

- Flujo cruzado: el movimiento del aire es perpendicular al del grano. Son los más utilizados en Estados Unidos y Canadá.
- Flujo concurrente: el movimiento del aire es paralelo al del grano. Son utilizados en aplicaciones especiales en Estados Unidos.
- Flujo mixto: combina flujo cruzado con concurrente. Son utilizados en Europa, Asia y Latinoamérica

En la siguiente tabla se aprecia la comparación de los tres tipos de secadoras descritos previamente, donde se puede observar que la de mayor temperatura es de flujo concurrente que a su vez presenta el menor porcentaje de fisuras. Sin embargo, este diseño es relativamente nuevo, por lo que su uso no se ha diseminado ampliamente. (Maier & Bakker-Arkema, 2002)

Tabla 4. Comparación de secadores

Dryer Type	Drying-Air Temperature °F (°C)	Maximum Grain Temperature °F (°C)	Stress-Cracked Kernels (%)
Crossflow	176-230 (80-110)	176-230 (80-110)	70-85
Mixed-Flow	212-266 (100-130)	158-212 (70-100)	40-55
Concurrent-Flow	392-545 (200-285)	140-176 (60-80)	30-45

(Maier & Bakker-Arkema, 2002)

Sin embargo, también existen secadoras de menor capacidad aptas para pequeños productores, como:

- Secadores solares
- Secadoras por convección natural
- Patios de secado
- Túneles de secado

E. EFICIENCIA DE UNA SECADORA

Una secadora de granos debe reducir el contenido de humedad mediante la evaporación de una masa de agua, por lo tanto, la eficiencia se refiere a la relación entre el calor mínimo necesario para evaporar dicha masa de agua y la cantidad de calor consumida. La disminución de la eficiencia se debe principalmente a pérdidas de calor del sistema hacia el ambiente. La saturación del aire también tiene un papel importante, ya que si la humedad relativa en el ambiente es elevada el mismo tendrá menor capacidad para ceder calor al grano y absorber su humedad. La eficiencia puede calcularse como el calor útil requerido, dividido el calor real utilizado (Cengel & Ghajar, 2011). También es posible medir la eficiencia mediante las temperaturas del aire de secado, aire ambiente y aire usado (una vez sale de la cámara de secado). Entre mayor sea la diferencia entre el aire de secado y el usado, mayor será la eficiencia. (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1996)

F. CAPACIDAD DE SECADO

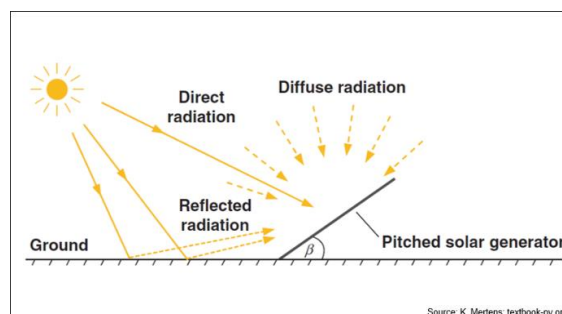
Es uno de los parámetros que comúnmente se utilizan para referirse al desempeño de un secador; además, permite comparar de forma sencilla uno o más secadores. La capacidad de secado se define como la cantidad de grano (húmedo o seco) que se obtiene del secador en un periodo de tiempo dado. Comúnmente se suele expresar en toneladas o quintales ya sea por hora o por día. (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1996)

La capacidad de secado se ve influenciada por: el contenido de humedad inicial, temperatura del aire de secado, tasa o rapidez de secado, condiciones externas del ambiente, tamaño y condición del secador. La capacidad real del secador debe determinarse en el campo, ya que por los factores anteriores puede variar entre 70% y 80% con respecto a las especificaciones del fabricante. (Maier & Bakker-Arkema, 2002)

G. RADIACIÓN SOLAR

Este tipo de radiación proviene de las reacciones de fusión dentro del núcleo del sol que genera altas temperaturas, del orden de millones de grados, emitiendo así grandes cantidades de radiación hacia el espacio. Dicha radiación presenta una longitud de onda corta, entre 0.3 a 3 μm , incluye tanto la radiación difusa como la directa. La radiación difusa es aquella que ha cambiado su dirección y se encuentra dispersa en la atmósfera. Adicionalmente el suelo puede actuar como un agente reflector, constituyendo así un componente de radiación reflejada. (Duffie & Beckman, 2006)

Ilustración 4. Distribución de la radiación solar

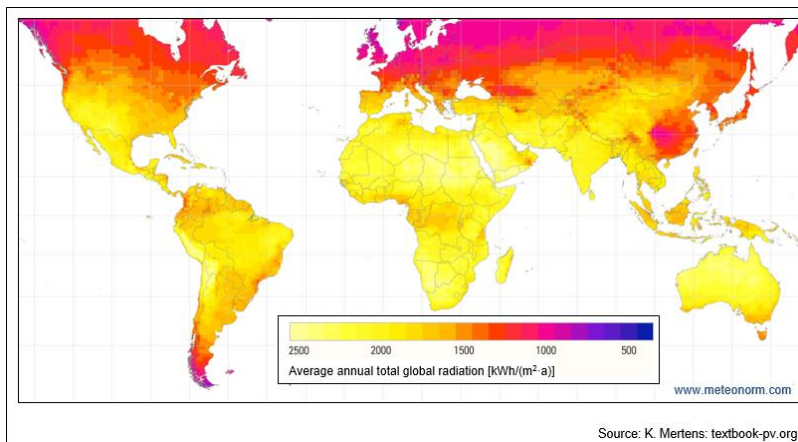


(Mertens, 2014)

Debido a la inclinación de la Tierra y su órbita alrededor del sol, la dirección de la radiación es cambiante y para propósitos de diseño y desempeño de un colector solar, es necesario hacer un ajuste de la radiación incidente sobre una placa inclinada en base a mediciones o estimados de la radiación sobre una superficie horizontal. (Duffie & Beckman, 2006)

La distribución solar también se ve afectada por la atmósfera y las regiones climáticas. Las áreas con mayor incidencia solar se sitúan a una latitud entre 30°N y 30°S, donde la atmósfera presenta un hundimiento donde el aire caliente desciende y causa menor nubosidad y poca lluvia durante gran parte del año. En dichas áreas la radiación solar anual promedio puede llegar a exceder el 90%. Sin embargo, el flujo solar presenta gran variabilidad en función del clima, principalmente se ve afectado por la nubosidad que suele ser impredecible. (Meinel & Meinel, 1977)

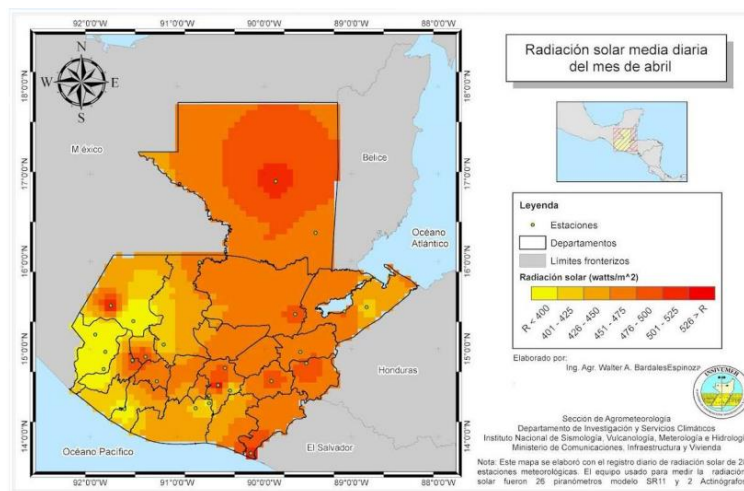
Ilustración 5. Flujo solar a nivel mundial



(Mertens, 2014)

En el siguiente mapa se puede apreciar a mayor detalle que en Guatemala se recibe gran cantidad de radiación solar, especialmente en las regiones de: costa sur oriental, oriente, caribe y norte.

Ilustración 6. Radiación solar media en Guatemala

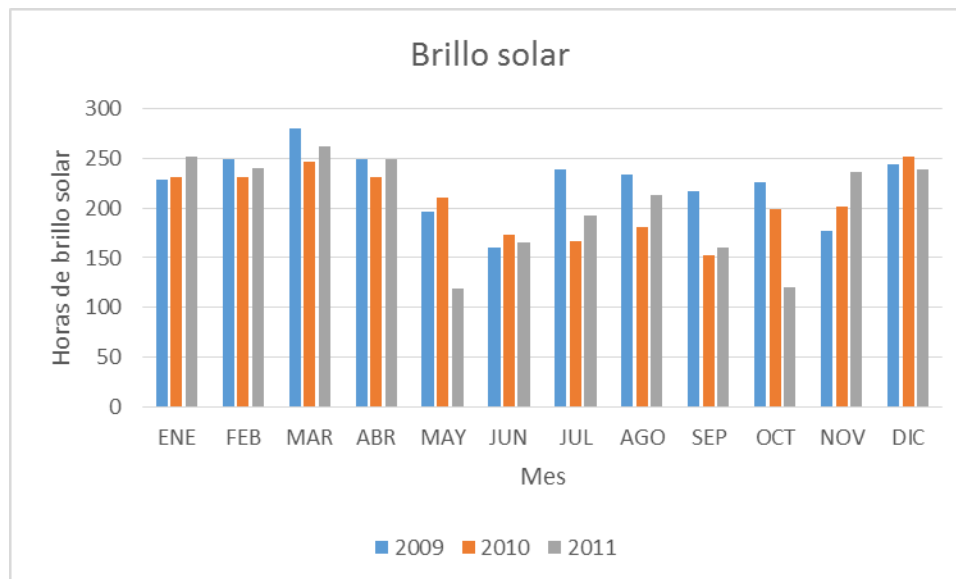


(INSIVUMEH, 2014)

Para medir la radiación solar se tienen dos tipos de instrumentos básicos: el pirheliómetro y el piranómetro. El primero utiliza un detector de luz colimada para medir la radiación solar, es decir que es capaz de medir la radiación directa. El segundo mide la radiación solar total, tanto directa como difusa. Adicionalmente es posible medir las horas de brillo y estimar promedios de radiación solar a largo plazo. Para ello es posible usar un heliógrafo Campbell-Stokes, que cuando la radiación supera cierto nivel crítico deja una quemadura sobre el papel. Para una lectura más precisa se puede utilizar un heliógrafo fotoeléctrico ("Foster sunshine switch"). (Duffie & Beckman, 2006)

El Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) utiliza un heliógrafo Campbell-Stokes para medir el brillo solar y un actinógrafo para medir la radiación global diaria. Para el departamento de Huehuetenango el INSIVUMEH cuenta con seis estaciones de las cuales únicamente la de la cabecera (Huehuetenango) cuenta con datos sobre brillo solar, ninguna cuenta con datos de radiación global diaria. Los datos más recientes sobre brillo solar de dicha estación se presentan a continuación. (INSIVUMEH, Componentes de una estación meteorológica, 2015)

Ilustración 7. Brillo solar mensual, estación Huehuetenango, Huehuetenango



(INSIVUMEH, Estación Huehuetenango, 2011)

H. ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR PARA UN DÍA DESPEJADO ("CLEAR-SKY")

Es posible calcular la radiación solar directa que incide sobre una superficie horizontal utilizando el modelo planteado por Hottel en 1976, para un día despejado. Este toma en cuenta el ángulo cenital, la latitud (para una atmósfera estándar) y un factor de corrección para cuatro tipos de climas. Para obtener la radiación difusa se aplican las relaciones desarrolladas por Liu y Jordan en 1960.

Sin embargo, el modelo anterior no proporciona la radiación sobre una superficie inclinada, por lo que se puede recurrir al modelo de cielo isotrópico de Liu y Jordan (1963). Un modelo menos conservador, de cielo anisotrópico, toma en cuenta la radiación difusa circunsolar y difusa del horizonte; también es conocido como modelo HDKR (Hay, Davies, Klucher, Reindl).

I. ENERGÍA RENOVABLE

Existe una gran cantidad de fuentes energéticas, las cuales pueden clasificarse en dos grandes categorías: energías renovables y energías no renovables. Las energías renovables son aquellas que se encuentran en abundancia, que causan poco o ningún daño ambiental. Algunos ejemplos incluyen la energía hidráulica, solar, geotérmica, eólica y biomasa. Por el contrario, las energías no renovables se encuentran de forma más limitada y su utilización genera efectos negativos para el medio ambiente. Algunos ejemplos son el petróleo y sus derivados, el propano, carbón, leña y uranio. (Madrid, 2009)

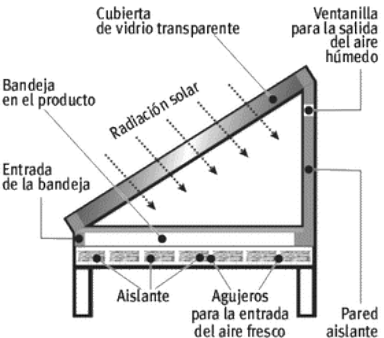
La energía solar es de particular interés debido a su gran abundancia y disponibilidad, se estima que la energía del sol es de 0.7 trillones de kWh que es entre 4,000 y 7,000 veces la energía que consumimos los humanos diariamente. El aprovechamiento de la energía solar puede ser a través de: energía térmica, fotovoltaica y termoeléctrica. En la primera se utiliza directamente el calor captado del sol. En la segunda se capta la luz y se transforma en una corriente eléctrica. La última es una combinación de las anteriores ya que produce tanto calor como electricidad a partir de la captación solar. (Madrid, 2009)

Este tipo de fuente energética resulta particularmente atractiva para países como Guatemala que por su ubicación geográfica pueden obtener mayores beneficios. Además, por ser un país en vías de desarrollo y debido a los elevados niveles de pobreza, el hecho que sea de gran disponibilidad y gratuita resulta ser una energía prometedora.

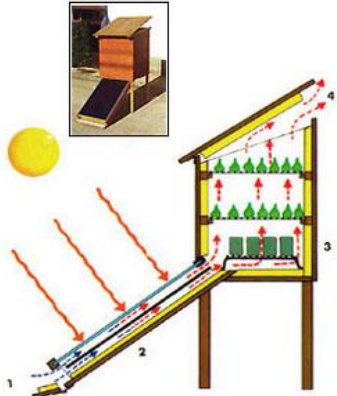

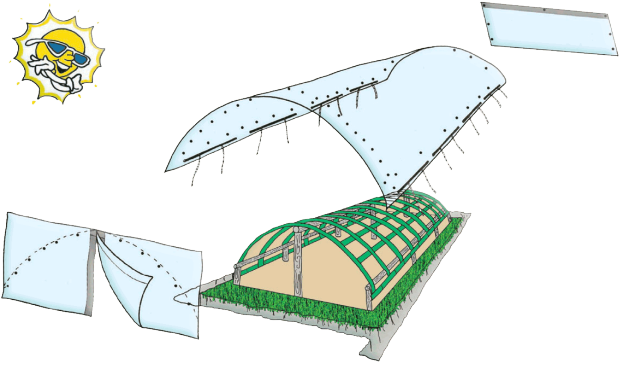
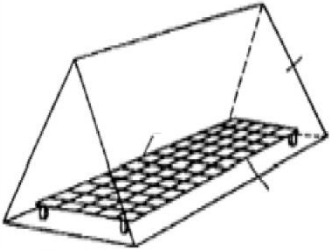
J. SECADORES SOLARES

Los secadores solares hacen uso de la energía solar térmica para disminuir el contenido de humedad en granos, frutas u otros. Se pueden dividir en dos categorías: directos e indirectos. Los secadores de tipo directo son aquellos donde el grano está expuesto a la radiación solar, donde el modelo más sencillo sería un patio de secado. Por el contrario, en los secadores indirectos la radiación solar es recogida por un dispositivo como un colector solar. A continuación, se muestran algunos tipos de secadores solares:

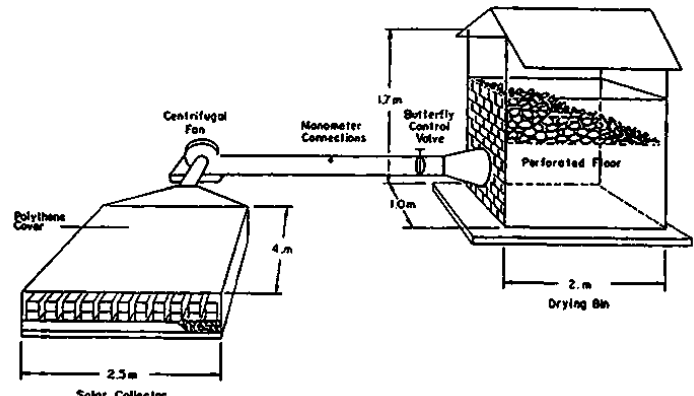
Tabla 5. Tipos de secadores solares

Tipo secador	Diseño
Cabina	 <p>(Bérriz, 2006)</p>

Continuación. Tabla 5

Tipo secador	Diseño
Gabinete	 <p>(Fundación Terra, s.f.)</p>
Combinado	 <p>(Vidal, Velásquez, Iñaki, & Ortega, 2012)</p>
Túnel	 <p>(TECNATROP, 2003)</p>
Tienda	 <p>(Proyecto Latin, s.f.)</p>

Continuación. Tabla 5

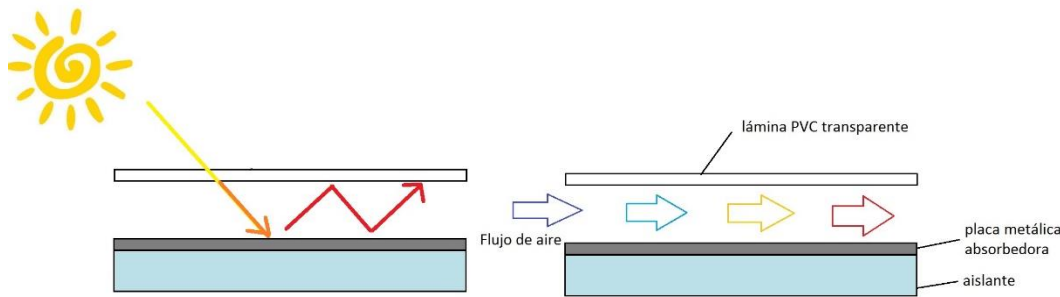
Tipo secador	Diseño
Arco	 <p>(Food and Agriculture Organization of United Nations, 1995)</p>

Un aspecto de gran importancia en este tipo de secadores es el flujo de aire, ya que éste incide directamente el tiempo de secado, que con secadores solares puede ser prolongado. El flujo de aire y la distribución del mismo deben ser adecuados tanto a través del colector como de la cámara de secado. Si el flujo es irregular o insuficiente, el grano puede no secarse de forma homogénea. Existen dos tipos de flujos para secadores solares: por convección natural y forzados. El primero presenta la ventaja de ser independiente de la disponibilidad de electricidad, ya que el aire caliente va subiendo de forma natural debido a una disminución en densidad. Sin embargo, si se requiere de un mayor flujo de aire o se tiene una resistencia al flujo considerable, es necesario emplear ventiladores para que el flujo sea forzado.

