

**UNIVERSIDAD DE PANAMÁ  
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**

**DESARROLLO Y DETERMINACIÓN ESTOCÁSTICA DEL  
COMPORTAMIENTO DE UN PROTOTIPO COLECTOR SOLAR PLANO  
CON CAPTADOR DE PIEDRAS, GENERADOR DE AIRE AGROINDUSTRIAL**

**KATHERINA DEL C. CORREA R.**

**4-764-719**

**DAVID, CHIRIQUÍ**

**REPÚBLICA DE PANAMÁ**

**2017**

**DESARROLLO Y DETERMINACIÓN ESTOCÁSTICA DEL  
COMPORTAMIENTO DE UN PROTOTIPO COLECTOR SOLAR PLANO  
CON CAPTADOR DE PIEDRAS, GENERADOR DE AIRE AGROINDUSTRIAL**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN SOMETIDO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE  
INGENIERO EN MANEJO DE CUENCAS Y AMBIENTE**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**

**PERMISO PARA SU PUBLICACIÓN, REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL  
DEBE SER OBTENIDA EN LA FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS.**

**APROBADO:**

**PROF. ING. JOSÉ R. CASTILLO MSc.** \_\_\_\_\_  
**DIRECTOR**

**PROF. ING. AMÍLCAR BEITIA MSc.** \_\_\_\_\_  
**ASESOR**

**PROF. ING. FÉLIX A. GUERRA MSc.** \_\_\_\_\_  
**ASESOR**

**DAVID, CHIRIQUÍ  
REPÚBLICA DE PANAMÁ**

**2017**

## AGRADECIMIENTO

*“No temas, porque yo estoy contigo; no desmayes, porque yo soy tu Dios que te esfuerzo; siempre te ayudaré, siempre te sustentaré con la diestra de mi justicia”.*  
*Isaías 41:10 (RVR1960)*

Agradezco a **JEHOVÁ DIOS** por darme la vida, salud, sabiduría y fortaleza espiritual para la realización de este trabajo. Por ser quien en todo momento está conmigo ayudándome a aprender de mis errores. Eres quien guía el destino de mi vida... Gracias Padre Celestial.

A mis padres Nidya E. Rodríguez J. y Alberto A. Correa G., por haberme forjado en valores, por su apoyo incondicional moral y económico, por su paciencia, orientación, humildad y sacrificio; por permitirme cometer mis propios errores, aun así, creer y confiar siempre en mí. Todo lo que soy hoy en día es gracias a ustedes.

A mis hermanos Alberto J. Correa R. y Selenys C. Correa R., quienes a pesar de nuestras diferencias siempre han estado junto a mí brindándome su apoyo y orientación, mostrándome lo bueno que es tener hermanos.

A toda mi familia, en especial a mis tíos Julio C. Rodríguez J., Onelia J. Rodríguez J.; mis primas Sidy O. Valdés R., Lany A. Valdés R. y Arisa M. Valdés J., y sobrina Ashley C. Rovira V. por su apoyo, alegría y entusiasmo en los momentos más importantes de mi vida.

A todos mis compañeros y amigos, especialmente a Zaira Lara, Ovet Aparicio, Ixi Espinosa, Edwin Cedeño, Isanella González, Abrahan Villamil, Estaycha Ríos,

Ameth Vargas, Melany Sánchez, quienes a pesar de nuestras diferencias, buenos y malos momentos que solo se viven en la vida universitaria, estuvieron conmigo y me animaron a seguir adelante, aun cuando a veces las fuerzas no eran suficientes.

A mi director de tesis MSc. José Ricardo Castillo por su orientación y ayuda en la realización de esta tesis, a los miembros del comité MSc. Félix Guerra y MSc. Amílcar Beitia, por su apoyo en el desarrollo de este trabajo, al PhD José Ramón Binns por su colaboración en el análisis estadístico; y a todos mis profesores, por su tiempo, consejos, experiencias y conocimientos brindados que fueron importantes para mi formación académica.

Un agradecimiento especial al Sr. Roberto Guerra y familia por su amabilidad en abrirme las puertas de su casa y por compartir su conocimiento en técnicas utilizadas en la construcción del colector solar.

Agradezco eternamente a quienes han hecho posible este trabajo y a quienes me han acompañado en estos largos años de descubrimiento científico y personal.

A todos, ¡mil gracias!

*Katherina Del C. Correa R.*

## DEDICATORIA

*“Justo es Jehová en todos sus caminos, y misericordioso en todas sus obras”  
Salmos 145:17 (RVR1960)*

Dedico esta tesis al creador de todas las cosas, **JEHOVÁ DIOS**, por darme siempre la fortaleza para continuar en lo adverso, por guiarme en el sendero correcto y darme sabiduría en las situaciones difíciles.

A mi madre **Nidya E. Rodríguez J.**, por ser un ejemplo de mujer, la razón principal de mi esfuerzo para lograr mis metas.

A mi padre **Alberto A. Correa G.**, quien ha fomentado en mí el deseo de superación y triunfo en la vida.

A mis hermanos **Alberto J. Correa R.** y **Selenys C. Correa R.**, por todo su cariño, por estar siempre a mi lado por su apoyo, alegría y entusiasmo en los momentos más importantes de mi vida.

A mi abuela **Gertrudis de Rodríguez** (QEPD), quien fue el pilar fundamental de la unión familiar; mi abuelo **Julio Rodríguez** por sus consejos y enseñanzas de vida y mi abuela **Elidya González** que con cariño me ha cuidado siempre.

A mi tío **Noel A. Rodríguez J.** (QEPD), quien siempre me exhortó a esforzarme para lograr mis metas.

Todos ustedes son lo más valioso y lo mejor que me ha dado Dios. Los Amo.

*♥Kathy!♥*

## **“DESARROLLO Y DETERMINACIÓN ESTOCÁSTICA DEL COMPORTAMIENTO DE UN PROTOTIPO COLECTOR SOLAR PLANO CON CAPTADOR DE PIEDRAS, GENERADOR DE AIRE AGROINDUSTRIAL”**

Correa Rodríguez, K. DC. 2017. Desarrollo y determinación estocástica del comportamiento de un prototipo colector solar plano con captador de piedras, generador de aire agroindustrial. Tesis. Ingeniería en Manejo de Cuencas y Ambiente. Chiriquí. Universidad de Panamá.

### **RESUMEN**

Esta investigación consistió en el desarrollo y determinación estocástica del comportamiento térmico de un colector solar de placa plana de un metro cuadrado de área, utilizando piedras de canto rodado pintadas de negro mate como almacenador térmico, para el calentamiento de aire agroindustrial. Los materiales utilizados en la construcción del colector solar fueron seleccionados considerándose factores de fácil adquisición, calidad, costo y trabajabilidad; para que el diseño pudiera replicarse con facilidad. Los parámetros evaluados fueron la temperatura y la humedad relativa en la entrada de aire ambiente del colector solar; la temperatura, la humedad relativa, la velocidad y el caudal del aire de escape; la radiación solar incidente en el colector solar y la radiación solar en el plano horizontal. El registro de los datos se efectuó en el mes de septiembre del 2016, periodo con elevada nubosidad y lluvia, en horas de la tarde. En promedio, el día con menor radiación solar alcanzó  $289.84 \text{ W/m}^2$  en el plano horizontal, el aire de escape llegó  $37.4^\circ\text{C}$  de temperatura y  $56.0\%$  de humedad relativa; mientras que el día con mayor radiación solar alcanzó  $663.84 \text{ W/m}^2$ ,  $56.2^\circ\text{C}$  y  $21.1\%$  respectivamente. El promedio a los 15 días alcanzó una radiación solar en plano horizontal de  $503.70 \text{ W/m}^2$ , y el aire de escape llegó a  $48.8^\circ\text{C}$ , la humedad relativa fue de  $31.0\%$ . La temperatura y la humedad relativa promedio alcanzadas a lo largo de las horas de prueba muestran que el mejor desempeño fue de 10:00 a 17:00 horas, ambos parámetros ideales para los procesos de secado y deshidratación. Las mejores ecuaciones de simulación se obtuvieron entre las 8:00 y las 11:00 horas y luego entre las 17:00 y las 19:00 horas. El prototipo de colector solar desarrollado superó las expectativas; es adecuado para generar aire precalentado para el procesamiento de productos agroindustriales y su comportamiento térmico puede estimarse y extrapolarse a otras ubicaciones geográficas, conociendo previamente el promedio de radiación solar en el sitio. El estudio se realizó en el futuro Centro de Investigación para el Desarrollo Sostenible (CIDSó), Facultad de Ciencias Agropecuarias, en el Corregimiento de Chiriquí.

**PALABRAS CLAVES:** Colector solar, comportamiento térmico, piedra de canto rodado, calentamiento de aire, temperatura, humedad relativa.

## **“DEVELOPMENT AND STOCHASTIC DETERMINATION OF THE THERMAL BEHAVIOR OF A FLAT SOLAR COLLECTOR PROTOTYPE WITH STONE DETAINER, AS AGROINDUSTRIAL AIR GENERATOR”**

Correa Rodríguez, K. DC. 2017. Development and stochastic determination of the thermal behaviour of a flat solar collector prototype with stone detainer, as agroindustrial air generator. Thesis research. Engineering in Watershed and Environment Management. Chiriquí. Faculty of Agricultural Science, University of Panama.

### **ABSTRACT**

This research consisted in a development and stochastic determination of the thermal behaviour of one square meter flat plate solar collector prototype, using black painted boulder stone as a thermal storage; for agro-industrial air heating using. The materials used in the solar collector construction were selected considering factors as easy local acquisition, quality, cost and workability, helping this design could be replicated easily. Temperature and relative humidity air inlet solar collector were evaluated parameters; temperature, relative humidity, air speed and flow of collector exhaust air; the incident solar radiation over the solar collector and solar radiation on a horizontal position. The data logging was in September 2016, cloudy and rainy period during the afternoon. The lowest solar radiation day reach  $289.84 \text{ W/m}^2$  average in the horizontal plane, exhaust air reached  $37.4^\circ\text{C}$  of temperature and  $56.0\%$  of relative humidity; but in the higher solar radiation day, the average goes to  $663.84 \text{ W/m}^2$ ,  $56.2^\circ\text{C}$  and  $21.1\%$ , temperature and relative humidity respectively. The global average shows  $503.70 \text{ W/m}^2$  solar radiation on a horizontal plane and exhaust air temperature reached  $48.8^\circ\text{C}$ , the relative humidity was  $31.0\%$ . Average temperature and relative humidity reached throughout the testing hours, shows the best performance from 10:00 to 17:00 hours, both ideal parameters for drying and dehydration process. Best simulation equations were obtained between 8:00 and 11:00 hours and then between 17:00 and 19:00 hours. The developed solar collector prototype exceeded expectations; it is suitable for generating preheated air for processing agro-industrial products, and its thermal behaviour can be estimated and extrapolated to other geographical locations, previously knowing the solar radiation average at the site. This study was realized at the future Research Development Center for Sustainability (CIDSo), Faculty of Agricultural Science, Chiriquí Township.

**KEYWORDS:** Solar collector, thermal behaviour, boulder stone, heating of air, temperature, relative humidity.



2.3.1	La transferencia de calor.....	30
2.3.1.1	La transferencia de calor por conducción.....	30
2.3.1.2	La transferencia de calor por convección.....	31
2.3.1.3	La transferencia de calor por radiación.....	31
2.4	El sistema solar térmico.....	32
2.4.1	Los colectores solares térmicos.....	32
2.4.2	Los colectores a baja temperatura.....	33
2.4.3	Los colectores solares de placa plana para calentamiento de aire.....	33
2.4.4	Componentes de un colector solar de placa plana para producción de aire caliente.....	34
2.4.4.1	La cubierta.....	35
2.4.4.2	El absorbedor de calor.....	35
2.4.4.3	El cuerpo del colector.....	35
2.5	Fenómenos físicos que se producen en el colector solar para calentamiento de aire.....	36
2.5.1	El efecto invernadero.....	36
2.5.2	La estratificación térmica.....	38
2.6	Variables más relevantes de un colector solar para calentamiento de aire.....	39
2.6.1	La temperatura.....	39
2.6.2	La humedad relativa.....	39
2.7	Materiales para captar y almacenar la energía solar térmica.....	40
2.7.1	Los materiales más utilizados.....	40
2.7.1.1	La lámina de cobre.....	40
2.7.1.2	La lámina captadora de zinc liso.....	40
2.7.2	Materiales de bajo costo y fácil adquisición.....	41
2.7.2.1	La piedra de canto rodado.....	41
2.7.2.2	La arena.....	42
<b>3.</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>43</b>
3.1	Listado de materiales, herramientas e instrumentación.....	43
3.2	Descripción de la instrumentación.....	45

3.2.1	Micro termo-higrómetro. ....	45
3.2.2	Termo-anemómetro.....	46
3.2.3	Actinógrafo portátil. ....	46
3.3	Ubicación del área de estudio. ....	47
3.4	Metodología.....	48
3.4.1.	Selección del diseño. ....	48
3.4.2	Selección de los materiales de construcción e instrumentación del levantamiento de los datos.....	48
3.4.3	Construcción del colector solar. ....	49
3.4.4	Levantamiento de los datos.....	49
3.4.5	Análisis de datos. ....	50
3.5	Parámetros a evaluar. ....	50
3.5.1.	Del aire de ingreso. ....	50
3.5.1.1	Temperatura y humedad relativa.....	50
3.5.2	Del aire de escape. ....	51
3.5.2.1	Temperatura y humedad relativa.....	51
3.5.2.2	Velocidad y caudal de escape.....	51
3.5.3	Intensidad de radiación solar. ....	52
3.5.3.1	Radiación solar en el plano horizontal.....	52
3.5.3.2	Radiación solar en el plano inclinado. ....	52
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>53</b>
4.1.	Construcción del colector solar térmico.....	53
4.2	Levantamiento y análisis de datos.....	63
4.3	Análisis gráfico e interpretación de los registros.....	69
4.4	Análisis estadístico. ....	88
<b>5.</b>	<b>DISCUSIÓN</b> .....	<b>96</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>99</b>
<b>7.</b>	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>102</b>
<b>8.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>104</b>
<b>ANEXOS</b>	..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Pág.
1. MATERIALES MÁS UTILIZADOS PARA CAPTAR Y ALMACENAR LA ENERGÍA SOLAR TÉRMICA.....	41
2. MATERIALES DE BAJO COSTO PARA ALMACENAR LA ENERGÍA SOLAR TÉRMICA.....	42
3. MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL COLECTOR SOLAR. ....	43
4. HERRAMIENTAS UTILIZADAS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL COLECTOR SOLAR.....	44
5. INSTRUMENTACIÓN UTILIZADA PARA EL REGISTRO DE PARÁMETROS. ....	45
6. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL MICRO TERMO-HIGRÓMETRO.....	45
7. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL TERMO-ANEMÓMETRO. ....	46
8. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL ACTINÓGRAFO.....	47
9. PROMEDIOS DIARIOS OBTENIDOS DURANTE QUINCE DÍAS DE LECTURA.....	64
10. PROMEDIOS DE TEMPERTURA Y HUMEDAD RELATIVA DE ESCAPE DURANTE LOS DÍAS CON MENOR Y MAYOR RADIACIÓN SOLAR Y EL PROMEDIO A LOS QUINCE DÍAS.....	65
11. PROMEDIOS HORARIOS DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA DE ESCAPE OBTENIDOS A LO LARGO DEL ENSAYADO.....	66
12. CORRELACIONES LINEALES DE PEARSON ENTRE LAS VARIABLES ESTUDIADAS.....	88
13. ECUACIONES DE REGRESIÓN LINEAL SIMPLE OBTENIDAS POR EL SAS CON SUS CORRESPONDIENTES COEFICIENTES DE DETERMINACIÓN. ....	89

14.	RESPUESTA DEL MODELO DE REGRESIÓN LINEAL SIMPLE AL AUMENTO DE UN VATIO POR METRO CUADRADO DE RADIACIÓN SOLAR.....	90
15.	RESPUESTA DEL MODELO MÚLTIPLE AL AUMENTO DE UN VATIO POR METRO CUADRADO DE RADIACIÓN SOLAR.....	91
16.	ECUACIONES DE REGRESIÓN LINEAL SIMPLE QUE MOSTRARON LOS MEJORES AJUSTES (MAYORES R CUADRADO).....	92
17.	RESPUESTA AL AUMENTO DE GRADIENTE DE TEMPERATURA DE ESCAPE.....	93
18.	RESPUESTA AL AUMENTO DE LA RADIACIÓN SOLAR EN EL PLANO HORIZONTAL.....	95

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>		<b>Pág.</b>
1.	Elevada energía térmica en un cuerpo caliente .....	29
2.	Reducida energía térmica en un cuerpo frío .....	29
3.	Esquema de colector solar pasivo de placa plana .....	34
4.	Componentes de un colector solar de placa plana .....	36
5.	Esquema del efecto invernadero en un colector solar plano .....	37
6.	Promedios diarios de temperatura y humedad relativa de escape y, radiación solar, durante todo el ensayado. ....	71
7.	Diferencias promedio horarias de temperatura y humedad relativa de escape y, radiación solar a lo largo del ensayado. ....	72
8.	Promedios de temperatura y humedad relativa de escape y, radiación solar, en el día menor radiación solar. ....	73
9.	Promedios de temperatura y humedad relativa de escape y, radiación solar, en el día con mayor radiación solar. ....	75
10.	Promedios horarios de temperatura y humedad relativa de escape y, radiación solar a lo largo del ensayado. ....	77
11.	Promedios diarios de las temperaturas de ingreso y escape de aire, a lo largo del ensayado. ....	78
12.	Promedios horarios de temperatura de ingreso y escape de aire, en el día con menor radiación solar. ....	79
13.	Promedios horarios de temperaturas de ingreso y escape de aire, en el día con mayor radiación solar. ....	80
14.	Promedios horarios de temperatura de ingreso y escape del aire, durante todo el ensayado. ....	81
15.	Promedios diarios de humedad relativa de ingreso y escape de aire, a lo largo del ensayado. ....	82
16.	Promedios horarios de humedad relativa de ingreso y escape de aire, en el día con menor radiación solar. ....	84
17.	Promedios horarios de humedad relativa de ingreso y escape de aire, en el día con mayor radiación solar. ....	85

18.	Promedios horarios de humedad relativa de ingreso y escape durante el ensayado. ....	86
19.	Promedios horarios de humedad relativa de escape en los días con menor y mayor radiación solar, y durante el ensayado.....	87

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo	Pág.
1. Presupuesto de los materiales para la construcción del colector solar.....	110
2. Limpieza total de la fascia .....	111
3. Impacto con el centro punto en las intersecciones trazadas .....	111
4. Taladrado de intersecciones marcadas en el área interna de la fascia .....	111
5. Estampador de esquinas construido .....	111
6. Impacto en el área interna de la fascia con el estampador de esquinas .....	112
7. Corte de las líneas trazadas en las pestañas de la fascia .....	112
8. Marcas realizadas en el área interna de la fascia .....	112
9. Doblado de la fascia en las marcas realizadas .....	112
10. Desbaste en las esquinas perforadas en la fascia .....	113
11. Pintado del área externa de la fascia .....	113
12. Perforaciones realizadas en las pestañas de cada doblez del marco .....	113
13. Instalación de remaches en las pestañas de cada doblez del marco .....	113
14. Cinta asfáltica adherida en la parte interna del marco .....	114
15. Trazado de las secciones medidas en la tabla .....	114
16. Aplicación de poliuretano en la tabla de madera .....	114
17. Corte de las secciones trazadas en la tabla .....	114
18. Aplicación de poliuretano en las hendiduras realizadas .....	115
19. Atornillado de las piezas de madera al marco .....	115
20. Súper aislamiento en el área interna del marco .....	115
21. Adhesión de cinta asfáltica en las aberturas entre las piezas de madera .....	115
22. Marcado de medidas en la lámina de zinc liso .....	116

23.	Corte de las medidas marcadas en la lámina de zinc liso .....	116
24.	Atornillado de la lámina de zinc liso sobre la madera .....	116
25.	Placa captadora fijada en la madera .....	116
26.	Colectado de las piedras de canto rodado .....	117
27.	Piedras acomodadas en una lámina de zinc .....	117
28.	Pintado de las piedras con epoxi negro mate .....	117
29.	Giro de las piedras para pintar el área restante .....	117
30.	Trazado de las medidas en el borde del marco .....	118
31.	Taladrado de los vértices marcados .....	118
32.	Corte de las líneas trazadas en el marco .....	118
33.	Eliminación del material cortado .....	118
34.	Cordón de adhesivo de poliuretano sobre el marco .....	119
35.	Instalación del vidrio sobre el marco del colector .....	119
36.	Presión ejercida sobre el vidrio para mejorar la adherencia .....	119
37.	Corte del sobrante del cordón de adhesivo de poliuretano .....	119
38.	Piedras pintadas de epoxi negro mate .....	120
39.	Colocación manual de las piedras en el colector .....	120
40.	Piedras introducidas en el colector .....	120
41.	Camada de piedras acomodadas de manera uniforme .....	120
42.	Micro termo-higrómetros .....	121
43.	Termo-anemómetro .....	121
44.	Actinógrafos portátiles .....	121
45.	Alineamiento Norte-Sur y 15° Latitud Norte .....	122
46.	Prototipo de colector solar instalado en el CIDSo .....	122
47.	Micro termo-higrómetro instalado en la entrada del aire ambiente del colector solar .....	123
48.	Micro termo-higrómetro y termo-anemómetro instalados en la salida del aire caliente del colector solar .....	123
49.	Promedios diarios registrados a lo largo del ensayado .....	124
50.	Promedios horarios registrados el día con menor radiación solar en el plano horizontal .....	124
51.	Promedios horarios registrados el día con mayor radiación solar en el plano horizontal .....	125

52.	Promedios horarios registrados a lo largo del ensayado .....	125
53.	Formulario utilizado en el registro de los parámetros evaluados .....	126

## 1. INTRODUCCIÓN

Existe oportunidad para diversas aplicaciones de la energía solar en áreas rurales y agroindustriales; para el calentamiento de fluidos, secado y deshidratación de productos agropecuarios e inclusive para aplicaciones bioclimáticas. Aún más en los países tropicales como Panamá, donde ocurren excelentes niveles de radiación solar acompañados de alta nubosidad, siendo que la primera normalmente se desperdicia como fuente de energía debido a diversos factores; muy a pesar de que la misma es una energía limpia, abundante y, su costo de aplicación es relativamente bajo.

Uno de los motivos que pudiera influir en la poca popularidad de estructuras para el aprovechamiento de la radiación solar es justamente el desconocer importantes parámetros de rendimiento, entre ellos, el relacionado al comportamiento térmico de colectores-almacenadores solares de piedra, material de fácil adquisición y bajo costo. Este factor es interesante debido a que la radiación solar es una energía intermitente y afectada por las condiciones climáticas, las cuales también variarán según la localización del aprovechamiento y la época del año. De ahí la importancia de conocer su rendimiento en el propio sitio de explotación y además generar resultados que permitan predecir el comportamiento térmico en otras latitudes.

En tal sentido, el presente proyecto se enfocará primeramente en desarrollar un prototipo de colector solar con captador-almacenador de piedras utilizando materiales fáciles de trabajar y adquirir en el mercado local; con la intención de que el diseño pueda replicarse con facilidad. En una segunda etapa se ensayará el comportamiento térmico e higroscópico del aire ambiente al ser procesado por convección natural a través de un metro cuadrado de colector+almacenador de piedra, bajo las condiciones climáticas locales. Finalmente se pretende obtener una o más ecuaciones que permitan predecir el comportamiento del colector a diferentes niveles de radiación solar, lo que permitirá simular el comportamiento térmico del mismo en otros puntos geográficos, desde que se conozca la ganancia de radiación solar en dichos puntos.

