

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HONDURAS

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE FÍSICA

MAESTRÍA EN FÍSICA



TESIS:

**PRINCIPIOS FÍSICOS INVOLUCRADOS EN EL TOSTADO DE CAFÉ
UTILIZANDO UN CONCENTRADOR SOLAR DE FRESNEL**

SUSTENTADO POR:

LICDA. LESLIE JOHANA MARTÍNEZ BANEGAS

PREVIO A OPTAR EL TÍTULO DE:

MÁSTER EN FÍSICA

PROMOCIÓN III

DIRECTOR: MARCO ANTONIO FLORES BARAHONA

TEGUCIGALPA MDC, HONDURAS CA, MAYO 2023

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

Dr. FRANCISCO JOSÉ HERRERA ALVARADO

RECTOR

MAE. BELINDA FLORES DE MENDOZA

VICERRECTORA ACADÉMICA

Dra. JESSICA PATRICIA SÁNCHEZ MEDINA

SECRETARIA GENERAL

Dr. RAÚL ARMANDO EUCEDA

DIRECTOR DE POSGRADOS

M.SC. ALEJANDRO GALO

DECANO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS

Ph. D MELISSA CRUZ

COORDINADORA DE LA MAESTRÍA EN FÍSICA

DEDICATORIA

A mis hijos David Emanuel y Leslie Sofía, por ser una inspiración para seguir adelante cada día.

A mi abuela Tesla que estaba orgullosa de mí y sé que desde el cielo celebra conmigo la culminación de mi maestría.

AGRADECIMIENTOS

A Dios todopoderoso por haberme permitido llegar hasta este punto, por darme las fuerzas para salir adelante, además de su infinita bondad y amor.

A mi amado esposo por su apoyo incondicional y su motivación constante.

A mis padres por haberme apoyado en todo momento y ser mi máximo ejemplo para seguir.

A mis hermanos que han estado siempre apoyándome y animándome.

A mi asesor el Dr. Marco Flores por todo su apoyo.

Al Instituto Hondureño de Ciencia, Tecnología e Innovación (IHCIETI) y al Mesoamerican Development Institute (Lowell, Massachusetts), por el financiamiento para hacer posible la construcción de la cámara de tostado.

Al Ingeniero Francisco Montes, quien construyó el concentrador solar y me apoyó en el proceso.

A mis amigos Claudia Vallejo, Carlos Gabarrete, Fernando Serrano y Wilmer Betanco por todo su apoyo.

Y a todos aquellos amigos y familiares que participaron directa o indirectamente en la elaboración de esta tesis. Muchas gracias a todos.

RESUMEN

A través del tiempo, han ido evolucionando diferentes métodos para el tostado del grano de café, comenzando con métodos tradicionales como el tostado en comales comunes, hasta métodos modernos más eficientes que permiten reducir el tiempo de tostado pero que usan energía convencional, como ser: la leña, la electricidad o el gas licuado de petróleo (GLP).

Considerando que el sol es una fuente inagotable de energía, esta se puede aprovechar para tostar los granos de café de una manera sostenible mediante el uso de concentradores solares.

Existen diferentes tipos de concentradores solares, pero este estudio está basado en un concentrador solar de Fresnel anidólico¹ con diseño novedoso, con el cual, se logra recolectar la energía procedente del sol en la cámara de tostado metálica de forma cilíndrica, incorporada a un motor que la hace girar para tostar los granos de café de una manera homogénea.

En esta investigación, se analizan los principios físicos (flujo de energía, transferencia de calor, potencia, eficiencia, entre otros) involucrados en el tostado de café. Realizando para ello, mediciones de temperatura en la cámara de tostado, temperatura ambiente, irradiancia y velocidad del viento a diferentes horas del día, con el fin de conocer el tiempo necesario para tostar una masa determinada de café.

Los resultados indican que el concentrador solar en estudio, es funcional, ya que la cámara de tostado alcanza temperaturas mayores a los 240 °C, siendo la temperatura ideal para tostar café entre 180°C y 240 °C, según (International coffee organization, s.f.). Cabe destacar que para alcanzar esa temperatura, la irradiancia debe de ser al menos de 1,100 W/m².

En la sección 6.2 se observan las curvas de tostado para un nivel de tueste medio y un nivel de tueste oscuro, respectivamente. También se muestra que el tueste oscuro de mejor calidad se logró con una temperatura máxima (en la cámara de tostado) de 236 °C en un tiempo de 74 minutos y el tueste medio de mejor calidad se logró con una temperatura máxima de 206 °C en un tiempo de 107 minutos. Demostrando que el tiempo de tostado es proporcional a la temperatura en la cámara de tostado y ésta a su vez, es proporcional a la irradiancia en un momento dado.

¹ No productor de imagen.

En este estudio también se muestra un modelo matemático utilizando Redes Neuronales Artificiales (RNA), que nos permite estimar la temperatura que puede alcanzar la cámara de tostado, según la irradiancia en ese momento.

De igual forma, se muestra que la eficiencia media del concentrador solar es de 49.03%.

PALABRAS CLAVE

Concentrador solar, Fresnel, tostado de café, eficiencia, energía solar, sostenibilidad.

ABSTRACT

Throughout time, different methods for roasting coffee have evolved, starting with traditional methods such as roasting in common griddles, to more efficient modern methods that reduce roasting time but use conventional energies, such as: firewood, electricity or gas.

Considering that the sun is a great source of energy, it can be used to roast coffee beans in a sustainable way using solar concentrators.

There are different types of solar concentrators, but this study is based on a anidolic Fresnel solar concentrator with a unique design, with which it is possible to collect the energy from the sun in a roasting chamber, incorporated into a motor that rotates in order to roast the coffee beans in a homogeneous way.

In this research, the physical principles (energy flow, heat transfer, power, efficiency, among others) involved in coffee roasting are analyzed. Carrying out temperature measurement in the roasting chamber, ambient temperature, irradiance, and wind speed at different times of the day, in order to know how long it takes to roast a given mass of coffee.

The results indicate that the solar concentrator under study is functional, since it reaches temperatures greater higher than 240 °C and the ideal temperature for roasting coffee is between 180 °C and 240 °C, according to (International coffee organization, s.f.). But for this, the irradiance must be at least 1,100 W/m².

In this study, a mathematical model of Artificial Neural Networks is also shown, which allows us to estimate the temperature that the roasting chamber can reach, according to the irradiance at that moment.

Section 6.2 shows the roasting curves for a medium roast level and a dark roast level, respectively. It is also shown that the best quality dark roast is modified was reached with a maximum temperature (in the roasting chamber) of 236 °C with a time of 74 minutes and the best quality medium roast is modified with a maximum temperature of 206 °C²⁰ with a time of 107 minutes. Showing that the roasting time is proportional to the temperature in the roasting chamber and this is proportional to the irradiance.

It is also shown that the average efficiency of the solar concentrator is 49.03 %.

KEYWORDS

Solar concentrator, Fresnel, coffee roasting, efficiency, solar energy, sustainability

NOMENCLATURA

A_a : Área de apertura del concentrador

A_e : Área total de la superficie reflectante

A_r : Área del receptor (Cámara de tostado)

C : Factor de concentración

G_{sc} : Constante solar

I : Irradiancia

L : Longitud de la cámara de tostado

P : Perímetro del receptor

P_e : Potencia térmica de entrada

P_a : Potencia absorbida por la cámara de tostado

P_u : Potencia útil en la cámara de tostado

q_R : Pérdida de calor por radiación

q_C : Pérdida de calor por convección

T_A : Temperatura ambiente

T_H : Temperatura máxima alcanzada en la cámara de tostado

$t_{tostado}$: Tiempo de tostado

V_{viento} : Velocidad del viento

$w_{perdido}$: Pérdida de peso del café tostado

Símbolos griegos

α : Absortividad del receptor

ρ : Reflectividad del concentrador solar

ε : Emisividad del receptor

η : Eficiencia instantánea del concentrador solar

Acrónimos

NN: Neuronal Network (Red Neuronal)

RMSE: Root Mean Square Error (Error cuadrático medio)

CONSTANTES

$$G_{sc} = 1,367 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Constante solar

$$\sigma = 5.667 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$$

Constante de Stefan-Boltzmann

ÍNDICE DE GRÁFICAS

	Página
Gráfica 6.1 Irradiancia en función de la hora local para el día para el 4 de marzo de 2022	46
Gráfica 6.2 Temperatura alcanzada en la cámara de tostado, en función de la Irradiancia para el 4 de marzo de 2022	46
Gráfica 6.3 Irradiancia en función de la hora local para el 6 de marzo de 2022	47
Gráfica 6.4 Temperatura alcanzada en la cámara de tostado, en función de la Irradiancia para el 6 de marzo de 2022	47
Gráfica 6.5 Irradiancia en función de la hora local para el 9 de marzo de 2022	48
Gráfica 6.6 Temperatura alcanzada en la cámara de tostado, en función de la Irradiancia para el 9 de marzo de 2022	48
Gráfica 6.7 Irradiancia en función de la hora local para el 10 de marzo de 2022	49
Gráfica 6.8 Temperatura alcanzada en la cámara de tostado, en función de la Irradiancia para el 10 de marzo de 2022	49
Gráfica 6.9 Irradiancia en función de la hora local para el 13 de abril de 2022	50
Gráfica 6.10 Temperatura alcanzada en la cámara de tostado, en función de la Irradiancia para el 13 de abril de 2022	50
Gráfica 6.11 Irradiancia en función de la hora local para el 19 de abril de 2022	51
Gráfica 6.12 Temperatura alcanzada en la cámara de tostado, en función de la Irradiancia para el 19 de abril de 2022	51
Gráfica 7.1 Modelo NN para la Temperatura 1 para el día 10 de marzo de 2022	59
Gráfica 7.2 Modelo NN para la Temperatura 2 para el día 10 de marzo de 2022	59

Gráfica 7.3	Modelo NN para la Temperatura 3 para el día 10 de marzo de 2022	59
Gráfica 7.4	Modelo NN para la Temperatura 1 para el día 13 de abril de 2022	61
Gráfica 7.5	Modelo NN para la Temperatura 2 para el día 13 de abril de 2022	61
Gráfica 7.6	Modelo NN para la Temperatura 1 para el día 19 de abril de 2022	62
Gráfica 7.7	Modelo NN para la Temperatura 2 para el día 19 de abril de 2022	62
Gráfica 7.8	Modelo NN para la Temperatura 1 con datos concatenados	63
Gráfica 7.9	Modelo NN para la Temperatura 2 con datos concatenados	63

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 2.1 Principales exportadores de café en el ámbito mundial	5
Figura 2.2 Principales productores de café en el ámbito mundial	6
Figura 2.3 Regiones cafetaleras de Honduras	7
Figura 2.4 Concentrador solar tipo Reflector Scheffler del proyecto Intikallana	11
Figura 3.1 Tipos de radiación solar dependiendo la forma en la que llega a la Tierra	15
Figura 3.2 Variación de la radiación solar fuera de la atmósfera terrestre	16
Figura 3.3 Sistema formador de imagen y sistema anidólico	20
Figura 3.4 Transferencia de calor por conducción	21
Figura 3.5 Corrientes de convección en una olla con agua que se calienta sobre una estufa	22
Figura 3.6 Espectro electromagnético.	23
Figura 4.1 Termómetro digital Infrarrojo FLUKE 62 MAX	28
Figura 4.2 Anemómetro de mano BTMETER BT-100-WM	28
Figura 4.3 Balanza digital EK6015	28
Figura 4.4 Medidor de irradiancia y Multímetro	29
Figura 4.5 Panel Solar Fotovoltaico	29
Figura 5.1 Concentrador solar de Fresnel y la tostadora de café	30
Figura 5.2 Volumen focal del Reflector de Fresnel	31
Figura 5.3 Radio de apertura del concentrador	32
Figura 6.1 Curva de tostado de un tueste medio	43
Figura 6.2 Curva de tostado de un tueste oscuro	44
Figura 6.3 Muestra de café del día 13 de abril a que no alcanzó los 180°C	45
Figura 6.4 Granos de café con nivel de tueste medio - 4 de marzo 2022	46
Figura 6.5 Granos de café con nivel de tueste oscuro - 6 de marzo 2022	47
Figura 6.6 Granos de café con nivel de tueste oscuro - 9 de marzo 2022	48
Figura 6.7 Granos de café con nivel de tueste oscuro - 10 de marzo 2022	49

Figura 6.8	Granos de café con nivel de tueste medio no uniforme – 13 de abril 2022	50
Figura 6.9	Granos de café con nivel de tueste medio - 19 de abril 2022	51
Figura 6.10	Proceso de torrefacción con muestras de café	52
Figura 6.11	Ejemplo del aumento en el volumen que experimentan los granos de café en el proceso de tueste	53
Figura 7.1	Perceptrón multicapas	55
Figura 7.2	Arquitectura general utilizada para la estimación de las temperaturas	56
Figura 7.3	Perceptrón multicapas usado con el concentrador solar de Fresnel	56
Figura 7.4	Arquitectura utilizada para la estimación de dos temperaturas	57
Figura 7.5	Arquitectura utilizada para la estimación de tres temperaturas	57
Figura 7.6	Puntos de la cámara de tostado donde se midió la temperatura	58

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 2.1	Regiones cafetaleras de Honduras 8
Tabla 3.1	Instrumentos meteorológicos para medir la radiación solar 18
Tabla 3.2	Resumen de los tipos de concentradores según su principio de óptica 19
Tabla 4.1	Datos meteorológicos medidos en cada prueba experimental 26
Tabla 5.1	Especificaciones del concentrador solar de Fresnel 31
Tabla 5.2	Clasificación de los colectores en función del factor de concentración 33
Tabla 5.3	Pérdidas de energía del día 9 de marzo del año 2022 36
Tabla 5.4	Pérdidas de energía del día 19 de abril del año 2022 37
Tabla 5.5	Potencia y eficiencia del concentrador para el día 9 de marzo de 2022 39
Tabla 5.6	Eficiencias promedio de algunos concentradores solares 40
Tabla 6.1	Comparación de la pérdida de peso de varias muestras 41
Tabla 6.2	Parámetros del día 19 de abril de 2022 42
Tabla 6.3	Parámetros del día 9 de marzo de 2022 43
Tabla 6.4	Temperatura, irradiancia y velocidad del viento para el 4 de marzo de 2022 46
Tabla 6.5	Temperatura, irradiancia y velocidad del viento para el 6 de marzo de 2022 47
Tabla 6.6	Temperatura, irradiancia y velocidad del viento para el 9 de marzo de 2022 48
Tabla 6.7	Temperatura, irradiancia y velocidad del viento para el 10 de marzo de 2022 49
Tabla 6.8	Temperatura, irradiancia y velocidad del viento para el 13 de abril de 2022 50
Tabla 6.9	Temperatura, irradiancia y velocidad del viento para el 19 de abril de 2022 51
Tabla 7.1	Datos recolectados el 10 de marzo de 2022 para el Modelo NN 59

Tabla 7.2	Error medio cuadrado para los datos recolectados el 10 de marzo de 2022	60
Tabla 7.3	Datos recolectados el 13 de abril de 2022 para el Modelo NN	61
Tabla 7.4	Error medio cuadrado para los datos recolectados el 13 de abril de 2022	61
Tabla 7.5	Datos recolectados el 19 de abril de 2022 para el Modelo NN	62
Tabla 7.6	Error medio cuadrado para los datos recolectados el 19 de abril de 2022	62

ÍNDICE DEL ANEXO

		Página
Anexo A.1	Especificaciones técnicas del equipo utilizado en las mediciones	85
Anexo A.2	Etapas de la investigación	86
Anexo A.3	Código en octave para los datos de temperatura concatenados	92
Anexo A.4	Caracterización de datos climáticos en Honduras	97
Anexo A.5	Comparación de los resultados de la estimación de temperaturas, usando el modelo autorregresivo y el modelo de Redes Neuronales	123
Anexo A.6	Análisis estadístico de las mediciones	124

Contenido

DEDICATORIA.....	2
AGRADECIMIENTOS	3
RESUMEN.....	4
ABSTRACT.....	6
NOMENCLATURA.....	7
CONSTANTES.....	8
ÍNDICE DE GRÁFICAS	9
ÍNDICE DE FIGURAS.....	11
ÍNDICE DE TABLAS.....	13
ÍNDICE DEL ANEXO	14
INTRODUCCIÓN.....	18
CAPÍTULO 1: Planteamiento del problema.....	19
1.1 Problema de Investigación.....	19
1.2 Objetivos de Investigación	19
1.2.1 Objetivo General	19
1.2.2 Objetivos Específicos.....	19
1.3 Preguntas de investigación.....	20
1.4 Justificación	20
CAPÍTULO 2: Estado del Arte	22
2.1 Importancia del café a nivel mundial.....	22
2.1.1 Zonas productoras de café en Honduras	23
2.2 Tueste del café	26
2.2.1 Historia del tueste del grano de café	26
2.2.2 Tueste de café usando concentradores solares	28
2.2.3 Principales fases del proceso de tueste	29
2.2.4 Sugerencias en el proceso de tueste de café	30
2.2.5 Tiempo de tostado del café y porcentaje de humedad	30
2.2.6 Cambios producidos en el grano de café por el proceso de tueste	31
CAPÍTULO 3: Fundamentos Teóricos	32
3.1 Radiación solar	32