Un colector solar es un caso particular de intercambiador de calor que permite transformar la radiación solar a calor útil. Los intercambiadores comunes utilizan una transferencia de calor entre fluidos (agua-aire, vapor-agua, agua-otro líquido) mientras que un colector toma la energía de una fuente lejana, el sol, y la transfiere en forma de calor a un fluido de trabajo ya sea líquido o gaseoso. Si no se utilizan métodos de concentración, el flujo solar puede llegar a ser de hasta 1100 W/m^2 y como se detalla anteriormente es altamente variable. (Duffie & Beckman, 2006)

Los colectores más comunes son los de placas planas ("flat-plate"), como en la siguiente ilustración, que permiten en el mejor de los casos, alcanzar hasta 100°C por encima de la temperatura ambiente. Pueden ser completamente horizontales o presentar un cierto grado de inclinación. Una de sus ventajas es su facilidad de construcción y mantenimiento, ya que son estáticos no requieren de partes móviles. Existe gran variedad de configuraciones y variantes de colectores de placas planas, los más sencillos consisten únicamente en una placa negra que absorbe la radiación solar y calienta el fluido de trabajo. Sin embargo, con este diseño se tienen grandes pérdidas térmicas hacia los alrededores. Por lo que un diseño más elaborado agrega una placa transparente o ventana, que cumple tres funciones: atrapar el aire disminuyendo las pérdidas a los alrededores, proteger la placa negra de la lluvia y suciedad, incrementar la temperatura mediante el efecto invernadero. Es posible incorporar más de una cubierta transparente para mejorar el rendimiento y eficiencia del colector, aunque ello conlleva un aumento en cuanto a costos. (Duffie & Beckman, 2006) (Meinel & Meinel, 1977)

Ilustración 8. Colector solar de placa plana



(Elaboración propia)

K. TRANSFERENCIA DE CALOR

En un colector solar se busca trasladar la energía térmica de una superficie a alta temperatura hacia un fluido de trabajo, que puede ser líquido o gaseoso. Sin embargo, se tienen pérdidas de calor que pueden ser por conducción, convección o radiación. La transferencia de calor por conducción surge de la interacción entre partículas donde aquella que tiene más energía (mayor temperatura) cede parte de su energía a las vecinas (menor temperatura). Dicho mecanismo de transferencia de calor sucede tanto en sólidos como en líquidos y gases; la velocidad con la que el calor fluye a través de un medio variará según sea el grosor y material. A mayores grosores menores serán las pérdidas de calor, así como en materiales con baja conductividad térmica (como la madera, esponjas, algunos plásticos, etc.). La convección transfiere energía entre una superficie sólida y un gas o líquido que está en movimiento relativo a la superficie. La tasa de transferencia se ve afectada por el movimiento del fluido; si éste se mueve a mayor velocidad la tasa será más elevada. Este mecanismo puede suceder de forma natural, como cuando se deja un objeto caliente en una mesa, o puede ser forzado por un elemento mecánico como un ventilador. Por último, la radiación se refiere a la energía que proviene de la materia y se manifiesta en forma de ondas electromagnéticas; a diferencia de los otros mecanismos, éste no requiere de un medio de propagación por lo que puede ocurrir de igual forma en el vacío. La emisión de radiación se debe a la temperatura que posee el objeto o cuerpo, siempre que un cuerpo tenga una temperatura por encima del cero absoluto emitirá cierto grado de radiación. (Cengel & Ghajar, 2011)

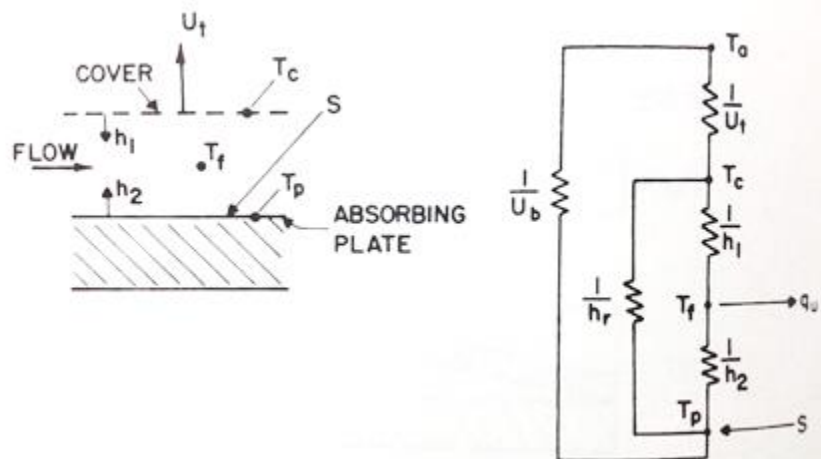
Ilustración 9. Métodos de transferencia de calor



(Instituto Tecnológico Nacional de México, s.f.)

En el caso de un colector solar de placas planas con una sola cubierta, se tienen pérdidas por radiación y convección desde la cubierta hacia el ambiente, por radiación y convección entre la placa metálica y la cubierta, y por conducción a través del aislante (aunque se busca que esta sea mínima). Por lo que el calor entrante de la radiación solar (S) se ve disminuido por dichas pérdidas, resultando en un calor útil (Q_u) menor. El sistema puede representarse como una red de resistencias térmicas, análogas a una resistencia eléctrica, como se muestra a continuación:

Ilustración 10. Sistema de resistencias térmicas para un colector de placa plana

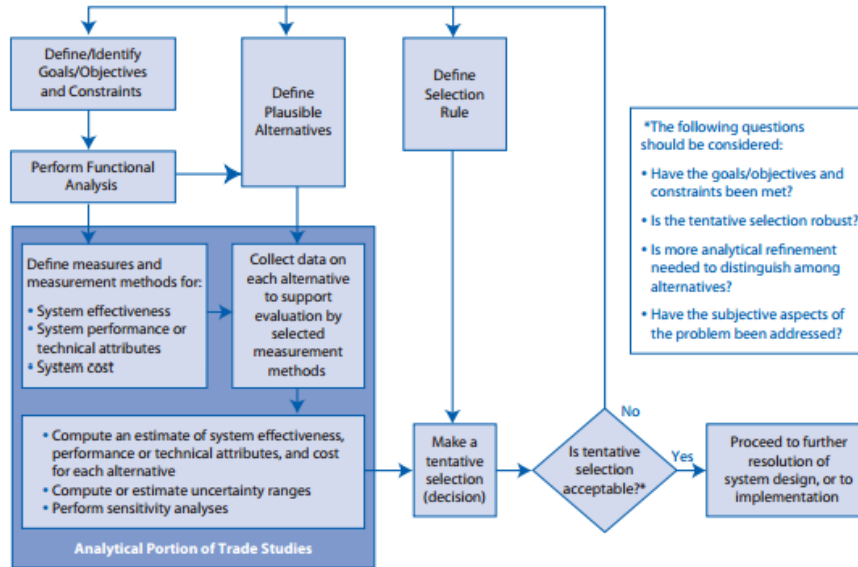


(Duffie & Beckman, 2006)

L. METODOLOGÍA DE NASA, “TRADE STUDIES”

Un “trade study” se refiere a la manera de tomar decisiones mediante la cual se puede identificar la solución técnica más aceptable dentro de un grupo de posibles soluciones. Un aspecto importante es que permite la documentación de las decisiones, en base a una serie de características deseables o requerimientos. Algunos casos donde es posible utilizar este método son: cuando existe más de un curso de acción posible; cada decisión tiene un resultado diferente que puede ser evaluado; variables como costo, calendarización y desempeño deben ser sopesadas. (Baker & Whalen)

Ilustración 11. Diagrama de flujo para un “trade study”



(Baker & Whalen)

De la imagen anterior se puede resumir que para esta metodología es necesario identificar los objetivos y las limitaciones, luego presentar varias opciones factibles, seleccionar los criterios de decisión, así como la regla de decisión y escoger una de las alternativas planteadas. Es importante comprobar que la alternativa seleccionada es aceptable y cumple con los objetivos. (NASA, 2007)

Para poder comparar las decisiones en base a los requisitos seleccionados, se puede hacer uso de distintas técnicas de análisis de decisiones dependiendo del tipo de datos disponibles. Un ejemplo son las técnicas de comparación MCDA o “Multiple Criteria Decision Analysis” como: “Pugh, Analytic Hierarchy Process (AHP) y Kepner-Tregoe (KT)”. En algunas ocasiones es necesario usar más de un método para tomar una mejor decisión. (Baker & Whalen)

Ilustración 12. Ejemplo del método AHP

DECISION CRITERIA				
PAIRWISE COMPARE	Emissions	Fuel Cost	Range	Vehicle Cost
Emissions	1	1	5	5
Fuel Cost	1	1	5	5
Range	0.2	0.2	1	3
Vehicle Cost	0.2	0.2	0.33	1
CRITERIA MATRIX	Emissions	Fuel Cost	Range	Vehicle Cost
Propane	0.07	0.08	0.24	0.65
Hybrid Electric	0.15	0.19	0.70	0.29
Electric	0.78	0.72	0.06	0.06
	GREEN VEHICLE OPTIONS			
MATRIX COMPUTATIONS	Propane	Hybrid Electric	Electric	
Final Scores	0.13	0.24	0.62	= 1 Sum of Scores
SELECTED VEHICLE			✓	

(Baker & Whalen)

Ilustración 13. Ejemplo del método Pugh

DECISION CRITERIA	GREEN VEHICLE OPTIONS		
	Propane	Hybrid Electric	Electric
Low CO ₂ Emissions	S	S	+
Low Fuel Cost	S	S	+
Long Range	S	+	-
Low Vehicle Cost	S	S	-
Sum of Positives	0	1	2
Sum of Negatives	0	0	2
Sum of Sames	4	3	0
SELECTED VEHICLE		✓	

(Baker & Whalen)

Ilustración 14. Ejemplo del método KT

DECISION CRITERIA	GREEN VEHICLE OPTIONS									
	Propane			Hybrid Electric			Electric			
<u>Must Haves</u>	Info	Y/N	Info	Y/N	Info	Y/N	Info	Y/N	Info	Y/N
Emissions < 120 CO ₂ g/km	110	Yes	104	Yes	0	Yes				
Capacity >= 4 adult passengers	5	Yes	5	Yes	4	Yes				
<u>Wants</u>	Weight	Info	Value	Score	Info	Value	Score	Info	Value	Score
Emissions (CO ₂ g/km)	0.3	110	0.83	0.25	104	1.33	0.40	0	10	3.00
Fuel Cost (US\$/mi)	0.3	12.6	2.62	0.79	13.2	2.14	0.64	3.1	9.76	2.93
Range (miles)	0.2	448	4.35	0.87	896	9.95	1.99	100	0	0.00
Vehicle Cost (US\$)	0.2	25,101	5.59	1.12	26,356	5.12	1.02	39,534	0.18	0.04
<u>Relative Merit</u>				3.03			4.06			5.96
Normalized Merit				0.23			0.31			0.46
Normalized Cost				0.28			0.29			0.43
<u>Merit/Cost</u>				0.84			1.07			1.05
SELECTED VEHICLE							✓			

(Baker & Whalen)

V. ANTECEDENTES

A. CLIMA HUEHUETENANGO

Huehuetenango, situado a una latitud de 15.1928, se caracteriza por tener un clima relativamente frío y húmedo, debido principalmente a su altitud. En cuanto a temperatura los registros más recientes (2011) indican una temperatura anual promedio mínima de 11.7°C, siendo enero, febrero, noviembre y diciembre los meses más fríos, mientras que la temperatura anual promedio para 2011 se registró en 18.5°C. La humedad relativa anual promedio para el mismo año fue del 65.3%, teniendo valores máximos de 77% en julio y siendo mínima en los meses de enero a abril, noviembre y diciembre. (INSIVUMEH, Estación Huehuetenango, 2011)

Existen otros factores meteorológicos que caracterizan esta región como lo son los días de lluvia, nubosidad y brillo solar. Para el año 2011 se tienen registrados 128 días de lluvia al año, los cuales se encuentran concentrados en los meses de mayo a septiembre, lo cual explica la época de siembra. En los meses de enero, febrero, noviembre y diciembre las lluvias son mínimas por lo que se aprovecha para la cosecha. En cuanto a nubosidad se tienen registros para el mismo año de 4.9 octas como promedio anual. Por último, el brillo solar anual promedio registrado en dicho año fue de 204.1 horas, teniendo valores elevados en los meses de enero a abril, noviembre y diciembre. (INSIVUMEH, Estación Huehuetenango, 2011)

B. DEPARTAMENTO DE HUEHUETENANGO, MUNICIPIO DE CHIANTLA, COMUNIDAD SAN ANTONIO LAS NUBES

Según el estudio realizado por la ONG Share, en el área se tiene un sistema de agricultura minifundista por lo que se les dificulta a las familias obtener una producción excedentaria, lo cultivado únicamente sirve para autoconsumo. El problema es agravado generacionalmente al repartir la escasa tierra entre los hijos. El 99.6% de los entrevistados cuentan con un terreno, del cual el 90% es un terreno propio y el resto arrenda tierra para su realizar sus siembras. En dicho terreno un 80% siembra maíz, con un rendimiento promedio de dos quintales por cuerda (el promedio nacional es de 4 quintales por cuerda, donde una cuerda equivale a 20 m X 20 m). (SHARE de Guatemala, 2014)

Los agricultores de maíz cuentan con poco apoyo técnico y financiero, falta de medios para transportar la cosecha y métodos inapropiados de almacenamiento y secado. Sus prácticas agrícolas son empíricas y pasadas de generación en generación, por lo que se encuentran fuertemente arraigadas. Sin embargo, dichas prácticas no contribuyen a la reducción de pérdidas post-cosecha, que debido a la humedad ascienden a un 49%, adicionalmente se sabe que el 67.96% de los agricultores reportan problemas de hongos y mohos en sus cosechas. (SHARE de Guatemala, 2014)

Actualmente 88% de los agricultores seca su maíz tendiéndolo al sol, mientras que otros indicaron que lo dejan secar en la planta. El secado se efectúa inmediatamente después de la cosecha y se realiza con la mazorca entera (sin desgranar). Con base en las pérdidas, se evidenció que las mazorcas no se encuentran con un contenido de humedad adecuado para almacenamiento. Algunas formas de almacenamiento incluyen costales (con maíz desgranado), tapancos (principalmente en mazorcas) y silos (utilizados por un 14% únicamente). Los controles de plaga que se tienen en esta etapa son de naturaleza correctiva y no preventiva, ya que el 53% los lleva a cabo cuando observa roedores o insectos. Dichos controles de plagas son utilizados por un 65% de los agricultores. (SHARE de Guatemala, 2014)

Las pérdidas de maíz pueden dividirse en dos grandes grupos según la etapa en la que ocurren, durante la cosecha y el secado, o durante el almacenamiento. Se estima que en la cosecha y secado las pérdidas pueden llegar hasta un 60%; el 20% de los agricultores perdieron más de 100 libras lo cual les lleva a comprar maíz o reducir su consumo. En el periodo de almacenamiento las pérdidas se debieron a putrefacción (32%), roedores (18%), humedad (12%), insectos (9%) y aves (5%). El 44% de los agricultores perdió entre 1 y 5 libras, un 7% perdió entre 25 a 50 libras, un 4% perdió de 50 a 100 libras y un 6% perdió más de 100 libras. Dicho maíz que presenta algún tipo de daño es utilizado en un 70% para alimentar a los animales, un 20% lo consume (por falta de un sustituto) y tan sólo el 10% lo desecha. (SHARE de Guatemala, 2014)

El diagnóstico inicial del área concluye que las prácticas actuales referentes al cultivo de maíz (que van desde la siembra, secado y almacenamiento) no son sustentables. Se identificó debilidades en el proceso de selección y preparación del maíz. Entre las principales recomendaciones del estudio se encuentran: adoptar mejores técnicas y prácticas de producción, selección, secado y almacenado; desarrollar procesos de transmisión de conocimiento; diversificar la dieta; desarrollar metodologías con mayor reconocimiento al rol de la mujer en el proceso (dándole una participación activa y mayor toma de decisiones). (SHARE de Guatemala, 2014)

C. TRABAJOS PREVIOS EN LA COMUNIDAD

Durante el año 2014 y 2015, la Universidad del Valle de Guatemala trabajó el megaproyecto “Análisis y propuesta de mejora del manejo post cosecha de maíz (*Zea mays*) para la reducción de aflatoxinas y fumonisinas en el maíz cultivado y consumido en el Departamento de Huehuetenango, Guatemala” en la comunidad de San Antonio Las Nubes. Este tenía por objetivo general “Analizar y proponer mejoras del manejo post cosecha de maíz (*Zea mays*) para la reducción de aflatoxinas y fumonisinas en el maíz cultivado y consumido en el departamento de Huehuetenango, Guatemala.” Uno de los principales enfoques incluyó el establecimiento de una línea base en cuanto al maíz cosechado en el área, para ello se realizaron diversas pruebas microbiológicas. Se establecieron dos municipios en el departamento de Huehuetenango para el estudio: Chiantla y Todos Santos Cuchumatán. En el siguiente cuadro se resumen las comunidades que formaron parte del muestreo y su ubicación. (López, Oliva, Rodas, & Aragón, 2015)

Tabla 6. Cadena de promotores para muestreo

Municipio 1: Chiantla	Municipio 2: Todos Santos Cuchumatán
<p>Altura 1:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cumbre de la bojita (3,267 msnm) • Tuinimá Chiquito y Grande (3,222 msnm) <p>Promotor 1</p>	<p>Altura 1:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Chixim (3,564 msnm) • Chemal II (3,581 msnm) <p>Promotor 1</p>
<p>Altura 2:</p> <ul style="list-style-type: none"> • San Antonio las Nubes (2,599 msnm) <p>Promotor 2</p>	<p>Altura 2:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Chicoy (2,300 msnm) • Los Lucas (2,467 msnm) <p>Promotor 2</p>
<ul style="list-style-type: none"> • San José las Flores (2,373 msnm) <p>Promotor 3</p>	<p>Altura 3:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tuiboch (1,565 msnm) • Tuipocomal (1,640 msnm) <p>Promotor 3</p>

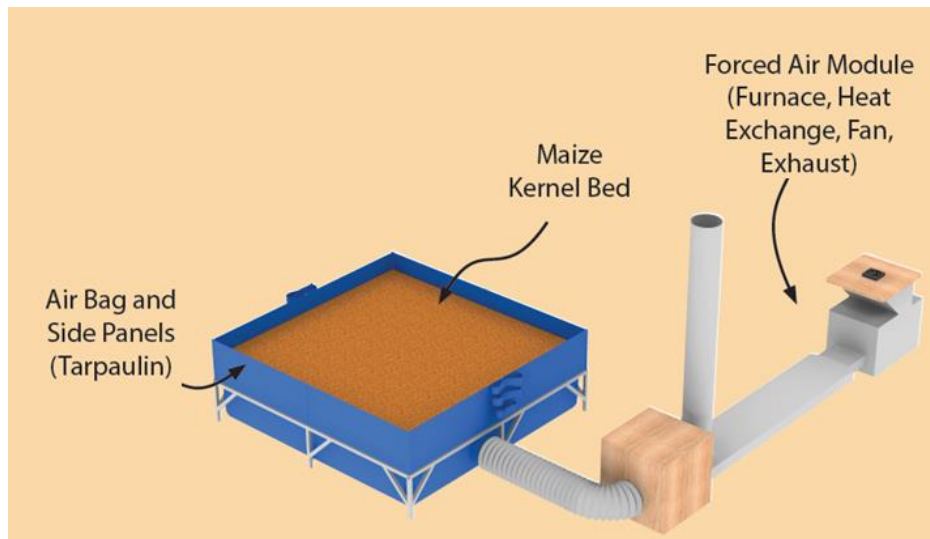
*msns: metros sobre el nivel del mar.