### **1.1 Planteamiento del problema.**

En investigaciones patrocinadas por la FAO en 1991, Dalpasquale *et al.*, mencionan que existen diversas fuentes de energía para el calentamiento del aire para uso agroindustrial, tales como gas licuado del petróleo (GLP) y electricidad. Estas energías aunque son convencionales, no son eco-amigables y son factores de riesgo ya que causan alteraciones al medio ambiente, siendo la combustión de hidrocarburos uno de los principales impactos ambientales negativos provenientes del sector energético.

Por otro lado, según Castillo, J.R. (2013), existen diversos tipos de colectores solares para producción de aire caliente asociados a captadores de calor

metálicos, los cuales normalmente presentan elevados costos y no siempre poseen las mejores características térmicas debido a que transfieren calor muy rápidamente al ambiente; aspecto desventajoso cuando se trata de mantener la temperatura y la humedad relativa de un proceso de secado o deshidratación lo más estable posible y dentro de ciertos límites de temperatura y humedad relativa.

Debido a lo antes expuesto, surge la necesidad de desarrollar y ensayar un colector solar que reduzca el uso de las fuentes de energía convencionales, utilizando materiales resistentes y de costo accesible.

## **1.2 Antecedentes.**

Existen registros (Rossi & Roa, 1980), donde se ensayan colectores solares con captadores de piedra y arena para aplicaciones de secado de granos, además de deshidratadores para carnes. En los mismos se tomaron datos de temperatura, radiación solar y flujo de aire, los cuales arrojaron resultados positivos y se pudo demostrar que ocurre una ganancia de calor significativa y adaptable al procesamiento de productos agropecuarios. Sin embargo, quedan algunas interrogantes en lo relacionado al dimensionado de los colectores.

Localmente (Pittí *et al*, 1993) realizaron un ensayo de cuatro sistemas de colectores solares para maíz en mazorca, uno de ellos era mediante un colector-almacenador de calor a base de piedra y arena; se obtuvo resultados alentadores para el secado de mazorcas de maíz. Sin embargo, no se determinó

el comportamiento térmico del colector solar a lo largo del día, detalle muy importante para el dimensionado de secadores solares.

### **1.3 Justificación.**

Los procesos del deshidratado y el secado de materiales biológicos son exitosos cuando el caudal, la temperatura y la humedad relativa del aire de proceso se mantienen en condiciones que permitan reducir considerablemente la velocidad de respiración del producto biológico en cuestión, de forma a que la velocidad de la respiración del producto se reduzca sensiblemente, conservando así el producto gran parte de sus propiedades organolépticas.

Vía de regla, cada rubro agrícola presenta propiedades específicas en lo relacionado a su velocidad de descomposición, la cual inicia inmediatamente después de la cosecha del mismo; de ahí que existe una relación directa entre la temperatura y la humedad relativa del aire, el caudal de aire de proceso y el volumen y humedad inicial del producto que se desea procesar. Por otro lado, ocurre que dentro de un colector solar térmico el calor es arrastrado por ventilación natural o forzada, hacia una cámara de secado; cuanto menor es la humedad relativa y más elevada es la velocidad del aire producido en el colector, mayor potencial de secado ocurrirá y más rápido se realizará el proceso de secado o deshidratación (Rossi & Roa, 1980).

Como se ha mencionado, a pesar de los diversos modelos de secadores y deshidratadores con captadores de piedra que se han desarrollado, se

desconoce el rendimiento térmico y el flujo de aire producido sobre un metro cuadrado de colector solar, en función de determinadas condiciones climatológicas.

La determinación de este parámetro permitirá en primer lugar, establecer una relación entre el área de captación de radiación solar, la intensidad de la misma y las condiciones del aire de proceso para así determinar su comportamiento térmico a lo largo del día. En segundo lugar, permitirá realizar la simulación y el dimensionado ajustado de los colectores-almacenadores de calor para secadores y deshidratadores solares, en función a cualquier punto geográfico, desde que se conozcan los valores de radiación local y se trate de colectores-almacenadores de características similares.

#### **1.4 Objetivos.**

##### **1.4.1 Objetivo general.**

Construir un prototipo de colector solar con captador-almacenador térmico de piedras y determinar los promedios de temperatura, humedad relativa y caudal de aire caliente generado, desarrollándose modelos predictivos del comportamiento térmico del colector.

### **1.4.2 Objetivos específicos.**

1. Diseñar y construir un colector-almacenador solar plano para la producción de aire caliente agroindustrial de un metro cuadrado de área de captación efectiva, con materiales resistentes y de bajo costo.
2. Registrar la radiación solar; la temperatura y la humedad relativa del aire de ingreso o de entrada al colector. Paralelamente registrar la velocidad del aire, la temperatura, la humedad relativa y el caudal del aire de escape o de salida del colector.
3. Graficar, en función de la radiación solar, los parámetros de admisión y escape del aire, los cuales son: la temperatura y la humedad relativa a lo largo de la evolución horaria del día.
4. Generar uno o más modelos matemáticos que sirvan de herramienta para predecir el comportamiento térmico del colector solar en otras latitudes y a diferentes niveles de radiación solar.

## **1.5 Hipótesis.**

### **1.5.1 Hipótesis alternativa Ha:**

Se logrará construir y ensayar un prototipo de colector solar con captador-almacenador de piedras y determinar ecuaciones que permitan pronosticar el comportamiento térmico del colector a diversas intensidades de radiación solar, para la producción de aire caliente agroindustrial.

### **1.5.2 Hipótesis nula Ho:**

No se logrará construir y ensayar un prototipo de colector solar con captador-almacenador de piedras, ni determinar ecuaciones que permitan emular el comportamiento térmico del colector a diversas intensidades de radiación solar, para la producción de aire caliente agroindustrial.

## **1.6 Alcances y limitaciones.**

### **1.6.1 Alcances.**

El presente proyecto pretende diseñar y construir un colector solar replicable, con materiales locales y de costo accesible para la producción de aire caliente agroindustrial, con un área efectiva de captación de un metro cuadrado y captador térmico de piedra. Además, se ha de evaluar el rendimiento del colector mediante un termo-anemómetro, un micro termo-higrómetro y un actinógrafo; de forma a determinar el caudal, la temperatura y la humedad relativa del aire de escape en función de la intensidad de la radiación solar. La determinación de los factores antes citados servirá de punto de referencia para el dimensionado de colectores solares con captadores de piedra de mayor tamaño, para la generación y posterior abastecimiento de aire pre-calentado en procesos de secado, deshidratación e inclusive en aplicaciones del diseño bioclimático.

Los hallazgos a esta investigación pudieran ayudar a reducir el elevado consumo de energía eléctrica e hidrocarburos; minimizando los costos de producción y contribuyendo a mejorar la calidad ambiental.

### **1.6.2 Limitaciones.**

Ocurrieron dificultades en la logística y los recursos para la importación de la instrumentación necesaria para el levantamiento de los parámetros investigados. Además, las variantes climáticas fueron adversas, eventualmente interfiriendo en la recolección de datos.

## **2. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1 Las fuentes alternativas de energía.**

Con el rápido desarrollo de la economía mundial, las necesidades de energía se han incrementado notablemente. La constatación de que los recursos de combustibles fósiles necesarios para la generación de energía se están volviendo escasos y que el cambio climático está relacionado con las emisiones de carbono a la atmósfera, ha incrementado el interés en el ahorro energético y protección del medio ambiente (Almanza y Cabarcas, 2013).

Los mismos autores señalan que la primera estrategia para reducir la dependencia de los recursos fósiles se basa en la utilización de fuentes alternativas de energía, no sólo para la producción de energía a gran escala, sino también para sistemas autónomos. Estas fuentes de energía alternativa se definen como toda fuente de energía que no acarrea la quema de combustibles fósiles como el petróleo, gas natural y carbón. Las principales fuentes renovables de energía son: energía eólica, energía geotérmica, energía hidráulica o hidroeléctrica y energía solar.

## **2.2 La energía solar.**

Según estudios realizados por Olivares y Torres (2010), la energía solar se fundamenta en el aprovechamiento de la radiación solar para la obtención de energía que podemos aprovechar directamente en forma de calor o bien poderla convertir en electricidad. La principal ventaja de la energía solar es que no consume combustible, pues obtiene su energía del Sol, lo cual significa que, económicamente, a largo plazo, estos sistemas son más sostenibles y estables. El alto costo inicial sigue siendo, no obstante, la desventaja desde el punto de vista económico. Desde el punto de vista ecológico, la energía solar no tiene competencia, pues es renovable y limpia.

### **2.2.1 La radiación solar.**

Ésta es la energía que emite el Sol en forma de ondas electromagnéticas en todo su espectro: ultravioleta, visible e infrarrojo. La energía solar que llega al planeta ha permitido la vida en el mismo y su acumulación en forma de biomasa, carbón y otros combustibles fósiles. La cantidad que recibe la tierra en 30 minutos es equivalente a toda la energía eléctrica que los habitantes del planeta consumen actualmente en un año. Esta fuente de energía ha sido utilizada por el hombre desde tiempos inmemoriales (Almanza y Cabarcas, 2013).

La radiación solar que llega a la superficie terrestre está formada principalmente por dos componentes: radiación directa y radiación difusa. La radiación directa es aquella que alcanza la superficie directamente desde el sol sin experimentar

cambios, mientras que la radiación difusa se considera como aquella que procede de toda la bóveda celeste y que ha sufrido cambios debido a su interacción, principalmente con los componentes atmosféricos. En un día claro, la mayor parte de la radiación que se recibe será directa, mientras que en un día con nubes la principal componente de la radiación que se recibe es la difusa (Agencia Andaluza de la Energía, 2011).

#### **2.2.1.1 Estimación de la radiación solar en el plano horizontal y en el plano inclinado.**

La radiación solar puede ser estimada en el plano horizontal, en la cual su valor representa la radiación solar incidente sobre una superficie horizontal, tal como ocurre en las estaciones meteorológicas y, en el plano el inclinado, cuando su valor representa la radiación solar incidente sobre una superficie inclinada, como en el caso de los colectores solares (Guevara, S. 2003). El manual de usuario explorador solar para autoconsumo versión 2016, indica que los colectores deben orientarse de este a oeste siguiendo la posición del sol para recibir radiación a lo largo del día, sin embargo, en el plano horizontal se intenta encontrar un ángulo de inclinación adecuado para la superficie receptora tal que se optimice la cantidad de radiación recibida durante el día.

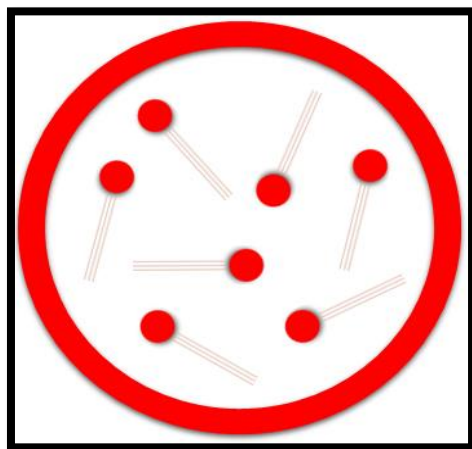
### **2.3 La energía térmica y el calor.**

Serway, R y Faughn, J. en el 2001 explican que la energía térmica o energía calorífica es la parte de la energía interna que cambia cuando se modifica la

temperatura del sistema. Este tipo de energía se debe al movimiento de las partículas que constituyen la materia.

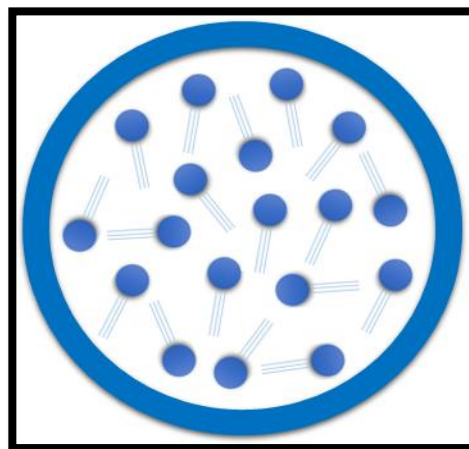
Los autores Muñoz, J. *et al.* en 2009 sustentan que cuando un cuerpo aumenta su energía térmica se está calentando, es decir recibiendo calor (figura 1). Cuando un cuerpo disminuye su energía térmica se está enfriando, es decir, perdiendo calor (figura 2). De esta forma, el calor no es más que una forma de denominar a los aumentos y pérdidas de energía térmica.

“El calor es la variación de la energía térmica de un cuerpo” (Muñoz, J. *et al.*, 2009).



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 1.** Elevada energía térmica en un cuerpo caliente.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 2.** Reducida energía térmica en un cuerpo frío.

### **2.3.1 La transferencia de calor.**

Cengel y Ghajar (2004) explican que la transferencia de energía como calor siempre se produce del medio que tiene la temperatura más elevada hacia el de temperatura más baja, y la transferencia de calor se detiene cuando los dos medios alcanzan la misma temperatura.

Los mismos autores señalan que el calor se puede transferir de tres modos diferentes: Conducción, convección y radiación. Todos los modos de transferencia de calor requieren la existencia de una diferencia de temperatura.

#### **2.3.1.1 La transferencia de calor por conducción.**

Según Incropera (1999) citado por Domínguez (2013), la conducción se define como la transferencia de energía de las partículas más energéticas a las menos energéticas de una sustancia debido a las interacciones entre las mismas. Esto quiere decir que, a nivel macroscópico, la interacción se dará por medio del contacto entre los sistemas, donde la transferencia de energía se efectuará en la siguiente dirección: del sistema con mayor nivel energético al de menor; el nivel energético de los cuerpos puede ser medido por la energía interna, que es un reflejo de la energía producida a nivel microscópico.

### **2.3.1.2 La transferencia de calor por convección.**

La convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacente que está en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor (Cengel y Ghajar, 2004).

Domínguez (2013) explica que puede existir convección natural, cuando la fuerza impulsora del movimiento es debida únicamente al cambio de temperatura experimentado por el fluido, lo que cambia su densidad; y se llama convección forzada cuando el movimiento del fluido es debido a agentes externos que hacen una corriente en el medio.

### **2.3.1.3 La transferencia de calor por radiación.**

Según Luna y Reyes (2008), la radiación presenta una diferencia fundamental respecto a la conducción y la convección: las sustancias que intercambian calor no tienen que estar en contacto, sino que pueden estar separadas por un vacío. La radiación es un término que se aplica genéricamente a toda clase de fenómenos relacionados con ondas electromagnéticas.

La transferencia de calor por radiación es la más rápida (a la velocidad de la luz) y no sufre atenuación en un vacío. Ésta es la manera en la que la energía del Sol llega a la Tierra (Cengel y Ghajar, 2004).

Los mismos autores señalan que en los estudios de transferencia de calor es de interés la radiación térmica, que es la forma de radiación emitida por los cuerpos debido a su temperatura.

## **2.4 El sistema solar térmico.**

Un sistema solar térmico transforma la energía radiante emitida por el Sol en energía térmica y la acumula. En general, son proyectos que pueden aplicarse desde una escala doméstica, comercial y hasta industrial. Dado que la energía térmica no se puede transportar eficientemente a través de grandes distancias, este tipo de tecnologías son especialmente adecuadas en áreas donde se concentra la demanda, como empresas, casas, edificios, u otros (Rodríguez, 2012).

### **2.4.1 Los colectores solares térmicos.**

Es un dispositivo que absorbe la radiación solar incidente, convirtiéndola en calor, y transfiere el calor a un fluido (aire, agua o aceite) que fluye a través del colector. El calor generado, se puede usar para sistemas de calefacción, procesamiento industrial o para calentamiento de agua. (Rodríguez, 2012).

Los colectores solares se clasifican tradicionalmente por su temperatura de operación en colectores de baja, media y alta temperatura (Almanza y Cabarcas, 2013).

### **2.4.2 Los colectores a baja temperatura.**

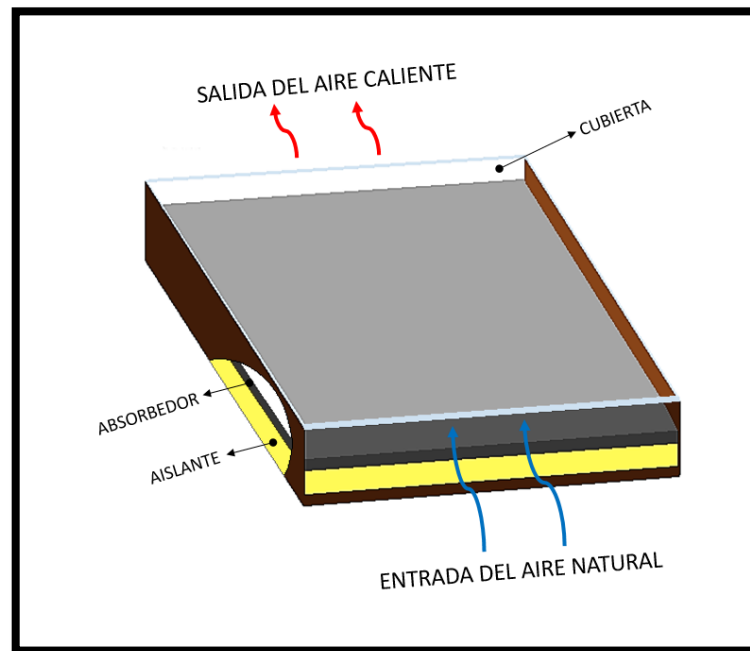
Según Pineda (2015) los colectores solares a baja temperatura proveen calor útil a temperaturas entre 30°C y 100°C. Las aplicaciones más comunes en este rango de temperatura son para el calentamiento de piscinas, agua caliente sanitaria (ACS), calefacción, secado, desalinización y destilación. Los dispositivos usados son colectores solares planos y el sistema está conformado por el circuito de fluido térmico, el aislamiento térmico y por la caja que contiene todos los componentes.

### **2.4.3 Los colectores solares de placa plana para calentamiento de aire.**

Los colectores de placa plana pueden ser diseñados para aplicaciones que requieren el calentamiento del aire a temperaturas de hasta a 100°C. Este tipo de colectores presentan ventajas; son mecánicamente simples, cualidad que implica un bajo costo de construcción, utilizan la radiación por haz solar y la radiación difusa, es decir, pueden operar en condiciones de cielo despejado y nublado, además de que no requieren seguimiento del Sol (Duffie & Beckman, 1991 citados por Domínguez, 2013).

Rodríguez, J. en el 2008 explica que los colectores solares para calentamiento de aire pueden diseñarse de acuerdo al principio físico bajo el cual se hace circular el aire: en activos y en pasivos, dichos nombres los reciben debido a que en los primeros el aire es obligado a circular con ayuda de un ventilador,

mientras en los segundos el aire circula gracias a la flotación inducida por los gradientes de densidad (figura 3).



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.** Esquema de colector solar pasivo de placa plana para calentamiento de aire.

#### 2.4.4 Componentes de un colector solar de placa plana para producción de aire caliente.

Durán y Condorí (2012) detallan los elementos por lo que está formado un colector solar de placa plana (figura 4):

#### **2.4.4.1 La cubierta.**

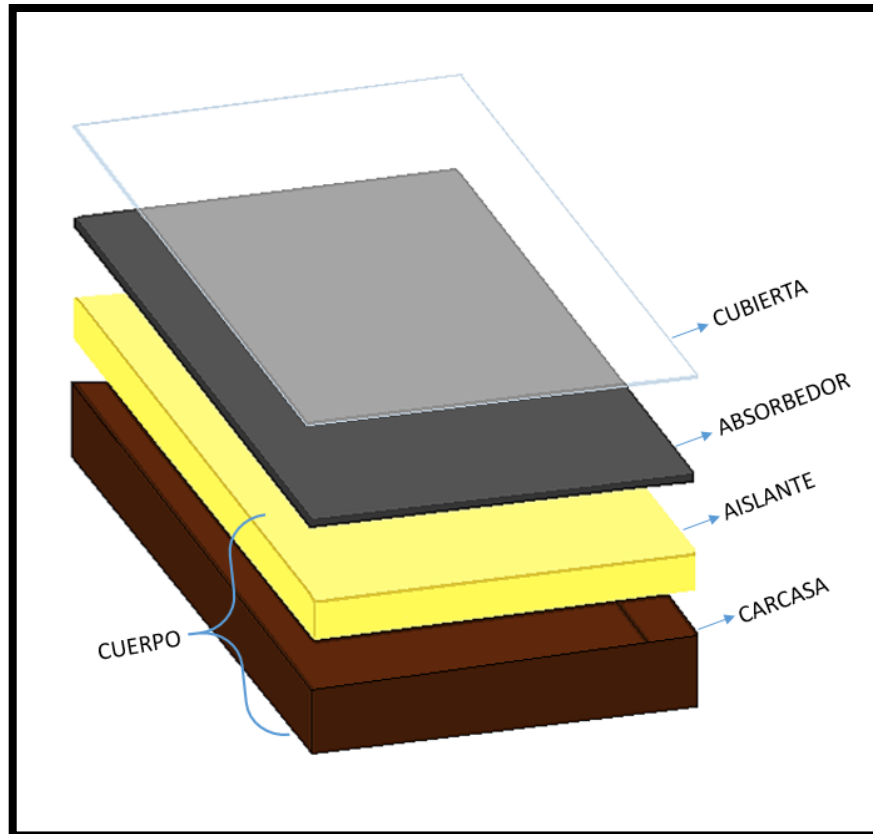
Como cubierta se utilizan materiales transparentes a la radiación solar. Es común el uso de vidrio y plástico. La eficiencia del colector se incrementa notoriamente mediante el uso de cubiertas selectivas, que permitan el paso de la radiación solar e impidan la transferencia hacia el ambiente de la radiación infrarroja de onda corta, generando efecto invernadero.

#### **2.4.4.2 El absorbedor de calor.**

Entre los conductores térmicos, es frecuente el uso de placas metálicas, o metal de descarte (latas recicladas, virutas y desechos, entre otros), piedras y arena. Como es de suponer, el uso de un material con capacidad calorífica alta favorecerá la acumulación de energía. Por último, para favorecer la absorción de calor, suele pintarse el absorbedor en color negro mate, o mediante recubrimientos con propiedades ópticas selectivas.

#### **2.4.4.3 El cuerpo del colector.**

Independientemente de la elección de materiales, es preferible que el cuerpo del colector posea una aislación térmica adecuada, disminuyendo las pérdidas de calor hacia el ambiente, incrementando la temperatura del aire de escape, y con ello la eficiencia térmica del colector.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 4.** Componentes de un colector solar de placa plana para calentamiento de aire.