3.1.1 Tipos de radiación solar	32
3.1.2 Variación de la radiación solar	33
3.1.3 Instrumentos para medir la radiación solar	34
3.2 Colectores solares	35
3.3 Concentración de la radiación solar.....	36
3.3.1 Tipos de concentradores solares	36
3.3.2 Concentrador solar de Fresnel	37
3.4 Óptica	37
3.4.1 Óptica Geométrica (Formadora de imagen).....	37
3.4.2 Óptica anidólica (no formadora de imagen)	37
3.5 Mecanismos de transferencia de calor	38
3.5.1 Conducción	38
3.5.2 Convección	39
3.5.3 Radiación	40
CAPÍTULO 4: Metodología de la investigación en el tueste de café	43
4.1 Metodología	44
4.2 Equipo utilizado en el trabajo experimental	44
4.3 Hipótesis nula	46
CAPÍTULO 5: Análisis del concentrador solar de Fresnel aplicado al tostado de café	47
5.1 Diseño técnico del concentrador	47
5.2 Área de apertura del concentrador solar y el área del receptor	49
5.2.1 Área de apertura del concentrador solar	49
5.2.2 Área del receptor	49
5.3 Factor de concentración geométrico	50
5.4 Eficiencia óptica del concentrador	51
5.5 Pérdidas de energía	52
5.5.1 Pérdida de calor por radiación	52
5.5.2 Pérdida de calor por convección.....	52
5.6 Potencia y eficiencia del concentrador solar de Fresnel	55
CAPÍTULO 6: Resultados y discusión del café tostado usando el concentrador solar de Fresnel	58
6.1 Pérdida de peso del café tostado (pérdida de humedad)	58
6.2 Curvas de tostado	59
6.2.1 Curva de tostado para un tueste medio	59

6.2.2 Curva de tostado para un tueste oscuro.....	60
6.3 Resultados del tueste	61
6.3.1 Resultados experimentales	63
6.3.2 Análisis de los resultados	69
CAPÍTULO 7: Uso de Redes Neuronales Artificiales para estimar las temperaturas en la cámara de tostado	71
7.1 Redes Neuronales Artificiales.....	71
7.2 Metodología	75
7.3 Resultados usando el modelo de Redes Neuronales Artificiales.....	75
CONCLUSIONES.....	81
RECOMENDACIONES Y TRABAJO A FUTURO	82
GLOSARIO	83
ANEXOS.....	85
A.1 Especificaciones técnicas del equipo utilizado en las mediciones	85
A.1.1 Termómetro digital Infrarrojo FLUKE 62 MAX	85
A.1.2 Anemómetro de mano BTMETER BT-100-WM	85
A.1.3 Balanza digital EK6015.....	85
A.1.4 Multímetro y medidor de irradiancia	86
A.2 Etapas de la investigación	86
A.2.1 Etapa de construcción del Concentrador Solar de Fresnel	86
A.2.2 Primeras pruebas para comprobar el funcionamiento del equipo	88
A.2.3 Trabajo experimental.....	89
A.2.4 Visita Técnica realizada el día 21 de marzo de 2022	91
A.3 Código en octave para los datos de temperatura concatenados	92
A.4 Caracterización de datos climáticos en Honduras	97
A.4.1. Heliofanía/Brillo solar	97
A.4.2. Diagramas climáticos para 10 Departamentos de Honduras	101
A.5 Comparación de los resultados de la estimación de temperaturas, usando el modelo autorregresivo y el modelo de Redes Neuronales.....	123
A.6 Análisis estadístico de las mediciones.....	124
A.6.1. Pruebas de Normalidad.....	124
A.6.2. Histogramas de Pearson	125
A.6.3 Diagramas de dispersión para temperatura e irradiancia.....	129
Bibliografía	130

INTRODUCCIÓN

El tostado de café es una actividad antigua que data, aproximadamente, del siglo XV y con el paso de los años ha mejorado sus métodos para obtener un café de mejor calidad.

La etapa del tostado del grano de café es muy importante ya que altera las características iniciales del grano para producir otros componentes organolépticos, como el sabor, la acidez, el sabor residual y el cuerpo de la taza de café. El tueste de los granos de café es lo que más influye en la calidad de una taza de café; por lo tanto, se le considera una fase vital dentro de la cadena de elaboración (Ministerio de Industrias y Productividad, 2016).

Considerando que la energía solar es una fuente de energía que tenemos disponible, podemos utilizarla para el tostado del grano de café, haciendo uso de un concentrador solar, cuyo objetivo es concentrar los rayos solares en un receptor, que en este caso sería la cámara de tostado.

Para este trabajo de investigación se ha diseñado un concentrador solar de Fresnel, con geometría cuasi parabólica, formada por secciones cónicas, con espejos planos de Fresnel, instalados sobre una estructura metálica en forma de paraboloide circular, produciendo un volumen focal en la cámara de tostado, donde se concentran los rayos solares reflejados por el concentrador de Fresnel, permitiendo alcanzar temperaturas superiores a 180 °C, temperatura mínima para tostar granos de café.

Con este Proyecto se estaría cerrando el ciclo de producción sostenible de café, ya que los granos usados han sido secados con energía solar de alta tecnología, producidos en una cooperativa de café ubicada en Subirana, Yoro.

CAPÍTULO 1: Planteamiento del problema

1.1 Problema de Investigación

La temática del café es de vital importancia en países como el nuestro, ya que, según el Instituto Hondureño del Café, (IHCAFE), Honduras ocupa el quinto o sexto lugar de los principales productores de café a nivel mundial, situación que es variable, dependiendo de las cosechas anuales de otros países productores.

A pesar de ello, no se han estudiado formalmente alternativas económicas y de alto contenido científico para reducir los costos económicos y ambientales inherentes en el proceso de cosecha, secado y tueste del grano de café.

Considerando que, en el proceso de tueste del grano de café, intervienen fenómenos físicos que involucran a la termodinámica en el proceso de absorción y transferencia de energía térmica y siendo el tueste de café un proceso energéticamente intensivo y uno de los pasos en la cadena de suministro que mayor valor agregado genera, surgen las siguientes interrogantes:

¿Cómo podría la Física contribuir en el mejoramiento del proceso de tostado del grano de café, reduciendo los costos de producción y utilizando una fuente de energía renovable?

¿Se podría elaborar un modelo matemático que nos ayude a estimar la temperatura en la cámara de tostado conociendo la radiación solar en ese instante?

1.2 Objetivos de Investigación

1.2.1 Objetivo General

Estudiar los principios físicos involucrados en el proceso de tueste de café, utilizando un concentrador solar de Fresnel anidólico y una tostadora, ambos con diseño novedoso.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Estudiar la funcionalidad del concentrador solar de Fresnel aplicado al tueste de café.
- Conocer la radiación solar mínima que se requiere para lograr alcanzar la temperatura adecuada para el tostado de los granos de café (180 a 240°C).

- Calcular la potencia y la eficiencia energética del concentrador solar de Fresnel utilizado para este diseño de tostadora de café.
- Calcular las pérdidas de energía asociadas en un ciclo de tostado con el diseño utilizado en este estudio.
- Elaborar un modelo matemático que permita la estimación de temperaturas en la cámara de tostado, según la radiación solar que incide en el área de apertura del concentrador solar de Fresnel.

1.3 Preguntas de investigación

1. ¿Cuáles son los principios físicos involucrados en el proceso de tostado de café utilizando un concentrador solar?
2. ¿Qué potencia y eficiencia energética puede llegar a desarrollar este concentrador solar de Fresnel?
3. ¿Cómo se pueden calcular las pérdidas de energía asociadas a un ciclo de tostado con el diseño del concentrador utilizado?
4. ¿Se puede elaborar una herramienta teórica, que estime las temperaturas del prototipo construido, según la radiación solar en ese momento?

1.4 Justificación

El café es uno de los productos más comercializados en el ámbito mundial (Perfect Daily Grind, 2020). Honduras es un país prolífico en la producción de café: ocupa el quinto lugar en el ámbito mundial, es el mayor productor de América Central y el tercero de América Latina. El impacto de la producción de café en la economía de nuestro país es muy importante ya que según IHCAFE, el café es ahora el principal producto agrícola de Honduras para la exportación, contribuye con más del 3% al PIB del país y cerca del 30% al PIB agrícola.

El concentrador solar de Fresnel de doble reflexión utilizado en este trabajo de tesis se diseñó utilizando el principio de óptica 3D no productora de imagen (Saravia Luis y Flores, 2004), además de una cámara de tostado de café, como una aplicación del concentrador solar. Ambos diseños son únicos, por lo cual, se requiere un estudio formal de su funcionamiento.

La construcción del concentrador fue financiada por el Instituto Hondureño de Ciencia, Tecnología e Innovación (IHCIETI) y la cámara de tostado con el financiamiento del Mesoamerican Development Institute (Lowell, Massachusetts).

Considerando que el proceso de tueste de café es un tema muy complejo desde la perspectiva termodinámica, especialmente el flujo de energía, transferencia de calor y su control en el proceso, con múltiples repercusiones en sabores y aromas y su implicación en el valor económico del grano, es de gran importancia realizar estudios formales que incluyan modelos científico - operativos que simulen un concentrador solar de Fresnel.

Usar un concentrador solar para el tostado de granos de café, contribuye con la conservación del ambiente y reducir los costos de tostado. Por ello se deben analizar parámetros como la irradiancia (que varía con la hora del día, el clima, la latitud y la estación del año; la cual es la fuente de energía del concentrador solar y de la cámara de tostado en estudio), la eficiencia y las pérdidas de energía por diferentes mecanismos de transferencia de calor.

Cabe destacar que el impacto del estudio estaría beneficiando la economía nacional, al producir café tostado de óptima calidad utilizando, en un 100 % energía renovable.

Además, los resultados de este proyecto de investigación pueden ayudar en dos vías: en primer lugar, se puede construir un prototipo incluyendo mejoras y utilizarse para tostar en el beneficio de café en Subirana, Yoro, con el apoyo del Mesoamerican Development Institute (Lowell, Massachusetts) y en segundo lugar, puede contribuir en la transferencia de conocimiento a los futuros estudiantes de posgrado.

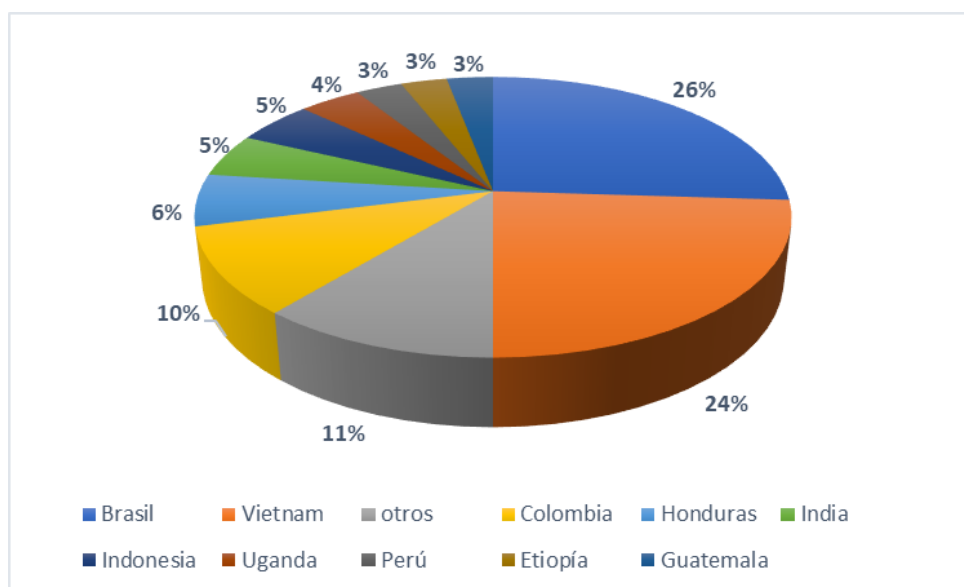
CAPÍTULO 2: Estado del Arte

2.1 Importancia del café a nivel mundial

Honduras se encuentra actualmente dentro de los diez países, en el ámbito mundial, que más exportaciones de café registran en el mercado internacional, al ocupar la quinta posición en ese ranking (ver figura 3.1). También ocupa la sexta posición en cuanto a los países más productores del grano (ver figura 3.2) según el Informe Estadístico 2019-2020 del Instituto Hondureño del Café (IHCAFE).

Según este informe, Brasil es el principal exportador en el ámbito mundial, con una participación del 32%, seguido de Vietnam con una participación del 21%; en tercer lugar, encontramos a Colombia con el 10%; Indonesia retomó el cuarto lugar con un 5%; Honduras cayó a la quinta posición con 4% de participación en el mercado global, seguido de Uganda e India, ambos con 4%; Perú representó el 3%; Etiopía y Guatemala con 3%; y los demás países con una participación en el mercado del 1%.

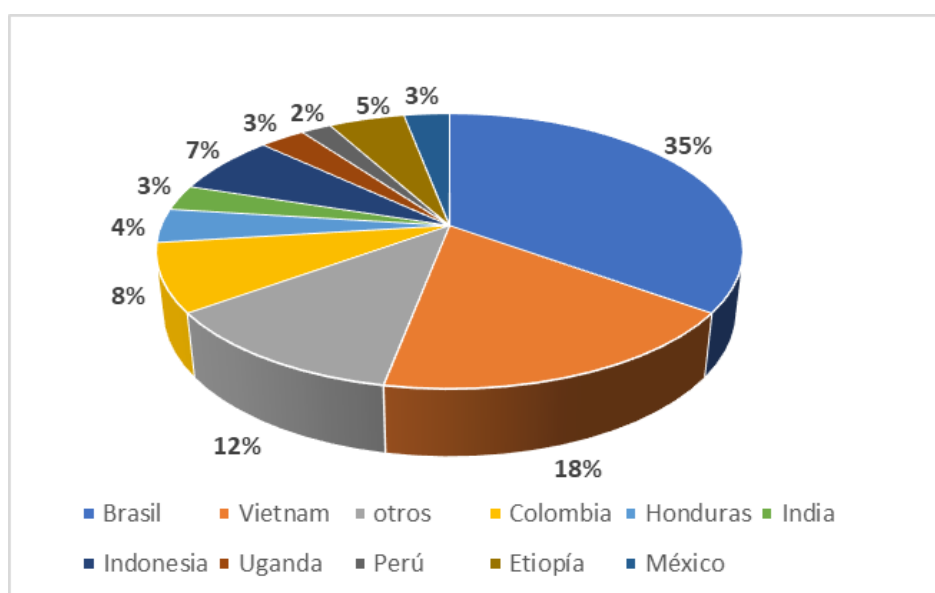
Figura 2.1 Principales exportadores de café en el ámbito mundial



Fuente: Instituto Hondureño del Café (IHCAFE)

De igual forma, Brasil es y ha sido el mayor productor de café en el ámbito mundial. Para la cosecha 2019-20 en la figura 3.2 se observa que Brasil produjo el 35% del total de la producción registrada, seguido de Vietnam con el 18%; Colombia, produjo un 8% del total mundial manteniéndose en la tercera posición. Indonesia tuvo una participación del 7%; Etiopía produce el 5%; Honduras se ubicó en la sexta posición de países productores con una participación del 4%; India con una participación del 3%; Uganda con un 3%, seguido de México con 3% y Perú con 2%. Los demás países en conjunto representan el 12% del total de la producción mundial (IHCAFE).

Figura 2.2 Principales productores de café en el ámbito mundial



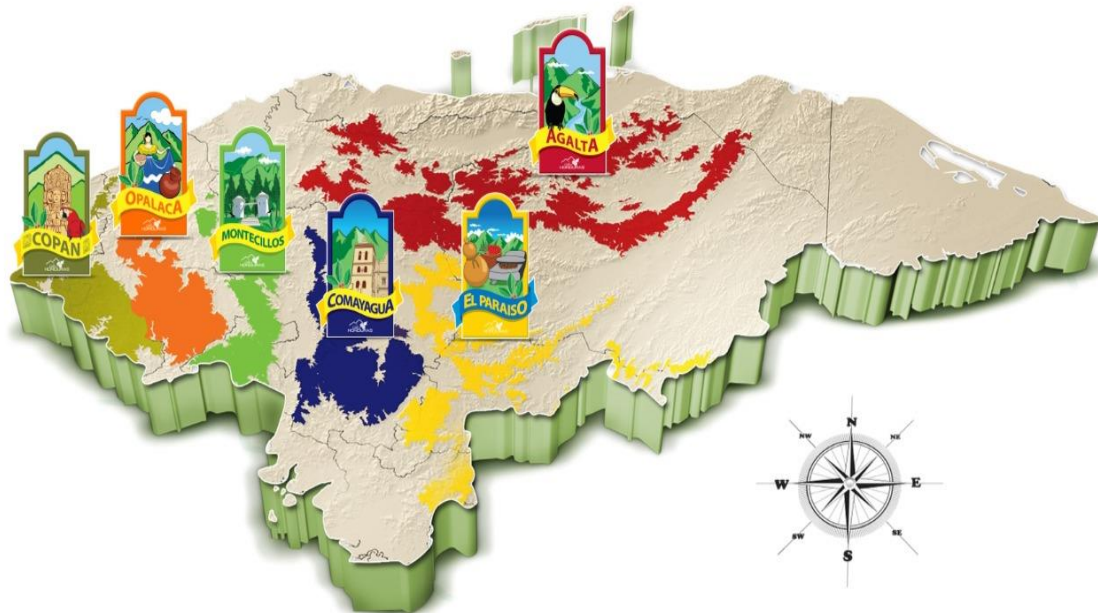
Fuente: Instituto Hondureño del Café (IHCAFE)

2.1.1 Zonas productoras de café en Honduras

Según el IHCAFE, la mayoría del café producido en Honduras proviene de regiones montañosas de 15 departamentos del país (210 municipios), generando más de un millón de trabajos que producen cerca del 38% del PIB Agrícola.

Se han clasificado seis regiones cafetaleras en Honduras: Copán, Opalaca, Montecillos, Comayagua, Agalta y El Paraíso, como se muestran en la Figura 2.3.