(López, Oliva, Rodas, & Aragón, 2015)

Según a las muestras analizadas, se determinó que el maíz no cumple con estándares de calidad e inocuidad en cuanto a cantidad de aflatoxinas, fumonisinas y hongos. De acuerdo con la dosis diaria estimada de aflatoxinas y fumonisinas, la salud de la población en cuestión se ve comprometida al consumir el maíz que cosechan. De los métodos de almacenamiento, los silos presentaron la menor cantidad de hongos y aflatoxinas. (López, Oliva, Rodas, & Aragón, 2015)

Como parte del proyecto se realizó un prototipo de secador a base de biomasa (cuyo diseño puede verse en la siguiente imagen), con un costo total de Q11, 514.00, con el cual se obtuvo una eficiencia máxima del 12.39% según las pruebas realizadas en San Antonio Las Nubes, Huehuetenango. Sin embargo, el secador presentó deficiencias en la cámara de combustión e intercambiador de calor, así como pérdidas de calor hacia el ambiente, impidiendo así que se alcanzara el contenido de humedad deseada (12-13%). (López, Oliva, Rodas, & Aragón, 2015)

Ilustración 15. Modelo de secador para megaproyecto 2014 a 2015



(López, Oliva, Rodas, & Aragón, 2015)

VI. METODOLOGÍA

A. ETAPA: ESCOGENCIA DEL MODELO DE SECADOR (“TRADE STUDY”)

1. COMPARACIÓN DE LOS TIPOS DE SECADORES Y SUS CARACTERÍSTICAS. Según a los objetivos y requisitos (Anexo 4) planteados, se le dio una ponderación a cada uno de los aspectos relacionados con el desempeño del secador, siendo los aspectos más importantes el menor costo y la temperatura máxima. Se evaluaron cinco posibles diseños de secador según su fuente de energía: solar activo, solar pasivo, uso de leña como fuente de energía, comercial (eléctrico) e híbrido (solar y leña). Se evaluó cada característica con una calificación de 1 a 3, siendo 1 lo menos deseable y 3 lo más deseable. Se escogió el modelo con la mayor puntuación.

Tabla 7. Matriz de valoración de los tipos de secadores de acuerdo a sus características

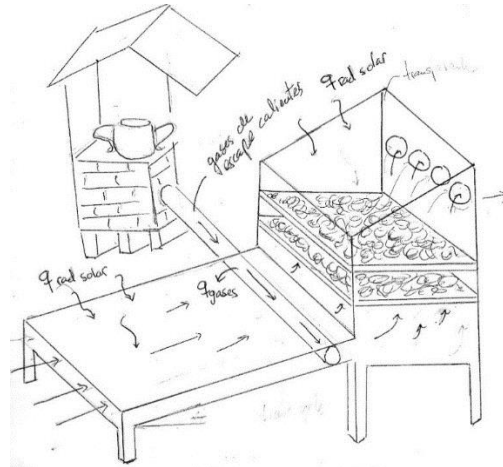
Característica	Ponderación	Solar activo		Solar pasivo		De leña		Comercial		Híbrido	
		Calificación	Puntuación	Calificación	Puntuación	Calificación	Puntuación	Calificación	Puntuación	Calificación	Puntuación
Capacidad	10%	2	0.2	2	0.2	1	0.1	3	0.3	2	0.2
Consumo energético	10%	2	0.2	3	0.3	1	0.1	1	0.1	2	0.2
Tiempo de operación	5%	1	0.05	1	0.05	2	0.1	3	0.15	3	0.15
Tamaño	5%	1	0.05	2	0.1	2	0.1	3	0.15	3	0.15
Control de temperatura	10%	1	0.1	1	0.1	2	0.2	3	0.3	2	0.2
Temperatura max	30%	1	0.3	2	0.6	2	0.6	3	0.9	3	0.9
Costo	30%	2	0.6	3	0.9	2	0.6	1	0.3	2	0.6
Total			1.5		2.25		1.8		2.2		2.4

(Elaboración propia)

B. ETAPA: CÁLCULOS PRELIMINARES Y DISEÑO DEL SECADOR

Al haber seleccionado un secador híbrido (solar y leña) se procedió a diseñar el mismo. Se decidió construir un secador solar tipo gabinete combinado por la facilidad de ensamble, colocación del grano y acoplamiento de una fuente de calor con leña. Para la fuente de calor con leña se pensó en utilizar una estufa ahorradora de leña, debido a que podría utilizarse con un doble propósito (cocinar y secar el maíz) y su bajo costo (Q400.00). Para ello se contó con el diseño de una estufa ahorradora de leña gracias a Carlos Galvez (miembro de Club Rotario Guatemala Este) y Club Rotaract Guatemala Sur. Inicialmente se planteó el siguiente bosquejo:

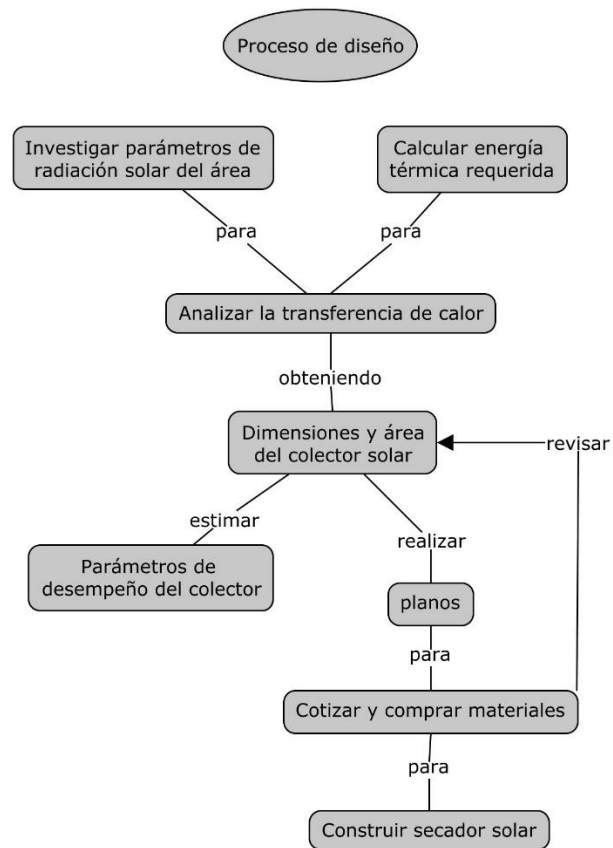
Ilustración 16. Diseño preliminar del secador



(Elaboración propia)

1. De acuerdo al Anexo 1 (Duffie & Beckman, 2006) se calculó el área del colector necesaria, la cual resultó en 6.80 m^2 .
2. El proceso de diseño fue iterativo por lo que el área del colector fue reducida posteriormente. El proceso que se siguió se ilustra a continuación:

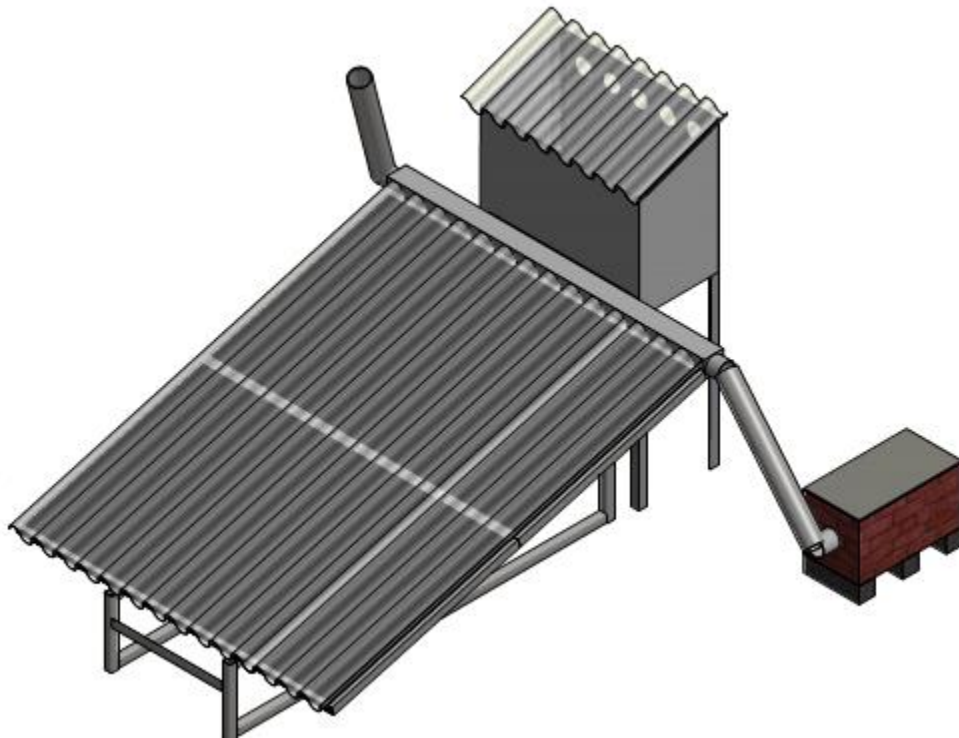
Ilustración 17. Proceso de diseño



(Elaboración propia)

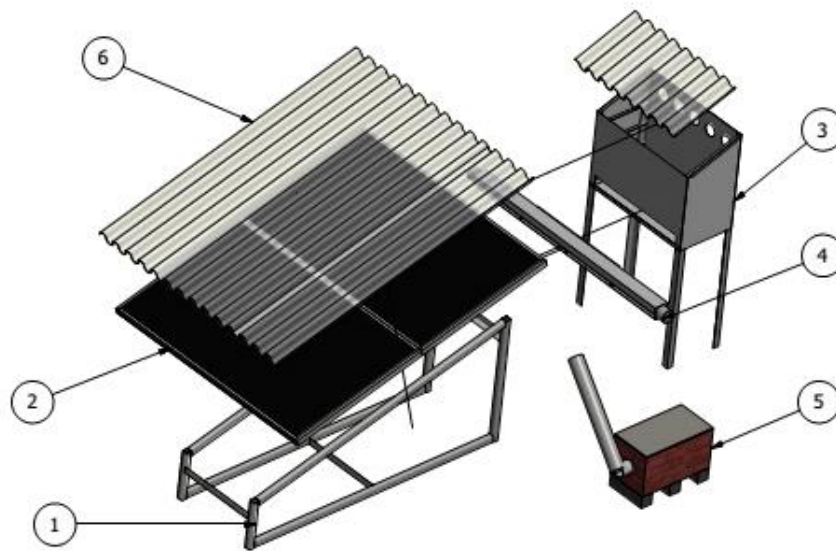
3. Según el bosquejo y las dimensiones del colector solar se realizaron los planos mecánicos, Anexo 2. El modelo 3D en base al cual se obtuvieron los planos se muestra a continuación:

Ilustración 18. Modelo 3D del secador



(Elaboración propia)

Ilustración 19. Explosión del secador



(Elaboración propia)

Ilustración 20. Listado de partes del secador

No. Ítem	Parte
1	Soporte del colector solar
2	Panel del colector solar
3	Gabinete para secado
4	Intercambiador de calor
5	Estufa ahorradora de leña
6	Lámina corrugada de PVC

(Elaboración propia)

C. ETAPA: CONSTRUCCIÓN DEL SECADOR

1. Según los planos se obtuvo el listado de materiales, así como las respectivas cotizaciones. El costo de los materiales se resume en la siguiente tabla:

Tabla 8. Costo del secador

Descripción	Cantidad	Precio	Total
Lámina negra 1/16" (4'X8')	6	Q 251.00	Q 1,506.00
Tubo cuadrado 2" chapa 14 (6 m)	1	Q 157.00	Q 157.00
Angular hierro negro 2"X2"x1/8" (6m)	4	Q 106.50	Q 426.00
Angular hierro negro 1"X1"x1/8" (6m)	5	Q 55.00	Q 275.00
Hierro Negro Plano 1"X1/8" (6m)	2	Q 30.00	Q 60.00
Plancha duroport 2'X4'x3/4"	24	Q 14.00	Q 336.00
Plancha duroport 1 cm espesor (100X50 cm)	14	Q 13.00	Q 182.00
Lámina galvanizada calibre 20 (4'X8')	2	Q 284.25	Q 568.50
Tubo de cobre 5/8" (20')	1	Q 248.61	Q 248.61
Lámina PVC 12 transparente	3	Q 192.00	Q 576.00
Galón de pintura mate de agua	1	Q 166.50	Q 166.50
galón de pintura	1	Q 211.92	Q 211.92
Ladrillos	55	Q 2.50	Q 137.50
Blocks	9	Q 6.50	Q 58.50
Tubos de hojalata	4	Q 55.00	Q 220.00
Codo 90° hojalata	3	Q 25.00	Q 75.00
Saco de arena	1	Q 80.00	Q 80.00
Otros (tornillos, silicón, cedazo, etc.)	1	Q 500.00	Q 500.00
Total			Q 5,784.53

2. Para la construcción del secador se utilizó el taller de metal mecánica y el de carpintería de la Universidad del Valle, y fue trabajado por la estudiante y el encargado del taller durante dos meses aproximadamente. Primero se construyó el colector solar, luego el gabinete y por último el intercambiador de calor. Las uniones permanentes se realizaron con soldadura de arco y las no permanentes con tornillos 1/4" de diámetro nominal.

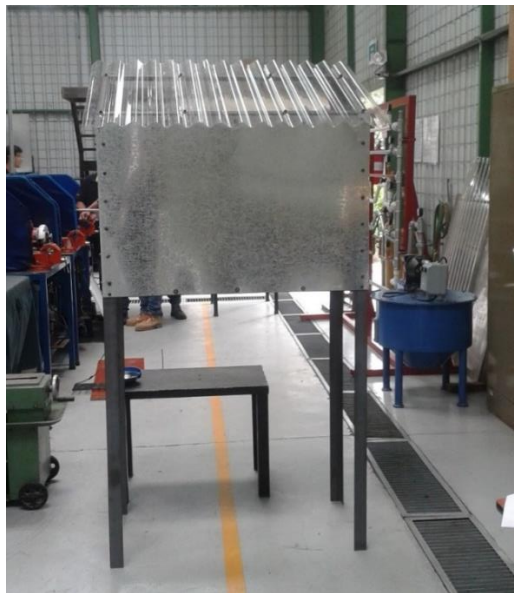
Ilustración 21. Construcción del colector solar



(Fotografía propia)

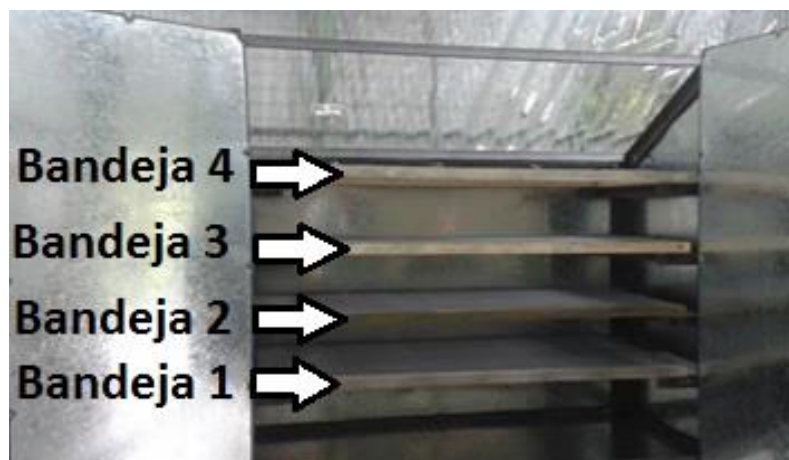
El colector solar cuenta con una estructura de soporte y 2 planchas metálicas que puede ser ensamblada fácilmente con tornillos. Está pintada de negro mate para mejorar la emisividad de la superficie, permitiendo mayor transferencia de calor.

Ilustración 22. Construcción del gabinete, vista frontal



(Fotografía propia)

Ilustración 23. Vista interna del gabinete



(Fotografía propia)

El gabinete puede ser armado mediante tornillos y cuenta con cuatro divisiones para colocar bandejas de madera y cedazo, donde el maíz se coloca desgranado. Tiene una lámina de PVC transparente en la parte superior para aprovechar la radiación solar de forma directa.

Ilustración 24. Construcción del intercambiador de calor



(Fotografía propia)

Para el intercambiador de calor se soldaron dos perfiles de acero tipo "C", colocando dentro 5 placas con tres agujeros como guías para soportar la tubería de cobre en su lugar. Los gases de escape de combustión de la estufa ahorradora de leña pasan por dentro de la tubería de cobre. Los perfiles "C" conectan el colector solar con el gabinete, permitiendo que el aire limpio pase por la parte externa de la tubería de cobre.

Ilustración 25. Construcción de bandejas



(Fotografía propia)

Las cuatro bandejas se fabricaron en el taller de carpintería utilizando pino; las uniones se realizaron con tornillos y cola para madera. La madera utilizada no tenía ningún tratamiento, ya que algunas veces se utiliza protección contra termitas u otros insectos, pero estos pueden contener químicos no deseados para el manejo de alimentos. El cedazo que se utilizó era plástico y se colocó con grapas de electricista sobre el marco de madera.

D. ETAPA: PRUEBAS DE CAMPO

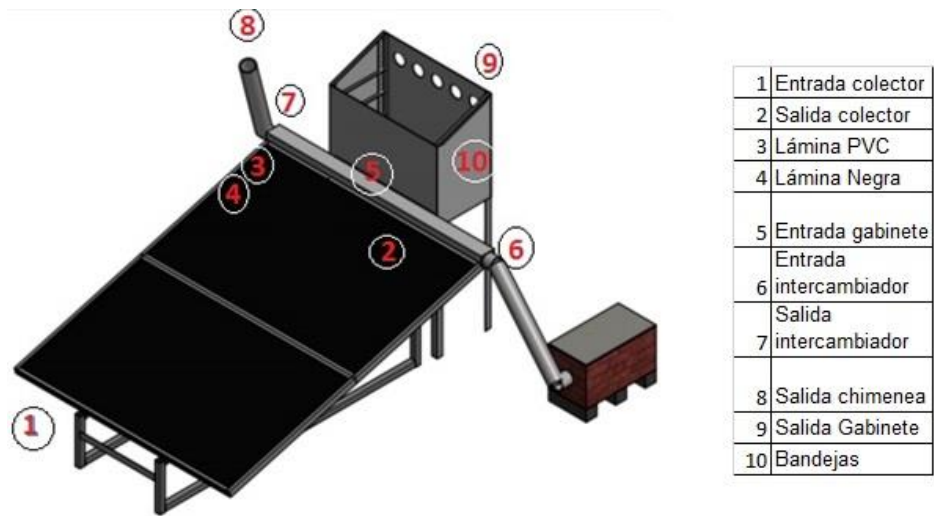
1. **PRUEBA PILOTO EN UVG.** En diciembre del 2015 se realizaron pruebas con el secador dentro del campus central de UVG, con el fin de evaluar el funcionamiento del mismo y de ser necesario realizar ajustes. Previo a esta prueba se determinaron los diez puntos principales de medición de temperatura, así como el equipo necesario y mediante la prueba, se validaron. Dentro del gabinete se situaron cuatro bandejas enumerándolas como 1 la inferior y 4 la superior.