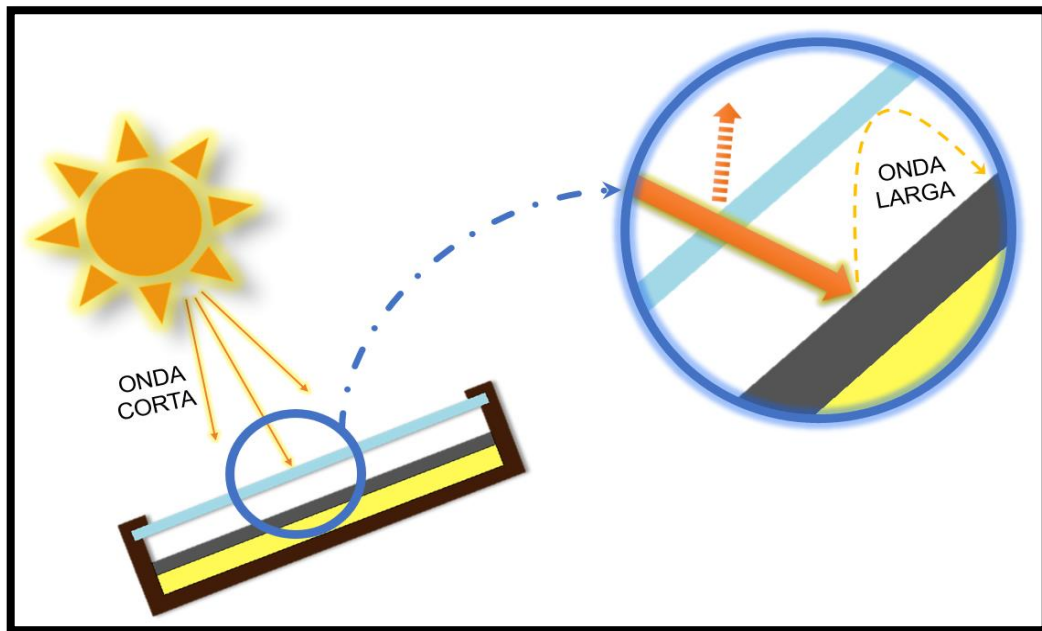
## 2.5 Fenómenos físicos que se producen en el colector solar para calentamiento de aire.

### 2.5.1 El efecto invernadero.

Nave, O. (s.f) explica que el efecto invernadero se refiere a los casos en que las longitudes de onda corta de la luz visible del Sol, pasa a través de un medio transparente y es absorbida, pero las longitudes de onda más larga de la re-

radiación infrarroja de los objetos calentados, son incapaces de pasar por ese medio. La captura de la radiación de longitud de onda larga, conduce a un mayor calentamiento y a una mayor temperatura resultante.

Cuevas, F. (2008) afirma que el funcionamiento de un colector solar plano se basa en el efecto invernadero. El mismo autor nos dice que al utilizar una cobertura de vidrio sobre una superficie absorbedora se produce dicho efecto, donde el vidrio permite el paso de la radiación incidente que proviene del sol, pero dificulta la radiación emitida por la superficie absorbedora, es decir, el vidrio tiene gran transmisividad frente a la radiación solar, pero baja transmisividad frente a la radiación que emite la superficie absorbedora (figura 5).



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 5.** Esquema del efecto invernadero en un colector solar plano.

### **2.5.2 La estratificación térmica.**

La estratificación térmica parte del principio del cambio de densidad del aire, normalmente generada por dos causas principales: las diferencias de los gradientes de presión y temperatura en un espacio determinado, provocando el movimiento interno de las masas de aire, por lo que se origina un flujo en sentido vertical, el cual se verá incrementado si se suman los dos fenómenos. Esta es la razón por la cual dentro de un espacio cerrado el aire caliente se posiciona en la parte superior al presentar una menor densidad y el aire más fresco se estaciona en las partes inferiores al presentar mayor densidad, resultado del fenómeno gravitacional.

En el 2005 Rubio, J. señala que un factor de gran influencia en el rendimiento del sistema solar es la estratificación térmica de la acumulación solar, a mayor estratificación mayor es el rendimiento de la instalación solar. La estratificación térmica de la acumulación hace posible que la temperatura de entrada al colector solar sea lo más baja posible, lo que mejora su rendimiento. Esta estratificación se puede conseguir en mayor o en menor grado en función de las medidas de diseño que se tomen. Una estratificación mayor se puede conseguir mediante diseños más sofisticados.

## **2.6 Variables más relevantes de un colector solar para calentamiento de aire.**

### **2.6.1 La temperatura.**

En el 2011, López, W. y Moyón, N. describen que la temperatura es aquella propiedad física que permite asegurar si dos o más sistemas están o no en equilibrio térmico (cuando dos cuerpos están a la misma temperatura), esto quiere decir que la temperatura es la magnitud física que mide cuan caliente o cuan frío se encuentra un objeto.

### **2.6.2 La humedad relativa.**

Giraldo, E. (2014) describe la humedad relativa como la cantidad de vapor de agua que hay en la atmósfera que comúnmente se expresa en tanto por ciento.

La misma autora explica que la humedad relativa es 100 por ciento (%) si el vapor está saturado, y cero por ciento (%) si no hay en absoluto vapor de agua; entre menor humedad relativa tenga el aire este tendrá mayor capacidad para absorber y retener la humedad.

## **2.7 Materiales para captar y almacenar la energía solar térmica.**

### **2.7.1 Los materiales más utilizados.**

#### **2.7.1.1 La lámina de cobre.**

El cobre es un metal de color rojizo, inerte y muy resistente a la corrosión; es un metal blando, resistente al desgaste, y posee una muy alta conductividad térmica y eléctrica. De hecho, es un excelente conductor de la electricidad (el segundo después de la plata) que unido a su buena ductilidad y maleabilidad lo hace el metal más empleado para la fabricación de cables eléctricos. El cobre por su eficiencia térmica es el metal más utilizado como absorbedor de la energía solar (Ingemecánica, S.f.). Sin embargo, su costo es muy elevado.

#### **2.7.1.2 La lámina captadora de zinc liso.**

Es un metal maleable, dúctil y de color gris. Los usos más importantes del zinc los constituyen las aleaciones y el recubrimiento protector de otros metales. El hierro o el acero recubiertos con zinc se denominan galvanizados. El zinc es buen conductor del calor y la electricidad. Como conductor del calor, tiene una cuarta parte de la eficiencia de la plata (Lenntech, S.f.).

**CUADRO I. MATERIALES MÁS UTILIZADOS PARA CAPTAR Y ALMACENAR LA ENERGÍA SOLAR TÉRMICA.**

<b>Material</b>	<b>Conductividad Térmica (W/(m· °K))</b>	<b>Densidad (Kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Cobre</b>	372-385	8900
<b>Zinc</b>	106-140	7140

Fuente: Miliarium, 2001.

- **Conductividad térmica:** Capacidad de un material para transferir calor. La conducción térmica es el fenómeno por el cual el calor se transporta de regiones de alta temperatura a regiones de baja temperatura dentro de un mismo material o entre diferentes cuerpos. Se mide en vatios por (metros- grados Kelvin).
- **Densidad:** Masa de material por unidad de volumen. Se mide en kilogramos por metros cúbicos.

## **2.7.2 Materiales de bajo costo y fácil adquisición.**

### **2.7.2.1 La piedra de canto rodado.**

Los materiales de canto rodado son definidos por varios investigadores como fragmentos de roca suelta que pueden ser transportados por medios naturales, como las corrientes de agua y los corrimientos de tierra; tiene una morfología más o menos redondeada, sub-redondeada o alargada, sin aristas y con la superficie lisa, debido al desgaste sufrido por los procesos erosivos, generalmente causados por la corrosión, las corrientes de agua (erosión hídrica) o el viento (erosión eólica). Su composición es casi totalmente de sílice en forma de calcedonia, ópalo, ágatas y cuarzo (Calderón, 2015).

### 2.7.2.2 La arena.

La arena es el material que resulta de la desintegración natural de las rocas o se obtiene de la trituración de las mismas, y cuyo tamaño es inferior a los cinco mm. El componente más común de la arena, en tierra continental y en las costas no tropicales, es la sílice, generalmente en forma de cuarzo. Sin embargo, la composición varía de acuerdo a los recursos y condiciones (Guaglianone, 2013).

**CUADRO II. MATERIALES DE BAJO COSTO PARA ALMACENAR LA ENERGÍA SOLAR TÉRMICA.**

<b>Material</b>	<b>Conductividad Térmica (W/m °C)</b>	<b>Densidad (Kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Piedra Canto rodado <sup>(a)</sup></b>	0.81	1700
<b>Arena <sup>(b)</sup></b>	0.33-0.58	1400

Fuente: Rey y Velasco, 2006<sup>(a)</sup>; Miliarium, 2001<sup>(b)</sup>.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Listado de materiales, herramientas e instrumentación.

**CUADRO III. MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL COLECTOR SOLAR.**

Ítem	Material	Cantidad	U. de medida
1	Fascia galvanizada 2" x 6" x 6m	1	unidad
2	Cinta asfáltica 0.25m x 10m	2	unidad
3	Tabla de pino 1" x 12" x 3,7m	1	unidad
4	Barniz poliuretano para madera de uso en exteriores	0.95	litros
5	Pieza de vidrio transparente 1.21m x 0.97m x 3mm de espesor	1	unidad
6	Adhesivo de uretano para parabrisas de vidrio automotriz 3M	1	unidad
7	Pintura blanca anticorrosiva mate Lanco	0.95	litros
8	Pintura negro anticorrosivo mate Lanco	2.84	litros
9	Piedra de canto rodado de aproximadamente 25.4mm de diámetro	0.08	metros cúbicos
10	Pieza de lámina de zinc liso de 1.22m x 0.99m	1	unidad
11	Thinner laca	3.70	litros
12	Brocha	1	unidad
13	Pincel	1	unidad
14	Tornillos de acero inoxidable N°12 x 25.4mm	29	unidades
15	Remaches de 4,8 mm	16	unidades
16	Masking tape	1	unidad

**CUADRO IV. HERRAMIENTAS UTILIZADAS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL COLECTOR SOLAR.**

<b>Ítem</b>	<b>Herramientas</b>	<b>Cantidad</b>
1	Pistola de pintar	1
2	Estampador de esquinas••	1
3	Remachadora	1
4	Taladro	1
5	Broca de cobalto de 3,2mm	1
6	Broca de cobalto de 4,8mm	1
7	Lija de agua para metal N° 80	1
8	Disco Para Cortar Metal	1
9	Disco para cortar madera	1
10	Lija de madera N° 80	1
11	Esmeril angular	1
12	Pinza de presión	2
13	Destornillador estrella	1
14	Centro punto	1
15	Martillo	1
16	Cinta métrica	1
17	Escuadra	1
18	Lima plana	1

••Herramienta desarrollada y construida en el taller para el estampado y posterior doblado de las esquinas del marco (ver anexo 5).

**CUADRO V. INSTRUMENTACIÓN UTILIZADA PARA EL REGISTRO DE PARÁMETROS.**

<b>Ítem</b>	<b>Instrumentación</b>	<b>Cantidad</b>
1	Micro termo-higrómetro	2
2	Termo-anemómetro	1
3	Actinógrafo portátil	2

### 3.2 Descripción de la instrumentación.

#### 3.2.1 Micro termo-higrómetro.

Se utilizó dos micro termo-higrómetros marca Qing Liu, modelo Q6Q16: uno para el registro de la temperatura y la humedad relativa del aire de entrada al colector solar y otro para medir la temperatura y humedad relativa del aire caliente que salía del colector (ver anexo 42).

**CUADRO VI. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL MICRO TERMO-HIGRÓMETRO.**

<b>Rango de Temperatura</b>	-50°C a 70°C
<b>Rango de Humedad</b>	10% HR a 99% HR
<b>Precisión Humedad</b>	±5% HR
<b>Precisión Temperatura</b>	±1 °C
<b>Periodo de muestreo</b>	10 seg.

### 3.2.2 Termo-anemómetro.

Se utilizó un termo-anemómetro marca Vetus, modelo HT-9819 en la salida de aire caliente del colector, el cual registró la velocidad instantánea y el caudal del aire caliente producido en el colector solar (ver anexo 43).

**CUADRO VII. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL TERMO-ANEMÓMETRO.**

<b>Velocidad del aire</b>	metros por segundo		<b>Flujo de aire</b>	metros cúbicos por minutos
<b>Rango</b>	0.40-30.00 m/s		<b>Rango</b>	0-9999 m <sup>3</sup> /min
<b>Resolución</b>	0.01 m/s		<b>Resolución</b>	1
<b>Precisión</b>	± (3% + 0.20 m/s)		<b>Área</b>	0 a 9.999 m <sup>2</sup>

#### Ecuación de volumen.

MCM (m<sup>3</sup>/min) = Velocidad del aire (m/s) x área (m<sup>2</sup>) x 60 seg.

### 3.2.3 Actinógrafo portátil.

Se utilizaron dos actinógrafos marca Tenmars, modelo TM-207: uno para el registro de radiación solar en plano horizontal y otro para el registro de la radiación solar en plano inclinado a aproximadamente 15 grados, similar a la

inclinación del colector solar. Las unidades de medida son vatios por metro cuadrado, y también es capaz de medirlo en unidades térmicas británicas (BTU) (ver anexo 44).

#### **CUADRO VIII. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL ACTINÓGRAFO.**

<b>Rango</b>	0 a 2000 W/m <sup>2</sup>
<b>Resolución</b>	0.1 W/m <sup>2</sup>
<b>Precisión</b>	+/- 10 W/m <sup>2</sup>
<b>Tiempo de muestreo</b>	0.25 segundos.
<b>Temperatura de funcionamiento</b>	0°C ~ 50°C
<b>Humedad de funcionamiento</b>	<80% RH

### **3.3 Ubicación del área de estudio.**

La construcción del prototipo de colector solar térmico con captador-almacenador de piedra fue ejecutado por la autora con la asesoría del profesor José Ricardo Castillo, realizado en el taller Guerra, ubicado en la Barriada Santa Fé, corregimiento de La Concepción, distrito de Bugaba, provincia de Chiriquí.

El levantamiento de los datos estudiados fue realizado en el futuro Centro de Investigación para el Desarrollo Sostenible (CIDSo) de la Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de Panamá, ubicada en el corregimiento de Chiriquí, distrito de David, provincia de Chiriquí. Se encuentra localizado entre los ocho

grados, 23 minutos y 33.4 segundos Latitud Norte y 82 grados, 19 minutos, 54.5 segundos Longitud Oeste; con una altitud de 29 metros sobre el nivel del mar (Google Earth, 2017). De acuerdo a la clasificación ecológica de L.R. Holdridge, El corregimiento de Chiriquí corresponde a Bosque Húmedo Tropical.

### **3.4 Metodología.**

#### **3.4.1. Selección del diseño.**

El prototipo de colector solar térmico de placa plana con captador-almacenador de piedra para calentamiento de aire agroindustrial fue diseñado utilizando como referencia los autores Moura B., Arnaldo; Rossi, Sílvio J. y Roa, Gonzalo. Se diseñó con un metro cuadrado de área de captación efectiva, utilizando piedras canto rodado pintadas de negro mate y una lámina de zinc liso como captadores térmicos.

#### **3.4.2 Selección de los materiales de construcción e instrumentación del levantamiento de los datos.**

Para la selección de materiales utilizados en la construcción del prototipo se consideró su fácil adquisición local, la calidad de los materiales, su bajo costo en el mercado y su trabajabilidad; todo esto con el propósito que el prototipo de colector solar para calentamiento de aire pudiera replicarse con cierta facilidad.

Se realizó la selección, compra e importación de la instrumentación para la determinación de factores energéticos y ambientales tomados en consideración en el estudio del rendimiento del prototipo.

### **3.4.3 Construcción del colector solar.**

Se construyó un colector solar de placa plana de un metro cuadrado de área de captación efectiva, utilizando piedra de canto rodado pintada de negro mate como captador térmico, mediante técnicas comúnmente utilizadas en labores de hojalatería y ebanistería.

### **3.4.4 Levantamiento de los datos.**

Mediante un micro termo-higrómetro se registró la temperatura y la humedad relativa del aire ambiente que ingreso al prototipo de colector solar, utilizando otro micro termo-higrómetro se registró la temperatura, humedad relativa del aire de escape (caliente); con un termo-anemómetro se registró la velocidad y caudal del aire de escape. Paralelamente se utilizó un actinógrafo para registrar la radiación solar incidente en el colector solar y otro actinógrafo para registrar la radiación solar en un plano horizontal.

Todos los parámetros fueron medidos en el mismo instante, a intervalos de 15 minutos desde el día 9 al 26 de septiembre de 2016 (15 días), excluyendo los sábados que fueron días en donde no hubo levantamiento de datos.

### **3.4.5 Análisis de datos.**

Para el análisis estadístico de los resultados obtenidos en el levantamiento de los datos del colector solar, se utilizó la aplicación de Excel de Microsoft Office en donde se construyeron gráficas que muestran la evolución de la humedad relativa y la temperatura, en función de la ganancia de radiación solar en plano horizontal. Por otro lado se realizó un análisis estadístico con el programa Sistema de Análisis Estadístico (SAS), en donde se realizaron modelos de correlación lineal de Pearson entre las variables antes citadas para determinar los coeficientes de correlación ( $r$ ) y los respectivos valores de significancia; y regresión lineal simple, donde se obtuvo las ecuaciones y sus respectivos coeficientes de determinación, así como la evaluación del ajuste de los modelos matemáticos que servirán para simular el comportamiento de la temperatura y la humedad relativa de escape en función de la intensidad de radiación y dentro de intervalos de horarios pre-establecidos, a lo largo de la evolución horaria del día.

## **3.5 Parámetros a evaluar.**

### **3.5.1. Del aire de ingreso.**

#### **3.5.1.1 Temperatura y humedad relativa.**

Para evaluar estos parámetros se utilizó un micro termo-higrómetro, en donde se obtuvo con intervalos de 15 minutos a lo largo del día, la temperatura en grado

Celsius y el porcentaje de humedad relativa de aire natural que ingresaba al prototipo de colector solar térmico.

### **3.5.2 Del aire de escape.**

#### **3.5.2.1 Temperatura y humedad relativa.**

Para evaluar estos parámetros se utilizó otro micro termo-higrómetro, en donde se obtuvo con intervalos de 15 minutos a lo largo del día, la temperatura en grado Celsius y el porcentaje de humedad relativa de aire de escape.

#### **3.5.2.2 Velocidad y caudal de escape.**

Para obtener estos parámetros se utilizó el termo-anemómetro, el cual registro con intervalos de 15 minutos a lo largo del día, la velocidad instantánea de aire de escape del prototipo de colector solar térmico en metros por segundo; para obtener el caudal de escape se multiplicó la velocidad registrada por el área de salida del aire caliente por 60 segundos, obteniendo el volumen de aire caliente que fluye del prototipo de colector solar térmico en metros cúbicos por minuto.

### **3.5.3 Intensidad de radiación solar.**

#### **3.5.3.1 Radiación solar en el plano horizontal.**

Para evaluar este parámetro se utilizó un actinógrafo portátil, nivelado y colocado en un ángulo de cero grados, el cual registró con intervalos de 15 minutos a lo largo del día los vatios por metro cuadrado de la intensidad de radiación solar en el plano horizontal.

#### **3.5.3.2 Radiación solar en el plano inclinado.**

Para evaluar este parámetro se utilizó otro actinógrafo portátil, colocado en un ángulo de 15 grados, en el centro del borde derecho del prototipo de colector solar térmico, el cual registró con intervalos de 15 minutos a lo largo del día los vatios por metro cuadrado de la intensidad de radiación solar incidente en el colector solar.

## **4. RESULTADOS**

### **4.1. Construcción del colector solar térmico.**

La construcción del prototipo de colector solar para calentamiento de aire se divide en diferentes fases:

- Confección del marco.
- Instalación del aislante térmico.
- Instalación de los elementos para captar y almacenar calor.
- Apertura de la entrada y salida del aire.
- Instalación de la cubierta transparente.

#### **FASE I. Confección del marco.**

Luego de ensayar otras formas se llegó a este método por ensayo y error.

- a. Se inició limpiando la fascia, retirándose toda la suciedad en ella (ver anexo 2).
- b. Con la cinta métrica se midió desde un extremo de la fascia una distancia longitudinal de 1.24 metros.
- c. Se aplicó masking tape en el área de medición, a lo interno de la fascia.
- d. Se procedió a rayar los 1.24 metros a escuadra, sobre el masking tape que se aplicó sobre la fascia, con un bolígrafo.

- e. Se utilizó una escuadra para hacer una marca en las pestañas laterales de la fascia.
- f. Se realizó un rayado perpendicular en ambas esquinas de inicio de pestañas, interceptando la línea transversal que marca la longitud de 1.24 metros.
- g. Con ayuda de un centro punto se marcó las intersecciones en ambas líneas, para facilitar el doblado del marco (ver anexo 3).
- h. Se colocó la fascia de forma oblicua para taladrar con una broca de 3,2 milímetros de diámetro las intersecciones marcadas con el centro punto (ver anexo 4).
- i. Se golpeó con un estampador de esquinas, que abarcaba totalmente la línea transversal de 1.24 metros, en el área interna de la fascia, para facilitar el doblado de la misma (ver anexo 6).
- j. Se cortó con un esmeril angular por la línea marcada en las pestañas de la fascia hasta el orificio previamente perforado (ver anexo 7).
- k. Se remarcó el golpe realizado en la línea de 1.24 metros para facilitar aún más, el doblado longitudinal de la fascia.

A partir de la marca de 1.24 metros longitudinalmente en lo interno de la fascia, se marcó 1.00 metro, 1.24 metros y 1.00 metro continuamente (ver anexo 8) y se realizaron los mismos pasos desde el punto **c** en adelante. Al tener todas las intersecciones señaladas, con un esmeril angular se cortó la fascia sobrante.

- l. Con una lima plana se desbastó el borde filoso previamente cortado con el esmeril angular; para reducir el peligro de corte en la piel.
- m. Se procedió a realizar el doblado de la fascia, en cada una de las intersecciones marcadas en la fascia, no sin antes modificar (abrir/cerrar) la posición de las pestañas de la fascia para que queden ubicadas correctamente (ver anexo 9).
- n. Doblada la fascia, con una lima plana se desbastaron las esquinas donde se realizaron las perforaciones para facilitar el doblado de la misma, reduciéndose el peligro de cortes en la piel. (ver anexo 10).
- o. Se volvió a limpiar totalmente la fascia para retirarle toda la suciedad y proceder a pintarla.
- p. Con una pistola de pintar se aplicó pintura tipo epoxi blanco mate, en la parte externa de la fascia y se deja secar durante 30 minutos (ver anexo 11).
- q. En un ángulo de 90 grados, se realizaron cuatro perforaciones en cada doblez del marco, dos en cada pestaña; utilizándose el taladro con una broca de 4,8 milímetros (ver anexo 12).
- r. Para finalizar la construcción del marco, con una remachadora se instalaron remaches de 4,8 milímetros de diámetro en tres vértices, dejando un vértice abierto para poder insertar dentro del marco, el material aislante (ver anexo 13).

**FASE II. Instalación del aislante térmico.**

- a. Se adhirió cinta asfáltica en toda la parte interna del marco (ver anexo 14).
- b. Se limpió la tabla de pino tratado, retirándole toda la suciedad en ella.
- c. Utilizando una lija N°80 para madera, se removió las imperfecciones de toda la superficie y bordes de la tabla.
- d. En la tabla de pino se midió secciones de 1.22 metros de largo con una cinta métrica y se marcaron con un bolígrafo hasta conseguir cuatro secciones (ver anexo 15).
- e. Con una pistola se pintó la tabla totalmente con barniz de poliuretano para exteriores. La pintura se dejó secar durante 30 minutos (ver anexo 16).
- f. Con el disco para cortar madera se realizaron los cortes de cada sección marcada en la tabla, para obtener las cuatro piezas necesarias para armar el fondo aislado del prototipo (ver anexo 17).
- g. Con la lija para madera se lijaron los bordes de las piezas de madera que fueron cortadas.
- h. Se realizaron cuatro hendiduras en dos piezas de madera. Colocando las piezas verticalmente, dos del lado derecho de una pieza y dos del lado izquierdo de otra pieza; esto para que al momento de introducir las piezas de madera dentro del marco del prototipo, las mismas ajustaran sobre los remaches previamente instalados en los vértices del marco.
- i. Con una brocha se pintaron las cuatro hendiduras y los bordes que fueron lijados de las cuatro piezas de madera, con barniz poliuretano para exteriores. Se dejó secar durante 30 minutos (ver anexo 18).