Figura 2.3 Regiones cafetaleras de Honduras



Fuente: Instituto Hondureño del Café – IHCAFÉ

El IHCAFE afirma que la calidad de nuestro café es el resultado directo de la combinación de la diversidad geográfica del país y del meticuloso trabajo de nuestros productores en toda la cadena productiva, desde la producción de finca, beneficiado, secado al sol y la preparación para la exportación.

Considerando que la época de cosecha de café en Honduras empieza en noviembre y termina entre marzo y abril, y según los datos de irradiancia de nuestro país, los mejores meses para el funcionamiento óptimo del prototipo construido serían de febrero a abril. Por lo que se puede disponer de un sistema auxiliar para el tostado de café en los meses de baja irradiancia, utilizando, por ejemplo, biogás producido a partir de la pulpa del café o utilizar gas licuado de petróleo, que es menos contaminante que los otros derivados del petróleo.

En la Tabla 2.1 se describen las características de cada una de las seis regiones cafetaleras en Honduras.

Tabla 2.1 Regiones cafetaleras de Honduras

Región	Ubicación geográfica	Precipitación anual	Altitud	Temperatura	Época de cosecha
Copán	Copán, Ocotepeque y Santa Bárbara	1,300 – 2,300 mm	1,000 – 1,700 msnm	16 a 24 °C	Noviembre a marzo
Opalaca	Santa Bárbara, Intibucá y Lempira	1,350 – 1,900 mm	1,100 – 1700 msnm	14 a 22 °C	Noviembre a marzo
Montecillos	La Paz, Santa Bárbara, Intibucá y Comayagua	1,300 – 2,300 mm	1,200 – 1,700 msnm	14 a 22 °C	Diciembre a abril
Comayagua	Comayagua y Francisco Morazán	1,350 – 1,700 mm	1,100 – 1,700 msnm	16 a 22 °C	Diciembre a marzo
Agalta	Olancho, Yoro, Colón y Atlántida	1,300 – 1,950 mm	1,100 – 1,700 msnm	16 a 24 °C	Diciembre a marzo
El Paraíso	El Paraíso, parte de Choluteca y Francisco Morazán	950 – 1,950 mm	1,100 – 1,700 msnm	16 a 24 °C	Diciembre a marzo

2.2 Tueste del café

2.2.1 Historia del tueste del grano de café

Solá (2011) nos hace un excelente resumen acerca de la historia del café, el cual tenemos a continuación:

Durante los siglos XV, XVI y XVII, para el proceso de tostado de café se utilizaban sartenes agujereadas sobre un lecho de carbón o un cilindro agujereado con un cigüeñal para el mezclado de los granos y una fuente de calor.

A lo largo del siglo XVIII y principios del XIX se empezó a perfeccionar el desarrollo de las tostadoras. En este tiempo la construcción era sobre hojas de metal de cobre, latón o de hierro fundido.

La absorción de calor siempre era de forma directa sobre la fuente y este calor externo calentaba el aire de forma homogénea gracias al giro constante del tambor durante el tostado. Las fuentes de calor utilizadas eran: madera, carbón o coque.

Solá (2011) menciona también que durante estos primeros tiempos se desarrollaron 4 diseños básicos de equipos de tostado:

1. Bandejas y cajas de tostado: Se colocaban directamente sobre el fuego y se agitaba para remover los granos.
2. Artefactos tipo sartén, con o sin tapa: Tenían forma de bol y estaban pensados para lotes de 2 kg de café verde. Se utilizaban cucharones para remover los granos durante el tostado, para permitir una transferencia de calor relativamente homogénea.
3. Esferas: Como resultado de un perfeccionamiento de las sartenes, se desarrollaron formatos esféricos a modo de tambor que incorporaban un huso y un cigüeñal para permitir el movimiento de los granos de café. Estas esferas eran más sencillas de operar y el diseño permitía la salida de humos y, por tanto, aumentar los lotes de café.
4. Cilindros: Los precursores de las actuales máquinas de tostar. Era un sistema que con un huso y un eje permitían un movimiento mecánico para el tostado. El cilindro se posicionaba

sobre el fuego con dos soportes. El proceso de enfriado era altamente sencillo, se colocaba el grano tostado en un bol aparte y se rociaba con agua.

Ya a finales del siglo XVIII se tiene constancia de que el conocimiento sobre el café había evolucionado enormemente. De acuerdo con la enciclopedia de Johann Georg Krünitz de 1784, ya se exploraban métodos de tostado, tostado claro u oscuro, y diferentes técnicas de enfriado. Krünitz ya apuntaba la importancia del proceso de tostado como un indicador de calidad crucial.

El proceso de industrialización de las máquinas tostadoras creció notablemente a partir de 1824 con el crecimiento económico de Europa y Estados Unidos, unido a la revolución industrial y el crecimiento de las redes de comunicación por tierra y mar, lo que introdujo la facilidad del transporte de mercancías y equipos. Así se pasó del tostado a escala doméstica al tostado comercial e industrial.

Además, el cambio de combustible de carbón a gas natural y el uso de cilindros perforados redujo los tiempos de tostado de 50 a 20 minutos y la introducción de tapas para regular el calor mejoró la calidad del tostado y la reducción del grano. La introducción del gas natural en las grandes ciudades ofrecía a los productores una combustión más homogénea, limpia y que permitía controlar de forma más precisa el tostado.

A mediados del siglo XIX los ingenieros trabajaron para la creación de sistemas de batea en el que con rastrillos de madera los operarios movían los granos para enfriarlos. Con el tiempo se crearon cernedores con palas giratorias y ventiladores para remover el aire caliente. Estos sistemas dieron paso a construcciones cilíndricas, en ocasiones cerradas, y que supusieron un gran avance para mejorar la calidad del café al evitar el sobre calentamiento.

En el siglo XX se continuó el proceso de perfeccionamiento de los sistemas, permitido por los avances tecnológicos, se mejoró el control del tostado gracias a indicadores de temperatura, sistemas automáticos de limpieza de restos en el cilindro y quemadores de humos para control de las emisiones a la atmósfera.

Según Solá (2011) hoy en día existe preocupación por la conservación del ambiente y se debe regular la contaminación causada específicamente por las emisiones de humos en el proceso de tostado del café.

Este problema de contaminación se puede resolver utilizando concentradores solares para el tueste de café.

2.2.2 Tueste de café usando concentradores solares

A continuación, se muestran dos modelos de concentradores solares usados en el tostado de granos de café. Cabe destacar que ninguno de los dos tiene un diseño igual al concentrador de este proyecto de investigación.

1. Concentrador solar tipo Reflector Scheffler en Perú

Este proyecto se denomina Intikallana (EcoInventos, 2015), que en quechua significa “tostador solar”, y pretende llevar a las zonas rurales de Perú una forma barata y sostenible de tostar este producto. Para conseguir el tostado del café se requiere de una temperatura que ronda los 200 °C, la cual se consigue, en ese caso, gracias a un concentrador solar tipo Reflector Scheffler, ver Figura 2.4. Estos reflectores solares se suelen utilizar para cocinar y generar vapor en países en vías de desarrollo. Partiendo de este dispositivo se diseñó un tostador en acero inoxidable y aluminio.

Figura 2.4 Concentrador solar tipo Reflector Scheffler del proyecto Intikallana



Fuente: EcoInventos, 2015

Según el informe del tiempo experimental de tostado, este concentrador solar tipo Reflector Scheffler ha conseguido tostar 1,000 g de café en 24 minutos.

2. Concentrador solar Parabólico en Pueblo, Colorado

Faircompanies (2007) comenta que David Hartkop y su hermano Mike pensaron en un método no contaminante para tostar café y convirtieron una vieja antena de satélite en un concentrador solar.

En lugar de cubrir el plato con un solo espejo o alguna superficie brillante usaron un gran número de pequeños espejos de cristal que pueden alinearse individualmente; por lo que en realidad hay decenas de espejos que pueden moverse autónomamente.

Ellos alinean esos espejos con el sol y dirigen la reflexión de la luz hacia la tostadora de café, alcanzando una temperatura entre 232 °C y 260 °C.

2.2.3 Principales fases del proceso de tueste

Ramírez, Sosa, Mendoza, López, y Pineda (2007) afirman que el proceso de tostado del café es lo que permite cambios importantes en las propiedades químicas, físicas y sensoriales del grano. Durante este proceso sucede el secado del grano, donde se extrae del 10% al 12% de su humedad inicial, seguido de reacciones químicas como la de Maillard, caramelización de la sacarosa y la pirólisis final de los carbohidratos y proteínas.

Según el Manual básico de buenas prácticas para el tostado del café, del Ministerio de Industrias y Productividad de Ecuador (2016), las principales fases del proceso de tostado son:

- Deshidratación o secado: Pérdida de humedad
- Caramelización: Fundición de los compuestos de azúcar (fructosa 128 °C; la glucosa 146-150 °C y sacarosa 186 °C).
- Transición térmica (primer crack): Cocción de los granos.
- Desarrollo del grano: El grano se expande y se vuelve brillante.
- Acabado y enfriamiento: Fin del tueste. El grano se debe llevar a la temperatura ambiente en menos de 3 minutos, para que el proceso de tostado se detenga.
- Desgasificación: Es la liberación de los gases que se forman dentro del grano en el proceso de tueste, incluyendo una gran cantidad de dióxido de carbono.

Esta última fase del proceso de tostado, la gasificación, es uno de los procesos más importantes para la obtención de una correcta taza de café. Según la Revista Fórum Café, el

café deberá reposar antes de que esté listo para su uso. Los gases se desprenden de forma rápida en las primeras horas después del tueste y su salida va decreciendo de forma continuada en un proceso que puede durar hasta 20 días.

2.2.4 Sugerencias en el proceso de tueste de café

En la página 23 del Manual básico de buenas prácticas para el tostado de Café (Ministerio de Industrias y Productividad, 2016) encontramos algunas sugerencias para conseguir un buen tostado:

1. Contar con un temporizador para controlar el tiempo.
2. No mezclar café verde y malo con el café bueno.
3. Controlar que el tueste no sea demasiado rápido, para evitar que presente puntas oscuras, o muy lento, para que el grano no quede horneado (con poco dulzor que normalmente se describe como sabor a pan o papel).
4. Siempre tener a mano una muestra del tueste seleccionado o el patrón de color que se quiere obtener.
5. Escuchar el primer crack y/o segundo crack, y decidir a simple vista (según la muestra o el patrón seleccionado) el momento de sacar el café de la máquina.
6. Enfriar el producto enseguida y envasar el producto en las 24 horas subsiguientes.

2.2.5 Tiempo de tostado del café y porcentaje de humedad

Según SABORA, los tostadores funcionan típicamente con temperaturas entre 180 °C y 240 °C y el tiempo de tostado oscila entre 10-25 minutos, dependiendo del tipo de tostadora.

Schenker (2002) señala que, si tostamos granos de café a una temperatura de 220 °C durante 10 minutos, se puede lograr un aroma suficientemente intenso. En cambio, si las temperaturas son mayores de 260 °C se puede alterar el aroma.

La revista del consumidor (Calidad de café tostado, en grano o molido - 2001) establece que los granos de café se suelen tostar a diferente intensidad con el fin de acentuar sus atributos y obtener así, características que satisfagan el gusto del consumidor. Existen tres niveles comerciales de tostado: claro, medio y oscuro. Cabe destacar que un café con tueste claro tiene un sabor más suave que uno con tueste oscuro.

El café tostado, en tanto no sobrepase un contenido de humedad de 6%, no presenta problemas de deterioro o descomposición; no obstante, dado que algunos de sus componentes son volátiles los expertos recomiendan que, de preferencia se consuma recién tostado o se adquiera solamente la cantidad que utiliza en periodos cortos (de dos a tres semanas)”

En el Manual básico de buenas prácticas para el tostado del café del Ministerio de Industrias y Productividad de Ecuador (2016), se nos dice que no es aconsejable un tostado con muy poco tiempo debido a la velocidad de tueste y la dificultad para controlar el proceso. Tampoco es conveniente demasiado tiempo de tueste, debido a que los compuestos volátiles se perderían.

2.2.6 Cambios producidos en el grano de café por el proceso de tueste

Al final del tueste, el grano de café ha sufrido cambios importantes, tanto en el ámbito cuantitativo como cualitativo.

Según el Manual básico de buenas prácticas para el tostado del café, del Ministerio de Industrias y Productividad de Ecuador (2016), esos cambios son:

- Pérdida de peso. El grano pierde alrededor del 15% al 20% de su peso, debido en gran parte a la evaporación de su humedad.
- Aumento de volumen. El grano aumenta entre 100% y 130% de su volumen. en función del tiempo de tueste.
- Cambio de color. Su color amarillo verdoso se transforma en un marrón, más o menos oscuro en función del grado de tueste escogido.
- Los azúcares han sido caramelizados.
- Disminución de los azúcares y los ácidos clorogénicos.
- Aumento de las sustancias grasas debido a las altas temperaturas.
- Los granos tienen un alto contenido de gases (principalmente dióxido de carbono), que hace difícil, aunque no imposible, que podamos preparar el café inmediatamente, ya que estos gases pueden formar pequeñas burbujas que alteran el contacto entre la molienda y el agua, resultando en una extracción desigual del sabor y de los compuestos aromáticos presentes en el café seco. En otras palabras, si preparamos café recién tostado, el sabor puede verse afectado negativamente.

CAPÍTULO 3: Fundamentos Teóricos

3.1 Radiación solar

Según Duffie y Beckman (2013) “la radiación solar es el flujo de energía que recibimos del sol en forma de ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias (luz visible, infrarroja y ultravioleta).”

También afirman que “la estructura y las características del sol determinan la naturaleza de la energía que se irradia hacia el espacio” y por eso es importante definirlo:

“El sol es una esfera de materia gaseosa intensamente caliente, que tiene un diámetro de 1.39×10^9 m y está, en promedio, a 1.5×10^{11} m de distancia del planeta Tierra.

Su densidad se estima alrededor de 100 veces la del agua, tiene una temperatura de cuerpo negro efectiva de 5,777 K y la temperatura en las regiones centrales interiores se estima que varía de 8×10^6 K a 40×10^6 K. Es en efecto, un reactor continuo de fusión con sus gases constituyentes.” (Duffie & Beckman, 2013)

“La radiación emitida por el sol y su relación espacial con la tierra dan lugar a una intensidad casi fija de la radiación solar fuera de la atmósfera terrestre, llamada la constante solar.

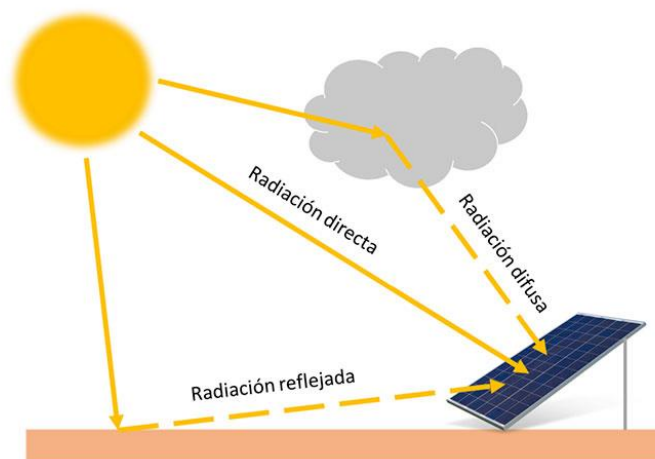
La constante solar, G_{SC} , se define como la energía del sol por unidad de tiempo recibida en un área unitaria de superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación a una distancia media entre la tierra y el sol, fuera de la atmósfera. Después de varias mediciones, el Centro Mundial de Radiación (WRC, por sus siglas en inglés) ha adoptado un valor estándar de $1,367 \text{ W/m}^2$ para la constante solar, con una incertidumbre del 1%.” (Duffie & Beckman, 2013)

3.1.1 Tipos de radiación solar

Según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), la radiación solar puede clasificarse en tres tipos, dependiendo de la forma en la que llega a la Tierra (ver imagen 3.1):

- a) Radiación solar directa: Este tipo de radiación es la que traspasa la atmósfera y alcanza la superficie de la Tierra sin haber sufrido dispersión significativa en su trayectoria. Es la radiación típica de los días soleados y la única que es efectiva en un concentrador solar.
- b) Radiación solar difusa: Es la radiación que alcanza la superficie de la Tierra tras haber sufrido múltiples desviaciones en su trayectoria, por ejemplo, por los gases presentes en la atmósfera, polvo, nubes. Es la radiación típica de los días nublados.
- c) Radiación solar reflejada: Es aquella fracción de radiación solar que es reflejada por la propia superficie terrestre, en un fenómeno conocido como efecto albedo.

Figura 3.1 Tipos de radiación solar dependiendo la forma en la que llega a la Tierra

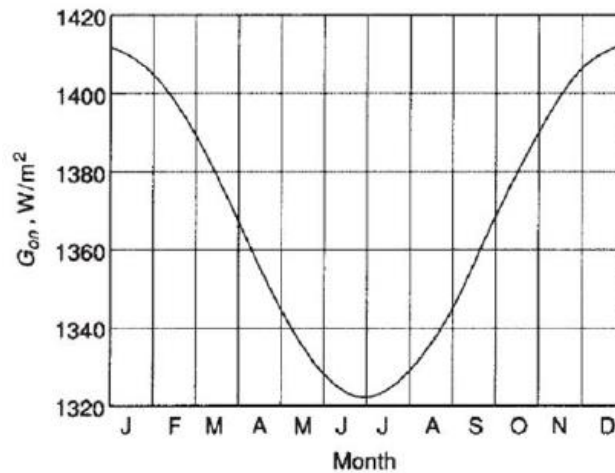


Fuente: Narva, 2020

3.1.2 Variación de la radiación solar

Según Duffie y Beckman (2013), la radiación solar no permanece uniforme todo el tiempo, por lo que se deben considerar dos fuentes de variación. En primer lugar, la variación de la radiación emitida por el sol, según el día del año, como se muestra en la figura 3.2.