Tabla 9. Puntos de medición

Puntos de interés a medir			
Número	Ubicación	Medición temperatura °C	Medición aire
1	Entrada colector	(Temp. Ambiente) Medidor de temperatura y humedad FLUKE 971	(m/s)Termo-Anemómetro EXTECH (AN200)
2	Salida colector	Termocopla, Enviro Meters termómetro diferencial dual EM60	-
3	Lámina PVC	Termocopla, Enviro Meters termómetro diferencial dual EM60	-
4	Lámina negra	Termocopla, Enviro Meters termómetro diferencial dual EM60	-
5	Entrada gabinete	Termocopla, Enviro Meters termómetro diferencial dual EM60	(Velocidad m/s)Termo-Anemómetro EXTECH (AN200)
6	Entrada intercambiador	Termocopla, Enviro Meters termómetro diferencial dual EM60	-
7	Salida intercambiador	Termocopla, Enviro Meters termómetro diferencial dual EM60	-
8	Salida chimenea	(Temp. Ambiente) Medidor de temperatura y humedad FLUKE 971	(Velocidad m/s)Termo-Anemómetro EXTECH (AN200)
9	Salida gabinete	Termocopla, Enviro Meters termómetro diferencial dual EM60	
10	Bandejas	*cápsula, 1 por bandeja. Data loggers HOBO temperatura y humedad relativa	

(Elaboración propia)

Ilustración 26. Puntos de medición



(Elaboración propia)

Ilustración 27. Secador armado, UVG



(Fotografía propia)

2. PRUEBA EN HUEHUETENANGO. Se viajó al municipio de Chiantla, departamento de Huehuetenango y se trabajó en la finca de Don Gabriel (agricultor contactado mediante SHARE) durante la semana del 18 al 22 de enero de 2016.

Ilustración 28. Secador armado, Huehuetenango



(Fotografía propia)

El día martes se tomaron lecturas con el secador como se aprecia en la imagen. El miércoles y jueves se aisló la estufa, para elevar la temperatura de los gases de escape.

Ilustración 29. Bandeja con maíz negro desgranado



(Fotografía propia)

E. Etapa: Evaluación del secador

Según a los datos obtenidos de las pruebas realizadas en Huehuetenango, se calculó el calor total (utilizando una estimación de la radiación solar, Anexo 3) y el calor útil (Duffie & Beckman, 2006). Para evaluar el desempeño general del secador se calculó la eficiencia térmica de dos maneras: como el calor útil requerido para el secado dividido el calor total que recibe el sistema (Duffie & Beckman, 2006) y mediante las temperaturas del aire de secado, aire ambiente y aire usado (una vez sale de la cámara de secado) según procedimiento de FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1996). Adicionalmente se verificó que los objetivos y requisitos se hayan cumplido.

VII. RESULTADOS

A. EXPERIMENTO 1: PRUEBAS UVG

La prueba fue realizada en el parqueo 1 del campus central de la Universidad del Valle de Guatemala, donde se recibe sol de forma directa y continua a lo largo del día. El secador se armó el lunes 14 de diciembre del 2015 y las pruebas se realizaron del martes 15 al jueves 17, siendo las del día miércoles y jueves desde las 10:00 hasta las 18:00 horas. Para esta prueba se compró maíz blanco con tuza.

Estas primeras pruebas sirvieron para validar los puntos donde se estaba midiendo la temperatura, comprobar el funcionamiento adecuado del secador y determinar cómo serían las pruebas en Huehuetenango. Además, permitieron darse una idea del tiempo y forma del ensamblaje, así como realizar cualquier modificación necesaria al equipo.

El día martes 15 la prueba se realizó utilizando el maíz en mazorca, colocando las mismas en las bandejas del secador. Previamente se quitó la tuza del maíz de forma manual. Luego de 2.5 horas de secado (de las 14:30 a 17:00 horas) la humedad disminuyó un 6.6% (de 24.5% a 17.9%). El maíz se dejó dentro del secador durante la noche, para evaluar si ganaba humedad hasta el siguiente período de secado.

Ilustración 30. Colocación de mazorcas en el secador



(Fotografía propia)

El miércoles 16 se continuó el secado del maíz en mazorca, empezando a las 10:00 horas con un contenido de humedad del 20.9%. Lo anterior evidenció que, al dejar el maíz dentro del secador durante la noche, se ganaba un 3% de humedad. El día estuvo relativamente nublado y se tuvo problemas para mantener la estufa prendida. Luego de 8 horas de secado (de las 10:00 a 18:00 horas) se tomó la lectura de contenido de humedad del maíz, la cual disminuyó a 20.5%. Adicionalmente se observó que el centro de la mazorca, el olote, estaba completamente seco.

El día jueves 17 se realizó la prueba utilizando el maíz desgranado (colocando 10 lb en cada una), una de las bandejas se rompió durante las pruebas anteriores por lo que se utilizaron tres bandejas únicamente. Para resolver el problema con la estufa se colocó un ventilador de computadora en la chimenea, y se forró la estufa con aislante de lana mineral; adicionalmente se colocaron 2 ventiladores dentro del gabinete para mejorar el flujo de aire dentro del mismo. La prueba de secado inició a las 9:30 y finalizó a las 16:00 horas. El maíz inició con un contenido de humedad del 21.3% y al finalizar la prueba el maíz de la bandeja 1 (bandeja inferior) tenía un 14.2% de humedad, el de la bandeja 2 (bandeja intermedia) un 17.4% y el de la bandeja 3 (bandeja superior) un 15.5%.

Ilustración 31. Ventilador colocado en la chimenea



(Fotografía propia)

Al momento de desarmar el equipo se pudo observar que, dentro del intercambiador de calor, se había depositado condensado; se acumuló en el codo de la chimenea principalmente. Esto causó que el flujo de gases se viera interrumpido. Para resolver dicho problema se realizó un agujero en el codo, por donde se pudiera drenar el condensado.

Ilustración 32. Condensado dentro del intercambiador de calor



(Fotografía propia)

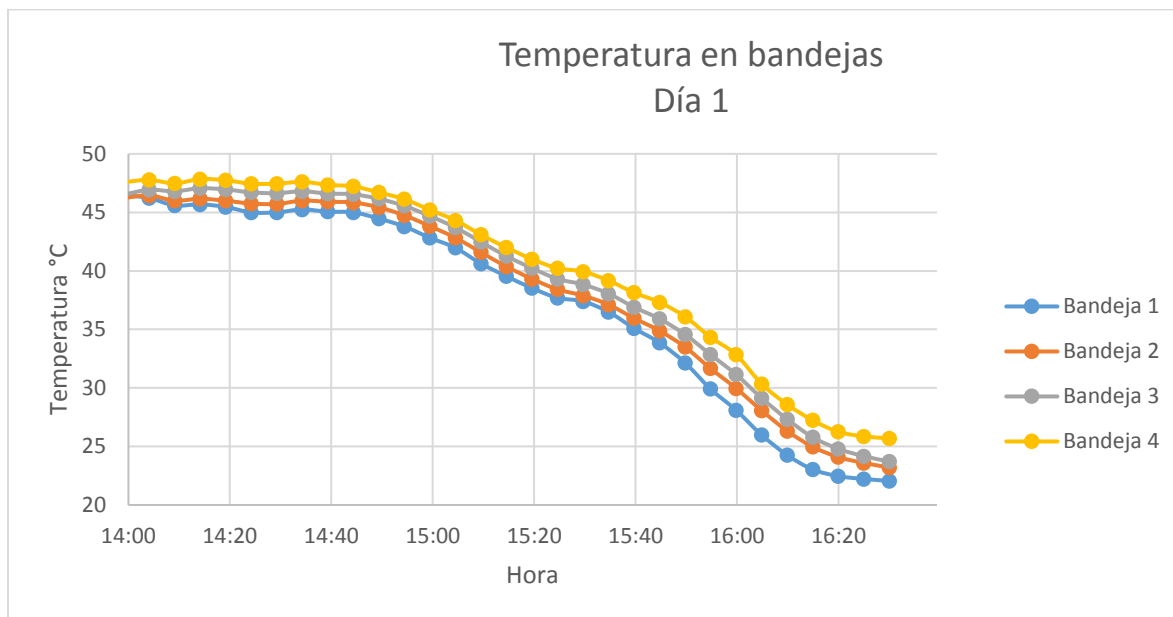
B. EXPERIMENTO 2: PRUEBA HUEHUETENANGO

El día lunes 18 de enero se transportó el material desde el campus central de UVG a Huehuetenango. El día martes por la mañana se llevó el material hasta la finca de Don Gabriel, agricultor con quien se trabajó durante las pruebas; también se construyó el secador. Se tomaron datos martes (únicamente por la tarde), miércoles y jueves. Se mantuvo la numeración original de las bandejas siendo 1 la que se sitúa en la parte inferior y 4 la de la parte superior. El día viernes se desmontó el equipo.

Para las pruebas de secado se utilizó maíz negro desgranado colocado sobre las bandejas, aproximadamente 10 lb en cada una de las bandejas. En el medio de cada una de las bandejas se colocó un sensor de temperatura y humedad relativa HOBO, que toma datos de forma inalámbrica y continua.

1. **DÍA 1 (MARTES 19 DE ENERO DE 2016).** Se colocó el secador teniendo la plancha de la estufa expuesta para evaluar si se podría cocinar al mismo tiempo que se seca el maíz. Se tuvo dos horas y media de operación, de las 14:00 a las 16:30 horas; únicamente se monitoreó la temperatura (no se colocó a secar maíz). Se observó que a partir de las 16:00 horas se formaba sombra sobre el colector debido a unos árboles altos en la cercanía. La temperatura de las bandejas varió según se muestra en el siguiente gráfico:

Ilustración 33. Temperatura en bandejas día 1



(Elaboración propia)

Tabla 10. Temperaturas máximas y mínimas día 1.

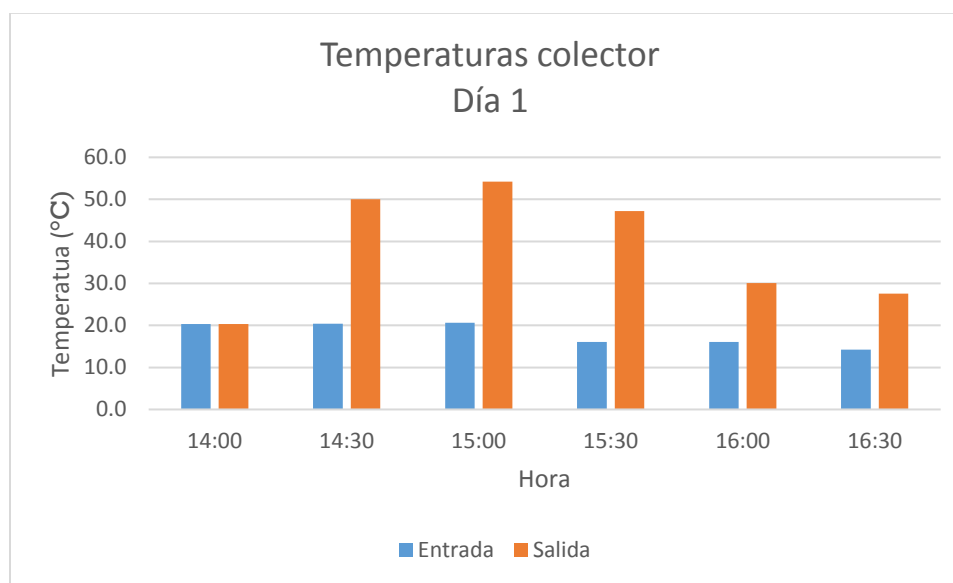
	Bandeja 1	Bandeja 2	Bandeja 3	Bandeja 4
Temperatura mínima (°C)	22.06	23.21	23.71	25.70
Temperatura máxima (°C)	46.48	46.45	47.06	47.84

(Elaboración propia)

Se puede apreciar que la temperatura de las cuatro bandejas es similar variando en uno o dos grados, siendo la bandeja 4 la que presenta mayores temperaturas. La temperatura tiende a decaer, teniendo su máximo al inicio (14:00 horas) más cerca del medio día solar. De las 16:00 a las 16:30 se tiene una caída de temperatura más pronunciada.

El colector solar incrementó la temperatura del aire en 24.3°C en promedio, presentando un incremento de temperatura mínimo de 13.4°C y un máximo de 33.6°C. A continuación, se muestra la temperatura del aire de entrada (temperatura ambiente) y a la salida del colector.

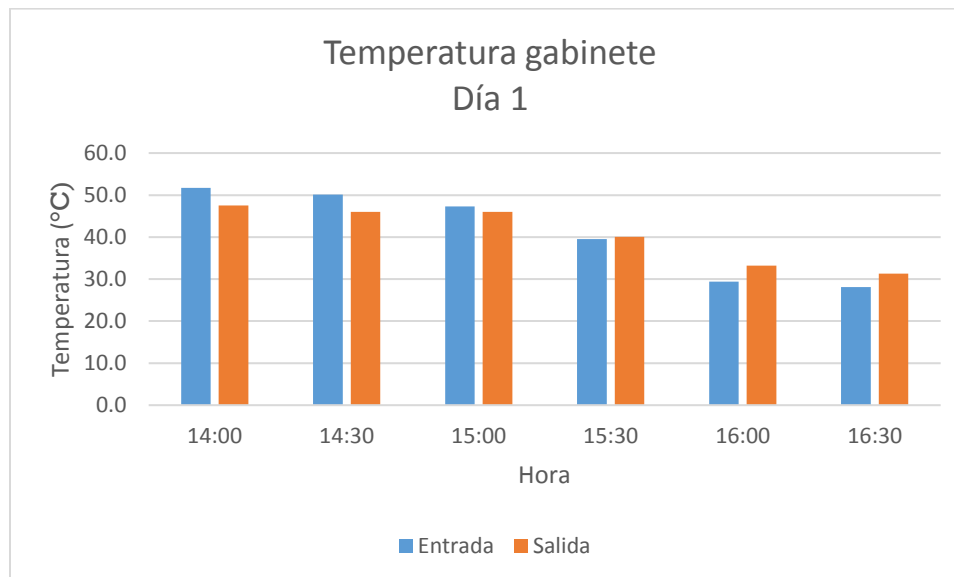
Ilustración 34. Temperaturas en el colector día 1



(Elaboración propia)

A continuación, se presenta la variación de temperatura dentro del gabinete, donde se encuentran las bandejas con maíz. Se puede ver que la diferencia de temperatura no es tan marcada como en el colector. Cabe resaltar que a partir de las 16:00 la temperatura de salida es mayor a la de entrada.

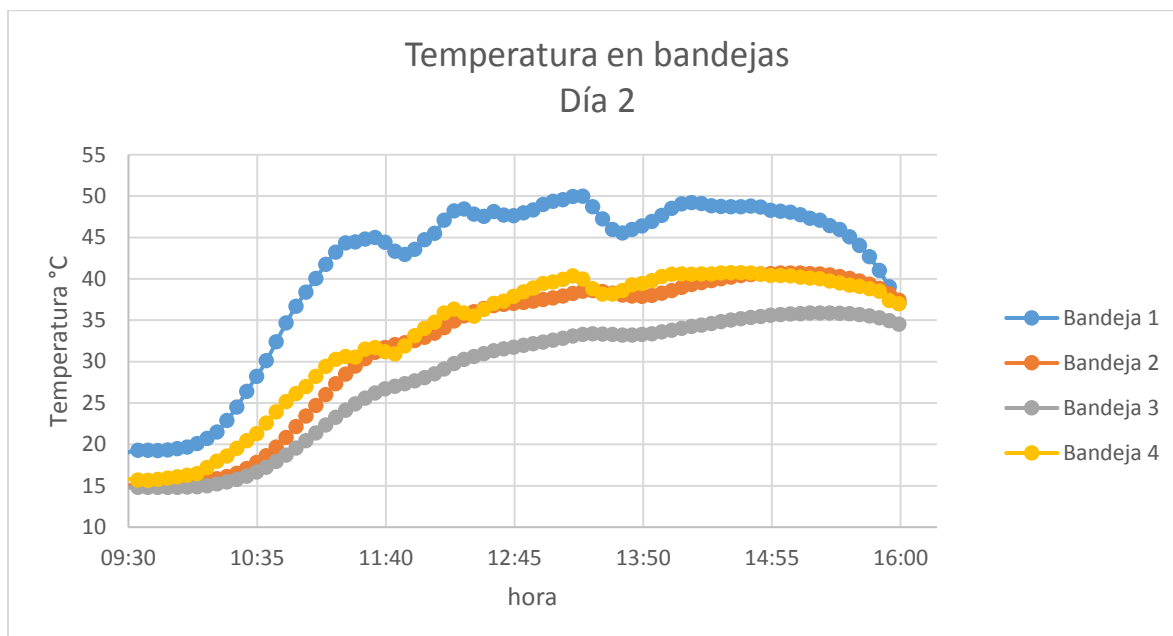
Ilustración 35. Temperatura en el gabinete día 1



(Elaboración propia)

2. **DÍA 2 (MIÉRCOLES 20 DE ENERO DE 2016).** Para esta prueba se colocó aislante sobre toda la plancha de la estufa, con el objetivo de elevar la temperatura de los gases de combustión. Adicionalmente se notó condensado sobre la superficie del colector, el cual fue secado previamente a iniciar la prueba. La misma inició a las 9:30 horas, se tuvo un cielo nublado hasta las 10:30, el resto del día fue bastante soleado y la prueba concluyó a las 16:00 horas. Se tuvo un consumo de leña bastante constante, siendo en promedio de 1.18 lb de leña por hora. La temperatura en las bandejas mostró un comportamiento distinto al día uno, con mayores diferencias de temperaturas entre bandejas.

Ilustración 36. Distribución de temperatura en bandejas día 2



(Elaboración propia)

Del gráfico anterior se puede observar claramente que la bandeja 1 presenta la mayor temperatura, mientras que la 4 y 2 tienen temperaturas similares, dejando la bandeja 3 como la de menor temperatura.

Tabla 11. Resumen de temperaturas por bandeja día 2

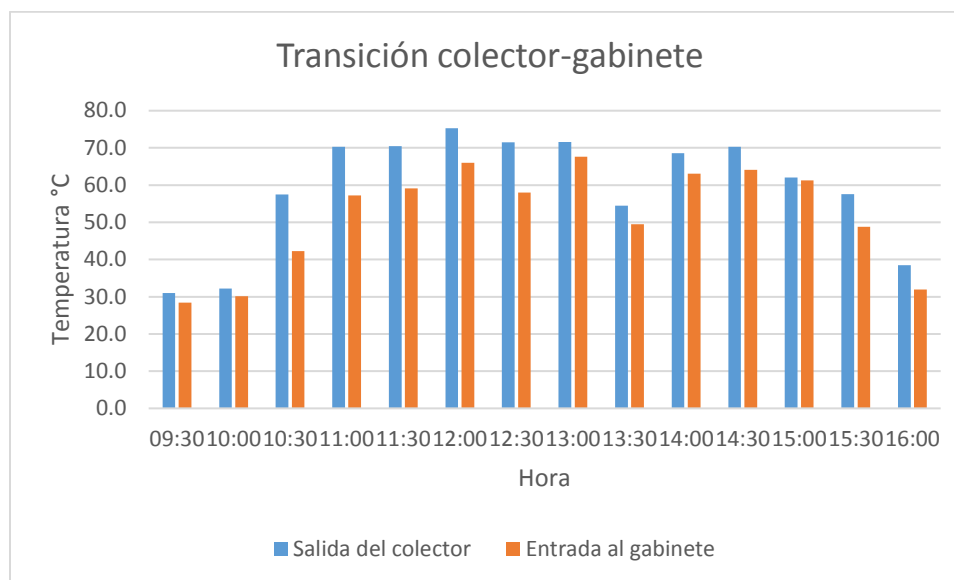
	Bandeja 1	Bandeja 2	Bandeja 3	Bandeja 4
Temperatura mínima (°C)	17.01	15.03	14.79	15.65
Temperatura máxima (°C)	49.99	40.69	35.88	40.75
% de Humedad inicial promedio maíz	22.4	22.4	22.4	22.4
% de Humedad final promedio maíz	16.7	17.6	18.5	18.4

(Elaboración propia)

De la tabla anterior se puede notar que la diferencia entre temperaturas mínimas y máximas en las bandejas, está entre 21.09°C y 32.98°C. Dicha diferencia de temperatura ocurre a lo largo del día, siendo mínima en las horas de la mañana y máxima cerca de las 13:00 horas. Además, el porcentaje de humedad del maíz se redujo mayormente en la bandeja uno, la cual tenía la mayor temperatura, reduciendo un 5.7% de humedad en 6.5 horas. El maíz de las bandejas se guardó por separado en bolsas plásticas, posteriormente colocadas en una caja plástica, para poder continuar el secado.