- j. Se procedió a remachar el último vértice del marco que había quedado abierto.
- k. Se centró, con la mejor precisión posible, las piezas de madera dentro del marco, ubicando las piezas con las hendiduras en los respectivos vértices.
- l. Utilizando un taladro con una broca 4,8 milímetros se perforaron orificios a un centímetro del borde de la pestaña del marco, donde irán los tornillos que fijarán las piezas de madera al fondo del marco.
- m. Utilizando un taladro con una broca de 3,2 milímetros se perforaron orificios en la madera en donde se instalarán los tornillos, para facilitar el atornillado de los mismos.
- n. Se atornillaron 24 tornillos de acero inoxidable en todo el perímetro del marco, utilizando cuatro tornillos en el lateral izquierdo, cuatro en el lateral derecho, ocho en la parte superior y ocho en la parte inferior del marco, para que las piezas de madera tuvieran una mejor fijación. (ver anexo 19).
- o. Se volvió a adherir cinta asfáltica en la parte interna del marco para que quedará súper aislado, está vez iniciándose la adhesión de la cinta sobre un centímetro por encima de las tablas y recorriendo toda la sección interna del marco metálico, hasta dos centímetros por encima de la pestaña del marco. (ver anexo 20).
- p. Se colocaron tiras de 2.5 centímetros de ancho de cinta asfáltica en todas las aberturas que hay entre piezas de madera y otra en la parte exterior del prototipo de colector solar (ver anexo 21).

Nota: El punto **o** y **p**, se ejecutaron luego de realizar la apertura de la entrada y salida del aire en el prototipo.

## **FASE II. Instalación de los elementos para captar y almacenar calor.**

### **1) Lámina de zinc liso.**

- a. En una lámina de zinc liso, con la ayuda de una cinta métrica y una tiza para trazar metal, se midió y marcó una sección rectangular de 1.22 metros de largo y 0.99 metros de ancho (ver anexo 22).
- b. Se cortó la sección rectangular con un esmeril angular por la línea previamente marcada (ver anexo 23).
- c. Con una lima plana, se desbastó el borde de la sección recién cortada, para reducir el riesgo de accidentes por cortes en la piel del operador.
- d. Con una pistola se pintó un solo lado de la lámina de zinc liso con pintura epoxi negro mate. Esta se dejó secar durante 30 minutos.
- e. Se procedió a instalar sobre el fondo de madera del colector, la lámina de zinc liso.
- f. Utilizando un taladro con una broca 3,2 milímetros se perforaron orificios a 20 centímetros desde cada vértice de la lámina instalada, hacia el centro del colector, diagonalmente, en donde irán los tornillos; para facilitar la penetración de los mismos (ver anexo 24).
- g. Se atornillaron cinco tornillos de acero inoxidable en total, uno en cada vértice ya descritos y uno en el centro de la lámina (ver anexo 25).

## **2) Piedra canto rodado.**

- h. Se recogieron piedras de canto rodado de aproximadamente una pulgada de diámetro, recolectando cuatro tanques de 20 litros (0.0757 metros cúbicos). Los ríos en donde se encontraron este tipo de piedras en mayor cantidad fue en el Río Piedra y en el Río Chiriquí (ver anexo 26).
- i. Se limpiaron las piedras, tratando de quitarle toda la suciedad a cada una de ellas.
- j. En una lámina de zinc se acomodaron las piedras de forma que no estuvieran una encima de la otra (ver anexo 27).
- k. Se realizó una dilución de la pintura, utilizando 50 por ciento de pintura epoxi negro mate y 50 por ciento de thinner laca para obtener una capa más delgada de pintura.
- l. Se procedió a pintar las piedras con ayuda de una pistola de pintar. Estas se dejaron secar durante 30 minutos (ver anexo 28).
- m. Al comprobar que las piedras estaban secas, se giró cada una de ellas para pintar el área restante (ver anexo 29).
- n. Se pintó la otra mitad de las piedras con la pistola de pintar. Nuevamente se dejaron secar durante 30 minutos.
- o. Algunas piedras quedaron con áreas sin pintar, estas se terminaron de pintar con un pincel para que todas las piedras estuvieran pintadas en su totalidad. En este caso se dejaron secar durante 15 minutos.

Nota: Las piedras se colocaron dentro del prototipo de colector solar en el sitio de ensayado, para luego realizar el levantamiento de los datos.

- p. Se colocaron las piedras en tanques de 20 litros y se llevaron al sitio de levantamiento de los datos (ver anexo 38).
- q. Al instalar y orientar el colector solar térmico, se colocaron manualmente las piedras pintadas dentro del mismo, por el orificio del aire de escape (ver anexo 39 y 40).
- r. Al colocar todas las piedras dentro del colector solar, se procedió a acomodarlas con una vara de madera, de manera a uniformizar la camada de piedra. (ver anexo 41).

#### **FASE IV. Apertura de la entrada y salida del aire.**

- a. Con una cinta métrica y un bolígrafo se trazaron las líneas con medidas predeterminadas en el lado más angosto del marco para hacer los orificios de ingreso y escape del aire (ver anexo 30).
- b. Se marcó cada vértice trazado con un bolígrafo para facilitar el posterior marcado a relieve con el centro punto.
- c. Con una broca 3,2 milímetros se taladró en los vértices marcados con el centro punto (ver anexo 31).

- d. Se cortó con un esmeril angular las líneas trazadas en el marco para realizar los orificios de ingreso y escape del aire del prototipo de colector solar (ver anexo 32).
- e. Con un martillo se golpeó en el área cortada, para retirar el material sobrante (ver anexo 33).
- f. Utilizando una lima plana, se desbastó los bordes cortados con el esmeril angular.
- g. Se colocó cinta asfáltica en los bordes de los orificios realizados para la entrada y salida del aire.

#### **1) Protectores contra la entrada de lluvia.**

- h. Utilizando una lámina de zinc liso, con una cinta métrica y un bolígrafo, se marcaron dimensiones de 90 centímetros de largo y 10 centímetros de ancho, para cubrir el orificio de entrada de aire y 70 centímetros de largo y 10 centímetros de ancho para cubrir el orificio de salida del aire.
- i. Se cortaron secciones de zinc liso con las dimensiones mencionadas, con un esmeril angular.
- j. Con una lima plana, se desbastó los bordes previamente cortados con el esmeril angular, para reducir el peligro de cortes en la piel.
- k. Se procedió a adherir cinta asfáltica en ambos lados del corte, dejando un labio de tres centímetros de cinta asfáltica para que esta se adhiriera en el marco del colector y quedara como una especie de visera, protegiendo la entrada y salida del aire contra la entrada de lluvia.

Nota: El orificio de salida del aire tuvo que cerrarse parcialmente para que solo quedara espacio del sensor del termo-anemómetro. Para esto se utilizó hielo seco de tres pulgadas de grosor, quedando con dimensiones de 7.2 centímetros de ancho y 6.5 centímetros de largo.

#### **FASE V. Instalación de la cubierta transparente.**

- a. Se eliminó la suciedad en ambos lados del vidrio.
  - b. Se presentó el vidrio sobre el marco para verificar, ajustarlo y marcar en sus bordes la posición centrada, previo a la aplicación del adhesivo.
  - c. Por todo el perímetro del borde el marco, se colocó un cordón de adhesivo de poliuretano (ver anexo 34).
  - d. Se procedió a instalar el vidrio a cuatro manos, sobre el marco en la posición previamente marcada. (ver anexo 35).
  - e. Se ejerció un poco de presión sobre el vidrio para mejorar la adherencia y se dejó secar durante 24 horas (ver anexo 36).
  - f. Con un exacto, se cortaron los sobrantes exteriores de cordón adhesivo de poliuretano, a ras del borde del vidrio (ver anexo 37).
- 
- **En todas las fases de la construcción del prototipo se utilizó protección personal.**

## **4.2 Levantamiento y análisis de datos.**

Se transportó el colector solar construido en el Taller Guerra en la Concepción, hasta el futuro Centro de Investigación para el Desarrollo Sostenible (CIDSo), donde se construyó una base nivelada de piedra picada para instalar el colector solar; luego se orientó en el sentido Norte-Sur, con un ángulo de inclinación de 15 grados, para un mejor aprovechamiento global de la radiación solar a lo largo del año (ver anexo 45).

El ensayado para el levantamiento de datos se realizó durante 15 días, desde el día 9 al 26 de septiembre de 2016.

La lectura de los parámetros durante los cinco primeros días, inició desde las 9:00 hasta las 19:00 horas, al observar que a las 9:00 horas había una elevada diferencia de temperatura y humedad relativa en la entrada y salida del aire, se modificó el horario del levantamiento de los datos del día seis hasta el día 15, iniciando las lecturas desde las 8:00 hasta las 19:00 horas.

A lo largo de los 15 días se recopilaron 655 datos por parámetro. Los cinco primeros días se consideraron 41 datos por parámetro al día, y los 10 días restantes, 45 datos por parámetro al día.

Para determinar el rendimiento del prototipo de colector solar térmico bajo una determinada intensidad de radiación solar, se registró la radiación solar en el plano horizontal, ya que con ésta, desde que se conozcan previamente los valores de radiación local, se puede realizar el dimensionado ajustado de los colectores para calentamiento de aire en relación a cualquier punto geográfico.

Para el análisis del comportamiento del prototipo de colector solar térmico se promediaron los valores registrados por día y con esto se determinó el día con mayor y menor radiación solar en el plano horizontal; también el promedio de la evolución horaria durante los 15 días, en base a la radiación solar en el plano horizontal, la temperatura y humedad relativa del aire de escape.

**CUADRO IX. PROMEDIOS DIARIOS OBTENIDOS DURANTE QUINCE DÍAS DE LECTURA.**

Día	Temperatura (°C)		Humedad Relativa (%)		Radiación solar (W/m <sup>2</sup> )	
	Aire de ingreso	Aire de Escape	Aire de ingreso	Aire de Escape	Plano horizontal	Plano inclinado
1	30.9	50.0	75.9	31.4	519.67	545.36
2	31.7	55.3	72.6	23.9	365.37	392.93
3	31.9	49.2	71.2	27.4	540.73	585.77
4	31.7	53.7	67.6	18.2	613.00	660.51
5	32.1	52.9	72.9	21.4	543.18	579.59
6	28.9	37.4	88.0	56.0	289.84	306.52
7	31.7	51.3	71.2	24.7	637.55	685.25
8	33.8	52.5	67.2	24.4	491.34	528.55
9	30.9	42.6	75.2	38.3	362.47	379.12
10	31.2	46.1	75.8	34.8	435.57	462.57
11	31.9	54.0	72.9	25.7	730.97	783.41
12	30.7	45.6	70.0	30.3	510.05	542.49
13	32.4	56.2	67.3	21.1	663.84	704.63
14	26.9	35.3	98.6	58.9	388.84	414.99
15	30.5	50.0	82.7	28.6	462.73	494.70
<b>PROM</b>	31.1	48.8	75.3	31.0	503.70	537.80

El día 11 presentó una radiación solar de 730.97 vatios por metro cuadrado, siendo el mayor promedio diario, pero este no se consideró como el día con mayor radiación solar ya que se suspendió el levantamiento de datos a las 15:00 horas por tormenta eléctrica, debido a esto se determinó el día 13 como el día con mayor promedio de radiación solar, con 663.84 vatios por metro cuadrado. El día seis registró los menores valores de radiación solar, con 289.84 vatios por metro cuadrado.

**CUADRO X. PROMEDIOS DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA DE ESCAPE DURANTE LOS DÍAS CON MENOR Y MAYOR RADIACIÓN SOLAR Y EL PROMEDIO A LOS QUINCE DÍAS.**

	Temperatura de escape (°C)	Humedad Relativa de escape (%)	Radiación solar en plano horizontal (W/m <sup>2</sup> )
<b>Día 6 (Menor radiación)</b>	37.4	56.0	289.84
<b>Día 13 (Mayor radiación)</b>	56.2	21.1	663.84
<b>Promedio a los 15 días</b>	48.8	31.0	503.70

Obteniendo el promedio por día, la menor radiación solar registrada fue de 289.84 vatios por metro cuadrado, mientras que la máxima fue de 663.84 vatios por metro cuadrado. Durante los 15 días, el promedio de la radiación solar en plano horizontal fue de 503.70 vatios por metro cuadrado, 48.8 grados Celsius el

promedio de temperatura y 31.0 por ciento la humedad relativa promedio de escape.

**CUADRO XI. PROMEDIOS HORARIOS DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA DE ESCAPE OBTENIDOS A LO LARGO DEL ENSAYADO.**

<b>HORA</b>	<b>Temperatura de escape (°C)</b>	<b>Humedad Relativa de escape (%)</b>	<b>Radiación solar en plano horizontal (W/m<sup>2</sup>)</b>
<b>8:00-9:00</b>	33.8	68.9	496.60
<b>9:00-10:00</b>	41.8	45.5	657.84
<b>10:00-11:00</b>	48.9	30.4	816.44
<b>11:00-12:00</b>	55.6	19.7	820.96
<b>12:00-13:00</b>	59.0	15.6	722.73
<b>13:00-14:00</b>	59.1	15.5	708.00
<b>14:00-15:00</b>	56.5	17.3	472.80
<b>15:00-16:00</b>	51.5	22.5	289.26
<b>16:00-17:00</b>	47.5	26.0	133.11
<b>17:00-18:00</b>	41.3	38.2	43.65
<b>18:00-19:00</b>	36.4	51.7	9.46

A lo largo de los 15 días del levantamiento de los datos, los mejores registros de radiación solar en plano horizontal, de temperatura y humedad relativa de escape, se observaron entre las 10:00 y las 14:00 horas; esto debido elevada nubosidad y eventos de lluvia casi diariamente, en horas de la tarde.

El prototipo de colector solar térmico para calentamiento de aire agroindustrial se diseñó bajo un sistema pasivo; el cual captó, almacenó y distribuyó la energía solar de forma natural, sin la utilización de elementos mecánicos como ventilación artificial, utilizándose únicamente fenómenos naturales de circulación del aire. Los resultados obtenidos de velocidad y caudal del aire de escape se muestran en el siguiente cuadro:

**CUADRO XII. PROMEDIOS DIARIOS DE LA VELOCIDAD Y CAUDAL DEL AIRE DE ESCAPE.**

<b>Día</b>	<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Caudal (m<sup>3</sup>/min)</b>
<b>1</b>	0.85	2.382
<b>2</b>	1.11	3.119
<b>3</b>	1.23	3.458
<b>4</b>	0.78	2.194
<b>5</b>	0.60	1.693
<b>6</b>	1.12	3.144
<b>7</b>	1.21	3.414
<b>8</b>	0.71	1.999
<b>9</b>	0.57	1.617
<b>10</b>	1.02	2.876
<b>11</b>	1.00	2.806
<b>12</b>	1.39	3.926
<b>13</b>	0.97	2.737
<b>14</b>	1.13	3.191
<b>15</b>	0.71	1.994

A los 15 días, el promedio de mayor velocidad de aire se registró el día 12 con 1.39 metros por segundo, donde alcanzó un caudal de aire de 3.926 metros cúbicos por minuto, sin embargo, ese caudal de viento no es constante durante todo el día.

**CUADRO XIII. PROMEDIOS HORARIOS DE VELOCIDAD Y CAUDAL DEL AIRE DE ESCAPE DURANTE EL ENSAYADO.**

<b>Hora</b>	<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Caudal (m<sup>3</sup>/min)</b>
<b>8:00-9:00</b>	0.58	1.635
<b>9:00-10:00</b>	0.75	2.108
<b>10:00-11:00</b>	0.85	2.400
<b>11:00-12:00</b>	0.92	2.609
<b>12:00-13:00</b>	0.88	2.486
<b>13:00-14:00</b>	1.14	3.224
<b>14:00-15:00</b>	1.04	2.924
<b>15:00-16:00</b>	0.93	2.623
<b>16:00-17:00</b>	0.68	1.929
<b>17:00-18:00</b>	0.53	1.500
<b>18:00-19:00</b>	0.90	2.524

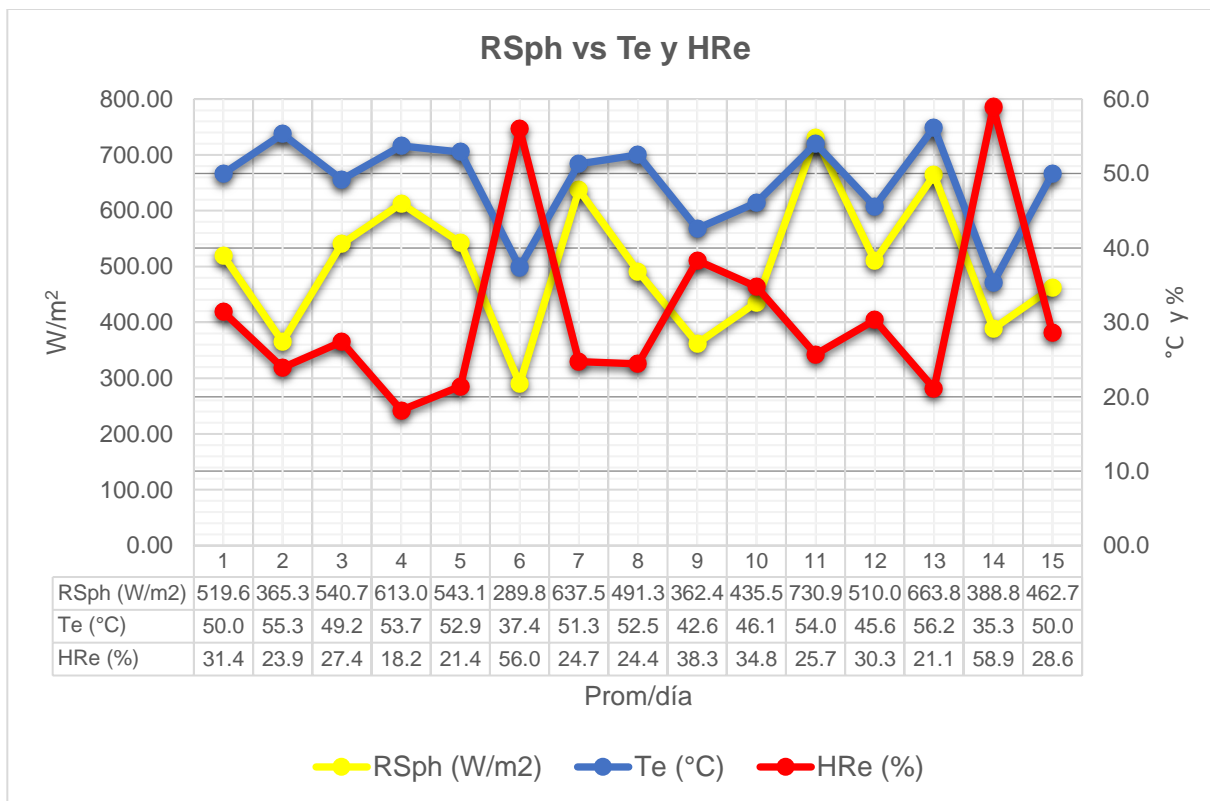
Durante los 15 días de lectura, se determinó que los mejores registros de velocidad y caudal del aire de escape se observaron entre las 13:00 y las 15:00 horas.

### **4.3 Análisis gráfico e interpretación de los registros.**

Para llevar a cabo un análisis del comportamiento del prototipo de colector solar térmico de forma más clara, se realizaron las siguientes gráficas:

1. Promedios diarios de temperatura, humedad relativa de escape y radiación solar, durante todo el ensayado.
2. Diferencias promedio horarias de temperatura, humedad relativa de escape y, radiación solar a lo largo del ensayado.
3. Promedios de temperatura y humedad relativa de escape y, radiación solar, en el día menor radiación solar.
4. Promedios de temperatura y humedad relativa de escape y, radiación solar, en el día con mayor radiación solar.
5. Promedios horarios de temperatura y humedad relativa de escape y, radiación solar a lo largo del ensayado.
6. Promedios diarios de las temperaturas de ingreso y escape de aire, a lo largo del ensayado.
7. Promedios horarios de temperaturas de ingreso y escape de aire, en el día con menor radiación solar.
8. Promedios horarios de temperatura de ingreso y escape de aire, en el día con mayor radiación solar.
9. Promedios horarios de temperatura de ingreso y escape del aire, durante todo el ensayado.

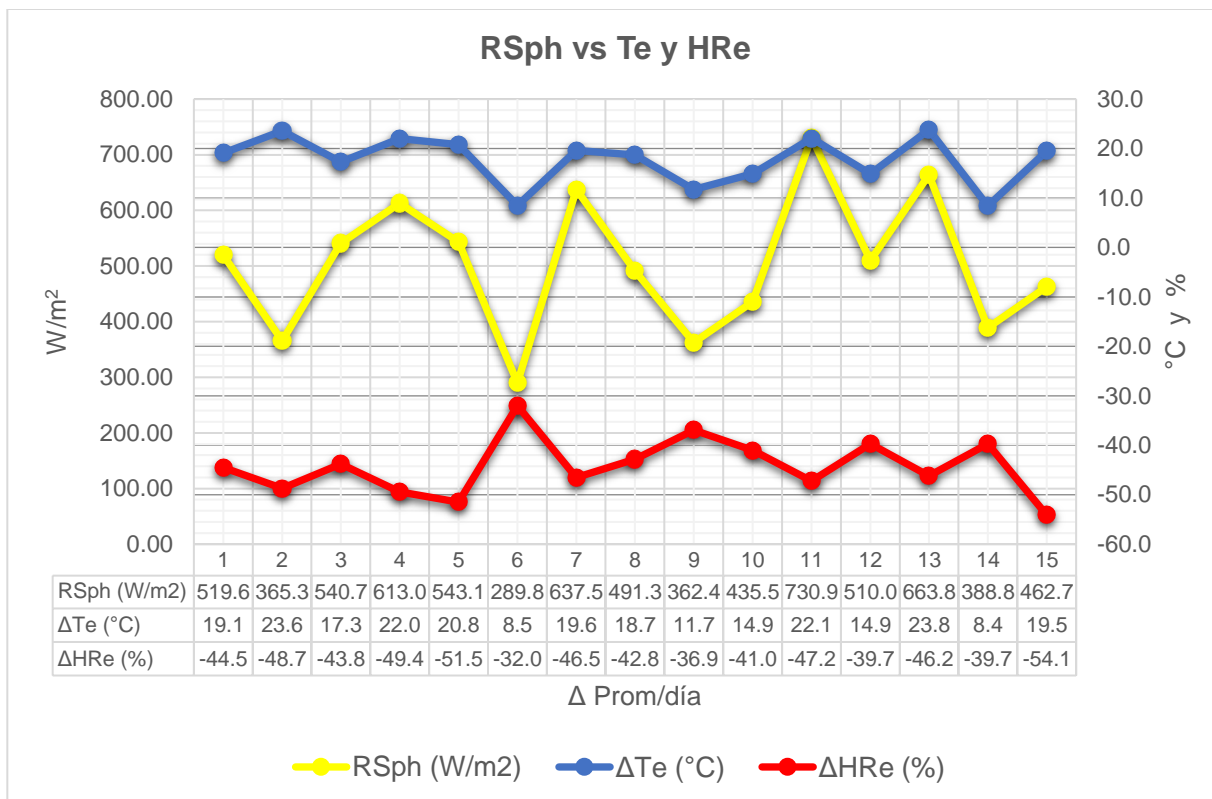
10. Promedios diarios de humedad relativa de ingreso y escape de aire, a lo largo del ensayado.
11. Promedios horarios de humedad relativa de ingreso y escape de aire, en el día con menor radiación solar.
12. Promedios horarios de humedad relativa de ingreso y escape de aire, en el día con mayor radiación solar.
13. Promedios horarios de humedad relativa de ingreso y escape durante el ensayado.
14. Promedios horarios de humedad relativa de escape en los días con menor y mayor radiación solar, y durante el ensayado.