Figura 3.2 Variación de la radiación solar fuera de la atmósfera terrestre



Fuente: Duffie y Beckman, 2013

Con la ecuación 2.1 se puede determinar la radiación extraterrestre incidente en el plano normal a la radiación en el n -ésimo día del año, donde G_{SC} es la constante solar definida anteriormente.

$$G_{ON} = G_{SC} \left[1 + 0.0033 \cos \frac{360 n}{365} \right] \quad (2.1)$$

En segundo lugar, está la distancia entre la tierra y el sol, que conduce a la variación del flujo de radiación extraterrestre en el intervalo de $\pm 3.3 \%$. El flujo emitido por el sol va disminuyendo con la distancia debido a que se reparte por una superficie mayor.

3.1.3 Instrumentos para medir la radiación solar

La radiación solar se mide en forma directa utilizando instrumentos que reciben el nombre de radiómetros y se puede estimar mediante modelos matemáticos que correlacionan la radiación con el brillo solar.

“Los radiómetros solares como los piranómetros o solarímetros y los pirheliómetros. Según sus características (ver Tabla 3.1), pueden servir para medir la radiación incidente global (directa más difusa), la directa (procedente del rayo solar), la difusa, la neta y el brillo solar.” (IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, s.f.)

Tabla 3.1 Instrumentos meteorológicos para medir la radiación solar

Tipo de Instrumento	Parámetro de Medida
Piranómetro	Radiación global, radiación directa, radiación difusa y radiación solar reflejada.
Piranómetro Espectral	Radiación global en intervalos espectrales de banda ancha
Pirheliómetro Absoluto	Radiación Directa
Pirheliómetro de incidencia normal	Radiación Directa (usado como patrón secundario)
Pirheliómetro (con filtros)	Radiación Directa en bandas espectrales anchas
Actinógrafo	Radiación Global
Pirgeómetro	Radiación Difusa
Radiómetro neto o piranómetro diferencial	Radiación Neta
Heliógrafo	Brillo Solar

Fuente: IDEAM, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

3.2 Colectores solares

Según Venegas Coll (2017), el colector solar es un dispositivo capaz de recibir la energía solar en forma de radiación y convertirla en otro tipo de energía.

Se pueden definir dos tipos de colectores solares:

- a) Colector solar no concentrador: Cuando el área de apertura es igual al área de recepción. En este caso la radiación solar sobre el receptor es igual a la radiación natural del sol en un área igual a la de recepción. (Venegas Coll, 2017)
- b) Colector solar concentrador: Cuando el área de apertura es mayor al área de recepción. En este caso la radiación solar sobre el receptor es mayor a la radiación natural del sol

en un área igual a la de recepción. En esta tecnología termo solar, por lo general, los receptores son espejos utilizados para concentrar la radiación solar en el absorbedor/receptor (Venegas Coll, 2017)

3.3 Concentración de la radiación solar

Según Muerza (2012), la concentración de la radiación solar se consigue utilizando una gran cantidad de espejos que pueden seguir al sol y luego concentrar su calor en un punto.

3.3.1 Tipos de concentradores solares

Según Díaz (2021) “existen muchos diseños de concentradores, pueden ser reflectores o refractores, cilíndricos o superficies de revolución, continuos o segmentados, convexos, planos o cóncavos y pueden ser cubiertos o descubiertos.”

Mientras que Leutz y Susuki (2001) señalan que “existen dos tipos de concentradores solares, en función de su diseño óptico y propiedades de imagen” (ver Tabla 3.2):

1. Concentradores formadores de imágenes.
2. Concentradores no formadores de imágenes.

Tabla 3.2 Resumen de los tipos de concentradores según su principio de óptica

Principio	Concentradores formadores de imágenes	Concentradores no formadores de imágenes
Reflexión	Cilindro parabólico, plato paraboloidal, reflectores Fresnel, reflector esférico con receptor de seguimiento, heliostato.	Concentrador parabolico compuesto, concentrador hiperboloide, concentrador de Fresnel
Refracción	Lentes de Fresnel	
Dispersión, difracción	Prisma, holograma, rejilla de difracción	
Fluorescencia		Concentradores planos fluorescentes

Fuente: Leutz y Susuki, 2001

3.3.2 Concentrador solar de Fresnel

Para Venegas Coll (2017), “el concentrador solar tipo Fresnel es un tipo de concentrador comúnmente utilizado para el aprovechamiento de la energía solar en aplicaciones a media y alta temperatura.”

Asimismo, menciona las siguientes características importantes de los concentradores de Fresnel:

- a) El receptor está siempre iluminado desde abajo, sin importar el ángulo del sol, eso es una ventaja importante para la generación directa de vapor.
- b) Su diseño óptimo ajusta cuidadosamente todos los parámetros geométricos como la altura del receptor, las distancias entre los espejos, el tamaño de los espejos, el número de espejos, etc. El diseño resultante tiene una potencia con picos térmicos más altos por unidad de área en comparación con una planta cilindro parabólico, por un factor de aproximadamente 1.5.
- c) Presenta facilidad en la limpieza de los espejos, uno de los factores más importantes para el rendimiento, costo de operación y mantenimiento.

3.4 Óptica

3.4.1 Óptica Geométrica (Formadora de imagen)

Villegas (2009) afirma que la óptica geométrica estudia los cambios de dirección que sufren los rayos luminosos al interaccionar con la materia, se ocupa solamente de cuestiones relacionadas con la propagación de la luz, por lo que su objetivo es determinar las trayectorias de la energía radiante a través de diferentes medios.

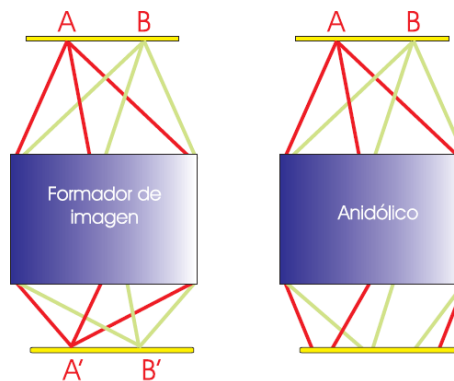
Además, Villegas (2009), expresa que los sistemas formadores de imagen están basados en un objeto y la imagen que la óptica forma de ese objeto. En este caso, el objeto es considerado un conjunto de puntos que se emiten en todas direcciones y la luz captada por el sistema óptico forma los puntos de la imagen.

3.4.2 Óptica anidólica (no formadora de imagen)

Villegas también señala que la óptica no formadora de imagen se ha desarrollado a partir de la óptica geométrica y a diferencia de los dispositivos formadores de imagen, los sistemas anidólicos no crean necesariamente una imagen del objeto (la fuente) en el plano focal.

“En la óptica anidólica en vez de un objeto se tiene una fuente de luz y en vez de una imagen se tiene un receptor donde se producirá un mapa de irradiancia proveniente de la fuente. En la Figura 3.3 se observa como en el sistema anidólico no hay una correspondencia entre puntos, esto permite optimizar la transferencia de energía por tener mayor libertad de diseño.” (Balbuena, 2011)

Figura 3.3 Sistema formador de imagen y sistema anidólico



Fuente: Balbuena, 2011

3.5 Mecanismos de transferencia de calor

La transferencia de calor de un cuerpo a otro puede darse de tres formas diferentes: conducción, convección y radiación. De Giancoli (2008), se extrae la definición de cada uno de esos mecanismos de transferencia, las cuales se describen a continuación:

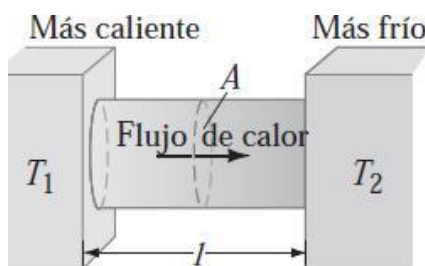
3.5.1 Conducción

La conducción de calor en muchos materiales se puede ver como un transporte mediante colisiones moleculares. Conforme un extremo del objeto se calienta, las moléculas ahí se mueven cada vez más rápido. Conforme chocan con moléculas vecinas de movimiento más lento, transfieren parte de su energía cinética a esas otras moléculas, las cuales, a la vez, transfieren energía mediante colisión a otras moléculas todavía más alejadas en el objeto. En los metales, las colisiones de los electrones libres son las principales responsables de la conducción.

La conducción de calor de un punto a otro tiene lugar sólo si hay una diferencia de temperatura entre los dos puntos. De hecho, experimentalmente se encuentra que la tasa de flujo de calor a través de una sustancia es proporcional a la diferencia en temperatura entre sus extremos.

La tasa de flujo de calor también depende del tamaño y la forma del objeto. Para investigar esto cuantitativamente, consideremos el flujo de calor a través de un cilindro uniforme, como se ilustra en la Figura 3.4:

Figura 3.4 Transferencia de calor por conducción



Fuente: Giancoli, 2008

Experimentalmente se encuentra que el flujo de calor ΔQ durante un intervalo de tiempo Δt está dado por la relación en la ecuación 3.1.

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = KA \frac{T_1 - T_2}{l} \quad (3.1)$$

Donde A es el área transversal del objeto, l es la distancia entre los dos extremos que están a las temperaturas T_1 y T_2 respectivamente y K es una constante de proporcionalidad llamada conductividad térmica, que es característica del material.” (Giancoli, 2008)

3.5.2 Convección

Según Giancoli, los líquidos y gases no son muy buenos conductores del calor, pero pueden transferirlo rápidamente por medio de la convección, que es el proceso mediante el cual el calor fluye por el movimiento de masa de las moléculas de un lugar a otro.

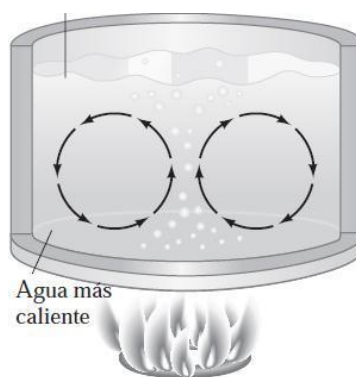
Mientras que en la conducción participan moléculas (y/o electrones) que se mueven sólo a lo largo de distancias cortas y chocan, la convección implica el movimiento de un gran número de moléculas a través de distancias grandes.

Un horno de aire forzado, en el que el aire se calienta y luego se sopla mediante un ventilador hacia una habitación, es un ejemplo de convección forzada.

También ocurre la convección natural, y un ejemplo son las corrientes oceánicas calientes o frías, como la suave Corriente del Golfo.

Cuando una olla con agua se calienta, se establecen corrientes de convección conforme el agua caliente en el fondo de la olla se eleva a causa de su densidad reducida. Esa agua caliente se sustituye con agua más fría proveniente de arriba, ver Figura 3.5.

Figura 3.5 Corrientes de convección en una olla con agua que se calienta sobre una estufa



Fuente: Giancoli, 2008

El viento es otro ejemplo de convección, y el clima en general está enormemente influido por las corrientes de aire convectivas.” (Giancoli, 2008)

3.5.3 Radiación

Como se ha visto, para que exista la transferencia de calor ya sea por convección o por conducción, se requiere de la presencia de materia como medio para transportar ese calor desde la región más caliente hacia la más fría. Pero existe un tercer tipo de transferencia de calor que ocurre sin que exista un medio en absoluto.

Toda la vida en la Tierra depende de la transferencia de energía del sol, y esta energía se transfiere a la Tierra a través de espacio vacío (o casi vacío).

Esta forma de transferencia de energía es el calor, pues la temperatura en la superficie del sol es mucho mayor (6000 K) que la de la Tierra, y se le conoce como radiación.

La radiación consiste esencialmente en ondas electromagnéticas y específicamente, la radiación del sol consiste en luz visible y muchas otras longitudes de onda a las que el ojo no es sensible, incluida la radiación infrarroja (IR) como se muestra en la Figura 3.6.

Figura 3.6 Espectro electromagnético

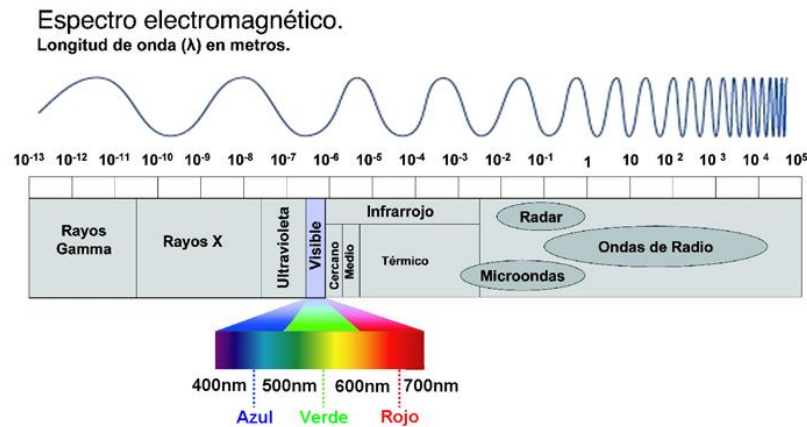


Imagen adaptada de El País, 2009.

La tasa a la que un objeto radia energía es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura Kelvin, T . Esto es, un objeto a 2,000 K, en comparación con uno a 1,000 K, radia energía a una tasa de $2^4 = 16$ veces.

La tasa de radiación también es proporcional al área A del objeto emisor, de manera que la tasa a la que la energía sale del objeto está dada por la ecuación 3.2.

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \epsilon \sigma A T^4 \quad (3.2)$$

Ésta es la ecuación de Stefan-Boltzmann, y σ es una constante universal llamada constante de Stefan-Boltzmann, que tiene el valor $5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$.

El factor ε se conoce como emisividad, es un número entre 0 y 1 que es característico de la superficie del material radiante. Las superficies muy negras, como el carbón, tienen emisividad cercana a 1, mientras que las superficies metálicas brillantes tienen emisividad cercana a cero y, por lo tanto, emiten menos radiación.

Es decir, las superficies brillantes emiten menos radiación y absorben poca de la radiación que incide sobre ellas (la mayor parte se refleja).” (Giancoli, 2008)

CAPÍTULO 4: Metodología de la investigación en el tueste de café

Con el fin de caracterizar climáticamente el lugar donde se hicieron las pruebas experimentales con el concentrador solar de Fresnel y la cámara de tostado, se muestran en la Tabla 4.1 los datos meteorológicos medidos cada día.

Lugar: Colonia Santo Domingo, Comayagüela

Departamento: Francisco Morazán

País: Honduras

Tabla 4.1 Datos meteorológicos medidos en cada prueba experimental

Fecha (dd/mm/aa)	Hora	Temperatura ambiente promedio (°C)	Rango de Irradiancia (W/m ²)	Velocidad promedio del viento (m/s)	Humedad relativa promedio (%)
4/03/22	11:08 am a 12:00M	29	1,210 – 1,274	0.6	34%
6/03/22	10:24 am a 11:30 am	30	1,190 – 1,259	0.35	36%
9/03/22	10:10 am a 11:22 am	30.5	1,209 – 1,250	0.5	38%
10/03/22	10:10 am a 11:26 am	33.5	920 – 1,241	0.35	38%
13/04/22	10:31 am a 11:14 am	31	1,173 – 1,230	0.15	30.2%
19/04/22	10:43 am a 12:30 pm	31.2	1,150 – 1,184	0.5	31.4%

Fuente: Elaboración propia

4.1 Metodología

A continuación, se muestra una serie de pasos realizados en cada prueba experimental:

1. Se pesa la muestra de café.

En cada prueba experimental se pesó 227 g de café, utilizando la balanza de la Figura 4.3.

2. Se introduce la muestra de café en la cámara de tostado.

La cámara de tostado cuenta con una compuerta para introducir los granos de café, luego se cierra y se ajusta con un tornillo para que selle bien y así evitar que al girar se salgan los granos.

3. Colocar el concentrador cóncavo hacia arriba.

Después de cada prueba experimental, el concentrador se guardaba cóncavo hacia abajo, por lo tanto, se procede a colocarlo cóncavo hacia arriba, teniendo cuidado ya que es muy pesado.

4. Instalación de piranómetro y multímetro.

Sin estar expuesto aún a la radiación solar, se instala el piranómetro de la Figura 4.4, en el espacio diseñado para éste (una placa de metal perpendicular al plano de apertura del concentrador) y se conecta al multímetro de la Figura 4.4.

5. Orientación del concentrador.

Se procede a colocar el concentrador de tal forma que los rayos solares sean perpendiculares al plano de apertura del concentrador y se conecta inmediatamente el panel solar fotovoltaico de la Figura 4.5 al motor que hace girar la cámara de tostado.