En el siguiente gráfico se puede observar la variación de la temperatura del aire de secado al pasar del colector al gabinete:

Ilustración 37. Temperaturas de transición entre colector y gabinete día 2



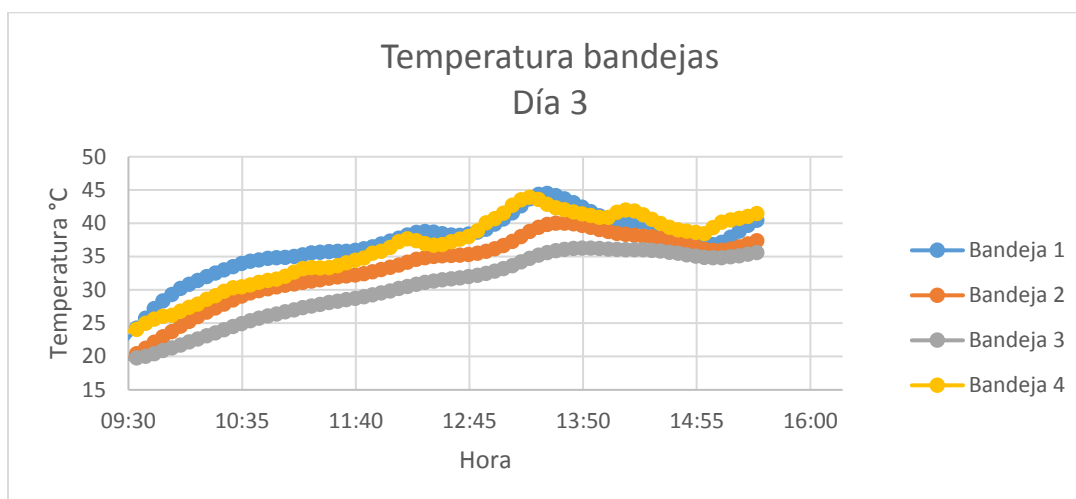
(Elaboración propia)

Del gráfico anterior se puede notar que la temperatura a la salida del colector decae con respecto a la de entrada al gabinete. Se presenta una mayor caída de temperatura de 10:30 a 11:30 horas y una caída de temperatura mínima a las 15:00 horas.

3. DÍA 3 (JUEVES 21 DE ENERO DE 2016). La prueba inició a las 9:30 horas, se tuvo un cielo nublado durante la mayor parte del día y la prueba concluyó a las 15:30 horas. Se sacó el maíz del día anterior de las bolsas plásticas y se volvió a tomar el porcentaje de humedad para corroborar que no se hubiera humedecido durante la noche. Sin embargo, la lectura fue bastante menor a la obtenida el día anterior.

Debido a que el maíz de cada bandeja se secó en distinta proporción el día anterior, se cambió el maíz más seco a las bandejas con menor temperatura y el más húmedo a las bandejas con mayor temperatura. Por lo tanto, el maíz que el miércoles estaba en la bandeja 1 se pasó a la bandeja 3, el de la 2 a la 4, el de la 3 a la 1 y el de la 4 a la 2.

Ilustración 38. Distribución de temperatura en bandejas día 3



(Elaboración propia)

Del gráfico anterior se puede apreciar que para un día nublado la temperatura entre las bandejas muestra menor dispersión, en comparación al día anterior (día 2). Las bandejas 1 y 4 son las de mayor temperatura, siendo mayor la de la bandeja 1 en la mayoría de ocasiones. Se mantiene que la bandeja 3 presenta la menor temperatura. En la siguiente tabla se puede ver que la diferencia de temperaturas por bandeja se mantuvo entre 16.63°C y 24.01°C.

Tabla 12. Resumen de temperaturas por bandeja día 3

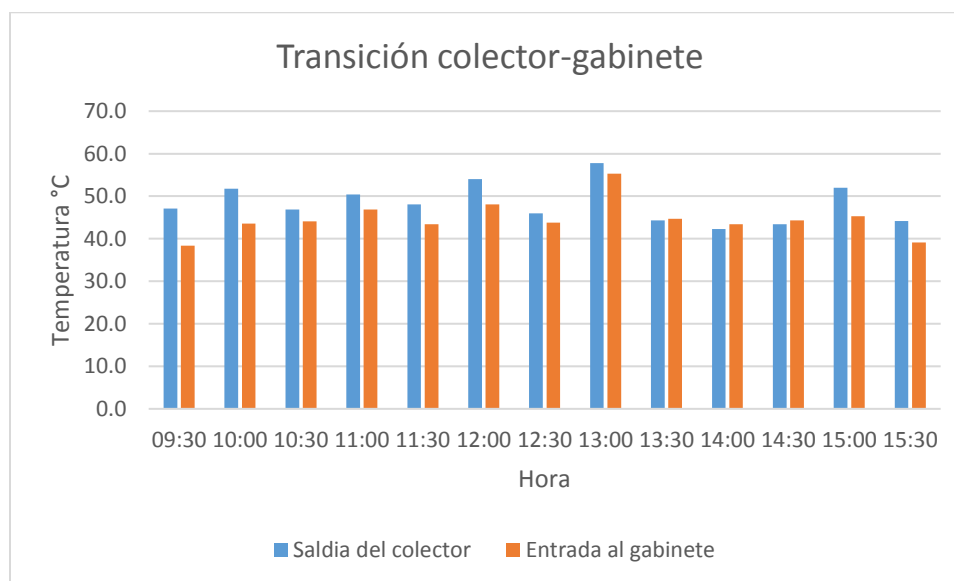
	Bandeja 1	Bandeja 2	Bandeja 3	Bandeja 4
Temperatura mínima (°C)	20.46	19.34	19.63	22.78
Temperatura máxima (°C)	44.47	40.03	36.25	43.89
% de Humedad inicial promedio maíz	16.7	15.2	14.7	16.0
% de Humedad final promedio maíz	14.8	14.5	14.3	14.5

(Elaboración propia)

Como resultado se tuvo porcentajes de humedad finales cercanos al 14% deseado. En la bandeja más húmeda (bandeja 1) se tuvo una disminución del 1.9% y en la más seca (bandeja 3) del 0.4%, para un tiempo de secado de 6 horas.

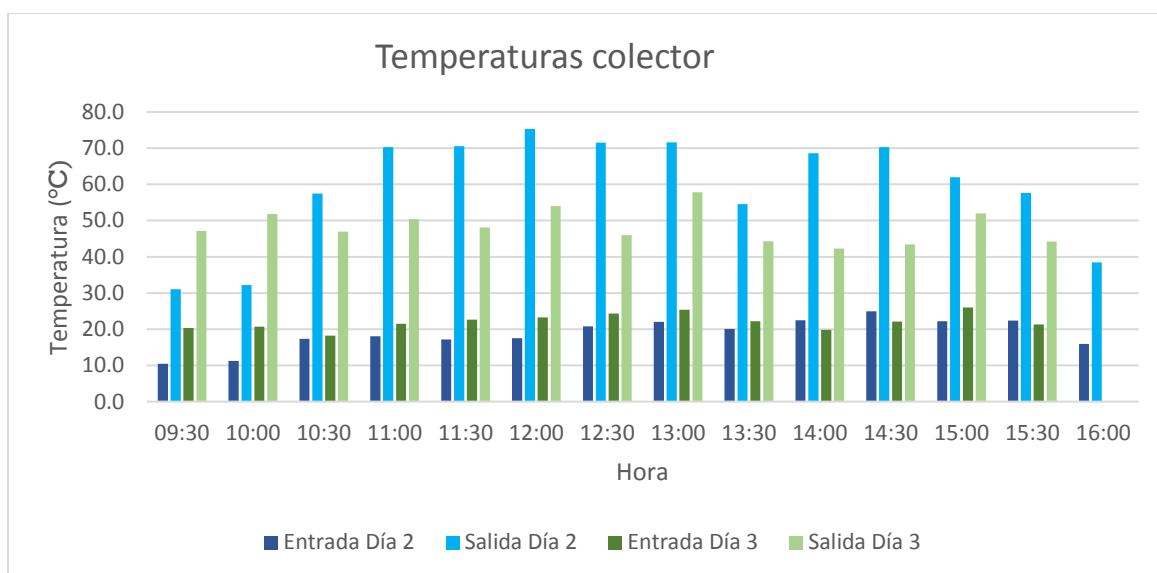
Al igual que en el día dos la temperatura cayó al pasar del colector al gabinete. Sin embargo, entre las 13:30 y 14:30 horas cuando la temperatura de salida del colector fue la más baja, la temperatura incrementó en un grado.

Ilustración 39. Temperaturas de transición entre colector y gabinete día 3



(Elaboración propia)

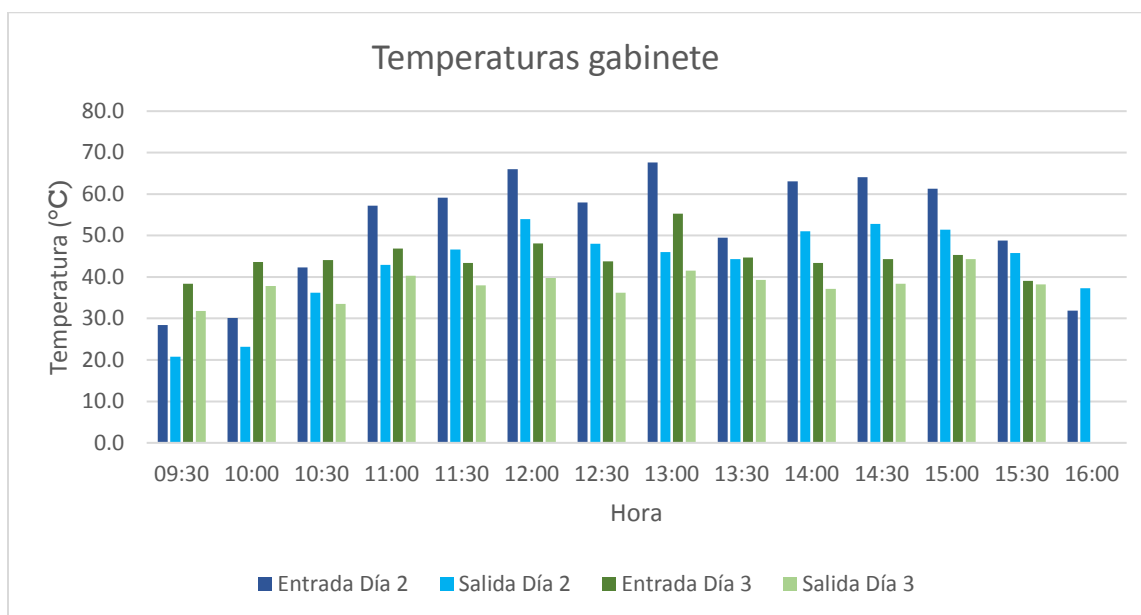
Ilustración 40. Comparación de temperaturas en el colector



(Elaboración propia)

En la gráfica anterior se puede comparar el comportamiento del colector en un día soleado (día 2) y uno nublado (día 3). La temperatura de entrada fue similar para ambos días, siendo igual o ligeramente superior el día 3. La temperatura de salida fue mayor el día 2 a partir de las 10:30.

Ilustración 41. Comparación de temperaturas en gabinete



(Elaboración propia)

De la gráfica anterior se puede ver un comportamiento similar de la temperatura de entrada respecto a la de salida en el gabinete, tanto para el día 2 como para el 3. El día 3 presenta temperaturas tanto de entrada como de salida superiores a las del día 2 respectivamente. Para el día 2 la temperatura de entrada se mantuvo por encima de 40°C de 10:30 a 15:30 horas, mientras que para el día 3 fue de 10:00 a 15:00 horas.

C. EFICIENCIA DEL SECADOR

El detalle de los cálculos de la eficiencia utilizando ambos métodos puede consultarse en el Anexo 5.

1. **Método 1.** Se calculó la eficiencia del secador (anexo 5) con la cantidad de energía requerida para evaporar el contenido de agua deseado y la energía total que utiliza el secador. La fuente de energía del secador es la radiación solar, debido a que la estufa no aportó en el calentamiento del aire de secado se excluye del cálculo. Este método utiliza estimaciones teóricas de la radiación solar (anexo 3), y se ve afectado por el factor de eficiencia del colector. Esta eficiencia se refiere a la del sistema del secador completo y resultó ser de: 10.6%.

2. **Método 2.** Se calcula la eficiencia del secador en base a las temperaturas del aire de secado, el aire usado y el aire ambiente. Este método utiliza los datos recopilados durante las pruebas en Huehuetenango, del día miércoles y jueves. Debido a que el secador es solar principalmente, las temperaturas del aire varían con la hora por lo que la eficiencia no es constante. A continuación, se muestra el resumen de la eficiencia obtenida por día:

Tabla 13. Eficiencia método 2

	Día 2 (martes)	Día 3 (miércoles)
Eficiencia máx.	47.4%	46.2%
Eficiencia promedio	29.3%	27.8%

(Elaboración propia)

Para ambos días la eficiencia se mantuvo por encima del 15% desde las 9:30 hasta las 14:30 horas. La eficiencia máxima se presentó a las 13:00 horas, cuando el sol está en su punto más alto, mientras que a partir de las 15:00 horas la eficiencia decayó. Con este método la eficiencia promedio del secador fue de 28.5%. Es importante resaltar que esta es la eficiencia del proceso de secado.

VIII. DISCUSIÓN

Durante las pruebas en UVG, el día miércoles 16 de diciembre se tuvo una reducción del contenido de humedad del grano de 0.4% en 8 horas. Dado que se observó que el centro de la mazorca (olote) estaba seco, es probable que la transferencia de calor del aire hacia el grano haya sido mucho menor que la del aire hacia el olote. La prueba realizada el jueves 17 de diciembre confirma que la tasa de secado del grano es mayor cuando éste se encuentra desgranado, ya que no se pierde calor en secar el olote.

De las pruebas realizadas en Huehuetenango, se tuvo diferencias en las lecturas del contenido de humedad del maíz del día miércoles 20 de enero (día 2) al jueves 21 de enero (día 3), lo cual puede obedecer a que el día miércoles la lectura se tomó inmediatamente al concluir el experimento, por lo que el maíz todavía tenía calor residual del secado. En cambio, el jueves por la mañana la lectura se realizó con el maíz estando más frío.

Las bandejas se colocaron de forma ascendente, situando la 1 en la parte inferior y la 4 en la parte superior (ver Ilustración 23 para claridad). De las cuatro bandejas de secado la cuarta mostró mayor temperatura que la segunda y tercera, lo cual se debe a que esta recibe radiación solar directa, por ello su temperatura es mayor. La primera tuvo la mayor temperatura, ya que recibe de forma directa el aire más caliente y seco, además que el caudal de aire incidente es mayor debido al posicionamiento de los ventiladores.

Se notó una pronunciada caída de temperatura en la salida del colector alrededor de las 16:00 horas la cual se debe a la sombra que se generó sobre el colector. Dicha sombra principalmente se debió a árboles muy altos en la cercanía.

La temperatura de salida del colector presenta fluctuaciones, que pueden deberse a nubes pasajeras y ráfagas de viento. La nubosidad disminuye la irradiación incidente sobre el colector, mientras que las ráfagas de viento alteran el flujo de aire dentro del colector.

La temperatura de salida del colector fue muy cercana a la de entrada del gabinete. En la mayoría de casos la de entrada al gabinete es inferior, lo cual indica que hay una pérdida de calor a través del intercambiador de calor, contrario a lo esperado. Únicamente el día jueves se tuvo un incremento de temperatura de un grado a través del intercambiador de calor, durante una hora. Las pérdidas de calor pueden atribuirse a un pobre aislamiento del intercambiador, baja temperatura y velocidad de los gases de escape, y a la formación de condensado dentro del intercambiador de calor.

La formación de condensado en el intercambiador de calor se debe a que los gases de combustión que salen de la estufa están a temperaturas relativamente bajas (alrededor de los 100°C) y al pasar por el intercambiador pierden energía por lo que parte de la humedad del aire se condensa. Es probable que la reducción de diámetro de la salida de la estufa, a la tubería de cobre del intercambiador genere pérdidas y contribuya al condensado.

La eficiencia global del secador es baja, lo cual se debe a pérdidas de calor generales y al funcionamiento de sus componentes. Dicha eficiencia se ve afectada por la eficiencia del colector solar y del intercambiador de calor. Como se puede observar en las gráficas de transición del colector al gabinete, el aire de secado pierde calor al pasar a través del intercambiador de calor. Esto contribuye fuertemente a una disminución de la eficiencia.

IX. CONCLUSIONES

1. Se secó un total de 40.6 lb (húmedas) de maíz negro, reduciendo el contenido de humedad de 22.4% a 14.5% en 12.5 horas solares (2 días), equivalente a un quintal por semana aproximadamente.
2. El secador de maíz diseñado y evaluado posee un colector solar con área de 5 m² y un factor de eficiencia de colector del 58.62%.
3. El secador construido tuvo un costo total de Q 5,784.53 que puede servir como un prototipo de referencia que puede ser utilizado para el secado de maíz, otros granos o productos agrícolas.
4. La temperatura de secado se vio fuertemente influenciada por la radiación solar incidente, estando por encima de 40°C durante 5 horas (al día) y llegando a un máximo de 67.6°C.
5. Se obtuvo una eficiencia total del secador de 10.6%, mientras que la eficiencia del proceso de secado fue de 28.5%.
6. La estufa ahorradora de leña, como fuente auxiliar de calor y el intercambiador de calor, no incrementaron la temperatura del aire de secado de forma significativa.

X. RECOMENDACIONES

Se recomienda implementar sistemas de convección forzada para mejorar el flujo de aire dentro del colector y contrarrestar la pérdida de presión que provoca la capa de granos. Lo anterior permitiría un mejor aprovechamiento del calor y una mayor tasa de secado.

En el campo de ciencias de los materiales se recomienda evaluar otros diseños con materiales alternativos como madera o plástico que permitan disminuir el costo del secador, haciéndolo accesible a más personas. Sin embargo, debe evitarse que algún cambio disminuya la eficacia y eficiencia del secado, así como la vida útil.