Te= Temperatura de escape (aire caliente).  
 HRe= Humedad relativa de escape (aire caliente).  
 RSph= Radiación solar en plano horizontal ( $\approx 0^\circ$ ).

**Figura 6.** Promedios diarios de temperatura y humedad relativa de escape y, radiación solar, durante todo el ensayo.

La figura 6 muestra la variabilidad de la radiación solar en el plano horizontal a lo largo del periodo de lectura; la temperatura y la humedad relativa también muestra una diferencia significativa. Estos cambios fueron consecuencia de la elevada nubosidad de la época y la precipitación que se presentó casi diariamente.



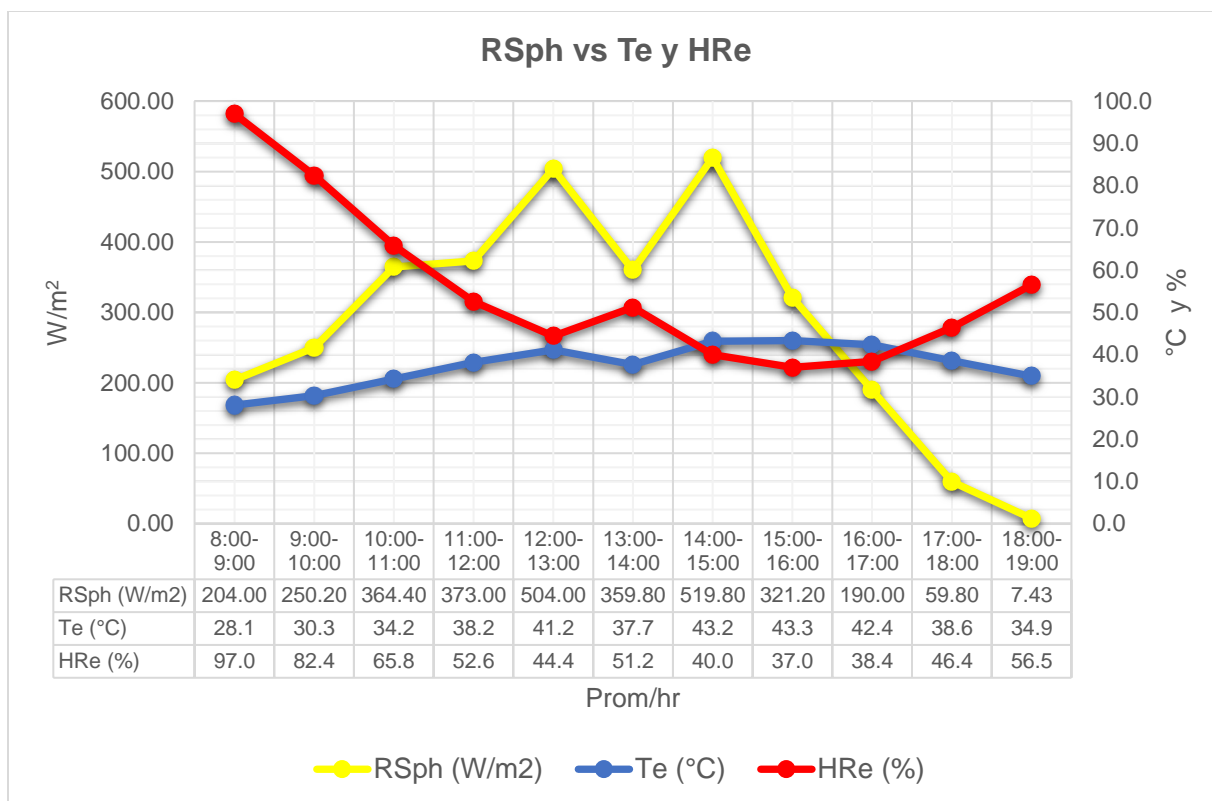
ΔTe= Gradiente de temperatura de escape (aire caliente).

ΔHRe= Gradiente de humedad relativa de escape (aire caliente).

RSph= Radiación solar en plano horizontal ( $\approx 0^\circ$ ).

**Figura 7.** Diferencias promedio horarias de temperatura y humedad relativa de escape y, radiación solar a lo largo del ensayado.

Como se puede observar en la figura 7, la diferencia de temperatura entre el aire de entrada y de salida es significativa, mientras que la diferencia entre humedad relativa de entrada y de salida es aún más acentuada; demostrando que hay una gran ganancia de calor dentro del prototipo de colector. Nótese que los factores antes mencionados están en función a la radiación solar en el plano horizontal.



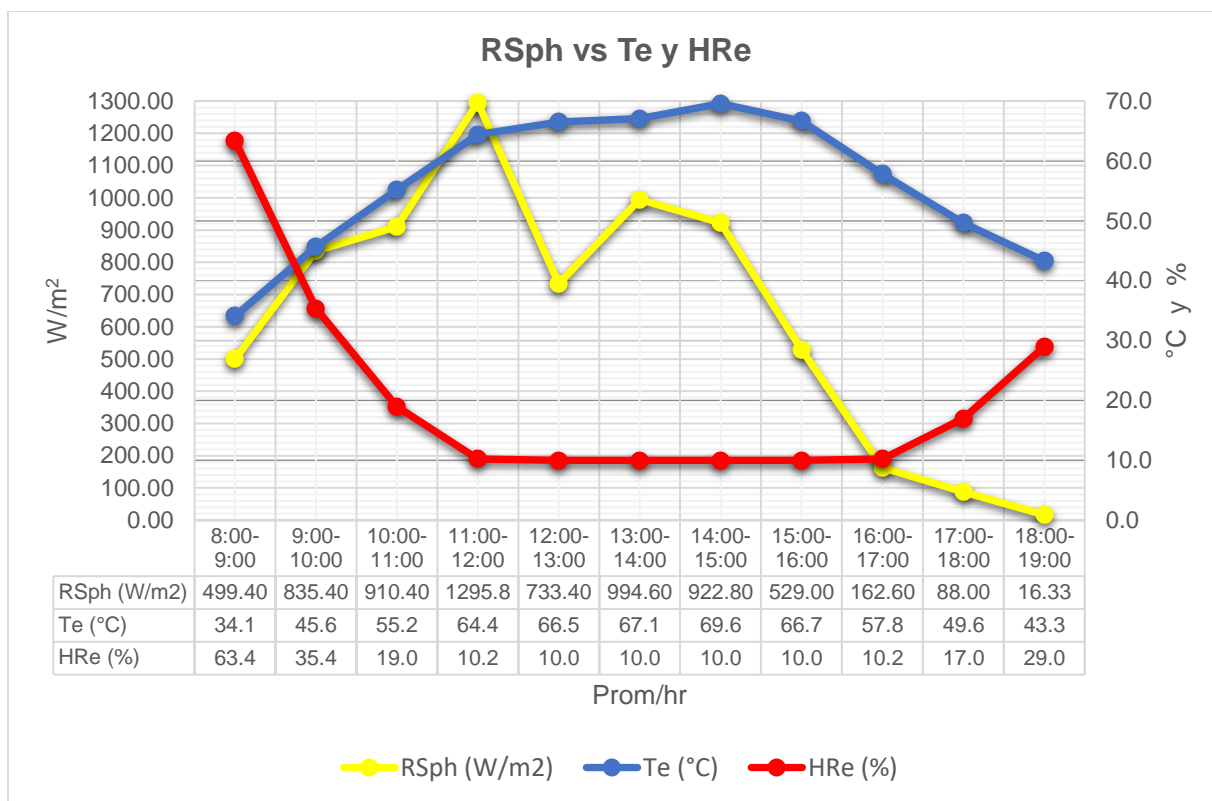
Te= Temperatura de escape (aire caliente).  
HRe= Humedad relativa de escape (aire caliente).  
RSph= Radiación solar en plano horizontal ( $\approx 0^\circ$ ).

**Figura 8.** Promedios de temperatura y humedad relativa de escape y, radiación solar, en el día menor radiación solar.

Las condiciones climáticas presentes este día (figura 8) fueron adversas; estuvo extremadamente nublado, presentándose lluvias intermitentes desde las 10:45 horas y continuó así hasta la noche.

A pesar de que este fue el día con la menor radiación solar en el plano horizontal, se observa que entre las 15:00 y 16:00 horas, la temperatura de escape alcanzó los 43.3 grados Celsius y la humedad relativa de escape alcanzó valores promedios de hasta de 37.0 por ciento, sugiriendo que posee un buen potencial de secado. Por otra parte, el registro promedio de la humedad

relativa entre las 18:00 y 19:00 horas, presenta un valor de 56.5 por ciento, lo que pudiera indicar que el calor almacenado por las piedras dentro del colector, se prolonga hasta horas de la noche.



Te= Temperatura de escape (aire caliente).  
HRe= Humedad relativa de escape (aire caliente).  
RSph= Radiación solar en plano horizontal ( $\approx 0^\circ$ ).

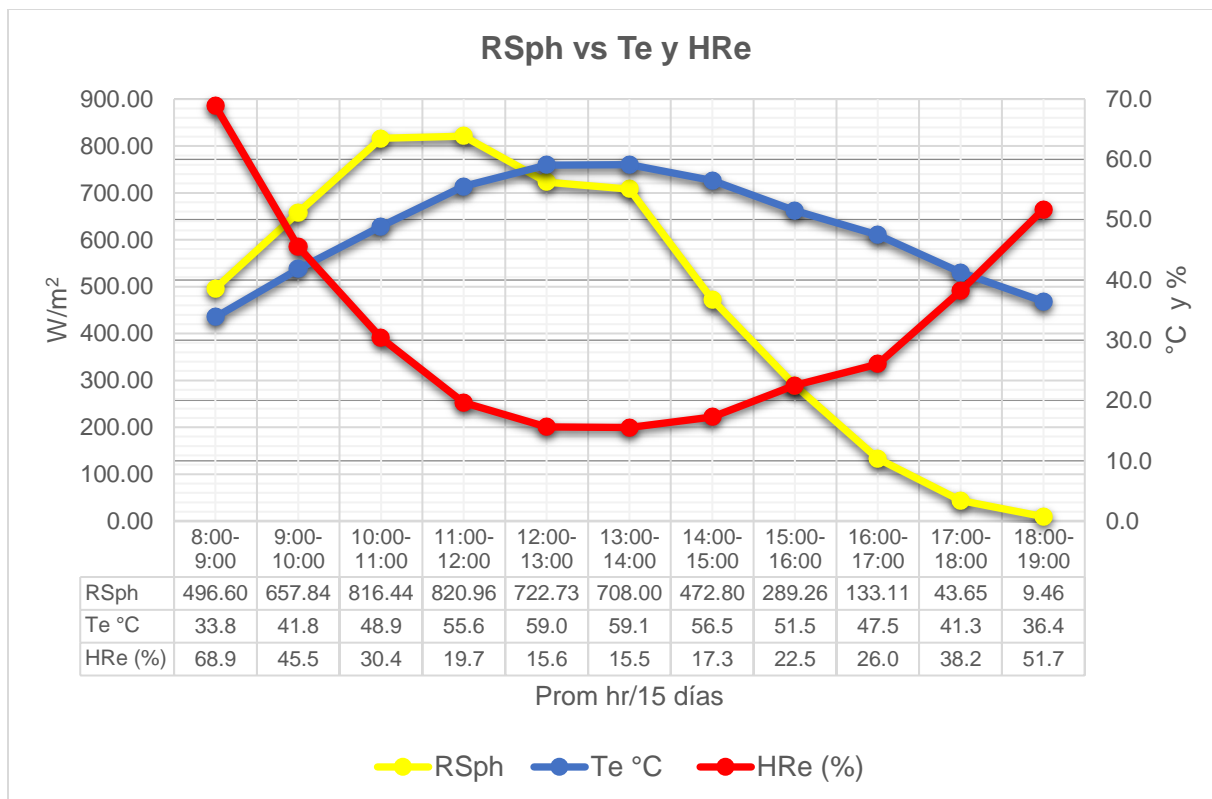
**Figura 9.** Promedios de temperatura y humedad relativa de escape y, radiación solar, en el día con mayor radiación solar.

En la figura 9 se muestra el día con la mayor radiación solar, el cual se presentó parcialmente nublado y sin lluvia; la temperatura y la humedad relativa alcanzaron valores de 69.6 grados Celsius y 10 por ciento respectivamente, el cual nos pudiera indicar que el aire de escape posee buen potencial de secado.

Si bien este día presenta la mayor radiación solar, ocurre variabilidad en la misma. Por otro lado, el registro a las 19:00 horas presenta valores de temperatura de 43 grados Celsius y humedad relativa de 20 por ciento,

evidenciando que el almacenamiento de calor en el prototipo hasta horas nocturnas.

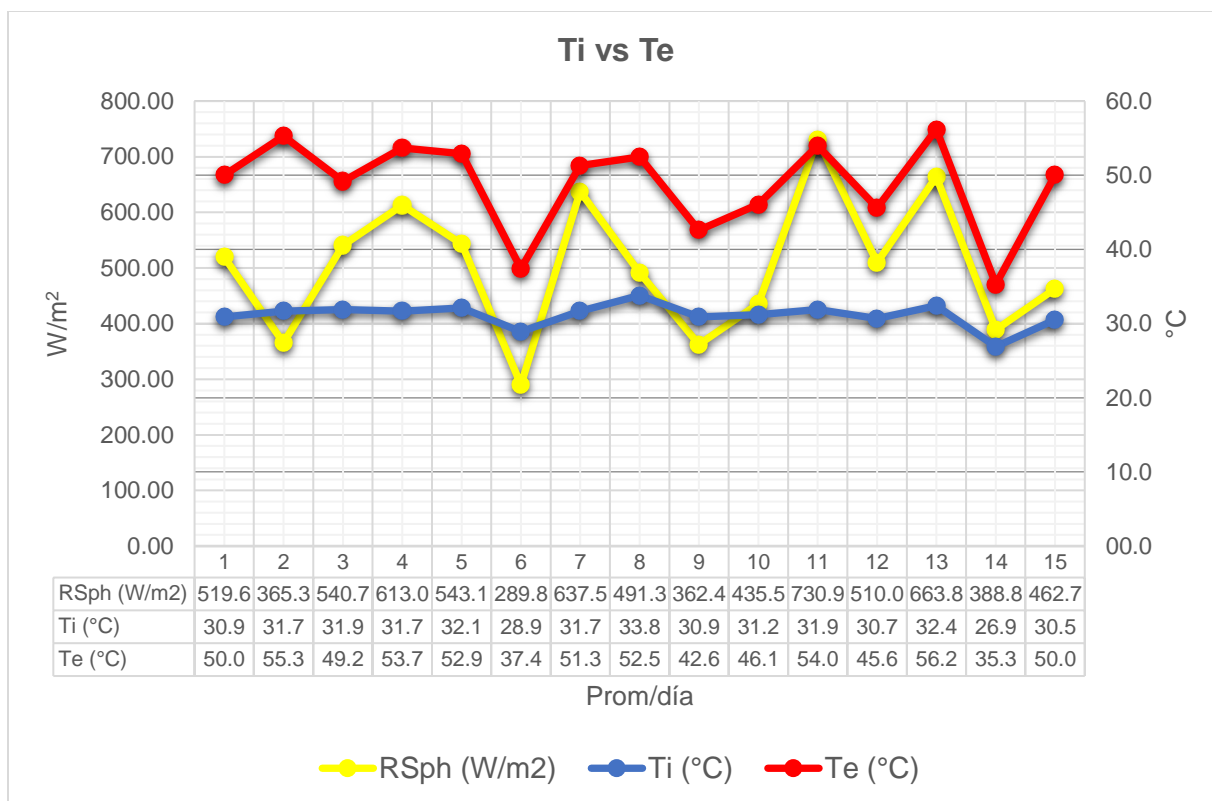
La humedad relativa promedio de 10 por ciento que se presenta desde las 12:00 hasta las 17:00 horas pudo ser menor; esto debido a las limitaciones de la amplitud de medición del propio micro termo-higrómetro y el fabricante especifica una lectura tope mínima de hasta 10 por ciento de humedad relativa.



Te= Temperatura de escape (aire caliente).  
 HRe= Humedad relativa de escape (aire caliente).  
 RSph= Radiación solar en plano horizontal ( $\approx 0^\circ$ ).

**Figura 10.** Promedios horarios de temperatura y humedad relativa de escape y, radiación solar a lo largo del ensayo.

La figura 10 demuestra que a lo largo de los 15 días de ensayo, la radiación solar disminuye acentuadamente a partir las 14:00 horas. Sin embargo, tanto la curva de temperatura de escape y la curva de humedad relativa de escape, evolucionan suavemente, lo que pudiera ocurrir debido al calor almacenado y luego liberado paulatinamente por el colector de piedra.

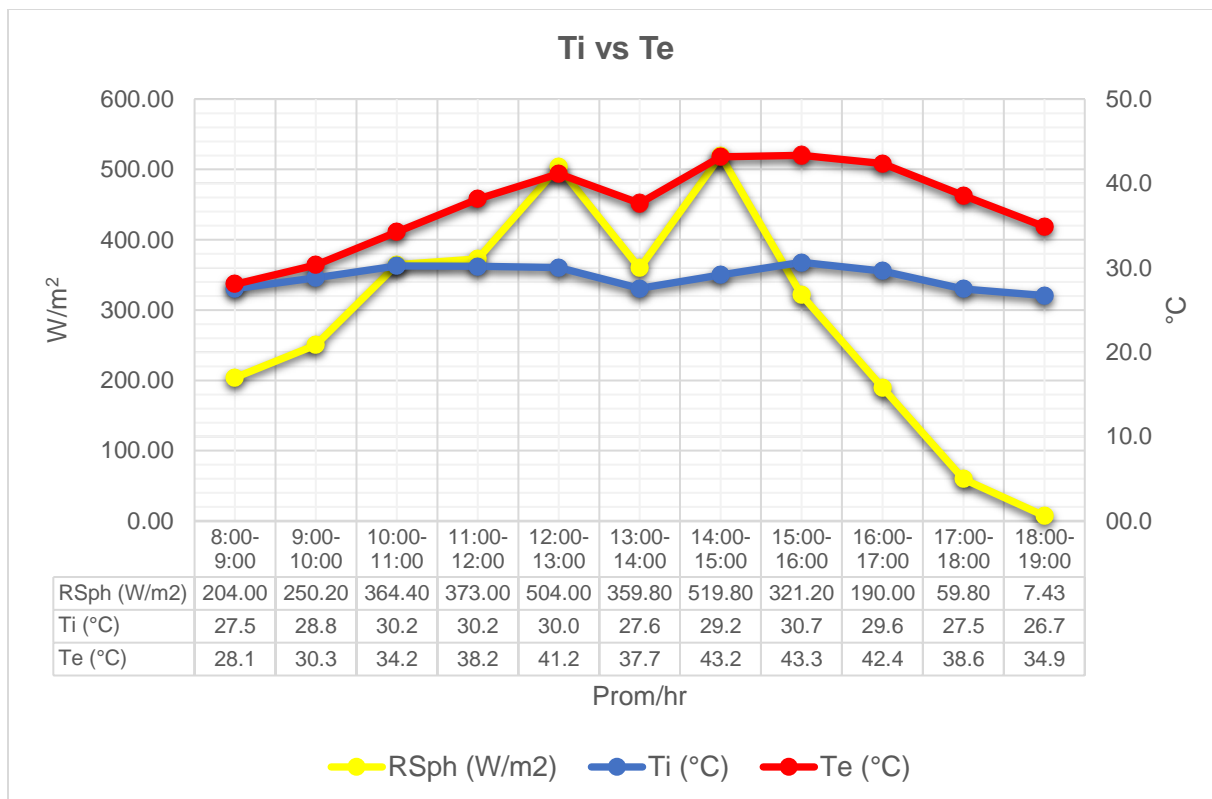


Ti= Temperatura de ingreso (aire ambiente).  
 Te= Temperatura de escape (aire caliente).  
 RSph= Radiación solar en plano horizontal ( $\approx 0^\circ$ ).

**Figura 11.** Promedios diarios de las temperaturas de ingreso y escape de aire, a lo largo del ensayo.

En la gráfica de la figura 11, se observa que la curva de la temperatura promedio del aire de escape fue desigual en los días de ensayado por la variabilidad en la radiación solar en el plano horizontal, pero se demuestra que a mayor radiación solar, mayor es la temperatura del aire de entrada, también la del aire de escape.

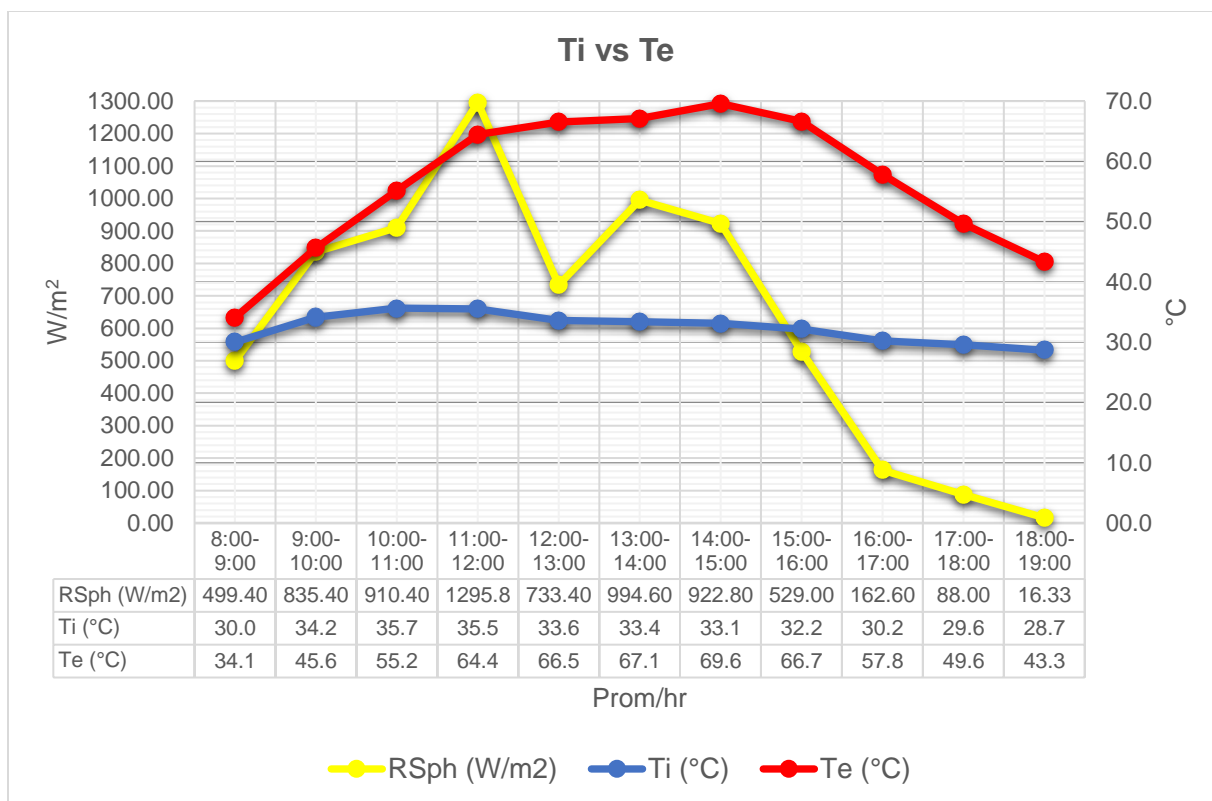
La menor diferencia de temperatura entre el aire ambiente y el aire de escape fue el día 14, con 8.5 grados Celsius; mientras que la mayor diferencia fue el día 13, con 23.8 grados Celsius.