6. Registro de datos.

Cada 4 minutos se registró la temperatura en la superficie de la cámara de tostado usando el termómetro de la Figura 4.1. De igual forma, se midió la velocidad del viento y la temperatura ambiente utilizando el anemómetro de la Figura 4.2 y la irradiancia que indicaba el multímetro. Ver Anexo A.2.3

7. Procesamiento de los datos recolectados.

8. Análisis de los resultados obtenidos.

4.2 Equipo utilizado en el trabajo experimental

A continuación, se muestra el equipo utilizado en las pruebas experimentales. Si desea conocer las especificaciones de cada aparato, puede encontrarlas en el anexo A.1

Figura 4.1 Termómetro digital Infrarrojo FLUKE 62 MAX



Figura 4.2 Anemómetro de mano BTMETER BT-100-WM



Figura 4.3 Balanza digital EK6015



Figura 4.4 Medidor de irradiancia y Multímetro

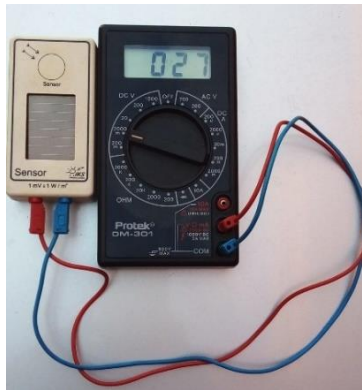
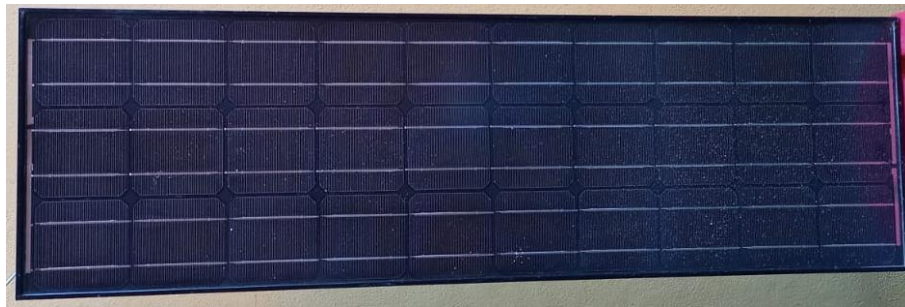


Figura 4.5 Panel Solar Fotovoltaico



4.3 Hipótesis nula

La cámara de tostado no alcanza una temperatura entre 180 °C y 240 °C, por lo tanto, el concentrador solar no se puede aplicar en el tostado de granos de café.

CAPÍTULO 5: Análisis del concentrador solar de Fresnel aplicado al tostado de café

5.1 Diseño técnico del concentrador

El concentrador solar tiene una estructura metálica en forma de paraboloide circular (ver Anexo A.2), cubierto por 46 segmentos de conos reflejantes de aluminio de alta reflectividad, como se observa en la Figura 5.1. Las especificaciones del concentrador solar de Fresnel se muestran en la tabla 5.1.

Figura 5.1 Concentrador solar de Fresnel y la tostadora de café



Los rayos al incidir en el concentrador son redireccionados hacia el volumen focal (ver Figura 5.2), el cual se estudió, diseñando el concentrador con el software Cabri 3D y luego estudiando cada rayo solar reflejado en el concentrador.

La cámara de tostado es un cilindro de hierro, como se observa en la Figura 5.1. Con el fin de aumentar la capacidad de absorción de calor, se le dio un revestimiento de color negro mate resistente a altas temperaturas. En su interior tiene cuchillas removedoras para obtener un tostado uniforme del café. Está unida a un sistema de rotación, diseñado a partir del sistema de cambios (engranajes) de las bicicletas de montaña. El engranaje principal está conectado a un motor que la hace girar a 1.11 rpm, para lograr que el café pueda tostarse uniformemente. Esta velocidad se puede graduar, de acuerdo con la radiación solar y al tipo de tueste que se requiera (medio u oscuro).

Figura 5.2 Volumen focal del Reflector de Fresnel usando el software Cabri 3D

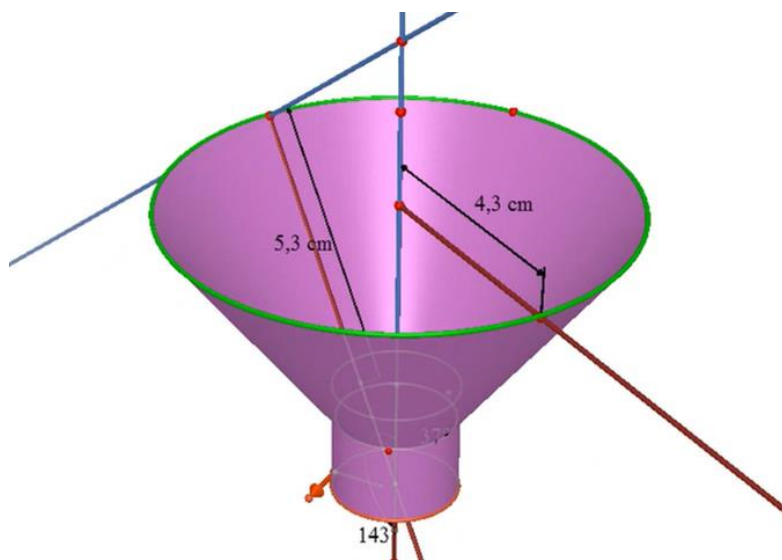


Tabla 5.1 Especificaciones del concentrador solar de Fresnel

Colector concentrador	
Forma	Paraboloide circular
Área de apertura	2.9255 m ²
Espejos de Fresnel	
Material	Aluminio altamente reflectante
Reflectividad	0.9
Espesor	0.4 mm
Número de espejos	46
Área total de los espejos	2.972 m ²
Receptor (Cámara de tostado)	
Material	Hierro con un revestimiento negro mate
Absortividad	0.97
Espesor	6.35 mm
Superficie lateral	0.2346 m ²
Longitud	0.34 m
Velocidad de rotación	1.11 rpm
Capacidad máxima	5 kg de granos de café

Fuente: Elaboración propia

5.2 Área de apertura del concentrador solar y el área del receptor

Venegas Coll (2017) señala que en los colectores solares se distinguen dos áreas que definen el funcionamiento de éste. El área de apertura, A_a , que, es la máxima área proyectada en un plano sobre la cual un colector recibe directamente la radiación.

Por otro lado, el área de recepción, A_r , es el área donde converge la radiación y en donde se encuentra el material que recibe la energía solar para convertirla en energía útil.”

5.2.1 Área de apertura del concentrador solar

El área de apertura está dada por:

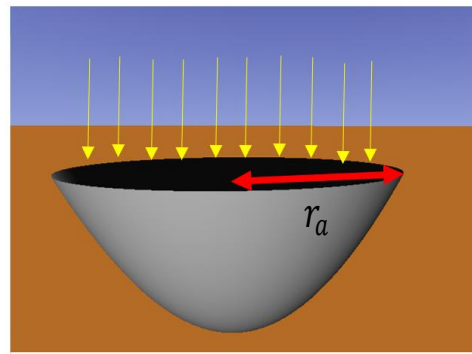
$$A_a = \pi r_a^2 \quad (5.1)$$

Donde r_a es el radio de apertura del concentrador, ver Figura 5.3.

Entonces:

$$A_a = \pi * (0.965 \text{ m})^2 = 2.9255 \text{ m}^2$$

Figura 5.3 Radio de apertura del concentrador



Fuente: Elaboración propia usando el software Tonatiuh

5.2.2 Área del receptor

El receptor (tostadora de café) es un cilindro de longitud L y perímetro p , cuya área A_r está dada por:

$$A_r = 2\pi r * L = p * L \quad (5.2)$$

El perímetro p de la cámara de tostado es 0.69 m y la longitud L es 0.34 m, por lo tanto:

$$A_r = 0.69 \text{ m} * 0.34 \text{ m} = 0.2346 \text{ m}^2$$

Nota: Cabe destacar que solo se consideró la superficie lateral del tostador y no se consideró el área de las bases, ya que éstas no reciben mucha radiación, porque la estructura que sostiene la cámara de tostado y el mecanismo de la cadena que la hace girar, interfieren en la captación de energía solar en esas zonas.

5.3 Factor de concentración geométrico

El factor de concentración geométrico es un parámetro esencial que define el comportamiento de un concentrador solar.

Según Duffie y Beckman (2013), el factor de concentración geométrico, C , se define como la relación entre el área de apertura, A_a , y el área del receptor, A_r .

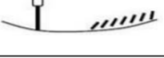
$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad (5.3)$$

La ecuación 5.3, satisface la condición de que A_r contiene los rayos solares colectados por el concentrador y reflejados por el sistema.

Con los valores de las áreas calculadas anteriormente, tenemos:

$$C = \frac{A_a}{A_r} = \frac{2.9255 \text{ m}^2}{0.2346 \text{ m}^2} = 12.47$$

Tabla 5.2 Clasificación de los colectores en función del factor de concentración

Tipo de colector	Croquis	Factor de Concentración	Rango de Temperatura alcanzada (°C)
Colector Parabólico Compuesto		$1 < C < 15$	$70 < T < 300$
Colector Cilíndrico Parabólico		$15 < C < 40$	$70 < T < 350$
Disco Parabólico		$100 < C < 1000$	$70 < T < 1500$
Torre Central		$100 < C < 1500$	$150 < T < 1500$

Fuente: Adaptado de Velasco, 2012, Diseño de concentrador solar cilíndrico parabólico para aplicaciones rurales en Paraguay.

En la Tabla 5.2 se muestran los diferentes colectores solares en función del factor o razón de concentración, así como el rango de temperaturas que se pueden alcanzar con dicho colector.

Como el concentrador solar en estudio tiene un factor de concentración de 12.47, según la Figura 5.4 está en el rango de un colector parabólico compuesto, cuyo valor está entre 1 y 15, alcanzándose temperaturas entre 70 °C y 300 °C

Con este valor del factor de concentración, nos aseguramos de que el concentrador estudiado proporciona una temperatura óptima (desde 180 °C a 240 °C) para tostar los granos de café.

5.4 Eficiencia óptica del concentrador

Según Duffie y Beckman (2013) la eficiencia óptica del concentrador está dada por:

$$\eta_{op} = \rho * \gamma * \alpha \quad (5.4)$$

Donde ρ es la reflectancia del espejo de Fresnel utilizado, γ es el factor de intercepción y α es la absorptividad del receptor.

Para Duffie y Beckman (2013), los concentradores anidólicos tienen la capacidad de reflejar toda la radiación incidente en el receptor; por lo tanto, el factor de intercepción, γ , sería 1 y la ecuación 5.4 se reduce a:

$$\eta_{op} = \rho * \alpha \quad (5.5)$$

Para el concentrador que estamos analizando, según las especificaciones de la Tabla 5.1, $\rho = 0.9$ y $\alpha = 0.97$, por lo tanto, la eficiencia óptica es:

$$\eta_{op} = \rho * \alpha = 0.9 * 0.97$$

$$\eta_{op} = 0.873$$

5.5 Pérdidas de energía

5.5.1 Pérdida de calor por radiación

Según Escudero (2006), la temperatura alcanzada por el receptor a causa de la concentración de la radiación solar reflejada por el concentrador se define como T_H , por lo que, la pérdida de energía por radiación, q_R , se presenta de la siguiente forma:

$$q_R = \varepsilon \sigma A_T (T_H^4 - T_{Cielo}^4) \quad (5.6)$$

Donde ε es la emisividad del receptor, que en este caso es $\varepsilon = 0.97$, $\sigma = 5.667 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$ es la constante de Stefan-Boltzmann, A_T es el área de la cámara de tostado y la temperatura del cielo se presenta como:

$$T_{Cielo} = 0.0552 T_A^{1.5} \quad (5.7)$$

Donde T_A es la temperatura ambiente en Kelvin.

5.5.2 Pérdida de calor por convección

Escudero (2006) define la pérdida de calor por convección de la siguiente forma:

$$q_c = h_H A_T (T_H - T_A) \quad (5.8)$$

Donde h_H es el coeficiente de convección para la transferencia de calor, A_T es el área de la cámara de tostado y T_H es la temperatura alcanzada en esta.

El coeficiente de convección h_H depende de la velocidad del viento del lugar donde se realiza el experimento; además, su cálculo está influenciado por el acabado de la superficie del receptor y la incidencia del aire.

Para superficies lisas, el coeficiente de convección para la transferencia de calor está dado por:

$$h_H = 7.120(v_{20})^{0.775} + 5.129 e^{-0.6v_{20}} \quad (5.9)$$

donde v_{20} es la velocidad del aire en m/s, a una temperatura de 293 K (20 °C), por lo tanto:

$$v_{20} = 293 \left(\frac{v}{T} \right) \quad (5.10)$$

siendo v la velocidad media del aire a una temperatura T .

Se realizó el cálculo para las dos pruebas experimentales donde se logra el mejor nivel de tueste, tanto medio como oscuro.

Los resultados del día 9 de marzo de 2022 se presentan en la Tabla 5.2 y los resultados del día 19 de abril de 2022 se presentan en la Tabla 5.3.

Se puede observar que el 9 de marzo el valor de la irradiancia fue mayor; por lo tanto, las pérdidas de energía por radiación también fueron mayores. De igual forma, la velocidad del viento fue mayor; por lo tanto, las pérdidas por convección fueron mayores.

Tabla 5.3 Pérdidas de energía del día 9 de marzo del año 2022

Hora	T_H [°C]	I [$\frac{W}{m^2}$]	v_{viento} [$\frac{m}{s}$]	T_{cielo} (K)	V_{20} (m/s)	h_H (W/m ² K)	q_R (W)	q_C (W)
10:10	56.8	1,209	1.9	291.141	1.837	13.111	59.911	82.436
10:14	106.5	1,219	0.4	291.141	0.387	7.477	174.831	134.187
10:18	145.5	1,234	0.8	291.141	0.774	9.060	302.926	245.491
10:22	157.6	1,235	1.6	291.141	1.547	12.013	350.698	359.601
10:26	181.7	1,236	0.7	291.141	0.677	8.679	458.601	308.870
10:30	188.4	1,237	1	291.141	0.967	9.808	491.817	364.485
10:34	191.8	1,238	1.1	291.141	1.064	10.178	509.236	386.352
10:38	197.4	1,239	0.9	291.141	0.870	9.436	538.771	370.568
10:42	199.9	1,239	0.7	291.141	0.677	8.679	552.302	345.926
10:46	206.4	1,240	1.1	291.141	1.064	10.178	588.499	421.214
10:50	211.6	1,240	1.6	291.141	1.547	12.013	618.537	511.783
10:54	223	1,241	1.1	291.141	1.064	10.178	687.858	460.852
10:58	226.2	1,242	0.8	292.583	0.771	9.050	706.346	414.434
11:02	227.2	1,243	0.4	292.583	0.386	7.471	712.782	343.894
11:06	227.4	1,243	2.2	292.583	2.120	14.185	714.074	653.603
11:10	233.4	1,240	1.4	292.583	1.349	11.264	753.558	534.829
11:14	234	1,245	0.9	292.583	0.867	9.425	757.585	448.847
11:18	235.4	1,250	0.9	292.583	0.867	9.425	767.035	451.942
11:22	238.9	1,250	0.9	292.583	0.867	9.425	791.006	459.681

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.4 Pérdidas de energía del día 19 de abril del año 2022

Hora	T [°C]	I [$\frac{W}{m^2}$]	v_{viento} [$\frac{m}{s}$]	T_{cielo} (K)	V_{20} (m/s)	h_H (W/m ² K)	q_R (W)	q_C (W)
10:47	108.6	1,164	0.3	291.717	0.386	7.037	180.065	129.090
10:51	124	1,167	0.2	291.717	0.290	6.559	226.952	144.018
10:55	134.5	1,169	0.3	291.717	0.193	7.037	262.211	171.845
10:59	142.3	1,170	0.2	291.717	0.290	6.559	290.229	172.175
11:03	162	1,170	0.5	291.717	0.193	7.889	368.363	243.554
11:07	163	1,171	0.3	291.717	0.483	7.037	372.623	218.892
11:11	166.8	1,176	0.4	291.717	0.290	7.475	389.083	239.185
11:15	170	1,180	0.3	291.717	0.386	7.037	403.279	230.447
11:19	181	1,183	0.3	291.717	0.290	7.037	454.478	248.605
11:24	184	1,184	0.3	291.717	0.290	7.032	467.241	253.396
11:30	186	1,184	0.3	293.161	0.289	7.032	477.153	256.696
11:34	160	1,150	1.7	293.161	0.289	12.350	358.067	375.498
11:38	169	1,150	0.3	293.161	1.636	7.032	396.948	228.650
11:42	172	1,160	0.6	293.161	0.289	8.280	410.447	275.043
11:46	185	1,165	0.5	293.161	0.578	7.882	472.181	285.879
11:50	186	1,180	0.2	293.161	0.481	6.552	477.153	239.172
11:54	187.5	1,150	0.3	293.161	0.192	7.028	482.779	259.006
11:58	189	1,150	0.5	294.607	0.288	7.876	490.372	293.029
12:02	190	1,151	0.5	294.607	0.480	7.876	495.475	294.877
12:06	191	1,151	0.2	294.607	0.480	6.552	500.612	246.857
12:11	195	1,152	0.3	294.607	0.192	7.028	521.492	271.371
12:18	198	1,153	0.2	294.607	0.288	6.552	537.508	257.617
12:22	200.5	1,158	0.3	294.607	0.192	7.028	551.090	280.439
12:26	205	1,159	0.5	294.607	0.288	7.876	576.086	322.591
12:30	206	1,159	0.5	294.607	0.480	7.876	581.737	324.439

Fuente: Elaboración propia

5.6 Potencia y eficiencia del concentrador solar de Fresnel

Según Pérez Escudero (2006), considerando que los rayos del sol son paralelos al eje del concentrador solar de Fresnel, podemos calcular la velocidad de transferencia de calor o potencia térmica de entrada (P_e) con la ecuación 5.11.

$$P_e = I A_a \quad (5.11)$$

Donde I es la irradiancia solar en W/m^2 y A_a es el área de apertura del concentrador en m^2 , calculada con la ecuación 5.1.

Considerando que la potencia solar concentrada en el receptor está dada por la radiación solar reflejada por el colector en la tostadora, se puede calcular la potencia absorbida por la cámara de tostado, P_a , utilizando la ecuación 5.12.

$$P_a = P_e \eta_{\text{op}} \quad (5.12)$$

Donde P_e es la potencia térmica de entrada del concentrador y η_{op} es la eficiencia óptica del concentrador, calculada en la sección 4.4.