Se recomienda aumentar la capacidad del secador para que éste sea más atractivo para los agricultores, manteniendo un bajo costo. Para ello se puede investigar sobre el mejoramiento de la eficiencia (tanto del colector como del sistema auxiliar de la estufa) o rediseñarlo para que sea de mayor tamaño.

Se recomienda buscar una fuente de calor auxiliar distinta a la estufa ahorradora de leña y rediseñar el intercambiador de calor, para que dicho sistema pueda servir de respaldo en días nublados o incluso lluviosos. Asimismo, se recomienda investigar sobre la incorporación de mecanismos de almacenamiento térmico.

Se recomienda evaluar el uso del secador en climas cálidos y con mayor radiación solar disponible, como en la costa. Con ello su rendimiento y capacidad de secado podría ser mayor, siendo más rentable.

XI. BIBLIOGRAFÍA

- Anacafé. Agosto de 2004. *Cultivo de maíz*. Obtenido de Anacafé:
<http://portal.anacafe.org/Portal/Documents/Documents/2004-12/33/12/Cultivo%20de%20Ma%C3%ADz.pdf> [10/01/2016]
- Baker, P. J., & Whalen, J. T. *survey of trade study methods for practical decision making*. Obtenido de NASA independent verification and validation facility:
https://www.nasa.gov/sites/default/files/survey_of_trade_study_methods_-_baker.pdf [8/04/2016]
- Bérriz, L. marzo de 2006. *Aplicaciones de la energía solar térmica*. Obtenido de Cuba solar:
<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Energia/Energia40/HTML/articulo04.htm> [5/11/2015]
- Bhat, R. V., & Miller, J. D. *Mycotoxins and food supply*. Obtenido de FAO corporate document repository: <http://www.fao.org/docrep/u3550t/u3550t0e.htm> [25/09/2015]
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. 2011. *Transferencia de calor y masa*. México: McGraw Hill.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. 2006. *Solar engineering of thermal processes*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Food and agriculture organization of united nations. marzo de 1995. *small-scale post-harvest handling practices- a manual for horticultural crops*. Obtenido de FAO corporate document repository: <http://www.fao.org/wairdocs/x5403e/x5403e0c.htm> [25/09/2015]
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. 1996. *Deposito de documentos de la Fao*. Obtenido de Secado de granos y secadoras:
<http://www.fao.org/docrep/x5028s/X5028S00.htm#Contents> [25/09/2015]
- Fuentes-López, M. R., Van Etten, J., Vivero Pol, J. L., & Ortega Aparicio, A. 2005. *Maíz para Guatemala: Propuesta para la Reactivación de la Cadena Agroalimentaria del Maíz Blanco y Amarillo*. Guatemala: FAO. [17/10/2015]
- Fundación Terra. *Secador solar de fruta*. Obtenido de Fundación Terra:
<http://www.cocinasolar.org/cocinas/secador-solar-de-fruta> [5/11/2015]
- INSIVUMEH. 2011. *Estación Huehuetenango*. Obtenido de
<http://www.insivumeh.gob.gt/meteorologia/ESTACIONES/HUEHUETENANGO/Huehuetenango/brillo%20solar%20%20HUEHUETENANGO.htm> [9/07/2015]

- INSIVUMEH. 2014. *Boletín climático 03-2014*. Obtenido de http://www.insivumeh.gob.gt/meteorologia/boletin_climatico/Boletin%20climatico%203-2014.pdf [9/07/2015]
- INSIVUMEH. 2015. *Componentes de una estación meteorológica*. Obtenido de Ministerio de comunicaciones, infraestructura y vivienda: <http://www.insivumeh.gob.gt/meteorologia/estacion%20meteorologica.htm> [9/07/2015]
- Instituto de ciencias y tecnologías agrícolas. 2002. *El cultivo de maíz en Guatemala*. Obtenido de <http://www.icta.gob.gt/maiz/cultivoMaizManejoAgronomico.pdf> [03/04/2016]
- Instituto nacional de estadística. 2006. *Hoja de balance de alimentos*. Obtenido de http://biblio3.url.edu.gt/IARNA/INE/Pub_comp_iarna-ine_HBA_2006.pdf [03/04/2016]
- Instituto nacional de estadística. 2014. *Encuestna nacional agropecuaria 2013*. Obtenido de <http://web.maga.gob.gt/download/ena-2013.pdf> [03/04/2016]
- Instituto nacional de estadística. 2015. *Índice de Precios al Consumidor - IPC -y Costo de la Canasta Básica Alimentaria y Vital*. Obtenido de <http://www.ine.gob.gt/sistema/uploads/2015/02/10/stbWBaaCNv92A6pagvK4nAD7AOH6QDDY.pdf> [03/04/2016]
- Instituto tecnológico nacional de México. *Tipos de calor*. Obtenido de Emaze: <https://www.emaze.com/@ACIITCTI/Presentation-Name> [8/07/2016]
- López, M., Oliva, A. G., Rodas, A. L., & Aragón, D. 2015. Análisis y propuesta de mejora del manejo post cosecha de maíz (*Zea mays*) para la reducción de aflatoxinas y fumonisinas en el maíz cultivado y consumido en el Departamento de Huehuetenango, Guatemala. *UVG*.
- Madrid, A. 2009. *Energías renovables*. España: AMV ediciones.
- Maier, D. E., & Bakker-Arkema, F. W. 2002. *Grain drying systems*. Obtenido de http://www.uwex.edu/energy/pubs/GrainDryingSystems_GEAPS2002.pdf [5/07/2015]
- Meinel, A. B., & Meinel, M. P. 1977. *Applied solar energy*. Addison-Wesley .
- Mertens, K. 2014. *Figures from the Textbook Photovoltaics*. Obtenido de <http://www.textbook-pv.org/figures.html> [8/07/2016]
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. 2014. *Informe Situación del Maíz Blanco a febrero de 2014*. Obtenido de <http://web.maga.gob.gt/download/info-maiz-feb.pdf> [12/08/2016]

- NASA. 2007. *Systems engineering handbook*. Obtenido de NASA:
<http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20080008301.pdf> [12/08/2016]
- proyecto latin. *secador solar*. Obtenido de Introducción al estudio de fuentes renovables:
<http://escritura.proyectolatin.org/introduccion-al-estudio-de-fuentes-renovables-de-energia/244-secador-solar/> [12/08/2016]
- Reurings, M., Vossenaar, M., Doak, C.M., Solomons, & N.W. 2013. Stunting rates in infants and toddlers born in metropolitan Quetzaltenango, Guatemala. *Nutrition* 29, 655-660.
- SHARE de Guatemala. 2014. *Proyecto "reducción de perrrida y desperdicio de alimento post-cosecha"*. Guatemala: USAID.
- TECNATROP. 2003. *Modulo FEN secador solar*. Obtenido de tecnología agrícola tropical:
<http://www.tecnatrop.com/modulo-ww.htm> [12/08/2016]
- Torres, O,*et al.*. 2015. Human health implications from co-exposure to aflatoxins and fumonisins in maize-based foods in Latin America: Guatemala as a case study. *World Mycotoxin Journal*, 143-159.
- Vidal, A., Velásquez, O., Iñaki, R., & Ortega, G. 2012. Diseño y construcción de un secador solar portátil. *Academia Journals*, 6. Obtenido de Congreso internacional de investigación.
- World Health Organization. 2012. *Improving public health through mycotoxin control*. International Agency of Research on Cancer.

XII. ANEXOS

Anexo 1: Procedimiento para determinar el área de un colector solar

Datos (tomados del INSIVUMEH)

- Temperatura ambiente promedio: 10° C
- Temperatura mínima absoluta: -5°C

Requerimientos

- Disminuir el contenido de humedad (en peso) del grano de maíz a 14%. Según el megaproyecto del año anterior, el contenido de humedad inicial es del 24%.
- La temperatura de secado se tomará como 45°C.
- El secado debe ser lento con una tasa menor al 5% de reducción de humedad por hora.

Método 1: Universidad de Nigeria

Artículo disponible en: http://ijs.academicdirect.org/A16/071_082.htm

1. Se calculó la velocidad del viento cerca del suelo (a 50 cm de altura) en base a la velocidad medida por el INSIVUMEH a una altura de 10 m. Tomando en cuenta la rugosidad de clase 2.5 según la “Danish wind industry association” <http://xn--drmsttre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/stat/unitsw.htm#speeds>

Tabla de clases y de longitudes de rugosidad

Clase de rugosidad	Longitud de rugosidad m	Índice de energía (%)	Tipo de paisaje
0	0,0002	100	Superficie del agua
0,5	0,0024	73	Terreno completamente abierto con una superficie lisa, p. ej., pistas de hormigón en los aeropuertos, césped cortado, etc.
1	0,03	52	Área agrícola abierta sin cercados ni setos y con edificios muy dispersos. Sólo colinas suavemente redondeadas
1,5	0,055	45	Terreno agrícola con algunas casas y setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 1250 m.
2	0,1	39	Terreno agrícola con algunas casas y setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 500 m.
2,5	0,2	31	Terreno agrícola con muchas casas, arbustos y plantas, o setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 250 m.

$$V_{suelo} = V_{INSIVUMEH} * \frac{\ln\left(\frac{z_{suelo}}{z_{rugosidad}}\right)}{\ln\left(\frac{z_{INSIVUMEH}}{z_{rugosidad}}\right)} = 1.4 * \frac{\ln\left(\frac{0.5}{0.2}\right)}{\ln\left(\frac{10}{0.2}\right)} = 0.3279 \text{ m/s}$$

2. Se seleccionaron parámetros geométricos como la separación entre placas (5 cm) y el ancho del colector (2.5 m)

3. Se calculó el área de entrada de aire:

$$A = 0.05 * 2.5 = 0.125$$

4. Se encontró las propiedades del aire:

Densidad del aire a 1000 msnm	1.112 m3/kg
Densidad del aire a 3000 msnm	0.909 m3/kg
Calor específico	1005 J/kg K

5. Se calculó el flujo volumétrico y másico de aire:

$$\dot{V} = A * v = 0.125 * 0.3279 = 0.04099 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\dot{m} = \rho \dot{V}$$

$$\text{Para 1000 msnm } \dot{m} = 1.112 * 0.04099 = 0.0456 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\text{Para 3000 msnm } \dot{m} = 0.909 * 0.04099 = 0.0414 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

6. Se calcula el área del colector:

$$A = \frac{\dot{m} C_p \Delta T}{0.5 I}, \text{ donde } I \text{ es la insolación en } \text{W}/\text{m}^2$$

$$A_{1000 \text{ msnm}} = \frac{0.0456 * 1005 * 35}{0.5 * 500} = 6.42 \text{ m}^2$$

$$A_{3000 \text{ msnm}} = \frac{0.0414 * 1005 * 35}{0.5 * 500} = 5.82 \text{ m}^2$$

Se puede concluir que a mayor altitud se reduce el área requerida para el colector, por lo que para que el diseño pueda aplicarse en cualquier comunidad se debe tomar el área mayor.

Los valores de insolación varían de 400 a 1000 W/m² según época del año, nubosidad, ubicación, etc. Se tomó el valor de 500 W/m² en base a los datos promedio del INSIVUMEH y luego de un

proceso iterativo en una hoja de cálculo. Además, este valor se encuentra en un rango bajo, que para cuestiones de diseño permite que el secador funcione incluso en días grises o no tan soleados.

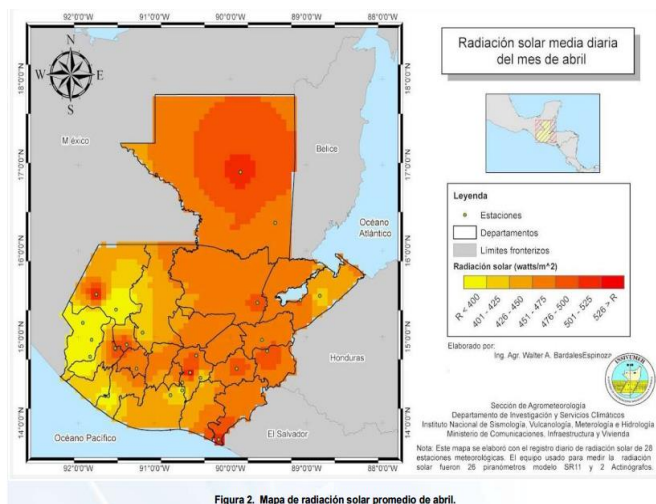


Figura 2. Mapa de radiación solar promedio de abril.

Cálculos adicionales

Calor requerido para evaporar 12% de contenido de humedad del grano

- Se seleccionó una capacidad de secador de 100 lb por día, tomando 5 horas diarias promedio de brillo solar.
- Las propiedades del aire (a 1 atm) son:

T entrada	10 °C		
h1	42.022 kJ/kg		
T secado	45 °C		
hf	188.44 kJ/kg		
hfg	2394 kJ/kg		
P sat	9.5953 kPa		
Reducción humedad	0.10	10%	2.0% por hora
Volumen de maíz	100 lb		
Masa de agua	10 lb	4.536 kg	
Horas de luz	5 h		

- Cálculo del calor requerido para evaporar 10% de humedad (KJ):

$$Q = m_{agua}(h_{fg} + (h_f - h_1)) = 4.536 * (2394 + (188.44 - 42.02)) = 11523.14 \text{ kJ}$$

4. Flujo de calor requerido:

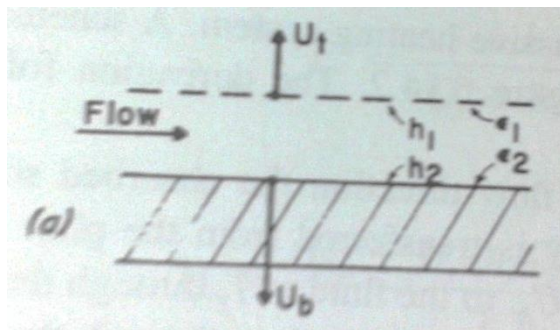
$$\dot{Q} = \frac{Q}{t} = \frac{11523.14}{5 * 3600} = 0.64 \text{ kW } \text{ ó } 640.17 \text{ W}$$

5. Flujo de calor requerido para calentar aire de entrada de 10°C a 45°C (temperatura de secado):

$$\dot{Q} = \dot{m}C_p\Delta T = 0.0456 * 1005 * 35 = 1603.98 \text{ W}$$

Método 2: Duffie & Beckman

Este método toma en cuenta las pérdidas de forma más específica, para ello se deben suponer distintos parámetros. Se tiene el caso de un colector solar de una sola cubierta:



1. Suposiciones

Distancia cubierta-placa	L	0,05 m		
Emisividad placa	Ep	0,97		
Emisividad cubierta	Ec	0,88		
Temperatura ambiente	Ta	10 °C	283 K	
Temperatura placa	Tp	60 °C	333 K	
Coeficiente de transferencia, viento	hw	10 W/m ² °C		
Ángulo de inclinación	θ	15.75°		
Diferencia de temperatura	ΔT	30 °C		
Radiación solar	S	500 W/m ²		
Temperatura cubierta	Tc	30 °C	303K	
Temperatura promedio	Tprom	45 °C		

2. Propiedades del aire (a Tprom)

Conductividad termica	k	0,02699	w/m °C
Viscosidad cinemática	v	0,0000175	m ² /s
Difusividad térmica	α	0,00002416	m ² /s

Gravedad	g	9,81	m/s ²
Número de Prandtl	Pr	0,7241	
Coefficiente expansión térmica	β	0,003144654088	1/K
Constante stefan boltzman	σ	0,0000000567	W/m ² *K ⁴

3. Cálculo de coeficiente transferencia de calor por radiación, cubierta-ambiente:

$$h_1 = \varepsilon_c \sigma (T_c^2 + T_s^2)(T_c + T_s) = 0.88 * 5.67 * 10^{-8} (303^2 + 283^2)(303 + 283) = 5.026 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

4. Cálculo de coeficiente transferencia de calor por radiación, placa-cubierta:

$$h_r = \frac{\sigma (T_p^2 + T_c^2)(T_p + T_c)}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} = \frac{5.67 * 10^{-8} (333^2 + 303^2)(333 + 303)}{\frac{1}{0.97} + \frac{1}{0.88} - 1} = 6.262 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

5. Cálculo de coeficiente transferencia de calor por convección, placa-cubierta (transferencia de calor y masa, Cengel):

- a. Número de Reynolds, se toma el diámetro hidráulico para placas planas como el doble del espaciamiento. La velocidad se toma como la calculada anteriormente, 0.3279 m/s

$$Re = \frac{v_{prom} D_h}{\nu} = \frac{0.3279(2 * 0.05)}{1.75 * 10^{-5}} = 1,873.71$$

$$L_{t,laminar} = 0.05 Re Pr D = 0.05 * 1,873.71 * 0.7241 * (2 * 0.05) = 6.78 m$$

Dado que $Re < 2300$ el flujo es laminar y no está completamente desarrollado.

- b. Para flujo laminar en desarrollo el número de nusselt es:

$$Nu = 7.54 + \frac{0.03 \left(\frac{D_h}{L}\right) Re Pr}{1 + 0.016 \left[\left(\frac{D_h}{L} Re Pr\right)^{\frac{2}{3}}\right]}$$

$$= 7.54 + \frac{0.03 \left(\frac{0.1}{3}\right) 1873.71 * 0.7241}{1 + 0.016 \left[\frac{0.1}{3} * 1873.71 * 0.7241\right]^{\frac{2}{3}}} = 8.668$$

c. $h_2 = \frac{Nu * k}{D_h} = \frac{8.668 * 0.02699}{0.1} = 2.3395 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$

6. Cálculo de pérdida total superior:

$$U_t = \left(\frac{1}{h_2 + h_r} + \frac{1}{h_w + h_1} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{2.3395 + 6.262} + \frac{1}{10 + 5.026} \right)^{-1} = 5.47$$

7. Temperatura de cubierta:

$$T'_c = T_p - \frac{U_t(T_p - T_a)}{(h_2 + h_r)} = 60 - \frac{5.47(60 - 10)}{2.3395 + 6.262} = 28.2^\circ\text{C}$$

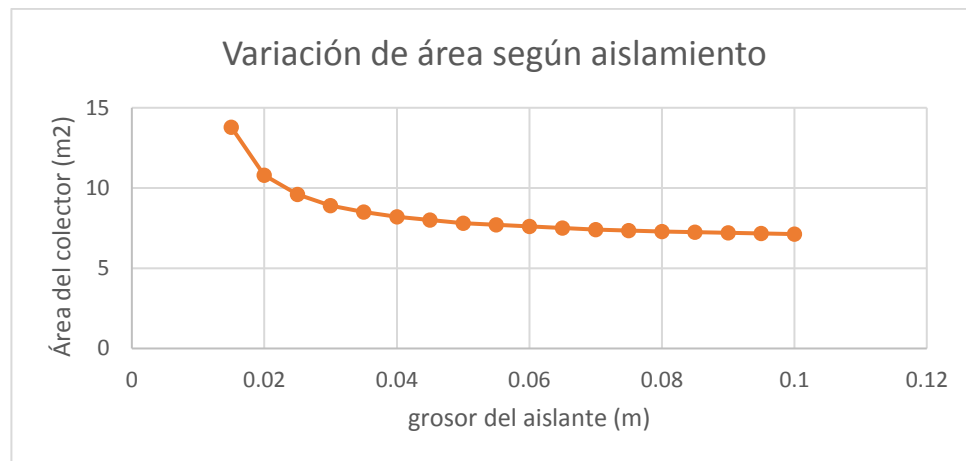
Debido a que la temperatura de la cubierta es cercana a la que se supuso inicialmente, no se requiere de más iteraciones.