Ti= Temperatura de ingreso (aire ambiente).  
Te= Temperatura de escape (aire caliente).  
RSph= Radiación solar en plano horizontal ( $\approx 0^\circ$ ).

**Figura 12.** Promedios horarios de temperatura de ingreso y escape de aire, en el día con menor radiación solar.

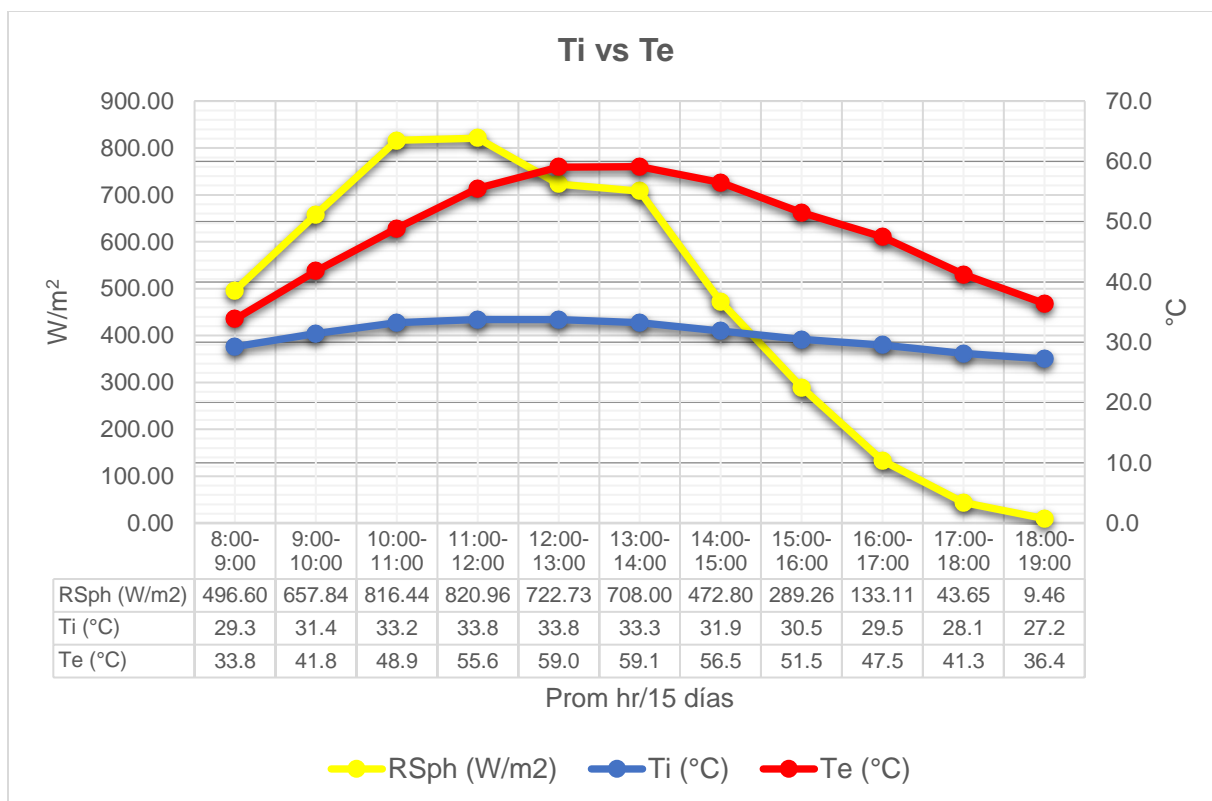
La figura 12 muestra que durante el día de menor radiación solar, la diferencia mínima entre la temperatura del aire ambiente y del aire de escape fue de 0.6 grados Celsius entre las 8:00 y 9:00 horas. Mientras que la mayor diferencia fue de las 14:00 a las 15:00 horas, con 14 grados Celsius. La diferencia de la temperatura del aire ambiente y del aire de escape entre las 18:00 y las 19:00 horas fue de 8.2 grados Celsius. Esto pudiera deberse a la transferencia de calor de las piedras hacia el aire interno circulante.



Ti= Temperatura de ingreso (aire ambiente).  
 Te= Temperatura de escape (aire caliente).  
 RSph= Radiación solar en plano horizontal ( $\approx 0^\circ$ ).

**Figura 13.** Promedios horarios de temperaturas de ingreso y escape de aire, en el día con mayor radiación solar.

La figura 13 muestra que durante el día de mayor radiación solar, la diferencia mínima entre la temperatura del aire ambiente y del aire de escape entre las 8:00 y 9:00 horas, fue de 4.1 grados Celsius; mientras que la mayor diferencia fue entre las 14:00 y 15:00 horas, con 36.5 grados Celsius. La diferencia de la temperatura del aire ambiente y del aire de escape entre las 18:00 y 19:00 horas fue de 14.6 grados Celsius. Esto pudiera deberse a la transferencia de calor cedido por las piedras al aire interno del colector, pues la radiación solar en ese periodo de tiempo presenta valores cercanos a cero.

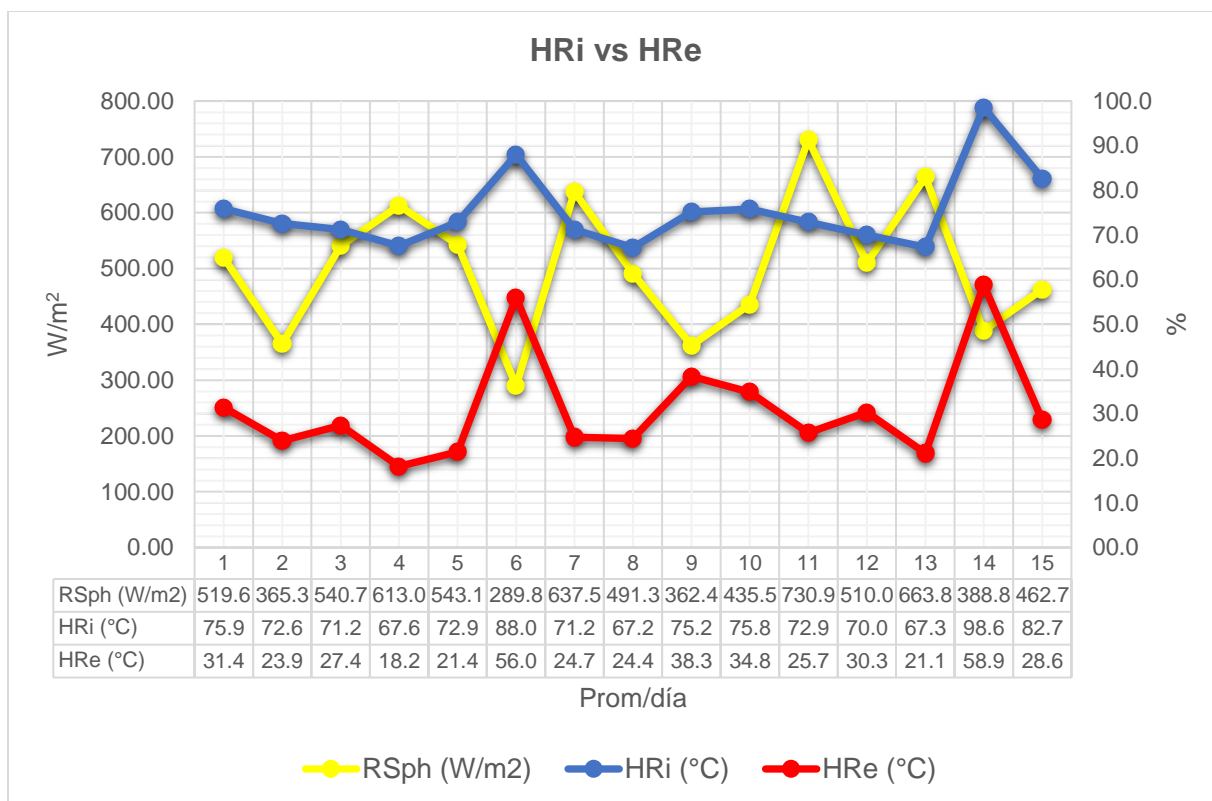


Ti= Temperatura de ingreso (aire ambiente).  
 Te= Temperatura de escape (aire caliente).  
 RSph= Radiación solar en plano horizontal ( $\approx 0^\circ$ ).

**Figura 14.** Promedios horarios de temperatura de ingreso y escape del aire, durante todo el ensayado.

En la figura 14 se observa que la temperatura ambiente promedio se mantiene casi constante a lo largo de los 15 días.

La menor diferencia de la temperatura del aire ambiente y del aire de escape en la evolución horaria de los 15 días fue entre las 8:00 y 9:00 horas, con 4.5 grados Celsius, mientras que la mayor diferencia fue entre las 13:00 y 14:00 horas, con 25.8 grados Celsius. Por otro lado, entre las 18:00 y 19:00 horas fue de 9.2 grados Celsius, aun cuando la radiación solar es casi nula.

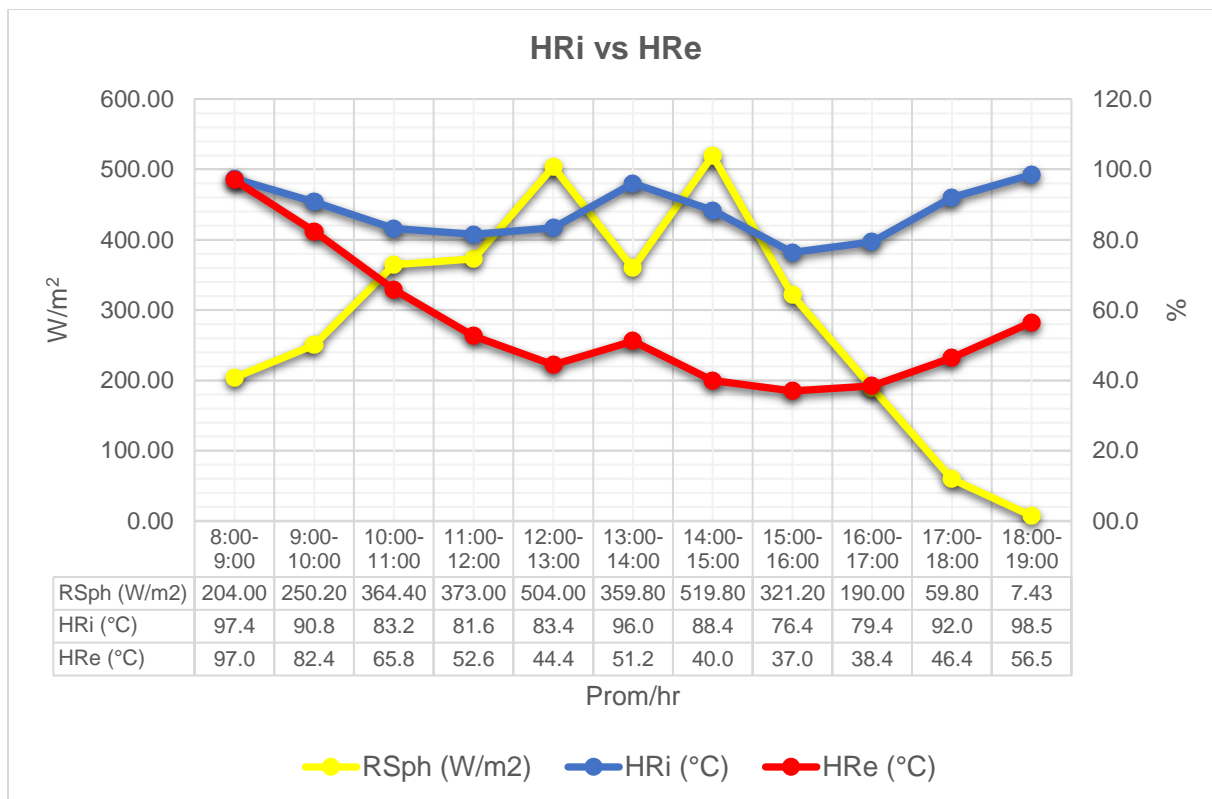


HRI= Humedad relativa de ingreso (aire ambiente).  
 HRe= Humedad relativa de escape (aire caliente).  
 RSph= Radiación solar en plano horizontal ( $\approx 0^\circ$ ).

**Figura 15.** Promedios diarios de humedad relativa de ingreso y escape de aire, a lo largo del ensayado.

En la gráfica de la figura 15, se observa que la curva de la humedad relativa promedio del aire de escape fue desigual a lo largo del ensayado, por la variabilidad en la radiación solar en el plano horizontal, pero se demuestra que a mayor radiación solar, menor es la humedad relativa del aire de entrada, por ende, la temperatura del aire de escape. Los bajos promedios diarios de humedad relativa del aire de escape demuestran la acción del calor transferido al aire.

La menor diferencia entre humedad relativa del aire ambiente y del aire de escape durante los 15 días ocurrió el día 6, con un valor de 32 por ciento; mientras que la mayor diferencia fue el día 15, con 54.1 por ciento.



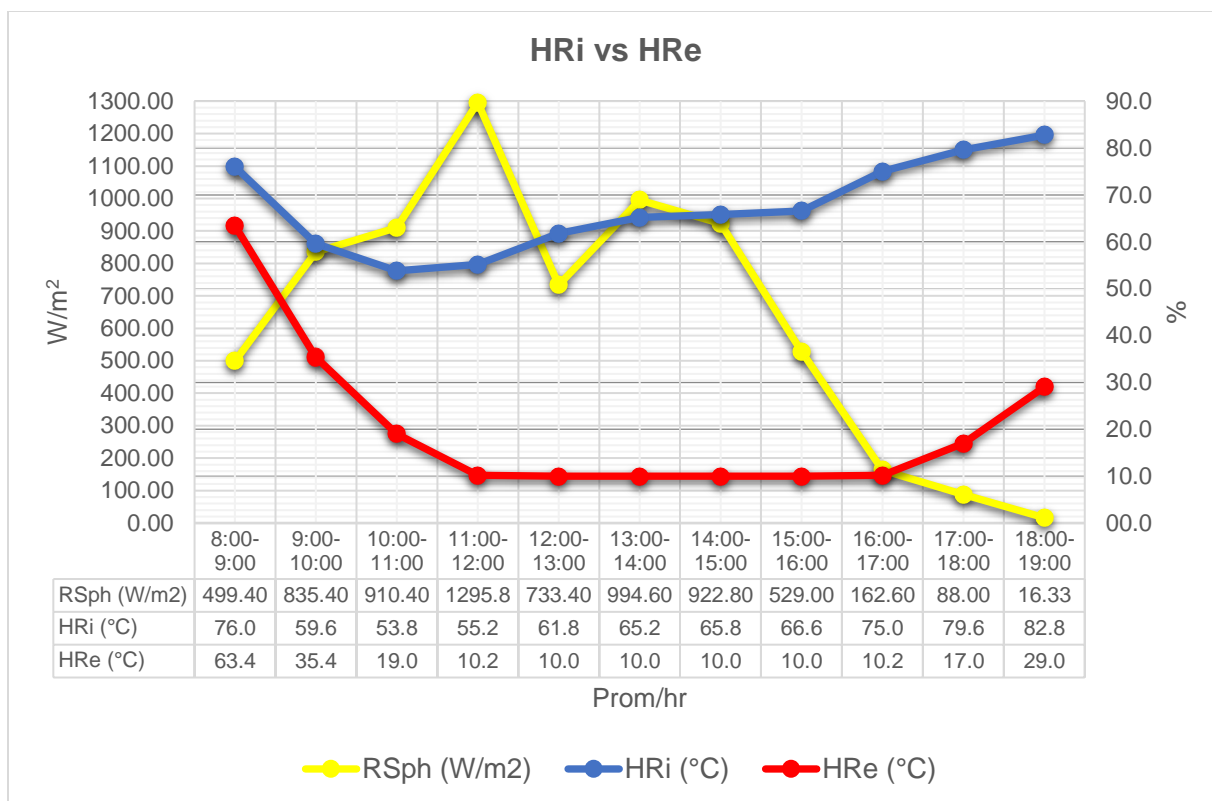
HRI= Humedad relativa de ingreso (aire ambiente).

HRe= Humedad relativa de escape (aire caliente).

RSph= Radiación solar en plano horizontal ( $\approx 0^\circ$ ).

**Figura 16.** Promedios horarios de humedad relativa de ingreso y escape de aire, en el día con menor radiación solar.

La figura 16 muestra que en el día con menor radiación solar, la diferencia mínima entre la humedad relativa del aire ambiente y del aire de escape, ocurrió entre las 8:00 y 9:00 horas, con un valor de 0.4 por ciento; mientras que la mayor diferencia fue entre las 14:00 y 15:00 horas, con 48.4 por ciento. La diferencia de la humedad relativa del aire ambiente y del aire de escape entre las 18:00 y 19:00 horas fue de 42 por ciento. Esto nos reafirma la acción del calor almacenado en las piedras sobre la humedad relativa.

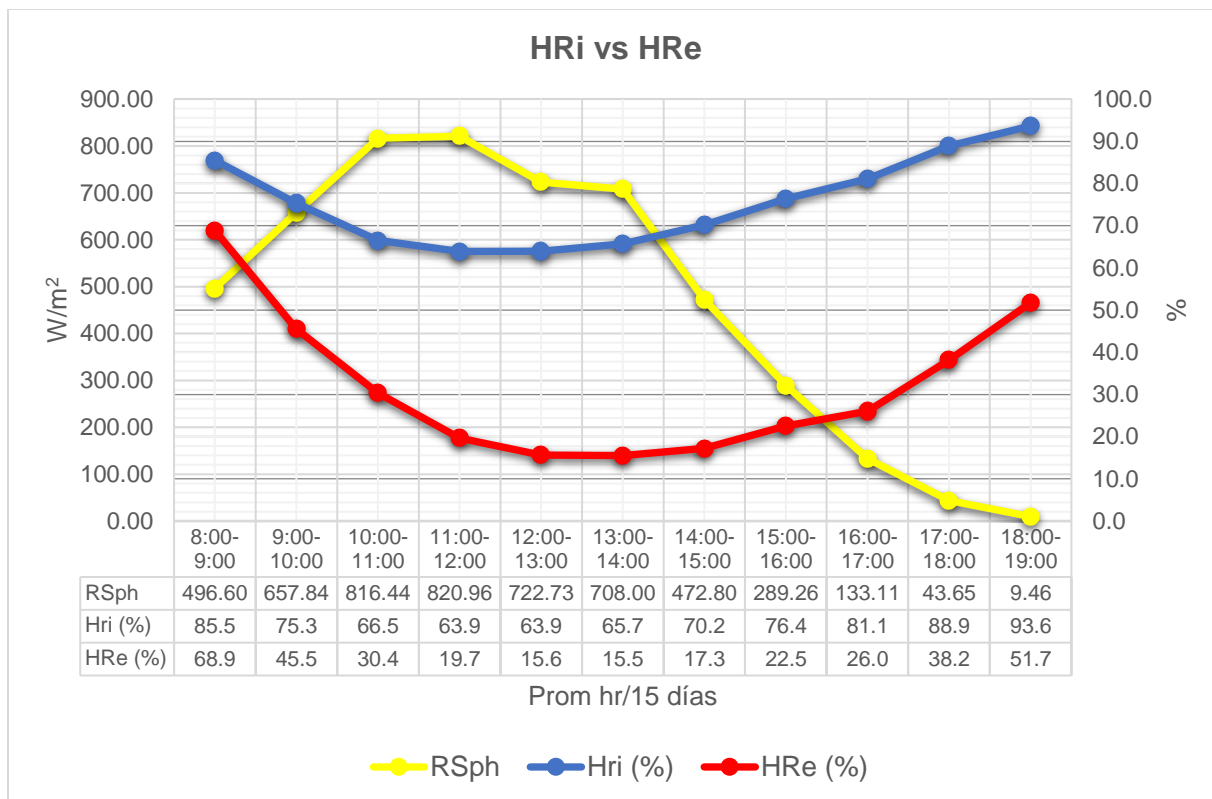


HRI= Humedad relativa de ingreso (aire ambiente).  
 HRe= Humedad relativa de escape (aire caliente).  
 RSph= Radiación solar en plano horizontal ( $\approx 0^\circ$ ).

**Figura 17.** Promedios horarios de humedad relativa de ingreso y escape de aire, en el día con mayor radiación solar.

La figura 17 muestra que durante el día de mayor radiación solar, la diferencia mínima entre la humedad relativa del aire ambiente y del aire de escape fue de 12.6 por ciento, entre las 8:00 y 9:00 horas; mientras que la mayor diferencia fue entre las 16:00 y 17:00 horas, con 64.8 por ciento. La diferencia de la humedad relativa del aire ambiente y del aire de escape entre las 18:00 y 19:00 horas fue 53.8 por ciento.

Entre las 12:00 y 17:00 horas se observa la humedad relativa promedio de 10 por ciento. Sin embargo, este valor pudo ser menor, debido a las limitaciones de amplitud de lectura reportadas por el fabricante del micro termo-higrómetro.