Así mismo, según el análisis del concentrador de Perez Escudero (2006), despreciando las pérdidas del colector, el balance energético de la cámara de tostado está dado por la ecuación 5.13.

$$P_u = P_a - q_R - q_C \quad (5.13)$$

Donde P_u es la potencia útil en la cámara de tostado, P_a es la potencia absorbida por esa, q_R es la pérdida de calor por radiación y q_C es la pérdida de calor por convección.

Luego, definimos la eficiencia instantánea del concentrador como la relación entre la potencia útil en la cámara de tostado y la potencia de entrada del concentrador tal y como se expresa en la ecuación 5.14.

$$\eta = \frac{P_u}{P_e} \quad (5.14)$$

Los valores calculados de la potencia y eficiencia del concentrador solar de Fresnel aplicado en el tostado de café se muestran en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5 Potencia y eficiencia del concentrador para el día 9 de marzo de 2022

I (W/m²)	P_e (W)	P_a (W)	q_R (W)	q_C (W)	P_u (W)	η	% η
1,240	3,277.072	2,801.897	588.499	421.214	1,792.183	0.547	54.69
1,240	3,277.072	2,801.897	618.537	511.783	1,671.576	0.510	51.01
1,241	3,279.715	2,804.156	687.858	460.852	1,655.446	0.505	50.48
1,242	3,282.358	2,806.416	706.346	414.434	1,685.636	0.514	51.35
1,243	3,285.000	2,808.675	712.782	343.894	1,751.999	0.533	53.33
1,243	3,285.000	2,808.675	714.074	653.603	1,440.998	0.439	43.87
1,240	3,277.072	2,801.897	753.558	534.829	1,513.510	0.462	46.18
1,245	3,290.286	2,813.195	757.585	448.847	1,606.763	0.488	48.83
1,250	3,303.500	2,824.493	767.035	451.942	1,605.515	0.486	48.60
1,250	3,303.500	2,824.493	791.006	459.681	1,573.805	0.476	47.64

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la Tabla 5.5, la potencia útil media fue de 1,629.7 W y la eficiencia instantánea promedio del concentrador fue de 49.03%.

En la Tabla 5.6 se muestran los datos de algunos concentradores solares que han sido estudiados en diversos lugares y que presentan las mayores eficiencias, por lo que la eficiencia obtenida utilizando el prototipo construido para este proyecto de tesis es bastante aceptable.

Tabla 5.6 Eficiencias promedio de algunos concentradores solares

Tipo de concentrador solar	Eficiencia promedio	Fuente de publicación	País	Fecha
Cilíndrico parabólico	27%	Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann de Tacna	Perú	2013
Cilíndrico parabólico	30%	Universidad Nacional de Itapúa	Argentina	2018
Disco parabólico	39,6%	Universidad del Quindío	Colombia	2021
Disco parabólico	49%	TECCIENCIA	Colombia	2013

Fuente: Elaboración propia con información de los diversos proyectos

CAPÍTULO 6: Resultados y discusión del café tostado usando el concentrador solar de Fresnel

6.1 Pérdida de peso del café tostado (pérdida de humedad)

Durante el proceso de torrefacción se extrae un porcentaje de humedad del grano de café, por lo tanto, éste pierde peso.

En la Tabla 6.1 se muestran los parámetros medidos en las seis pruebas experimentales, donde I es la irradiancia, T es la temperatura en la cámara de tostado, v_{viento} es la velocidad del viento, t_{tueste} es el tiempo de tueste y $\% W_{perdido}$ representa el porcentaje de peso perdido.

Se identifican resaltados en color anaranjado los dos tuestes de mejor calidad que se obtuvieron en el trabajo experimental.

De la misma forma, en la Tabla 6.1 se puede observar que el día 6 de marzo se perdió 26.11% del peso. Lo ideal es que el peso perdido sea menor del 24%, eso nos indica que ese café estuvo tostándose más tiempo de lo que necesitaba y el problema es que según Perfect Daily Grind, (2020), “un tueste largo o a temperatura demasiado alta puede disminuir significativamente el dulzor del perfil final.”

Tabla 6.1 Comparación de la pérdida de peso de varias muestras

Fecha (dd/mm/aa)	I $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	T [°C]	v_{viento} $\left[\frac{m}{s}\right]$	t_{tueste} [min]	$\%W_{perdido}$	Nivel de tueste
4/03/22	1,210 – 1,274	76.5 – 226.6	0.1 – 1.1	52	18.23%	Medio
6/03/22	1,190 – 1,259	92.1 - 242	0.1 – 0.6	66	26.11%	Oscuro
9/03/22	1,209 – 1,250	56.8 - 236	0.1 – 0.9	74	24.04%	Oscuro
10/03/22	920 – 1,241	87 - 241	0.1 – 0.6	72	31.21%	Oscuro
13/04/22	1,173 – 1,230	141.1- 203	0.1 – 0.2	43	14.07%	Medio
19/04/22	1,150 – 1,184	45 - 206	0.1 – 0.9	107	19.47%	Medio

Fuente: Elaboración propia

6.2 Curvas de tostado

Según Perfect Daily Grind (2020), “llevar un control de las variables que influyen en el tueste de café puede proporcionar a los tostadores información valiosa sobre el funcionamiento de este proceso. Dado que el calor es un elemento importante durante el tueste, la temperatura es una variable que es importante analizar. Es por eso que crear una curva de tueste para llevar un registro de estas temperaturas puede ayudar a los tostadores a predecir con mayor exactitud el resultado de un tueste.”

“A menudo, una curva de tueste se utiliza para crear una curva de referencia. Seguir esta referencia puede ayudar a los tostadores a recrear el perfil de tueste deseado, al hacer coincidir las temperaturas y tiempos del tueste en curso con las temperaturas y tiempos en la referencia” (Perfect Daily Grind, 2020).

Se tiene que, aproximadamente a los 150 °C se comienza a sentir un aroma a semillas tostadas, y a partir de los 180 °C se siente el olor característico del café y es en ese instante, donde se inicia el oscurecimiento del grano de café.

El café pasa por dos “cracks” en el proceso de tueste, los tuestes claros a medianos terminarán entre medio de uno de los dos cracks. Los tuestes oscuros generalmente se tostarán pasado el segundo crack. En este proyecto se logró alcanzar un tueste nivel medio y un tueste nivel oscuro.

6.2.1 Curva de tostado para un tueste medio

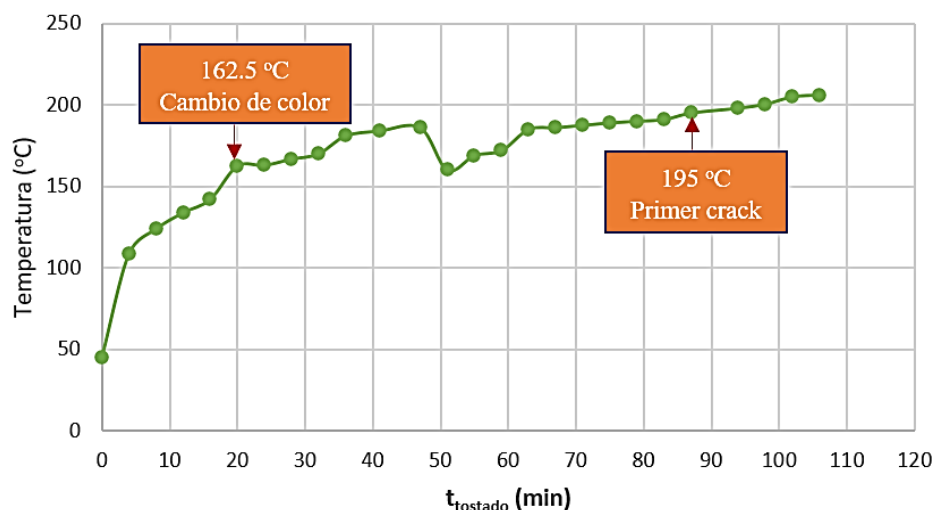
En la Tabla 6.2 se muestra un resumen de los parámetros del día 19 de abril de 2022 y en la Figura 6.1 se muestra la curva de tostado para un tueste nivel medio.

Tabla 6.2 Parámetros del día 19 de abril de 2022

I $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	T $[^{\circ}C]$	v_{viento} $\left[\frac{m}{s}\right]$	t_{tueste} [min]	$\%W_{perdido}$	Nivel de tueste
1,150 - 1,184	45 - 206	0.1 - 0.9	107	19.47%	Medio

Fuente: Elaboración propia

Figura 6.1 Curva de tostado de un tueste medio



Fuente: Elaboración propia

En este tueste solo se escuchó el primer crack, que sucede cuando los granos de café se dilatan y se abren debido al aumento de la temperatura y de la presión, proceso mediante el cual se libera el vapor y el dióxido de carbono atrapados en su interior. Por eso se logró un tueste de nivel medio.

6.2.2 Curva de tostado para un tueste oscuro

En la Tabla 6.3 se muestra un resumen de los parámetros del día 9 de marzo de 2022 y en la Figura 6.2 se muestra la curva de tostado para un tueste nivel oscuro.

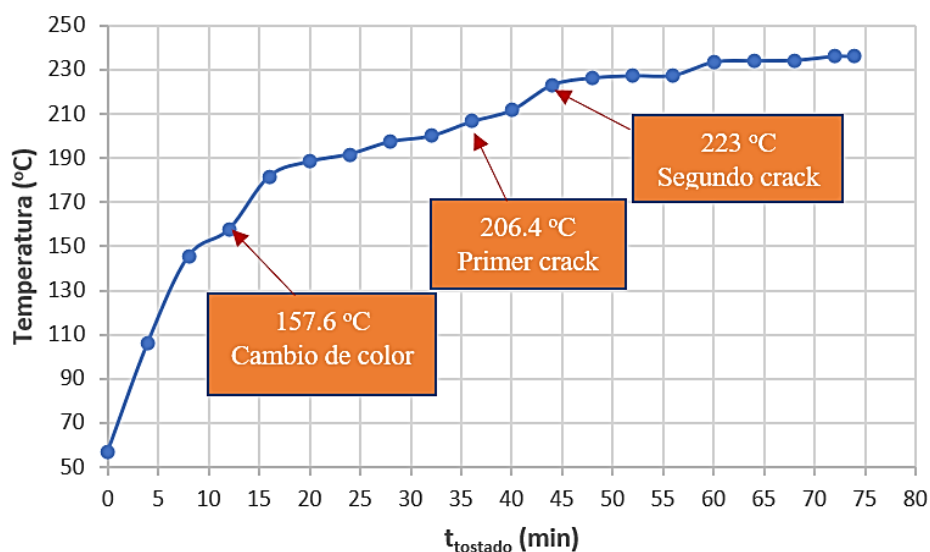
Tabla 6.3 Parámetros del día 9 de marzo de 2022

I $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	T $[^{\circ}C]$	v_{viento} $\left[\frac{m}{s}\right]$	t_{tueste} [min]	$\%W_{\text{perdido}}$	Nivel de tueste
1,209 - 1,250	56.8 - 236	0.1 - 0.9	74	24.04%	Oscuro

Fuente: Elaboración propia

Para el nivel de tueste oscuro si fue necesario llegar al segundo crack. En el minuto 36 se escuchó el primero, justo cuando alcanzó 206 °C y en el minuto 44 se escuchó el segundo, cuando la temperatura en la cámara de tostado era de 223 °C.

Figura 6.2 Curva de tostado de un tueste oscuro



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 6.2 se puede observar que al minuto 60 la curva de tostado empieza a aplanarse, es por eso, que lo ideal en el tueste oscuro es escuchar el segundo crack y terminar el proceso de tostado. Ya que, si se deja más tiempo el grano de café pierde aroma, desprende sus aceites y su gusto es a grano quemado.

6.3 Resultados del tueste

Se realizaron trece pruebas experimentales con el concentrador solar, de las cuáles solo en seis ocasiones se logró tostar los granos de café. Debido a que en algunas pruebas la radiación solar fue muy baja o la velocidad del viento era muy fuerte y no permitía que la temperatura en la cámara de tostado subiera y alcanzara la temperatura deseada. En otras ocasiones, se suspendió el proceso de tueste porque las nubes cubrieron el disco solar por mucho tiempo.

En siete pruebas realizadas no se alcanzó la temperatura óptima para el proceso de torrefacción (180 °C a 240 °C); solo se logró que el grano cambiara de color y perdiera humedad.

En la figura 6.3 se observa la muestra de café que no alcanzó la temperatura de torrefacción.

Figura 6.3 Muestra de café del día 13 de abril a que no alcanzó los 180°C



Fuente: Elaboración propia

6.3.1 Resultados experimentales

En este análisis no se incluyen las pruebas que no lograron alcanzar más de 180 °C, que es la temperatura en la cual empieza a sentirse el olor característico del café.

Prueba experimental #1: realizada el 4 de marzo de 2022

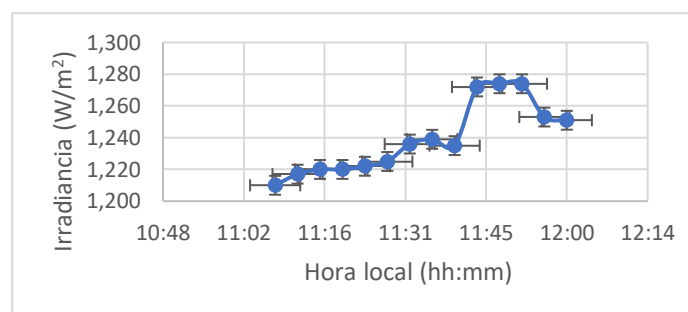
Tabla 6.4 Temperatura, irradiancia y velocidad del viento

Hora	T (°C)	I (W/m ²)	V _{viento} (m/s)
11:08	76.5	1,210	1.1 - 2.2
11:12	100	1,217	0.6 - 2.4
11:16	121	1,220	0.2 - 1.1
11:20	130.9	1,220	0.3 - 1.1
11:24	141.6	1,222	0.1 - 1.4
11:28	144.1	1,225	0.4 - 1.4
11:32	161.1	1,236	0.1 - 2
11:36	184	1,239	0.3 - 2
11:40	186.5	1,235	0.1 - 4.2
11:44	191.5	1,272	0.1 - 2.1
11:48	196.5	1,274	0.1 - 1.1
11:52	206.4	1,274	0.1 - 0.4
11:56	212.6	1,253	0.3 - 0.4
12:00	226.6	1,251	0.1 - 1.2



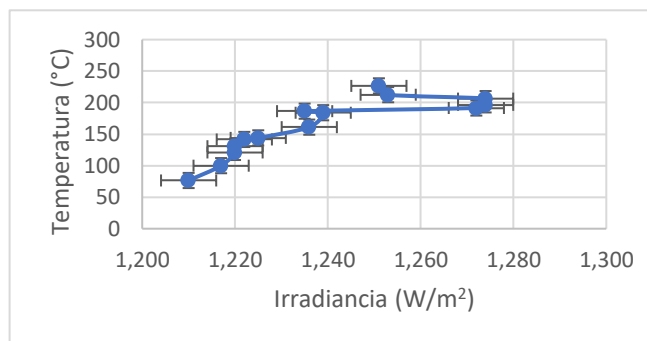
Figura 6.4 Granos de café con nivel de tueste medio

Gráfica 6.1 Irradiancia en función de la hora local



Fuente: Elaboración propia usando Excel

Gráfica 6.2 Temperatura alcanzada en la cámara de tostado, en función de la Irradiancia



Fuente: Elaboración propia usando Excel

Discusión: En la Gráfica 6.1 se puede observar el descenso en la curva de irradiancia a las 11:40 am y a las 11:56 am, a causa de que una nube tapó el disco solar.

Debido a las condiciones climatológicas, se suspendió el proceso de tueste a las 12:00 m. Se logró un tueste medio, como se puede observar en la Figura 6.4, ya que solo se alcanzó a escuchar el primer crack a las 11:52 am.

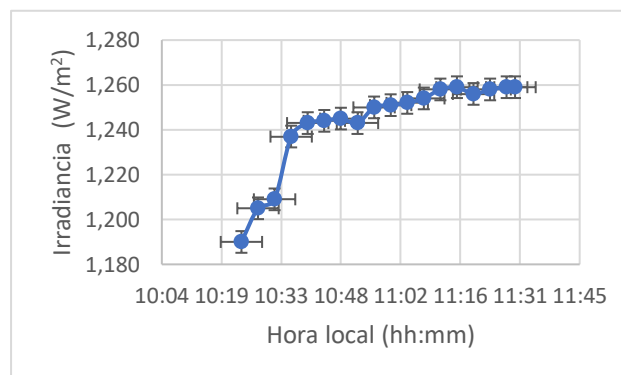
Tabla 6.5 Temperatura, irradiancia y velocidad del viento

Hora	T (°C)	I (W/m ²)	V _{viento} (m/s)
10:24	92.1	1,190	0.1 - 0.9
10:28	129.4	1,205	0.1 - 0.6
10:32	145.6	1,209	0.1 - 0.6
10:36	161.6	1,237	0.1 - 1.4
10:40	174.9	1,243	0.1 - 1.4
10:44	184	1,244	0 - 0.1
10:48	185.1	1,245	0.1 - 0.5
10:52	187	1,243	0 - 0.1
10:56	189.5	1,250	0.1 - 0.6
11:00	203.1	1,251	0.1 - 0.6
11:04	216	1,252	0.1 - 0.6
11:08	221.5	1,254	0.1 - 0.9
11:12	225.2	1,258	0.1 - 0.6
11:16	229.5	1,259	0.1 - 1.6
11:20	235	1,256	0.1 - 0.6
11:24	239.9	1,258	0.1 - 1.1
11:28	241	1,259	0.1 - 1.1
11:30	242	1,259	0.1 - 1.1



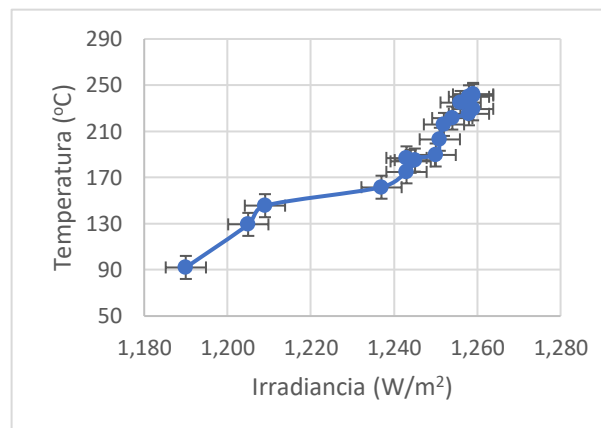
Figura 6.5 Granos de café con nivel de tueste oscuro

Gráfica 6.3 Irradiancia en función de la hora local



Fuente: Elaboración propia usando Excel

Gráfica 6.4 Temperatura alcanzada en la cámara de tostado, en función de la Irradiancia



Fuente: Elaboración propia usando Excel

Discusión: Esta muestra de café se mantuvo 66 minutos en la cámara de tostado (como indica la Tabla 6.5), si comparamos los resultados con los del día 4 marzo (Prueba experimental #1), esto es, casi el doble del tiempo. Por lo tanto, a pesar de que los valores de irradiancia eran similares, la temperatura alcanzada fue mayor y por eso se logró un tueste oscuro, como lo muestra la Figura 6.5. En este caso el café experimentó una pérdida de peso del 26.11 % y lo conveniente es una pérdida entre 12% y 23%.