8. Cálculo de la pérdida inferior

Tomando como aislante duroport, por su bajo costo y baja conductividad térmica, se tienen $k=0.029 \text{ W/m}^2\text{C}$. Se tiene:

$$U_b = \frac{k}{l}$$

Se puede variar el espesor del aislamiento para reducir la pérdida, se tomó como espesor 5 cm ya que un grosor mayor no reduce el área requerida, como se muestra en la siguiente gráfica:



Por lo que

$$U_b = \frac{k}{l} = \frac{0.029}{0.05} = 0.580 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}$$

9. Cálculo de pérdida total:

$$U_L = \frac{(U_b + U_t)(h_1 h_2 + h_1 h_r + h_2 h_r) + U_b U_t (h_1 + h_2)}{h_1 h_r + h_2 U_t + h_2 h_r + h_1 h_2}$$

$$\begin{aligned}
 U_L &= \frac{(0.580 + 5.605)(5.026 * 2.3395 + 5.026 * 6.262 + 2.3395 * 6.262) + 0.580 * 5.605(5.026 + 2.3395)}{5.026 * 6.262 + 2.3395 * 5.605 + 2.3395 * 6.262 + 5.026 * 2.3395} \\
 &= 5.285
 \end{aligned}$$

10. Factor de eficiencia:

$$\begin{aligned}
 F' &= \frac{h_r h_1 + h_2 U_t + h_2 h_r + h_1 h_2}{(U_t + h_r + h_1)(U_b + h_2 + h_r) - h_r^2} \\
 &= \frac{5.026 * 6.262 + 2.3395 * 5.605 + 2.3395 * 6.262 + 5.026 * 2.3395}{(5.605 + 6.262 + 5.026)(0.580 + 2.3395 + 6.262) - 6.262^2} \\
 &= 61.65 \%
 \end{aligned}$$

11. Cálculo de área requerida:

Para un colector solar, en base a un balance de energía, se tiene que el calor útil es:

$$Q_u = A[S - U_l(T_p - T_a)]$$

Anteriormente se calculó el calor requerido para evaporar la humedad, que es menor al calor requerido para calentar el aire. Por lo tanto, se puede definir el calor útil como calor necesario para calentar el aire de 10°C a 45°C, con base en cálculos previos (ver cálculos adicionales inciso 5), $Q_u = 1603.98 \text{ W}$

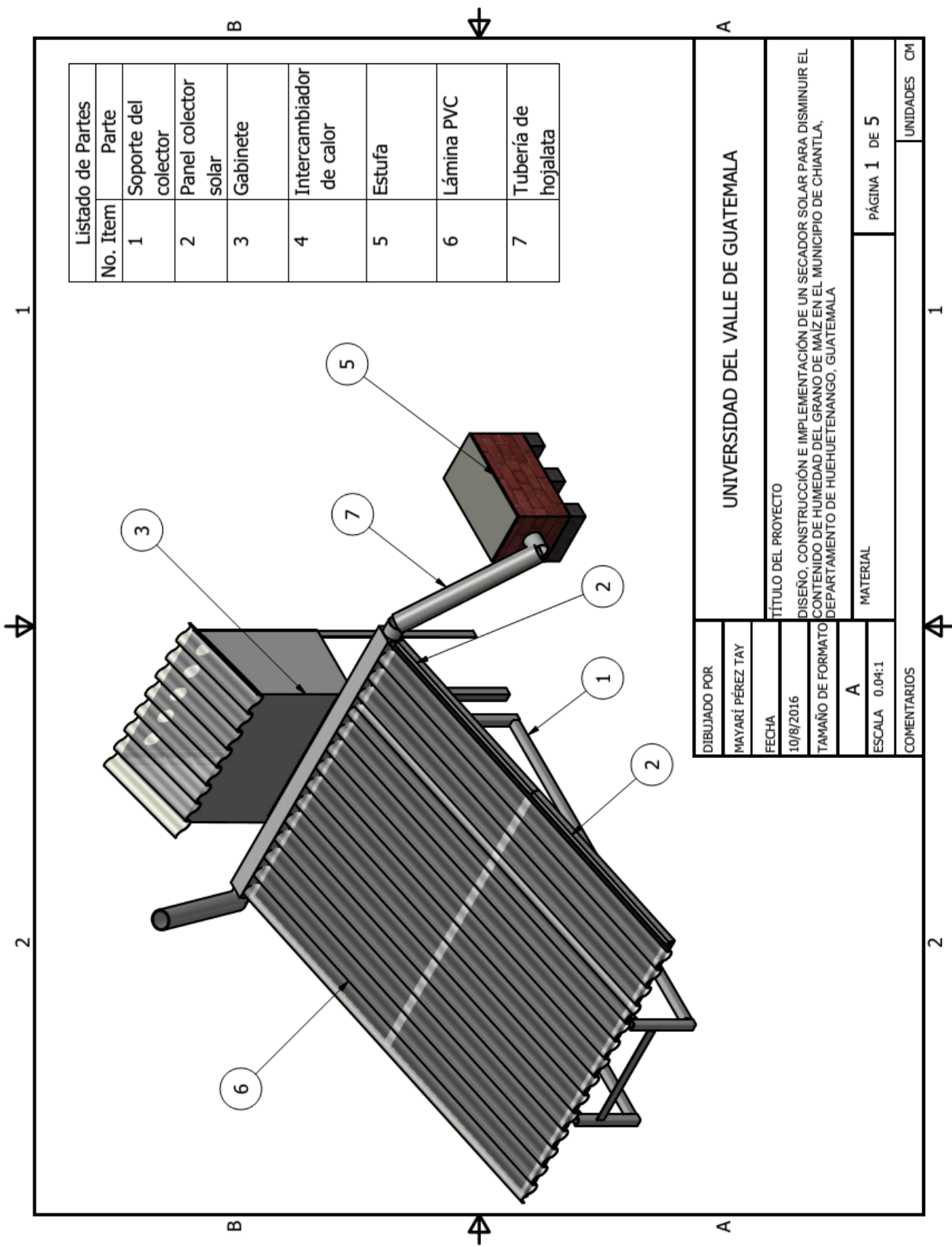
Al despejar para área se tiene:

$$A = \frac{Q_u}{[S - U_l(T_p - T_a)]} = \frac{1603.98}{[500 - 5.285(60 - 10)]} = 6.80 \text{ m}^2$$

Ambos métodos convergen dando como resultado áreas similares, variando por 0.42 m². Para fines de diseño se tomará el área mayor para asegurar que se cumpla con los requisitos. Adicionalmente el segundo método permite introducir variantes como el aislamiento y las pérdidas por radiación y convección. Por lo tanto, se tomará el área dada por el segundo método, 6.80 m².

Anexo 2: planos mecánicos

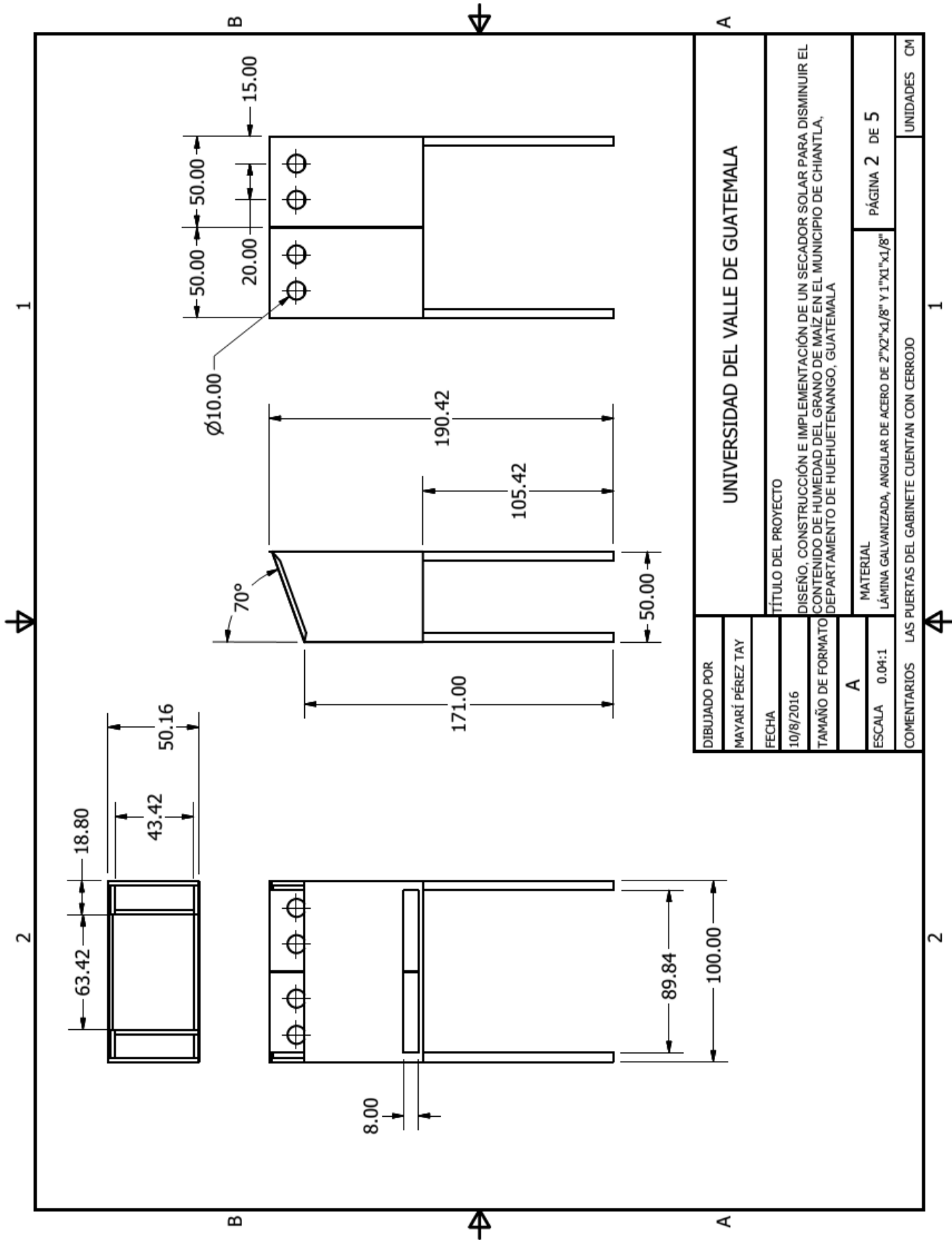
A continuación, se presentan los planos para los componentes principales del secador.

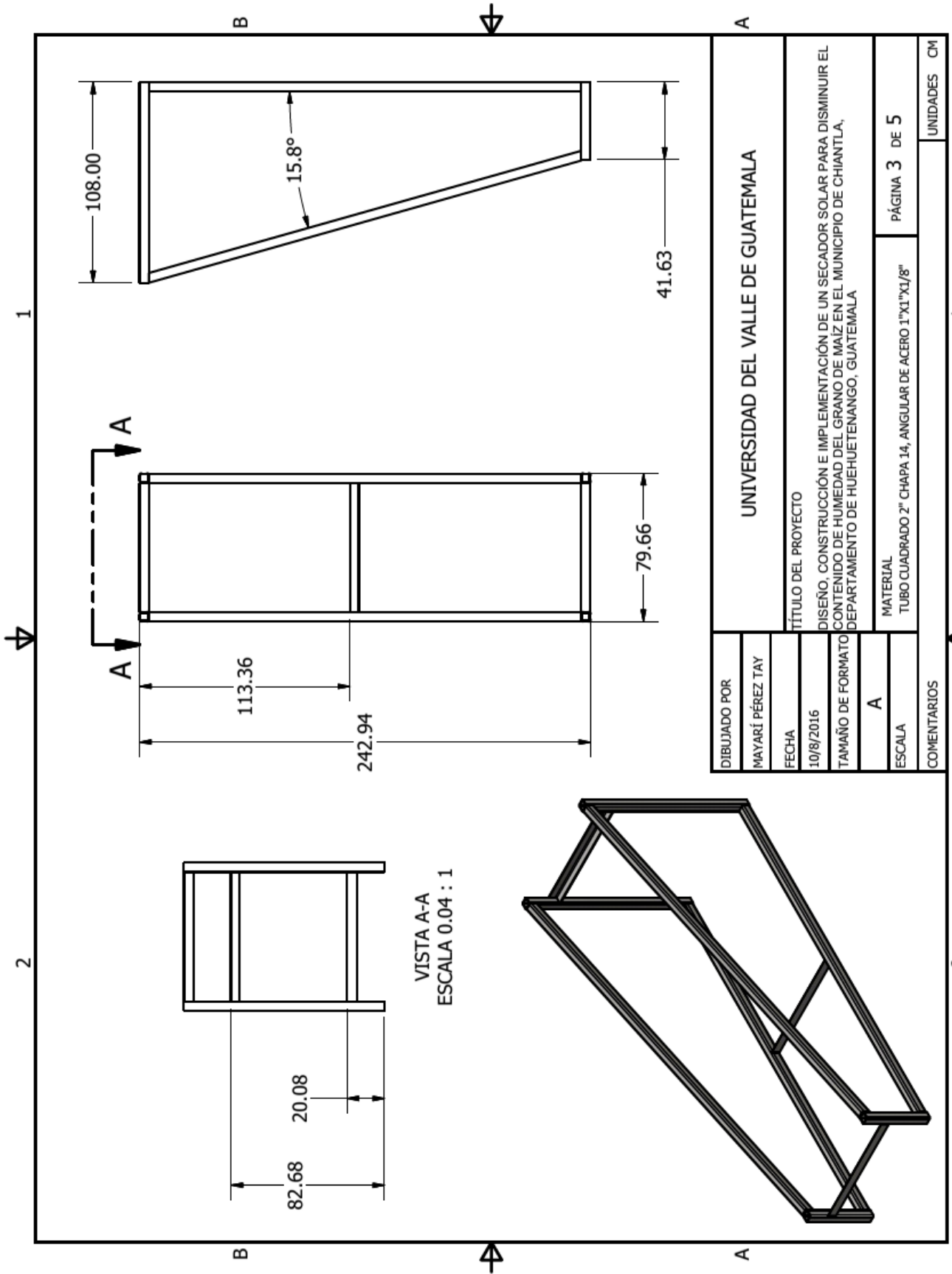


Listado de Partes	
No. Item	Parte
1	Soporte del colector
2	Panel colector solar
3	Gabinete
4	Intercambiador de calor
5	Estufa
6	Lámina PVC
7	Tubería de hojalata

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA	
TÍTULO DEL PROYECTO	
DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN SECADOR SOLAR PARA DISMINUIR EL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL GRANO DE MAÍZ EN EL MUNICIPIO DE CHIANTLA, DEPARTAMENTO DE HUEHUETENANGO, GUATEMALA	
MATERIAL	
PÁGINA 1 DE 5	
UNIDADES CM	

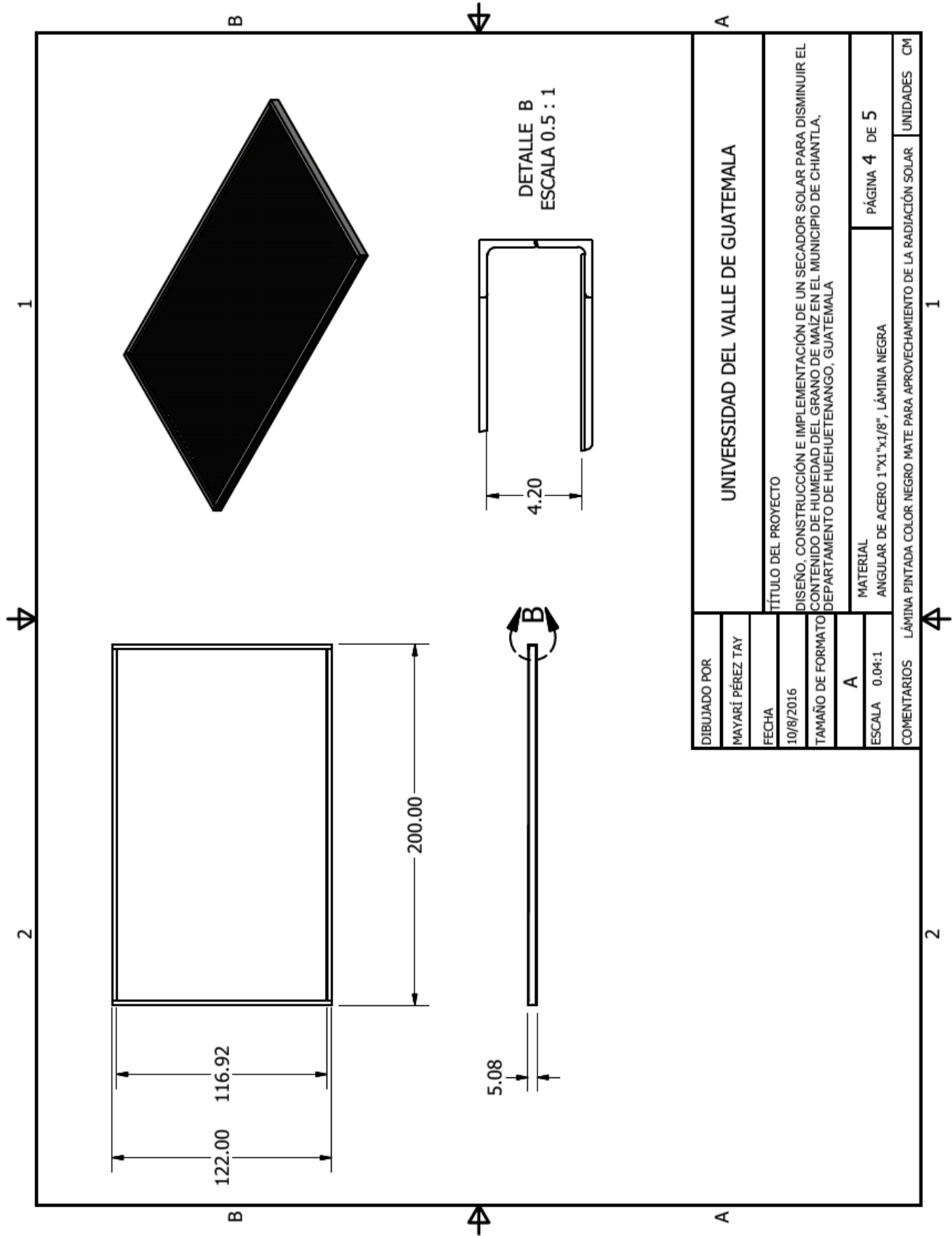
DIBUJADO POR	MAYARÍ PÉREZ TAY
FECHA	10/8/2016
TAMAÑO DE FORMATO	A
ESCALA	0.04:1
COMENTARIOS	