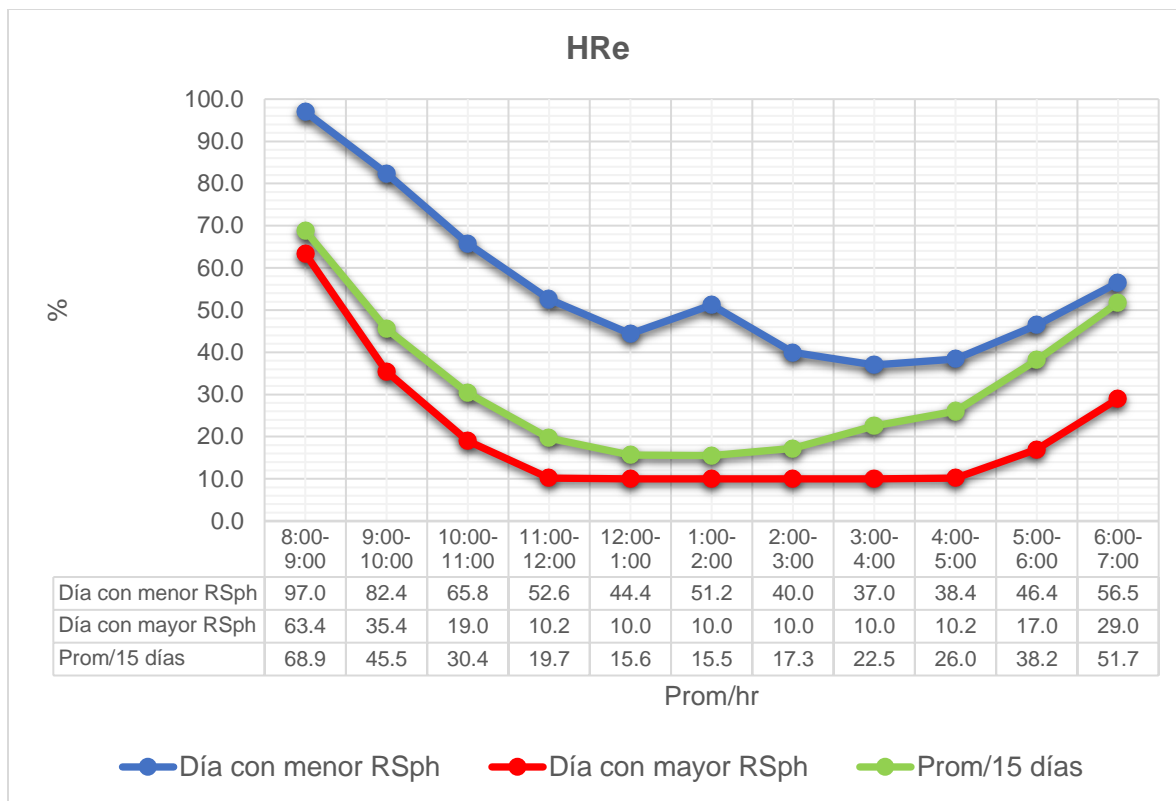
HRI= Humedad relativa de ingreso (aire ambiente).

HRe= Humedad relativa de escape (aire caliente).

RSph= Radiación solar en plano horizontal ( $\alpha 0^\circ$ ).

**Figura 18.** Promedios horarios de humedad relativa de ingreso y escape durante el ensayo.

En la figura 18 muestra que la menor diferencia de la humedad relativa del aire ambiente y del aire de escape en la evolución horaria de los 15 días fue entre las 8:00 y 9:00 horas, con 16.6 por ciento, mientras que la mayor diferencia fue entre las 16:00 y 17:00 horas, con 55.1 por ciento. Por otro lado, entre las 18:00 y 19:00 horas fue de 41.9 por ciento.



HRe= Humedad relativa de escape (aire caliente).

**Figura 19.** Promedios horarios de humedad relativa de escape en los días con menor y mayor radiación solar, y durante el ensayado.

Al compararse el día de menor y mayor radiación solar en el plano horizontal con el promedio a lo largo de los 15 días; se observa que la curva de humedad relativa a lo largo del ensayado presenta semejanza con la curva del día con mayor radiación solar en el plano horizontal, hasta aproximadamente las 15:00 horas, y desde las 15:00 hasta las 19:00 horas se asemeja a la curva del día con la menor radiación solar en el plano horizontal. Esto pudiera deberse a que los eventos de precipitación se dieron casi a diario y cercanos a éste horario.

#### 4.4 Análisis estadístico.

El cuadro XII resume los resultados del análisis de correlación lineal entre las variables de interés, generados por medio del SAS en forma de matriz.

**CUADRO XII. CORRELACIONES LINEALES DE PEARSON ENTRE LAS VARIABLES ESTUDIADAS.**

<b>Variables</b>	<b>Coefficiente de Correlación (r)</b>	<b>Significancia</b>
<b>Te – RSpi</b>	0.6867	0.0047**
<b>Te – RSph</b>	0.6831	0.0050**
<b>HRe – RSph</b>	-0.6849	0.0048**
<b>HRI - RSph</b>	-0.5870	0.0214*

Te= Temperatura de escape (aire caliente).  
 HRI= Humedad relativa de ingreso (aire ambiente).  
 HRe= Humedad relativa de escape (aire caliente).  
 RSph= Radiación solar en plano horizontal ( $\approx 0^\circ$ ).  
 RSpi= Radiación solar en plano inclinado ( $\approx 15^\circ$ ).

Como se observa en el Cuadro XII, todas las correlaciones resultaron significativas o altamente significativas. La temperatura de escape correlacionó positivamente tanto con la radiación solar en el plano inclinado como con la radiación solar en el plano horizontal. Estas correlaciones fueron intensas en magnitud y de naturaleza altamente significativas ( $p \leq 0.01$ ).

La humedad relativa de escape correlacionó negativamente con la radiación en el plano horizontal, siendo esta correlación altamente significativa ( $p \leq 0.01$ ) y muy fuerte en magnitud.

Por su parte, la humedad relativa de ingreso correlacionó negativamente con la radiación solar en el plano horizontal, pero esta correlación fue apenas significativa ( $p \leq 0.05$ ).

En términos generales, esto indica que a mayor radiación solar en plano inclinado y a mayor radiación solar en el plano horizontal, mayor es la temperatura de escape. A mayor radiación solar en el plano horizontal menor es la humedad relativa de ingreso y de escape (ver figura 6).

El Cuadro XIII muestra las ecuaciones de regresión lineal simple obtenidas por medio del SAS.

**CUADRO XIII. ECUACIONES DE REGRESIÓN LINEAL SIMPLE OBTENIDAS POR EL SAS CON SUS CORRESPONDIENTES COEFICIENTES DE DETERMINACIÓN.**

<b>Ecuación de Regresión</b>	<b>Coefficiente de determinación (<math>r^2</math>)</b>	<b>Evaluación del ajuste del modelo</b>
<b>Te=31.3073 + 0.0347 (RSph)</b>	0.4666	Aceptable
<b>Te=32.3468 + 0.1546 (RSpi) + 0.1324 (RSph)</b>	0.4800	Aceptable
<b>HRe= 64.3 – 0.0661 (RSph)</b>	0.4692	Aceptable
<b>HRI= 95.7361 – 0.0406 (RSph)</b>	0.3447	Regular

En términos generales, los modelos de regresión lineal sometidos a prueba revelaron un ajuste aceptable a juzgar por los valores R cuadrado que en su mayoría, estuvieron cerca de 0.50. Los signos de los coeficientes de regresión coincidieron con los signos de los coeficientes de correlación tal como era de esperarse.

La interpretación de los modelos fue la siguiente:

1. Por el aumento de un vatio por metro cuadrado de radiación en el plano horizontal, la temperatura de escape en el prototipo de colector solar se incrementa en 0.03 grados Celsius, aproximadamente.
2. Por el incremento de un vatio por metro cuadrado de radiación en el plano horizontal, la humedad relativa del aire de escape se reduce en 0.06 por ciento, aproximadamente.
3. Al incrementarse un vatio por metro cuadrado de radiación en el plano horizontal, la humedad relativa del aire de ingreso se reduce en 0.04 por ciento aproximadamente.

**CUADRO XIV. RESPUESTA DEL MODELO DE REGRESIÓN LINEAL SIMPLE AL AUMENTO DE UN VATIO POR METRO CUADRADO DE RADIACIÓN SOLAR.**

Radiación Solar	W/m <sup>2</sup>	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	
		Escape	Ingreso	Escape
En plano horizontal	1	+ 0.03	- 0.04	- 0.06

+ = Aumenta.

- = Disminuye.

4. El modelo múltiple que consideró la temperatura de escape como una función de ambos tipos de radiación indicó que:

- a) Por cada vatio por metro cuadrado de radiación solar en el plano inclinado, la temperatura de escape aumenta aproximadamente en 0.15 grados Celsius, manteniéndose constante la radiación solar en un plano horizontal.
- b) Por cada vatio por metro cuadrado de radiación en el plano horizontal la temperatura de escape aumenta en 0.13 grados Celsius aproximadamente, manteniéndose constante la radiación solar incidente.

**CUADRO XV. RESPUESTA DEL MODELO MÚLTIPLE AL AUMENTO DE UN VATIO POR METRO CUADRADO DE RADIACIÓN SOLAR.**

<b>Radiación Solar</b>	<b>W/m<sup>2</sup></b>	<b>Temperatura de escape (°C)</b>
En plano horizontal	1	+ 0.13
En plano inclinado	1	+ 0.15

+ = Aumenta.

El Cuadro XVI muestra las ecuaciones de regresión lineal simple obtenidas por medio del SAS.

**CUADRO XVI. ECUACIONES DE REGRESIÓN LINEAL SIMPLE QUE MOSTRARON LOS MEJORES AJUSTES (MAYORES R CUADRADO).**

Hora	Ecuación de regresión	r <sup>2</sup>
8:00 – 9:00	$\Delta HRe = 2.2911 - 4.1523 \Delta Te$	0.9299 <sup>1</sup>
9:00 – 10:00	$\Delta HRe = -6.3249 - 2.2645 \Delta Te$	0.8549 <sup>3</sup>
10:00 – 11:00	$\Delta HRe = -14.2184 - 1.3996 \Delta Te$	0.8097 <sup>4</sup>
11:00 – 12:00	$\Delta HRe = -19.1729 - 1.1505 \Delta Te$	0.6145 <sup>9</sup>
16:00 – 17:00	$\Delta HRe = -28.7716 - 1.4625 \Delta Te$	0.5630 <sup>11</sup>
17:00 – 18:00	$\Delta HRe = -25.2828 - 1.9337 \Delta Te$	0.7701 <sup>5</sup>
18:00 – 19:00	$\Delta HRe = 16.8031 - 2.7341 \Delta Te$	0.9058 <sup>2</sup>
8:00 – 9:00	$\Delta HRe = 7.7307 - 0.0491 (RSph)$	0.7210 <sup>7</sup>
8:00 – 9:00	$\Delta Te = -1.2467 + 0.0117 (RSph)$	0.7587 <sup>6</sup>
9:00 – 10:00	$\Delta Te = 0.8625 + 0.0144 (RSph)$	0.6375 <sup>8</sup>
13:00 – 14:00	$\Delta Te = 11.1291 + 0.0208 (RSph)$	0.5768 <sup>10</sup>

Los valores de r<sup>2</sup> están enumerados en orden descendente.

El Cuadro XI muestra los modelos de regresión lineal simple que resultaron en los mejores ajustes y, por lo tanto, los que ofrecen mayor confiabilidad en

términos de medir el impacto que la variable independiente ejerce sobre la variable dependiente.

Se observa que, en la relación entre gradiente de humedad relativa de escape y gradiente de temperatura de escape, las ecuaciones con mejor ajuste se obtuvieron entre las 8:00 y las 11:00 horas y luego entre las 17:00 y 19:00 horas. En todos los casos, la relación entre las variables fue inversa, evidenciada por el signo negativo (-) de los coeficientes de regresión correspondientes. Esto es señal de que al aumentar la gradiente de temperatura de escape, la gradiente de humedad relativa de escape disminuye. La mejor ecuación (obtenida entre las 8:00 y 9:00) nos indica que por cada cambio unitario en el valor gradiente de temperatura de escape (grados Celsius), el valor de gradiente de humedad relativa de escape disminuye en 4.15 por ciento aproximadamente (ver figura 10).

**CUADRO XVII. RESPUESTA AL AUMENTO DE GRADIENTE DE TEMPERATURA DE ESCAPE.**

<b>Gradiente de temperatura de escape (°C)</b>	<b>Gradiente de Humedad Relativa de escape (%)</b>
+ 1	- 4.15

+ = Aumenta.  
- = Disminuye.

Por otro lado, en cuanto a la relación entre gradiente de humedad relativa de escape y la radiación solar en plano horizontal, se encontró en esta investigación que la ecuación que dio mejor ajuste ( $R^2=0.7210$ ) correspondió al período o lectura realizada entre las 8:00 y 9:00. El coeficiente de regresión fue negativo (-) evidenciando una relación de tipo inverso, es decir que, a mayor radiación solar en el plano horizontal menor es la gradiente de humedad relativa de escape. Para ser más exactos, la ecuación nos indica que por cada vatio por metro cuadrado de aumento en la radiación solar en el plano horizontal, la gradiente de humedad relativa de escape disminuye en 0.04 por ciento aproximadamente (ver figura 18).

Por último, en lo referente a la relación entre la radiación solar en el plano horizontal y gradiente de temperatura de escape, la investigación reveló que la ecuación con mayor ajuste se obtuvo en el período entre las 8:00 y 9:00 horas. La siguiente (en orden descendente de  $R^2$ ) se obtuvo entre las 9:00 y 10:00 horas y la de menor ajuste o  $R^2$  se obtuvo entre las 13:00 y 14:00 horas. Estos resultados sugieren que la influencia de la radiación solar en plano horizontal sobre la gradiente de temperatura de escape tiende a disminuir conforme avanza el día. Estos resultados se obtuvieron de esta forma ya que el levantamiento de los datos fue tomado en condiciones climáticas desfavorables, en la mayoría de los días, hubo lluvias esporádicas a lo largo del día.

En todos los casos el coeficiente de regresión fue positivo (+) indicando una relación directa, es decir, al aumentar la radiación solar en el plano horizontal, el incremento en gradiente de temperatura de escape se hace mayor. En el caso

particular de la ecuación con mejor ajuste o R cuadrado (entre 8:00 y 9:00 horas), está nos indica que cada vez que la radiación solar en el plano horizontal aumenta un vatio por metro cuadrado, la gradiente de temperatura de escape aumenta en 0.01 grados Celsius aproximadamente (ver figura 14).

**CUADRO XVIII. RESPUESTA AL AUMENTO DE LA RADIACIÓN SOLAR EN EL PLANO HORIZONTAL.**

<b>Radiación solar en plano horizontal (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Gradiente Temperatura de escape (°C)</b>	<b>Gradiente Humedad Relativa de escape (%)</b>
+ 1	+ 0.01	- 0.04

+ = Aumenta.

- = Disminuye.

## 5. DISCUSIÓN

Para iniciar la discusión es bueno diferenciar los términos deshidratado y secado, pues justamente el prototipo solar ensayado busca producir aire precalentado principalmente para éstos procesos agroindustriales. Normalmente el secado de productos agrícolas, como los granos y semillas, son sometidos a una cierta temperatura y caudal de aire para retirarle la denominada *agua levemente adsorbida*, que es aquella que está débilmente retenida por el grano; el proceso de secado se detiene cuando el grano alcanza en torno al 12 por ciento de humedad base húmeda (b.h.) y esta cifra variará ligeramente dependiendo del tipo de grano y su contenido de aceite.

El deshidratado se aplica normalmente a frutas, vegetales, especias, carnes rojas y pescado; normalmente suelen consumirse en ese estado o ligeramente rehidratados. En este caso, la humedad del producto deshidratado suele mantenerse a niveles inferiores al 15 por ciento (b.h.), con excepción de aquellos rubros con alto contenido de azúcares, los cuales soportan mayores niveles de humedad final. Sin embargo, el producto podrá perder su estructura original debido a la retirada del *agua fuertemente adsorbida*.

Tanto en el secado, como en la deshidratación se busca reducir la velocidad de respiración del producto para aumentar el periodo de vida postcosecha, mientras se conserva un elevado porcentaje de las características organolépticas del producto pre-procesado.

Específicamente para el caso del método de secado a bajas temperaturas, que es un método artificial en el que se utiliza aire natural o aire pre-calentado entre uno y cinco grados Celsius, sobre la temperatura ambiente (Marcal de Queiroz, D. & Marques Pereira, J.A., 1985); el prototipo de colector ensayado responde adecuadamente aún en el día de menor radiación solar; ya a las 8:00 horas de un día lluvioso consigue elevar la temperatura en 0.6 grados Celsius y una reducción de la humedad relativa de 0.4 por ciento, bajo una radiación solar de apenas 204 vatios por metro cuadrado. En la oscuridad casi total entre las 18:00 y 19:00 horas, la ganancia de temperatura sobre el aire ambiente es de 8.2 grados Celsius, mientras que la reducción de la humedad relativa sorprende con una diferencia de 42 por ciento y apenas 7.43 vatios por metro cuadrado de radiación solar, demostrando que aún resta calor almacenado en las piedras del colector solar y es transferible al aire por convección natural (ver figura 12 y 16). El proceso de secado a baja temperatura requiere al menos de una temperatura del aire de proceso de 40 grados Celsius y será más eficiente cuando la humedad relativa sea inferior a los al 60 por ciento. Ya el proceso de deshidratado de frutas y hortalizas también obedece a parámetros máximos de temperatura y humedad relativa del aire, además está limitado por la humedad inicial del producto, el cual varía considerablemente entre rubros. La temperatura de deshidratado oscila entre los 45 y 70 grados Celsius y desde que el aire de proceso se mantenga en este intervalo, ocurrirá la deshidratación (Gastronomía Solar. S.f.).

La temperatura más elevada del día de menor radiación solar fue de 43 grados Celsius entre las 14:00 y 15:00 horas, la cual se ubica en el límite mínimo para realizar el proceso de deshidratación. Sin embargo, el promedio de temperatura alcanzada a lo largo del tiempo de ensayado, demuestra que a partir de las 10:00 horas se puede dar inicio al proceso de deshidratación pues la temperatura se mantendrá dentro del rango de deshidratado hasta las 17:00 horas y, al reducirse la temperatura y aumentar la humedad relativa, no ocurrirá el re-humedecimiento del producto debido al particular comportamiento del fenómeno de histéresis en los procesos de secado y deshidratación de productos agropecuarios (ver figura 10).

Por otro lado, el menor caudal de aire registrado fue de 1.500 metros cúbicos por minuto entre las 17:00 y 18:00 horas y, el máximo ocurrió entre las 13:00 y 14:00 horas con 3.224 metros cúbicos por minuto (ver CUADRO VIII). Es bueno observar que caudales de aire natural pre-calentado, a partir de un metro cúbico por minuto, por metro cuadrado de área de secado, son utilizados regularmente para el secado de granos a bajas temperaturas (Marcal de Queiroz, D. & Marques Pereira, J.A. 1985). Nótese además que debido a la baja presión estática, típica en los procesos de deshidratación, los caudales registrados son suficientes para este proceso y en todo caso el movimiento del aire ocurre únicamente por convección natural.

## 6. CONCLUSIONES

Se diseñó y desarrollo un método sencillo para construir un colector solar plano con captador-almacenador de piedra canto rodado, dando como resultado una estructura robusta, de operación fiable y funcional; se utilizó herramientas convencionales y materiales accesibles en las ferreterías locales. El costo aproximado del colector, exceptuando el costo de la mano de obra, fue de B/. 227.48 y su mantenimiento pudiera limitarse a la limpieza de la superficie captadora.

La instrumentación utilizada permitió registrar la radiación solar, la temperatura y la humedad relativa del aire de ingreso al colector. Paralelamente, se pudo registrar la velocidad del aire, la temperatura, la humedad relativa y el caudal del aire de escape del colector. Un instrumento presentó limitaciones para registrar parámetros de humedad relativa inferiores al diez por ciento, debido a la amplitud establecida por el fabricante. Sin embargo, esto no afectó los resultados encontrados pues este nivel de humedad relativa es suficiente para los procesos de secado y deshidratación. Por otro lado, el registro de la velocidad del caudal de aire de escape fue afectado ocasionalmente por el viento del sur que ingresó al colector.

Se logró realizar 14 gráficas que determinan con precisión el comportamiento térmico del prototipo construido, bajo diferentes intensidades de radiación solar. En promedio, el día con menor radiación solar alcanzó 289.84 vatios por metro

cuadrado en el plano horizontal, el aire de escape llegó 37.4 grados Celsius de temperatura y 56.0 por ciento de humedad relativa; mientras que el día con mayor radiación solar alcanzó 663.84 vatios por metro cuadrado, 56.2 grados Celsius y 21.1 por ciento respectivamente. En promedio a lo largo del ensayado, el prototipo de colector solar alcanzó la radiación solar en plano horizontal de 503.70 vatios por metro cuadrado, y el aire de escape llegó 48.8 grados Celsius y la humedad relativa fue de 31.0 por ciento. Por otro lado, los intervalos horarios de mayor rendimiento en base a los registros más elevados de radiación solar, se observaron entre las 10:00 y las 14:00 horas.

Se logró desarrollar, mediante regresión lineal simple, tres modelos matemáticos predictivos que relacionan la humedad relativa de ingreso en función de la radiación solar en el plano horizontal, obteniendo ésta un ajuste regular; la humedad relativa de escape en función de la radiación solar en el plano horizontal y la temperatura de escape en función de la radiación solar en el plano horizontal, obteniendo estos modelos un ajuste aceptable; y un modelo múltiple en donde se relaciona la temperatura de escape en función de la radiación solar en el plano horizontal y en función de la radiación solar en el plano inclinado, consiguiendo este modelo un ajuste aceptable. Por otro lado, mediante regresión lineal simple, se desarrollaron 11 ecuaciones matemáticas, definidas por los horarios que presentaron los mejores ajustes: se generaron siete ecuaciones del modelo gradiente de humedad relativa de escape en función del gradiente de temperatura de escape; una ecuación del modelo que relaciona el gradiente de humedad relativa de escape, en función de la radiación

solar en el plano horizontal; y tres ecuaciones del modelo que relaciona el gradiente de temperatura de escape en función de la radiación en el plano horizontal. En todos los casos el horario de mejor ajuste estadístico fue entre las 8:00 y 9:00 horas.

Es bueno destacar que los parámetros se registraron en el mes de septiembre, época lluviosa y de elevada nubosidad, lo que pudo incidir en la variabilidad de los parámetros; en dos ocasiones hubo que suspender el registro de datos debido a peligrosas tormentas eléctricas

De forma general se puede inferir que el prototipo desarrollado superó las expectativas de los autores, es un modelo que puede ser fácilmente replicado, apto para generar aire pre-calentado en el procesado de productos agroindustriales, y su comportamiento térmico podrá ser simulado y extrapolado a otros puntos geográficos desde que se conozca la radiación solar y otras variables climáticas.

## 7. RECOMENDACIONES

Es ideal continuar las investigaciones durante el período de mayor radiación solar para conocer el rendimiento del prototipo en condiciones favorables. Además, se recomienda realizar ensayos adicionando una corriente de aire constante para obtener un determinado caudal de aire con características definidas de temperatura, humedad relativa y presión de escape. Por otro lado, y debido a que aún a las 19:00 horas el captador mantiene calor, es recomendable ampliar el periodo de registro de datos, por lo menos hasta el momento en que la temperatura de escape sea igual a la temperatura de ingreso del aire.

Uno de los principales obstáculos para la manipulación del prototipo desarrollado lo fue su elevado peso; por lo tanto, se recomienda revisar el actual diseño.

Los micro-termohigrómetros pudieran substituirse por otros que presenten mayor amplitud de medición.

Considerando que esta investigación utilizó regresión lineal simple para el desarrollo de los modelos predictivos, de forma a entender la naturaleza de las relaciones físicas entre las variables del sistema y que los hallazgos encontrados son de importancia considerable; se recomienda que en estudios futuros utilicen

modelos logarítmicos, polinómicos o incluso exponenciales a fin de determinar si estos ajustan mejor los datos experimentales.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Agencia Andaluza de la Energía. 2011.** Energía solar térmica a baja temperatura (en línea). Sevilla, ES. Consultado 3 nov. 2015. Disponible en [https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/energia\\_solar\\_termica\\_a\\_baja\\_temperatura\\_generalidades.pdf](https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/energia_solar_termica_a_baja_temperatura_generalidades.pdf)

**Almanza G., Gustavo C. y Cabarcas T., Jhon J. 2013.** Diseño de un sistema de secado industrial basado en la concentración de energía solar usando un colector tipo cilindro-parabólico acoplado a un intercambiador de calor de tubo/coraza. Tesis Ing. Químico. Cartagena de Indias, CO. Universidad de Cartagena. 89 p.