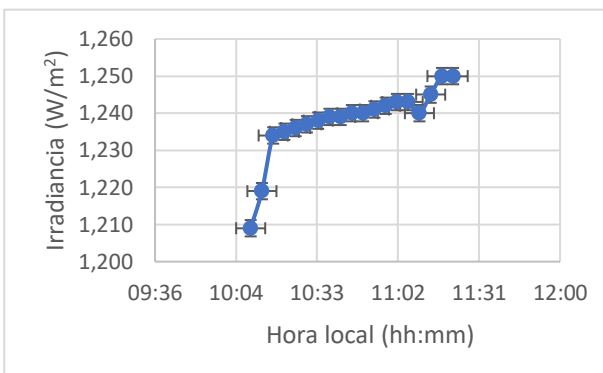
Tabla 6.6 Temperatura, irradiancia y velocidad del viento

Hora	T (°C)	I (W/m ²)	V _{viento} (m/s)
10:10	56.8	1,209	0.7 – 1.9
10:14	106.5	1,219	0.1 – 0.4
10:18	145.5	1,234	0.1 - 0.8
10:22	157.6	1,235	0.1 - 1.6
10:26	181.7	1,236	0.1 - 0.7
10:30	188.4	1,237	0.1 – 1.1
10:34	191.8	1,238	0.1 – 0.9
10:38	197.4	1,239	0.1 – 0.7
10:42	199.9	1,239	0.1 – 1.1
10:46	206.4	1,240	0.6 – 1.1
10:50	211.6	1,240	0.4 – 1.6
10:54	223	1,241	0.4 – 1.1
10:58	226.2	1,242	0.1 – 0.8
11:02	227.2	1,243	0.1 – 0.4
11:06	227.4	1,243	0.1 – 2.2
11:10	233.4	1,240	0.1 – 1.4
11:14	234	1,245	0.3 - 0.9
11:18	235.4	1,250	0.1 – 0.9
11:22	238.9	1,250	0.1 – 0.9



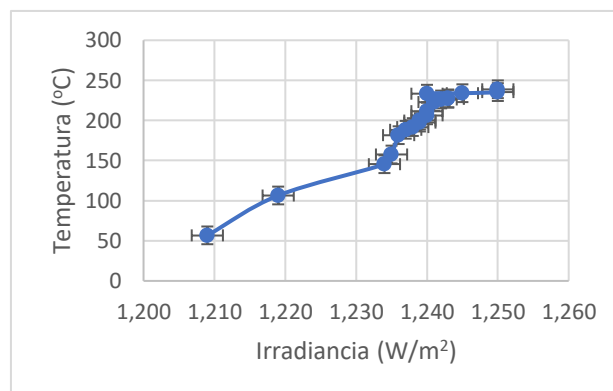
Figura 6.6 Café con nivel de tueste oscuro

Gráfica 6.5 Irradiancia en función de la hora local



Fuente: Elaboración propia usando Excel

Gráfica 6.6 Temperatura alcanzada en la cámara de tostado, en función de la Irradiancia



Fuente: Elaboración propia usando Excel

Discusión: En la Gráfica 6.5 se puede observar un descenso de temperatura a las 11:10 am, a causa de que una nube tapó el disco solar y el reflector dejó de recibir radiación directa. Esta muestra de café estuvo más tiempo que la del 6 de marzo (Prueba experimental #2), pero como la temperatura que alcanzó la cámara de tostado fue menor, el tueste fue menos oscuro. Se puede considerar que el color de los granos de café de la figura 6.6 es el indicado cuando queremos obtener un tueste oscuro.

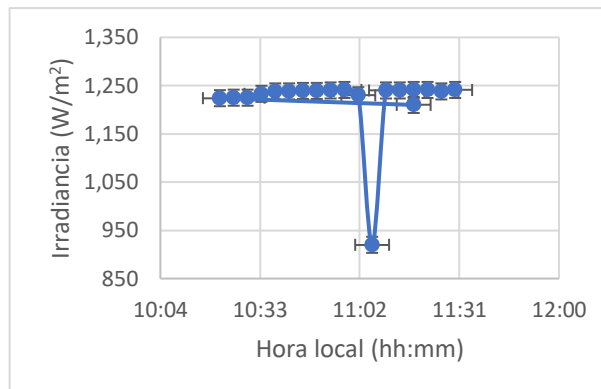
Tabla 6.7 Temperatura, irradiancia y velocidad del viento

Hora	T (°C)	I (W/m ²)	V _{viento} (m/s)
11:18	87	1,210	1.1 – 1.4
10:22	123	1,224	0.1 - 0.5
10:26	147	1,225	0.1 - 0.4
10:30	161.5	1,225	0.1 - 0.4
10:34	172.3	1,233	0.1 - 0.4
10:38	186.7	1,238	0.1 - 0.6
10:42	194.2	1,238	0.1 - 0.4
10:46	202.4	1,239	0.1 - 0.4
10:50	210.4	1,239	0.1 - 0.6
10:54	220.7	1,240	0.1 - 0.9
10:58	229.1	1,241	0.1 - 0.2
11:02	224.1	1,230	0.1 - 0.9
11:06	220.9	920	0.1 - 0.7
11:10	212.4	1,240	0.1 - 0.9
11:14	236	1,240	0.1 - 0.6
11:18	238	1,241	0.1 - 0.8
11:22	240.2	1,241	0.1 - 1.1
11:26	238.5	1,238	0.1 - 0.8
11:30	241	1,241	0.1 - 0.8



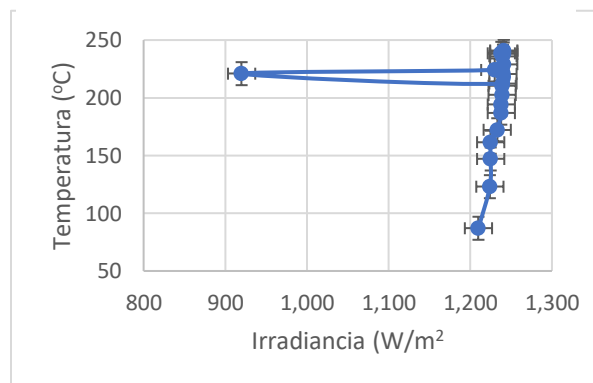
Figura 6.7 Café molido con nivel de tueste oscuro

Gráfica 6.7 Irradiancia en función de la hora local



Fuente: Elaboración propia usando Excel

Gráfica 6.8 Temperatura alcanzada en la cámara de tostado, en función de la Irradiancia



Fuente: Elaboración propia usando Excel

Discusión: Durante este experimento, se alcanzó una temperatura máxima de 241°C como se muestra en la Tabla 6.7 y se logró un tostado oscuro, ver Figura 6.7. Este día se dejó mucho tiempo después del segundo crack, por lo tanto, el nivel de tueste fue muy oscuro y eso puede afectar en el sabor del café, dando un sabor amargo. A las 11:06 am una nube tapó el disco solar por 8 minutos, lo que provocó una disminución en la radiación y, por ende, en la temperatura, pero una vez que el cielo se despejó, la temperatura se volvió a incrementar.

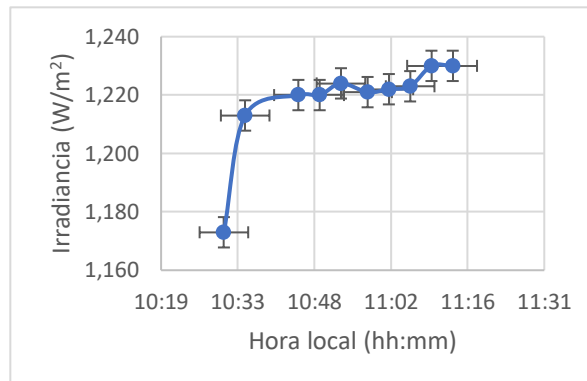
Tabla 6.8 Temperatura, irradiancia y velocidad del viento

Hora	T (°C)	I (W/m ²)	V _{viento} (m/s)
10:31	141.1	1,173	0.1 – 1.2
10:35	147.3	1,213	0.1 – 1.4
10:45	165.5	1,220	0.1 - 0.2
10:49	171	1,220	0.1 - 0.2
10:53	187	1,224	0.1 - 0.2
10:58	198.5	1,221	0.1 - 0.2
11:02	200	1,222	0.1 - 1.2
11:06	200.5	1,223	0.2 - 0.5
11:10	202	1,230	0.1 -0.9
11:14	203	1,230	0.1 - 0.4



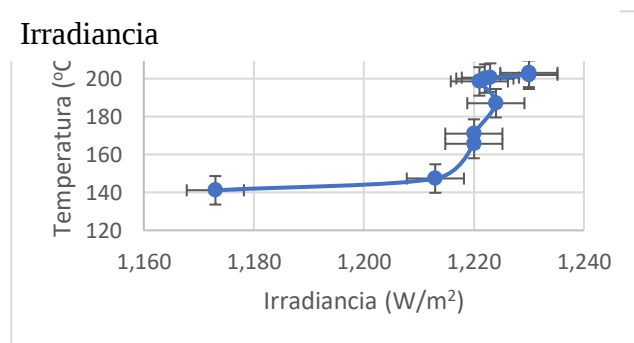
Figura 6.8 Café con nivel de tueste medio, no uniforme

Gráfica 6.9 Irradiancia en función de la hora local



Fuente: Elaboración propia usando Excel

Gráfica 6.10 Temperatura alcanzada en la cámara de tostado, en función de la Irradiancia



Fuente: Elaboración propia usando Excel

Discusión: Este día se dañó la cadena que hace girar la cámara de tostado, lo que provocó que dejaba de girar por unos minutos, por lo que se suspendió el proceso y se obtuvo un tostado incompleto (la temperatura solo llegó a 203 °C, como se observa en la Tabla 6.8), pero además de eso, en la Figura 6.8 se observa que el tostado no fue uniforme, confirmando la importancia de que la cámara de tostado se mantenga rotando continuamente durante todo el proceso.

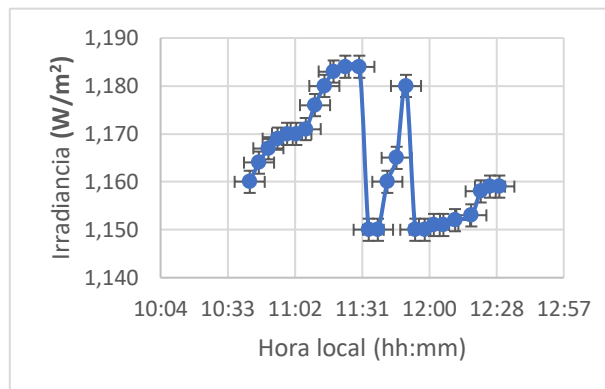
Tabla 6.9 Temperatura, irradiancia y velocidad del viento

Hora	T (°C)	I (W/m ²)	V _{viento} (m/s)
10:43	45	1,160	0.1 – 0.6
10:47	108.6	1,164	0.1 – 0.4
10:51	124	1,167	0.1 – 0.2
10:55	134.5	1,169	0.1 – 0.4
10:59	142.3	1,170	0.1 - 0.3
11:03	162	1,170	0.1 - 0.8
11:07	163	1,171	0.1 - 0.5
11:11	166.8	1,176	0.1 - 0.6
11:15	170	1,180	0.1 - 0.4
11:19	181	1,183	0.1 - 0.2
11:24	184	1,184	0.1 - 0.4
11:30	186	1,184	0.1 - 0.4
11:34	160	1,150	0.1 - 3.2
11:38	169	1,150	0.1 - 0.4
11:42	172	1,160	0.1 – 1.1
11:46	185	1,165	0.1 - 0.8
11:50	186	1,180	0.1 - 0.3
11:54	187.5	1,150	0.1 - 0.4
11:58	189	1,150	0.1 - 0.9
12:02	190	1,151	0.1 - 0.9
12:06	191	1,151	0.1 - 0.2
12:11	195	1,152	0.1 - 0.4
12:18	198	1,153	0.1 - 0.4
12:22	200.5	1,158	0.1 - 0.5
12:26	205	1,159	0.1 - 0.9
12:30	206	1,159	0.1 - 0.4



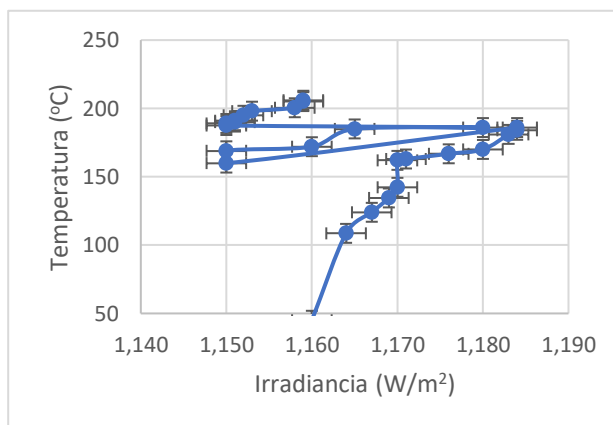
Figura 6.9 Café con nivel de tueste medio

Gráfica 6.11 Irradiancia en función de la hora local



Fuente: Elaboración propia usando Excel

Gráfica 6.12 Temperatura alcanzada en la cámara de tostado, en función de la Irradiancia



Fuente: Elaboración propia usando Excel

Discusión: Al analizar los resultados obtenidos este día, se observa la influencia que tiene la irradiancia en el tiempo de tostado del café. En este caso, el tueste medio se logró en un tiempo mayor que el tueste oscuro, porque ese día había mucha bruma como consecuencia de un incendio forestal y, por ende, la radiación fue menos intensa, como se puede ver en la gráfica 6.11. Esto ocasionó que la temperatura máxima alcanzada fuera de 206 °C, como se observa en la Tabla 6.9 y en la Gráfica 6.12.

En cambio, el día que se logró el tueste oscuro (9 de marzo de 2022), la temperatura máxima alcanzada fue de 238.9 °C, la radiación era más intensa y, por ende, el tiempo de tostado fue menor.

6.3.2 Análisis de los resultados

6.3.2.1 Zona de torrefacción:

- a) Aproximadamente a partir de los 180 °C se sintió el olor característico del café.
- b) De 180 °C a 240 °C el aroma era más intenso y el grano se iba oscureciendo.

Para una mejor comprensión de las etapas del proceso de torrefacción, se elaboró la Figura 6.10 con muestras reales obtenidas en el proceso.

Figura 6.10 Proceso de torrefacción con muestras de café



Fuente: Elaboración propia

6.3.2.2 Cambios producidos en el grano de café durante el proceso de tueste:

- Su peso disminuyó por la pérdida de humedad (lo ideal es entre 12% y 23%), como se puede observar en la Tabla 6.1.
- Se pudo observar que su volumen aumentó. En la Figura 6.11 se muestra una ilustración de ese aumento.
- Presentó exudación brillante en la superficie y se volvió oscuro.

Figura 6.11 Ejemplo del aumento en el volumen que experimentan los granos de café en el proceso de tueste



Fuente: Elaboración propia

6.3.2.3 Influencia de la radiación solar en el proceso de tueste de café

a) Influencia de la radiación solar en la temperatura de la cámara de tostado.

En la Tabla 6.7 se observa que el día 10 de marzo a las 10:58 am, la radiación solar era de 1,241 W/m², luego a las 11:02 am una nube cubrió el disco solar y la radiación bajó a 1,230 w/m²; como consecuencia, la temperatura en la cámara de tostado descendió de 229.1 °C a 224.1 °C. Luego, a las 11:06 am la radiación había bajado a 920 W/m², por lo que, la temperatura siguió disminuyendo hasta llegar a un valor de 220.9 °C.

Al retirarse la nube, la temperatura comenzó a incrementarse de nuevo. Confirmando que la radiación directa es necesaria en este tipo de proyectos y que la irradiancia está directamente relacionada con la temperatura en la cámara de tostado como podemos comprobar en el análisis estadístico del anexo A.6

b) Influencia de la radiación en el tiempo de tueste.

En la Tabla 6.1 se muestra una comparación de las seis pruebas experimentales, donde se puede observar que el tueste medio del día 19 de abril tardó 74 minutos; en cambio, el tueste oscuro del día 9 de marzo tardó 107 minutos. Esto es debido a que la radiación solar era menor y por eso el tiempo de tostado fue mayor.