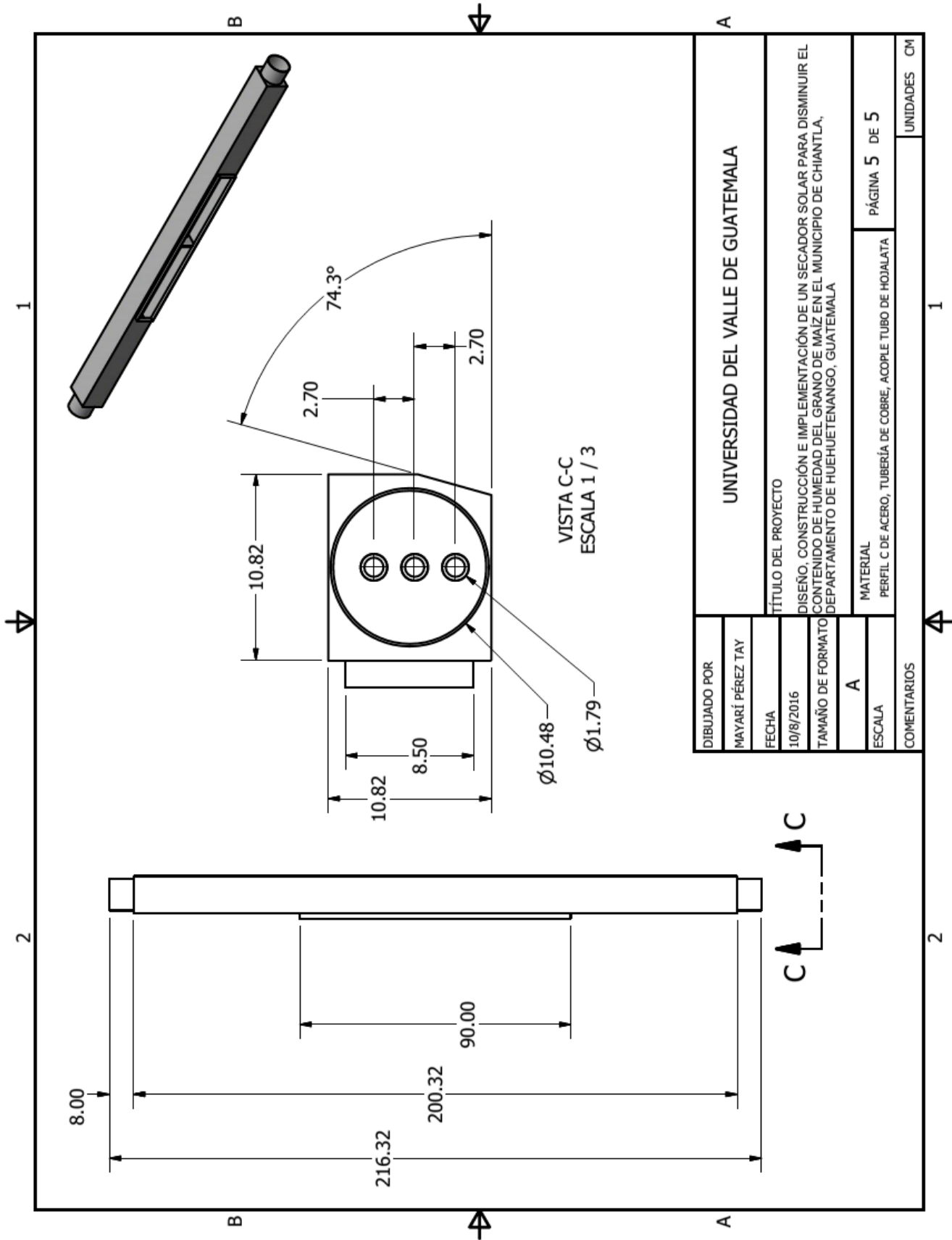


VISTA A-A
ESCALA 0.04 : 1

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA	
DIBUJADO POR MAYARÍ PÉREZ TAY	TÍTULO DEL PROYECTO DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN SECADOR SOLAR PARA DISMINUIR EL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL GRANO DE MAIZ EN EL MUNICIPIO DE CHIANTLA, DEPARTAMENTO DE HUEHUETENANGO, GUATEMALA
FECHA 10/8/2016	MATERIAL TUBO CUADRADO 2" CHAPA 14, ANGULAR DE ACERO 1"x1"x1/8"
TAMAÑO DE FORMATO A	PÁGINA 3 DE 5
ESCALA	UNIDADES CM
COMENTARIOS	



DIBUJADO POR	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA		
MAYARÍ PÉREZ TAY			
FECHA	TÍTULO DEL PROYECTO		
10/8/2016	DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN SECADOR SOLAR PARA DISMINUIR EL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL GRANO DE MAIZ EN EL MUNICIPIO DE CHIANTLA, DEPARTAMENTO DE HUEHUETENANGO, GUATEMALA		
TAMAÑO DE FORMATO	MATERIAL		
A	ANGULAR DE ACERO 1"x1"x1/8", LÁMINA NEGRA		
ESCALA	0.04:1		PÁGINA 4 DE 5
COMENTARIOS	LÁMINA PINTADA COLOR NEGRO MATE PARA APROVECHAMIENTO DE LA RADIACIÓN SOLAR		UNIDADES CM



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA	
TÍTULO DEL PROYECTO	
DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN SECADOR SOLAR PARA DISMINUIR EL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL GRANO DE MAÍZ EN EL MUNICIPIO DE CHIANTLA, DEPARTAMENTO DE HUEHUETENANGO, GUATEMALA	
DIBUJADO POR	MAYARÍ PÉREZ TAY
FECHA	10/8/2016
TAMAÑO DE FORMATO	A
ESCALA	
MATERIAL	PERFIL C DE ACERO, TUBERÍA DE COBRE, ACOPLER TUBO DE HOJALATA
PÁGINA 5 DE 5	
UNIDADES CM	

Anexo 3: Estimación de la radiación solar

Ecuaciones para cálculo de radiación solar

Declinación

$$\delta = \left(\frac{180}{\pi}\right)(0.006918 - 0.399912 \cos B + 0.070257 \sin B - 0.006758 \cos 2B + 0.000907 \sin 2B - 0.002697 \cos 3B + 0.00148 \sin 3B)$$

Donde B es $B = (n - 1) \frac{360}{365}$, siendo n el número de día del año

Ángulo de incidencia sobre una superficie inclinada, radiación directa

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \sin \beta \cos(\gamma_s - \gamma)$$

Ángulo cenital $\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta$ Ángulo acimutal solar $\gamma_s = \text{sign}(\omega) \left| \cos^{-1} \left(\frac{\cos \theta_z \sin \phi - \sin \delta}{\sin \theta_z \cos \phi} \right) \right|$ Factor geométrico $R_b = \frac{G_{b,T}}{G_b} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z}$

Radiación extraterrestre sobre un plano normal a la dirección de la radiación

$$G_{on} = G_{sc}(1.000110 + 0.034221 \cos B + 0.001280 \sin B + 0.000719 \cos 2B + 0.000077 \sin 2B)$$

Donde la constante solar $G_{sc} = 1367 \frac{W}{m^2}$

Transmitancia atmosférica para radiación directa:

$$\tau_b = a_0 + a_1 \exp\left(-\frac{k}{\cos \theta_z}\right)$$

$$a_0^* = 0.4237 - 0.00821(6 - A)^2$$

$$a_1^* = 0.5055 + 0.00595(6.5 - A)^2$$

$$k^* = 0.2711 + 0.01858(2.5 - A)^2$$

$$r_o = \frac{a_0}{a_0^*}, \quad r_1 = \frac{a_1}{a_1^*}, \quad r_k = \frac{k}{k^*}$$

Tabla 1. Factores de corrección para distintos tipos de clima

Tipo de clima	r_o	r_1	r_k
Tropical	0.95	0.98	1.02
Verano de mediana altitud	0.97	0.99	1.02
Verano subártico	0.99	0.99	1.01
Invierno de mediana altitud	1.03	1.01	1.00

Para una superficie horizontal el modelo de Hottel propone:

$$\text{Radiación directa normal } G_{cnb} = G_{on}\tau_b$$

$$\text{Radiación directa horizontal } G_{cb} = G_{on}\tau_b \cos \theta_z$$

$$\text{Radiación directa } G_b = G_{bn} \cos \theta_z$$

$$\text{Radiación difusa } \tau_d = 0.271 - 0.294\tau_b = \frac{G_d}{G_o}$$

$$\text{Radiación extraterrestre } G_o = G_{on} \cos \theta_z$$

Modelo HDKR

Radiación total sobre superficie inclinada:

$$I_T = (I_b + I_d A_i) R_b + I_d (1 - A_i) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left[1 + f \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] + I \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

Donde el índice anisotrópico es $A_i = \frac{I_{bn}}{I_{on}} = \frac{I_b}{I_o}$

Y el factor modulador es $f = \sqrt{\frac{I_b}{I}}$

Terminología

Radiosidad G (W/m²)

Irradiación I (J/m²) para una hora

Insolación diaria H (J/m²) para un día

Subíndices

Directa b (beam)

Difusa d

Normal n

Sobre una superficie inclinada T

Extraterrestre o

Día despejado c (clear-sky)

Con base en el lugar y la fecha de las pruebas, se calcula ω, θ, τ y G en intervalos de media hora de 9:30 a 16:00 horas. De esto se puede obtener la radiosidad total, sin embargo, se desea conocer la insolación diaria (en dicho periodo de tiempo). Por lo tanto, es necesario calcular la irradiación en periodos de una hora y luego sumarlos. A continuación, se muestra la tabla para la irradiación solar:

Intervalo	τb	I_{cnb}	I_{cb}	τd	I_{cd}	I_c	$I_{cb,T}$	A_i	f	R_b	I_T
9:30 a 10:30	0.695	3.541	2.335	0.067	0.222	2.558	3.146	0.695	0.956	1.357	3.456
10:30 a 11:30	0.715	3.643	2.721	0.061	0.230	2.951	3.176	0.715	0.960	1.169	3.448
11:30 a 12:30	0.721	3.673	2.853	0.059	0.233	3.086	3.189	0.721	0.962	1.118	3.452
12:30 a 13:30	0.715	3.643	2.721	0.061	0.230	2.951	3.176	0.715	0.960	1.169	3.448
13:30 a 14:30	0.695	3.541	2.335	0.067	0.222	2.558	3.146	0.695	0.956	1.357	3.456
14:30 a 15:30	0.653	3.323	1.732	0.079	0.207	1.939	3.059	0.653	0.945	1.810	3.457
15:30 a 16:00	0.596	1.517	0.590	0.096	0.093	0.684	1.439	0.298	0.929	2.492	1.608

Por último, se tiene que la insolación diaria recibida es de 22.3 MJ/m².

Anexo 4: requisitos del secador

Código	Descripción	Categorías	Verificación	Fuente del requisito
C1	La temperatura del grano no debe sobrepasar 60 C	Calidad del grano	Medir inmediatamente a la salida con un termómetro	Externa (FAO)
C2	La velocidad de deshumidificación no debe sobrepasar 5% (humedad relativa en peso) por hora	Calidad del grano	Al alcanzar condiciones de funcionamiento óptimas medir la humedad cada hora, durante 4 horas por lo menos	Externa (FAO)
C3	Se debe reducir la humedad del grano de 24% a 14%	Calidad del grano	Utilizar un humidímetro para medir la humedad del grano a la entrada y salida (fuera del secador)**	Externa (climática)
C4	Se debe poder calentar aire a temperatura ambiente a una temperatura mínima de 40 C	Calidad del grano	Medir temperatura del aire a la entrada del gabinete, mediante termocupla	Propio
ED1	Las bandejas o zarandas deben soportar el peso del maíz sin romperse	Estructura y diseño del secador	Encontrar límite de peso a colocar por zaranda, cargandola hasta ruptura	Propio
ED2	Las bandejas o zarandas deben ser fáciles de cargar y descargar	Estructura y diseño del secador	Opinión de usuario	Propio
ED3	La estructura debe ser duradera	Estructura y diseño del secador	Vida útil de componentes de por lo menos 3 años	Propio
ED4	La estructura debe ser apta para condiciones de interperie	Estructura y diseño del secador	Visualmente no hay materiales frágiles u oxidables expuestos	Propio
ED5	Se debe evitar el acceso de insectos o contaminantes externos a la cámara del maíz	Estructura y diseño del secador	Visualmente no hay agujeros o accesos que permitan el ingreso de insectos u otros	Propio
ED6	Se debe minimizar el costo del secador	Estructura y diseño del secador	Realización de varias cotizaciones para materiales	Propio
ED7	Los materiales para la construcción del secador deben estar disponibles en el mercado local	Estructura y diseño del secador	Comprar a proveedores locales (facturas)	Propio
ED8	El tamaño de los componentes no debe exceder el volumen de carga de un pick up		Medición de dimensiones	Propio
ED9	Se debe poder ensamblar o construir el secador (en el lugar de uso) fácilmente	Estructura y diseño del secador	Uniones roscadas, dimensiones razonables para transporte en pick up, utilización de herramientas sencillas (martillo, desarmador...)	Propio
S1	El secador debe ser seguro	Seguridad	Visualmente no hay riesgos para el usuario (filos expuestos, partes móviles...)	Propio
SU1	El secador debe ser de fácil mantenimiento	Social y utilización	Cualquier persona con una breve capacitación es capaz de hacerlo, no involucra herramientas o conocimientos especializados	Propio
SU2	El secador debe ser amigable para la comunidad	Social y utilización	No emite ruidos fuertes (decibelímetro), su uso es sencillo (opinión del usuario)	Propio

**Si la muestra está muy caliente, debe enfriarse antes de medir, pues en los humidímetros corrientes la corrección por temperatura no es exacta para valores superiores a 30°C

Anexo 5

Cálculo de la eficiencia

Método 1:

$$Eficiencia = \frac{Q_{requerido}}{Q_{utilizado}}$$

Donde el calor requerido se refiere al calor mínimo para evaporar una masa de agua dada y el calor utilizado está compuesto por la energía solar recibida y el calor proveniente de la combustión.

Datos:

- Temperatura promedio del aire ambiente: 20.5°C
- Temperatura promedio del aire de secado: 49.1°C
- Reducción de contenido de humedad de un 10% (de 24% a 14%)
- 1.5" de aislamiento de duroport
- Área del colector 5 m² (2x2.5 m)

Cálculos

Calor requerido

Datos prueba Huehuetenango
Tablas Termodinámica Cengel
Resultado

Propiedades	
Tentrada	20 °C
h1	83.915 kJ/kg
Tsecado	50 °C
hf	209.34 kJ/kg
hfg	2382 kJ/kg
Psat	12.352 kPa
reduccion humedad	0.1 10%
Volumen de maiz	40.6 lb
masa de agua	4.06 lb
horas de luz	6 h

1.67% por hora

1.842 kg

$$Q_{requerido} = m(hfg + (hf - h1)) = 4617.63 \text{ kJ}$$

Calor utilizado

$$Q_{utilizado} = Q_{solar}$$

El calor solar será la radiación solar incidente (estimada en el anexo 3 como 22.3 MJ/m² en un día) por la eficiencia teórica del colector. Para lo cual se recalculó F' (eficiencia del colector):

Q solar	
distancia cubierta-placa	L 0.05 m
emisividad placa	Ep 0.97

emisividad cubierta	E_c	0.88	
Temperatura ambiente	$T_a = T_s$	20	°C
Temperatura placa	T_p	40	°C
Coefficiente de transferencia, viento	h_w	10	W/m ² °C
ángulo de inclinación	θ	0.261799388	15
Diferencia de temperatura	ΔT	15	°C
Radiación solar	S	865	W/m ²

ASUMIENDO

Temperatura cubierta	T_c	25	°C
Temperatura promedio	T_{prom}	32.5	°C

PROPIEDADES AIRE T_{prom}

conductividad termica	k	0.026065	w/m °C
viscosidad cinemática	ν	0.000016315	m ² /s
difusividad térmica	α	0.000022425	m ² /s
gravedad	g	9.81	m/s ²
Número de Prandtl	Pr	0.7275	
Coefficiente expansión térmica	β	0.003273322	1/K
Constante stefan boltzman		5.67E-08	W/m ² *K ⁴

Número de Reynolds	Re	2009.81	
Número Nusselt, placas inclinadas	Nu	8.745	

Coefficiente transfer. conv., placa-cubierta	$h_{c,p-c} = h_2$	2.279	W/m ² °C
Coefficiente transfer. rad., placa-cubierta	$h_{r,p-c} = h_r$	5.543	W/m ² °C
Coefficiente transfer. rad., cubierta-ambiente	$h_{r,c-a} = h_1$	5.150	W/m ² °C
Pérdida superior	U_t	5.159	W/m ² °C

Temperatura cubierta	T_c'	26.81	°C
----------------------	--------	-------	----

Pérdida inferior	U_b	Duroport
		1.076

Pérdida total	UI	5.739
Factor de eficiencia del colector	F'	58.62%
Transmitancia PVC		70%
Absortancia		95%

$$Q_{solar} = (22.3 * 10^3 * 5) * 0.5862 * 0.7 * 0.95 = 43466.73 \text{ kJ}$$

Eficiencia entonces se calcula como:

$$Eficiencia = \frac{Q_{requerido}}{Q_{utilizado}} = \frac{4617.63}{43466.73} = 10.6\%$$

Método 2:

$$Eficiencia = \frac{T_{aire\ secado} - T_{aire\ usado}}{T_{aire\ secado} - T_{aire\ ambiente}} \times 100$$

(Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1996)

Donde el aire de secado es aquél que ingresa a la cámara de secado, mientras que el aire usado es el que sale de la cámara (que ya ha pasado por los granos).

Para el día miércoles se tiene:

Miercoles

Hora	aire secado	aire usado	aire ambiente	Eficiencia
	Punto 5 Temperatura °C	Punto 9 Temperatura °C	Punto 1 Temperatura °C	
9:30	28.4	20.8	10.4	42.2%
10:00	30.1	23.2	11.2	36.5%
10:30	42.3	36.2	17.3	24.4%
11:00	57.2	42.9	18.0	36.5%
11:30	59.1	46.6	17.2	29.8%
12:00	66.0	54.0	17.5	24.7%
12:30	58.0	48.0	20.8	26.9%
13:00	67.6	46.0	22.0	47.4%
13:30	49.5	44.3	20.1	17.7%
14:00	63.1	51.0	22.5	29.8%
14:30	64.1	52.8	24.9	28.8%
15:00	61.3	51.4	22.2	25.3%
15:30	48.8	45.8	22.4	11.4%
			Eficiencia max	47.4%
			Eficiencia prom	29.3%

Para el día jueves se tiene:

Hora	aire secado	aire usado	aire ambiente	Eficiencia
	Punto 5 Temperatura °C	Punto 9 Temperatura °C	Punto 1 Temperatura °C	
9:30	38.4	31.8	20.3	36.5%
10:00	43.6	37.8	20.7	25.3%
10:30	44.1	33.5	18.2	40.9%
11:00	46.9	40.3	21.5	26.0%
11:30	43.4	38.0	22.6	26.0%
12:00	48.1	39.8	23.3	33.5%
12:30	43.8	36.2	24.3	39.0%
13:00	55.3	41.5	25.4	46.2%
13:30	44.7	39.3	22.2	24.0%
14:00	43.4	37.1	19.8	26.7%
14:30	44.3	38.4	22.1	26.6%
15:00	45.3	44.3	26.0	5.2%
15:30	39.1	38.2	21.3	5.1%

Eficiencia máx. 46.2%

Eficiencia prom 27.8%

Resumen

	Martes	Miércoles
Eficiencia máx.	47.4%	46.2%
Eficiencia promedio	29.3%	27.8%