**ANAM (Autoridad Nacional del Ambiente). 2010.** Atlas Ambiental de la República de Panamá. Panamá. Editora Novo Art. Primera edición. 190 p.

**Calderón C., Edgar. 2015.** Diseño de hormigón con cantos rodados provenientes del río Chanchan a través de los métodos ACI y O'REILLY. Tesis M.Sc. Tec. de la Edif. Guayaquil, EC. Universidad de Guayaquil. 153 p.

**Castillo C., José R. 2013.** Alternativas energéticas: Colectores solares (apuntes de clase). Chiriquí, PA. Universidad de Panamá, FCA. (E-mail: [energia.pa@gmail.com](mailto:energia.pa@gmail.com))

**Cengel, Yunus y Ghajar, Afshin. 2004.** Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones. Ed. McGraw Hill. 4 ed. Ciudad de México, MX. 922 p.

- Cuevas G., Felipe. 2008.** Balance térmico de colectores solares planos (en línea). Santiago, CL. Consultado 24 de nov. 2016. Disponible en [https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2008/2/ME716/1/material\\_docente/objeto/201904](https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2008/2/ME716/1/material_docente/objeto/201904)
- Dalpasquale, Valdecir A., et al. 1991.** Secado de granos a altas temperaturas: Calentamiento de aire (en línea). FAO Para América Latina y El Caribe. Santiago, CL. Consultado 3 dic. 2015. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/x5059s/x5059S00.htm#Contents>
- Domínguez H., Arnulfo. 2013.** Diseño de un calentador solar de aire para aplicaciones de secado. Tesis Ing. Mecánico. Ciudad de México. MX. Universidad Nacional Autónoma de México. 60 p.
- Durán, Gonzalo J. y Condorí, Miguel A. 2012.** Modelo unidimensional estacionario de un colector solar de aire: Simulación por diferencias finitas (en línea). Salta, AR. Consultado 3 nov. 2015. Disponible en <http://www.cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/viewFile/4172/4098>
- Gastronomía Solar. S.f.** Proceso de deshidratado de frutas y verduras (en línea). Consultado 20 abr 2017. Disponible en <https://gastronomiasolar.com/deshidratado-de-frutas-verduras/>
- Giraldo S., Erika J. 2014.** Control de temperatura y humedad relativa para un deshidratador solar de frutas. Tesis Tec. en Mec. Colombia. Universidad Tecnológica de Pereira. 59 p.
- Google Earth, 2017.** Coordenadas geográficas del futuro Centro de Investigación para el Desarrollo Sostenible (CIDSo) de la Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de Panamá (en línea). Consultado: 3 mar. 2017. Disponible en: <http://earth.google.com>

- Guaglianone, Fernando. 2013.** Procesos Constructivos: Materiales de construcción (en línea). La Plata, AR. Consultado 1 nov. 2015. Disponible en [http://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-09-17\\_01-27-59110125.pdf](http://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-09-17_01-27-59110125.pdf)
- Guevara V., Sixto. 2003.** Estimación de la radiación solar (en línea). Lima, PE. Consultado 25 de nov. 2016. Disponible en <http://www.bvsde.ops-oms.org/tecapro/documentos/miscela/iestimacionradiacion.pdf>
- Ingemecánica. S.f.** Propiedades Mecánico-Químicas del Cobre (en línea). Consultado 4 de nov. 2015. Disponible en <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn112.html#seccion1>
- Lenntech. S.f.** Zinc–Zn: Propiedades químicas del Zinc (en línea). Rotterdamseweg, NL. Consultado 4 de nov. 2015. Disponible en <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/zn.htm>
- López V., Walter E. y Moyón A., Nelson F. 2011.** Desarrollo de un sistema scada para la medición de temperatura con sistemas embebidos para el laboratorio de mecatrónica de la facultad de mecánica. Tesis Ing. de mantenimiento. Ecuador. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. 109 p.
- Luna V., Noel y Reyes B., Sergio. 2008.** Cálculo y selección de un colector solar y de un módulo fotovoltaico para uso doméstico, conforme a la norma mexicana nmx-es-normex-2005-energia solar- rendimiento térmico y funcionalidad de colectores solares. Tesis Lic. Ciudad de México, México. MX. Instituto Politécnico Nacional. 113 p.
- Marcal de Queiroz, Daniel & Marques Pereira, José Antonio. 1985.** Secagem de Graos a Baixas Temperaturas. Vicosá M.G.

**Miliarium. 2001.** Propiedades térmicas de materiales (en línea). Madrid, ES.

Consultado 1 nov. 2015. Disponible en

<http://www.miliarium.com/Prontuario/Tablas/Quimica/PropiedadesTermicas.asp>

**Ministerio de Energía, CL. 2016.** Manual del usuario: Explorador Solar para Autoconsumo (en línea). Santiago, CL. Consultado 25 de nov. 2016.

Disponible en

[http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Solar3/doc/Manual\\_Explorador\\_Solar.pdf](http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Solar3/doc/Manual_Explorador_Solar.pdf)

**Moura B., Arnaldo. 1982.** Energía Solar: Aquecedores de agua. Editora Librería Itaipu, Paraná, BR, 129 p.

**Muñoz C., Jesús M. et al. 2009.** Física y Química: Calor y energía (en línea).

Consultado el 25 de nov. De 2016. Disponible en

[http://recursostic.educacion.es/secundaria/edad/4esofisicaquimica/impresos/curso\\_completo.pdf](http://recursostic.educacion.es/secundaria/edad/4esofisicaquimica/impresos/curso_completo.pdf)

**Nave R., Olmo M. (s.f).** Efecto Invernadero (en línea). Atlanta, US. Consultado 24 de nov. De 2016. Disponible en <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/thermo/grnhse.html>

**Olivares C., Antonio E. y Torres F., Guillermo A. 2010.** Caracterización de un Sistema de calentamiento de aire por medio de energía solar con almacenamiento energético. Tesis Ing. Mecánico. Antiguo Cuscatlán, SV. Universidad Centroamericana José Simeón Cañas. 126 p.

**Pineda C., Marvin E. 2015.** Diseño de una planta piloto para el estudio del aprovechamiento de la energía solar térmica. Tesis Ing. Mecánico. San Salvador, SV. Universidad de El Salvador. 128 p.

**Pittí, Norberto et al. 1993.** Desarrollo de secadores solares y leña para pequeños productores de maíz (entrevista). Chiriquí. FCA, Universidad de Panamá.

**Rey M., Francisco; Velasco G., Eloy. 2006.** Eficiencia energética en edificios: Certificación y auditorías energéticas. Madrid, ES. International Thomson Editores Spain. 313 p.

**Rodríguez P., Juan M. 2008.** Transferencia de calor, flujo de aire y similitud en un secador solar pasivo de tipo indirecto. Tesis M.Sc. Ing. Mecánica. Bogotá, CO. Universidad de los Andes. 53 p.

**Rodríguez V., Hernán M. 2012.** Diseño, construcción y caracterización de un colector solar plano de aire. Tesis. Ing. Físico. Santiago, CL. Universidad de Santiago de Chile. 99 p.

**Rossi, Sílvio J. y Roa, Gonzalo. 1980.** Secagem e Armazenamento de Produtos Agropecuários com uso de Energia Solar e Ar Natural. São Paulo, BR. Academia de Ciências do Estado. Publicación ACIESP n°22. 295 p.

**Rubio R., Juan M. 2005.** Guía de ahorro energético en gimnasios: La energía solar térmica: agua caliente sanitaria, calefacción y climatización (en línea). Madrid, ES. Consultado el 24 de nov. de 2016. Disponible en <http://www.madrid.org/bvirtual/BVCM005515.pdf>

**Serway, Raymond; Faughn, Jerry. 2001.** Física: Calor y energía interna. 5ª ed. MX. Pearson Educación. 936 p.

ANEXOS

**Anexo 1.** Presupuesto de los materiales para la construcción del colector solar.

Ítem	Material	Cantidad	Costo Unitario B/.	Costo Total B/.
1	Fascia galvanizada 2" x 6" x 6m	1	18.17	18.17
2	Cinta impermeabilizante autoadhesiva 0.20m x 5m	2	12.95	25.90
3	Tabla de pino 1" x 12" x 3,7m	1	8.25	8.25
4	Barniz poliuretano para madera de uso en exteriores	0,95 L	13.50	13.50
5	Pieza de vidrio transparente 1.21m x 0.97m x 3mm de espesor	1	35.00	35.00
6	Adhesivo de uretano para parabrisas de vidrio automotriz 3M	1	12.99	12.99
7	Pintura blanca anticorrosiva mate Lanco	0,95 L	11.95	11.95
8	Pintura negro anticorrosivo mate Lanco	2,85 L	11.95	35.85
10	Pieza de lámina de zinc liso de 1.22m x 0.99m	1	8.00	8.00
11	Thinner laca	4,75 L	19.95	19.95
14	Tornillos de acero inoxidable N°12 x 25.4mm	29	0.25	7.25
15	Remaches de 4,8 mm	16	0.06	0.96
16	Masking tape	1	2.99	2.99
17	Broca de cobalto de 3,2mm	1	5.95	5.95
18	Broca de cobalto de 4,8mm	1	4.95	4.95
19	Lija de agua para metal N° 80	1	0.55	0.55
20	Lija de madera N° 80	1	0.39	0.39
<b>Subtotal</b>			167.38	212.60
<b>Impuesto (7%)</b>				14.88
<b>TOTAL</b>				<b>B/. 227.48</b>

## CONFECCIÓN DEL MARCO DEL COLECTOR SOLAR



**Anexo 2.** Limpieza total de la fascia.



**Anexo 3.** Impacto con el centro punto en las intersecciones trazadas.



**Anexo 4.** Taladrado de intersecciones marcadas en área interna de la fascia.



**Anexo 5.** Estampador de esquinas construido.



**Anexo 6.** Impacto en el área interna de la fascia con el estampador de esquinas.



**Anexo 7.** Corte de las líneas trazadas en las pestañas de la fascia.



**Anexo 8.** Marcas realizadas en el área interna de la fascia.



**Anexo 9.** Doblado de la fascia en las marcas realizadas.



**Anexo 10.** Desbaste en las esquinas perforadas en la fascia.



**Anexo 11.** Pintado del área externa de la fascia.



**Anexo 12.** Perforaciones realizadas en las pestañas de cada doblez del marco.

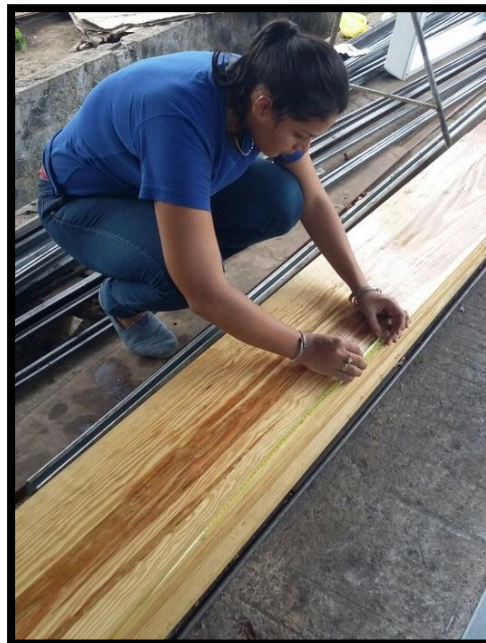


**Anexo 13.** Instalación de remaches en las pestañas de cada doblez del marco.

## INSTALACIÓN DEL AISLANTE TÉRMICO



**Anexo 14.** Cinta asfáltica adherida en la parte interna del marco.



**Anexo 15.** Trazado de las secciones medidas en la tabla.



**Anexo 16.** Aplicación de poliuretano en la tabla de madera.



**Anexo 17.** Corte de las secciones trazadas en la tabla.



**Anexo 18.** Aplicación de poliuretano en las hendiduras realizadas.



**Anexo 19.** Atornillado de las piezas de madera al marco.



**Anexo 20.** Súper aislamiento en el área interna del marco.



**Anexo 21.** Adhesión de cinta asfáltica en las aberturas entre las piezas madera.

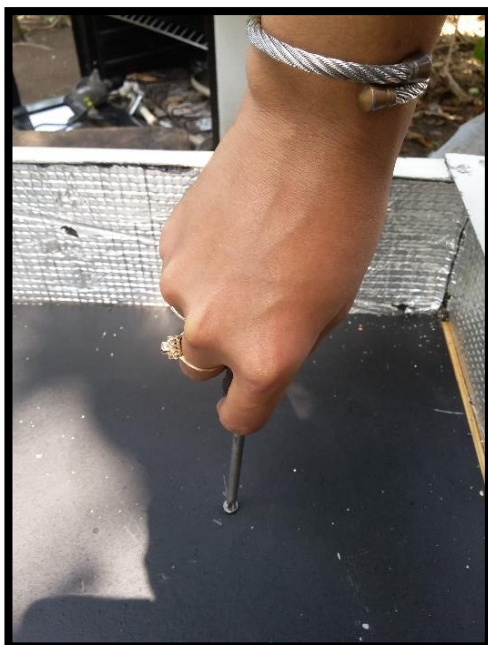
## INSTALACIÓN LÁMINA DE ZINC LISO



**Anexo 22.** Marcado de medidas en lámina de zinc liso.



**Anexo 23.** Corte de las medidas marcadas en la lámina de zinc liso.



**Anexo 24.** Atornillado de la lámina de zinc liso sobre la madera.

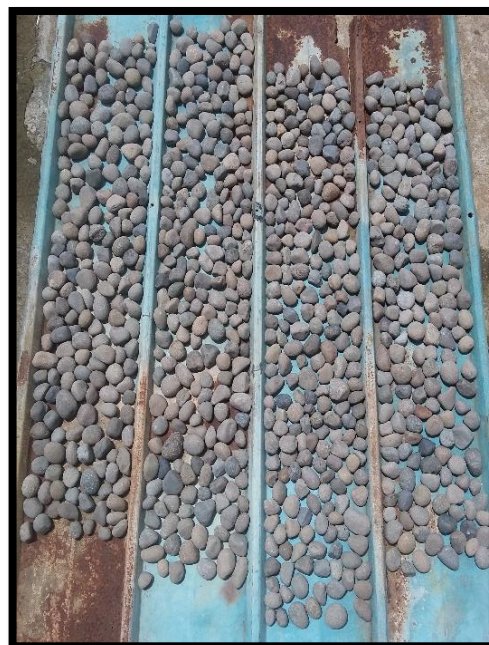


**Anexo 25.** Placa captadora fijada en la madera.

## SELECCIÓN Y PINTADO DE LAS PIEDRAS CANTO RODADO



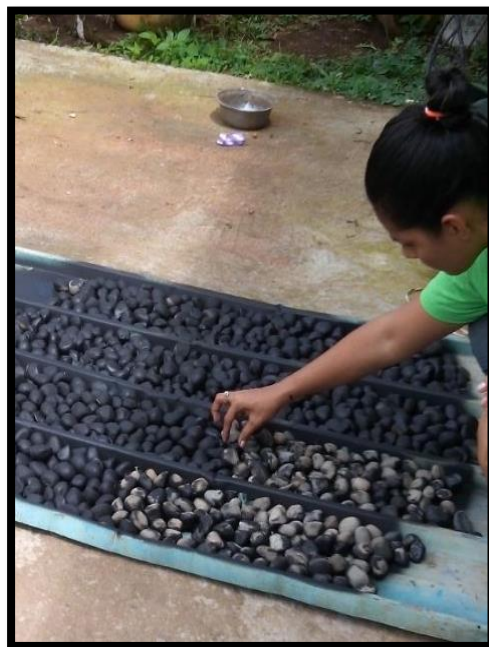
**Anexo 26.** Colectado de las piedras canto rodado.



**Anexo 27.** Piedras acomodadas en una lámina de zinc.



**Anexo 28.** Pintado de las piedras con epoxi negro mate.



**Anexo 29.** Giro de las piedras para pintar el área restante.

**APERTURA DE LA ENTRADA Y SALIDA DEL AIRE**

**Anexo 30.** Trazado de las medidas en el borde del marco.



**Anexo 31.** Taladrado en los vértices marcados.



**Anexo 32.** Corte de las líneas trazadas en el marco.



**Anexo 33.** Eliminación del material cortado.

## INSTALACIÓN DE LA CUBIERTA TRANSPARENTE



**Anexo 34.** Cordón de adhesivo de poliuretano sobre el marco.



**Anexo 35.** Instalación del vidrio sobre el marco del colector.



**Anexo 36.** Presión ejercida sobre el vidrio para mejorar la adherencia.

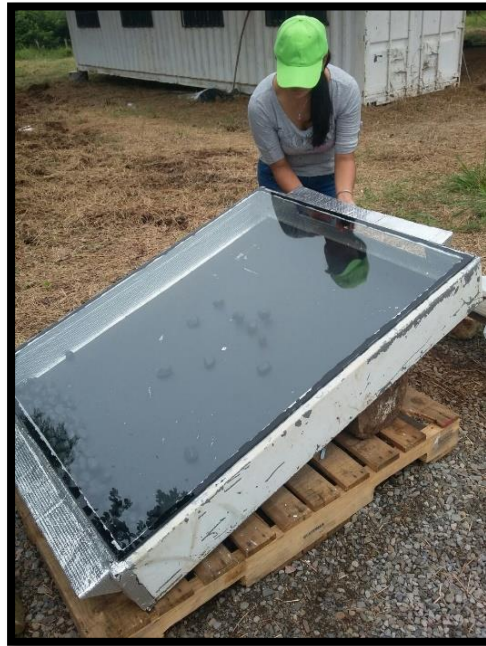


**Anexo 37.** Corte del sobrante del cordón de adhesivo de poliuretano.

## INSTALACIÓN DE LAS PIEDRAS CANTO RODADO



**Anexo 38.** Piedras pintadas de epoxi negro mate.



**Anexo 39.** Colocación manual de las piedras en el colector.



**Anexo 40.** Piedras introducidas en el colector.



**Anexo 41.** Camada de piedras acomodadas de manera uniforme.

**INSTRUMENTACIÓN UTILIZADA PARA EL REGISTRO DE PARÁMETROS****Anexo 42.** Micro termo-higrómetros.**Anexo 43.** Termo-anemómetro.**Anexo 44.** Actinógrafos portátiles.

**SUPERVISIÓN DEL LEVANTAMIENTO DE LOS DATOS**

**Anexo 45.** Alineamiento Norte-Sur y 15° Latitud Norte.



**Anexo 46.** Prototipo de colector solar instalado en el CIDSo.



**Anexo 47.** Micro termo-higrómetro instalado en la entrada del aire ambiente del colector solar.



**Anexo 48.** Micro termo-higrómetro y termo-anemómetro instalados en la salida del aire caliente del colector solar.

**Anexo 49.** Promedios diarios registrados a lo largo del ensayado.

DÍA	Ti (°C)	Te (°C)	$\Delta T$ (°C)	HRi (%)	HRe (%)	$\Delta HR$ (%)	RSph (W/m <sup>2</sup> )
1	30.9	50.0	19.1	75.9	31.4	-44.5	519.67
2	31.7	55.3	23.6	72.6	23.9	-48.7	365.37
3	31.9	49.2	17.3	71.2	27.4	-43.8	540.73
4	31.7	53.7	22.0	67.6	18.2	-49.4	613.00
5	32.1	52.9	20.8	72.9	21.4	-51.5	543.18
6	28.9	37.4	8.5	88.0	56.0	-32.0	289.84
7	31.7	51.3	19.6	71.2	24.7	-46.5	637.55
8	33.8	52.5	18.7	67.2	24.4	-42.8	491.34
9	30.9	42.6	11.7	75.2	38.3	-36.9	362.47
10	31.2	46.1	14.9	75.8	34.8	-41.0	435.57
11	31.9	54.0	22.1	72.9	25.7	-47.2	730.97
12	30.7	45.6	14.9	70.0	30.3	-39.7	510.05
13	32.4	56.2	23.8	67.3	21.1	-46.2	663.84
14	26.9	35.3	8.4	98.6	58.9	-39.7	388.84
15	30.5	50.0	19.5	82.7	28.6	-54.1	462.73

**Anexo 50.** Promedios horarios registrados el día con menor radiación solar en el plano horizontal.

Prom/Hr	Ti (°C)	Te (°C)	HRi (%)	HRe (%)	RSph (W/m <sup>2</sup> )
8:00-9:00	27.5	28.1	97.4	97.0	204.00
9:00-10:00	28.8	30.3	90.8	82.4	250.20
10:00-11:00	30.2	34.2	83.2	65.8	364.40
11:00-12:00	30.2	38.2	81.6	52.6	373.00
12:00-13:00	30.0	41.2	83.4	44.4	504.00
13:00-14:00	27.6	37.7	96.0	51.2	359.80
14:00-15:00	29.2	43.2	88.4	40.0	519.80
15:00-16:00	30.7	43.3	76.4	37.0	321.20
16:00-17:00	29.6	42.4	79.4	38.4	190.00
17:00-18:00	27.5	38.6	92.0	46.4	59.80
18:00-19:00	26.7	34.9	98.5	56.5	7.43

**Anexo 51.** Promedios horarios registrados el día con mayor radiación solar en el plano horizontal.

Prom/Hr	Ti (°C)	Te (°C)	HRi (%)	HRe (%)	RSph (W/m <sup>2</sup> )
8:00-9:00	30.0	34.1	76.0	63.4	499.40
9:00-10:00	34.2	45.6	59.6	35.4	835.40
10:00-11:00	35.7	55.2	53.8	19.0	910.40
11:00-12:00	35.5	64.4	55.2	10.2	1295.80
12:00-13:00	33.6	66.5	61.8	10.0	733.40
13:00-14:00	33.4	67.1	65.2	10.0	994.60
14:00-15:00	33.1	69.6	65.8	10.0	922.80
15:00-16:00	32.2	66.7	66.6	10.0	529.00
16:00-17:00	30.2	57.8	75.0	10.2	162.60
17:00-18:00	29.6	49.6	79.6	17.0	88.00
18:00-19:00	28.7	43.3	82.8	29.0	16.33

**Anexo 52.** Promedios horarios registrados a lo largo del ensayado.

Prom/Hr	RSph (W/m <sup>2</sup> )	Ti (°C)	Te (°C)	HRi (%)	HRe (%)
8:00-9:00	496.60	29.3	33.8	85.5	68.9
9:00-10:00	657.84	31.4	41.8	75.3	45.5
10:00-11:00	816.44	33.2	48.9	66.5	30.4
11:00-12:00	820.96	33.8	55.6	63.9	19.7
12:00-13:00	722.73	33.8	59.0	63.9	15.6
13:00-14:00	708.00	33.3	59.1	65.7	15.5
14:00-15:00	472.80	31.9	56.5	70.2	17.3
15:00-16:00	289.26	30.5	51.5	76.4	22.5
16:00-17:00	133.11	29.5	47.5	81.1	26.0
17:00-18:00	43.65	28.1	41.3	88.9	38.2
18:00-19:00	9.46	27.2	36.4	93.6	51.7



20	12:45								
21	1:00								
22	1:15								
23	1:30								
24	1:45								
25	2:00								
26	2:15								
27	2:30								
28	2:45								
29	3:00								
30	3:15								
31	3:30								
32	3:45								
33	4:00								
34	4:15								
35	4:30								
36	4:45								
37	5:00								
38	5:15								
39	5:30								
40	5:45								
41	6:00								
42	6:15								
43	6:30								
44	6:45								
45	7:00								
<b>PROM</b>									

OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_