CAPÍTULO 7: Uso de Redes Neuronales Artificiales para estimar las temperaturas en la cámara de tostado

En este capítulo se muestra la metodología y resultados de la estimación de temperaturas del concentrador solar de Fresnel con el modelo de Redes Neuronales (NN, por sus siglas en inglés). Para ello, se considera como entrada la irradiancia y dos o tres salidas, que son las temperaturas tomadas en la cámara de tostado.

7.1 Redes Neuronales Artificiales

En su artículo “Uso de redes neuronales para la obtención de imágenes termográficas en el absorbedor de un concentrador solar de Fresnel de doble reflexión, a partir de los registros de temperatura en el absorbedor”, Flores, Serrano y Cadena (2021) nos brindan el siguiente resumen sobre Redes neuronales:

Las redes neuronales artificiales (RNA) son objetos de programación que imitan el funcionamiento de las neuronas biológicas. Las RNA, al interconectarlas en paralelo y con una organización jerárquica que les permite interactuar con el entorno y el correspondiente entrenamiento, tienen capacidad de procesar información y proporcionar respuestas de acuerdo con los estímulos externos que recibe.

Las RNA, por si solas, se pueden utilizar para resolver problemas; además, se pueden combinar con otros métodos para resolver diferentes tareas. Se utilizan, por ejemplo, en física, matemática, neuro ciencias, ingeniería, estadística, y computación, se pueden usar en diversas aplicaciones como modelado, reconocimiento de patrones, análisis de redes temporales, control, también las podemos usar para predecir algunos parámetros como la radiación solar.

Las redes neuronales artificiales son conexiones entre elementos llamados neuronas, unidas por una serie de pesos (sinápticos), fundamentadas en las redes neuronales biológicas que se encuentran en el cerebro.

El perceptrón, ver imagen 7.1, es la unidad básica de una red neuronal, basada en una neurona biológica y consta de un nodo en el cual se encuentra una función de activación que por lo

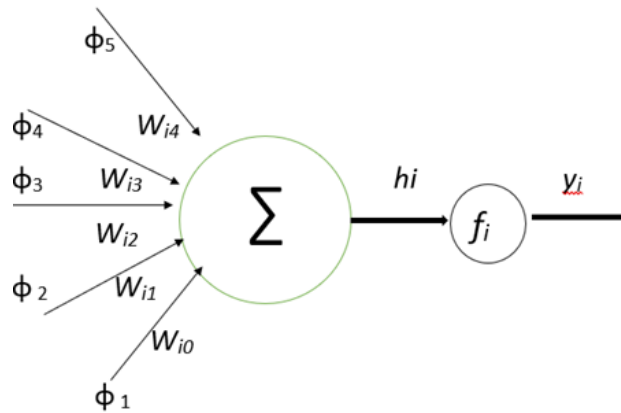
general es una función no lineal, la cual tiene varias entradas y una salida además de una entrada de bias.

El perceptrón multicapa consiste en organizar las unidades en capas dejando a cada unidad tomar como entradas las salidas de unidades en la capa previa o entradas externas.

Por lo general, un perceptrón multicapa está formado por las siguientes capas:

1. Capa de entrada
2. Capa oculta
3. Capa de salida

Figura 7.1 Perceptrón multicapas



Fuente: Uso de redes neuronales para la obtención de imágenes termográficas en el absorbedor de un concentrador solar de Fresnel de doble reflexión, a partir de los registros de temperatura en el absorbedor, Flores, Serrano y Cadena (2021)

Las ϕ_i son las señales de entrada, las W_{ij} son los pesos sinápticos de la red neuronal de la capa de entrada, W_{i0} es el peso del Bias de entrada, Σ es la unión sumadora, h_i son los pesos de la capa oculta (neuronas principales), f_i es la función de activación y y_i es la salida.

La salida de un perceptrón multicapa está dada por la Ecuación 7.1.

$$y_i = f_i(h) = f_i(\sum_{j=1}^n W_{ij} + W_{i0}) \quad (7.1)$$

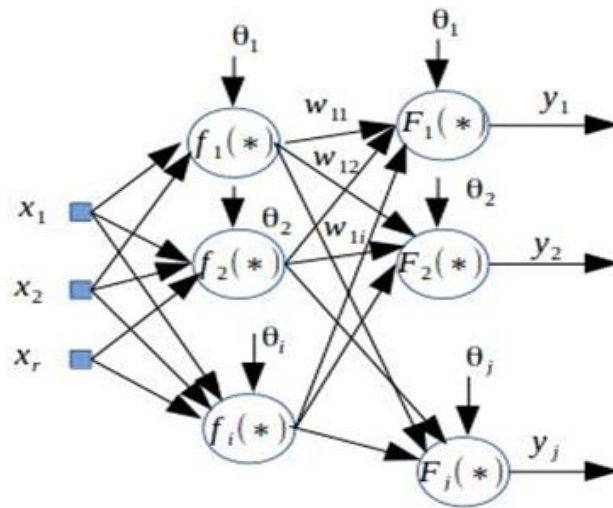
La función de activación actúa como el soma de una neurona biológica. Por lo general, está representada por una función no lineal lo que les da a las redes neuronales la propiedad de representar la dinámica no lineal de un sistema.

Dentro de las funciones de activación que se utilizan con más frecuencia son:

- Sigmoidal
- Tangente hiperbólica
- Signo

La arquitectura general para el cálculo de las temperaturas se muestra en la Figura 7.2

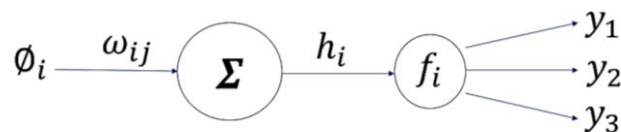
Figura 7.2 Arquitectura general utilizada para la estimación de las temperaturas



Fuente: Uso de redes neuronales para la obtención de imágenes termográficas en el absorbedor de un concentrador solar de Fresnel de doble reflexión, a partir de los registros de temperatura en el absorbedor, Flores, Serrano y Cadena (2021)

En nuestro caso, como entrada de la red neuronal tenemos la Irradiancia en W/m^2 y como salida tenemos dos o tres temperaturas en $^{\circ}\text{C}$ medidas en el exterior de la cámara de tostado, esto es porque unos días se registraron dos temperaturas y otros días tres temperaturas (ver figura 7.6), por lo tanto, nos quedaría el perceptrón de la Figura 7.3.

Figura 7.3 Perceptrón multicapa usado con el concentrador solar de Fresnel



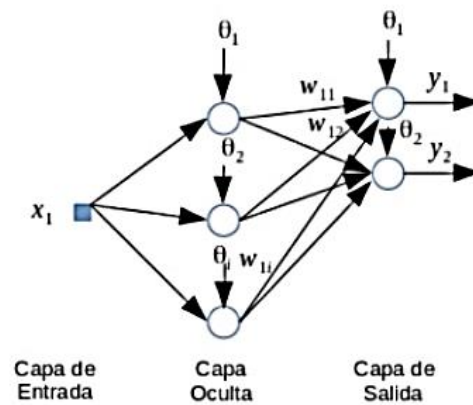
Fuente: Elaboración propia usando Power Point

Donde ϕ_i es la irradiancia, f_i es la función de activación sigmoïdal que está dada en la ecuación 7.2, y_1 es la temperatura 1, y_2 es la temperatura 1 y y_3 es la temperatura 3.

$$f_i = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (7.2)$$

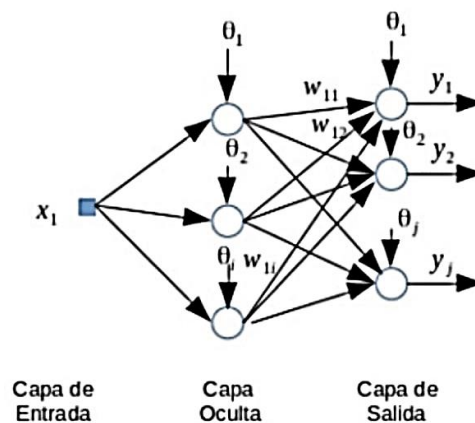
En la figura 7.4 y figura 7.5 se muestra la arquitectura para la estimación de temperaturas en el caso del concentrador solar en estudio.

Figura 7.4 Arquitectura utilizada para la estimación de dos temperaturas



Fuente: Elaboración usando Libreoffice draw

Figura 7.5 Arquitectura utilizada para la estimación de tres temperaturas

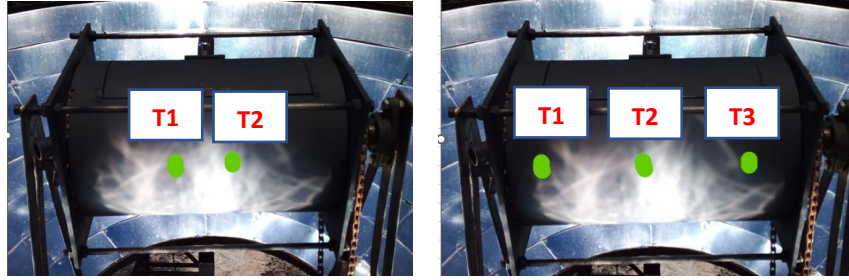


Fuente: Elaboración usando Libreoffice draw

7.2 Metodología

1. En cada prueba experimental, se registraron 2 ó 3 temperaturas en distintas partes de la cámara de tostado, como se muestra en la Figura 7.5.

Figura 7.6 Puntos de la cámara de tostado donde se midió la temperatura



Fuente: Elaboración propia

2. Se seleccionó el modelo de Redes Neuronales Artificiales ya que anteriormente este modelo se ajustó bastante bien al estudio de un concentrador solar de doble reflexión en el artículo “Uso de redes neuronales para la obtención de imágenes termográficas en el absorbedor de un concentrador solar de Fresnel de doble reflexión, a partir de los registros de temperatura en el absorbedor” de Flores, Serrano y Cadena, (2021) .
3. Se utilizó el programa GNU Octave versión 4.2.2 y computadora HP con procesador Intel Centrino, para realizar la estimación de temperaturas en la cámara de tostado utilizando el modelo de Redes Neuronales. (en el anexo A.3 se muestra un ejemplo del código en octave)

7.3 Resultados usando el modelo de Redes Neuronales Artificiales

A continuación, se muestran los resultados de los conjuntos de datos que se analizaron utilizando el modelo de Redes Neuronales Artificiales, cuyo rendimiento se puede comprobar calculando el error medio cuadrado (RMSE, por sus siglas en inglés) mediante la ecuación 7.2.

$$RMSE = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{n=1}^N |y_{estimado} - y|^2} \quad (7.2)$$

Donde N es el número de muestras, y es la temperatura medida en la cámara de tostado y $y_{estimado}$ es la temperatura estimada por el modelo RNA.

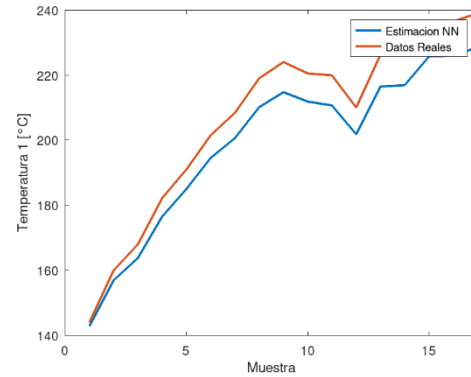
El error cuadrático medio (RMSE) mide el error que hay entre dos conjuntos de datos. Es decir, compara un valor estimado y un valor conocido.

Modelo de Redes Neuronales (NN) para los datos del día 10 de marzo de 2022

Tabla 7.1 Datos recolectados

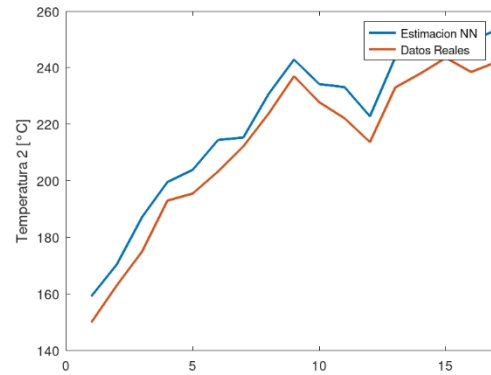
Hora	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	T ₃ (°C)	I (W/m ²)
10:26	144	150	147	1,225
10:30	160	163	161	1,225
10:34	168	175	174	1,233
10:38	182.2	193	185	1,238
10:42	191	195.5	195.1	1,238
10:46	201.5	203.3	202.3	1,238
10:50	208.4	212.2	210	1,238
10:54	219	223.8	219.4	1,238
10:58	224	237	226.4	1,238
11:02	220.5	227.8	224	1,230
11:06	219.9	222.1	220.6	920
11:10	210	213.7	213.5	1,240
11:14	226.3	233	232	1,240
11:18	226.8	238	234.1	1,240
11:22	236	243.5	240.2	1,240
11:26	236.4	238.5	237.5	1,240
11:30	239	242	239.6	1,240

Gráfica 7.1 Modelo NN para la Temperatura 1



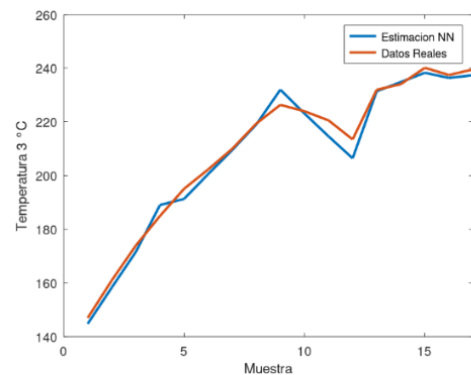
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 7.2 Modelo NN para la Temperatura 2



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 7.3 Modelo NN para la Temperatura 3



Fuente: Elaboración propia

Tabla 7.2 Error medio cuadrado

Temperatura Medida (°C)	RMSE (°C)
1	2.19954
2	1.29329
3	0.720686

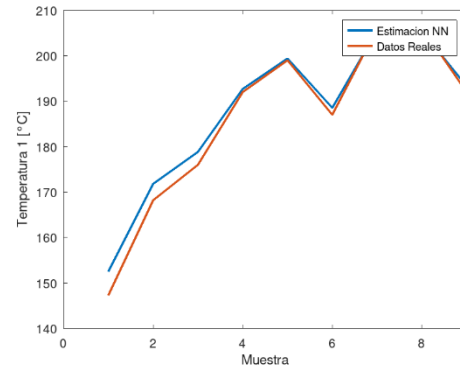
Discusión: En las gráficas, la línea en color rojo indica los datos reales (ver Tabla 7.1) y la línea en color azul la estimación de la temperatura usando el modelo de Redes Neuronales Artificiales (ver Gráfica 7.1, Gráfica 7.2 y Gráfica 7.3). Para el día de 10 de marzo, según los datos de la Tabla 7.2, la serie de temperaturas que presenta el menor error medio cuadrado es la serie de Temperatura 3, con un RSME de 0.72068 °C. Ese valor puede indicar que esa medición de temperatura en esa zona era más precisa que los otros dos puntos.

Modelo de Redes Neuronales (NN) para los datos del día 13 de abril de 2022

Tabla 7.3 Datos recolectados

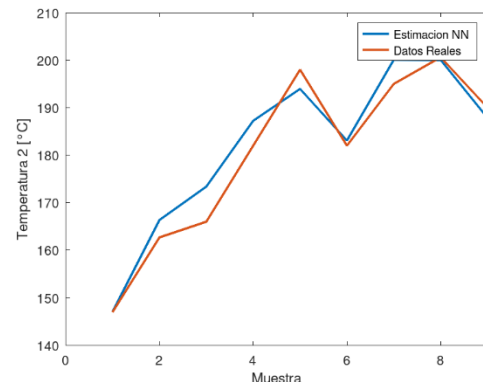
Hora	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	I (W/m ²)
10:35	147.3	147	1,213.50
10:45	168.2	162.7	1,220
10:49	176	166	1,220
10:53	192	182	1,220
10:58	199	198	1,220
11:02	187	182	1,220
11:06	206	195	1,223
11:10	206.3	200.6	1,223
11:14	192	190	1,223

Gráfica 7.4 Modelo NN para la Temperatura 1



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 7.5 Modelo NN para la Temperatura 2



Fuente: Elaboración propia

Tabla 7.4 Error medio cuadrado

Temperatura Medida (°C)	RMSE (°C)
1	0.752406
2	1.21337

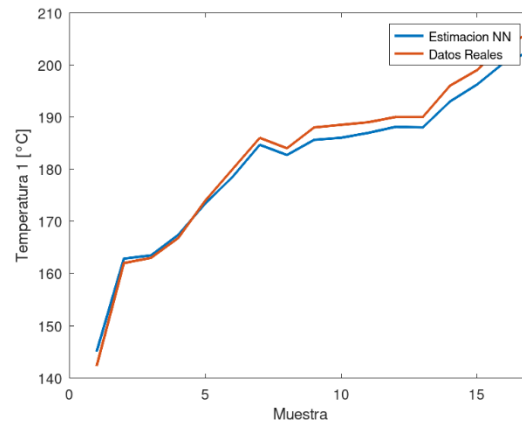
Discusión: Los datos reales de temperatura se muestran en la Tabla 7.3, las Gráficas 7.4 y 7.5 muestran la comparación entre los datos medidos y los datos de temperatura estimados por el modelo de Redes Neuronales Artificiales. Según la Tabla 7.4, la temperatura 1 presenta un error medio cuadrado de 0.752406 °C, como se observa en la Gráfica 7.4 la desviación es pequeña, lo que nos garantiza la efectividad del modelo.

Modelo de Redes Neuronales (NN) para los datos del día 19 de abril de 2022

Tabla 7.5 Datos recolectados

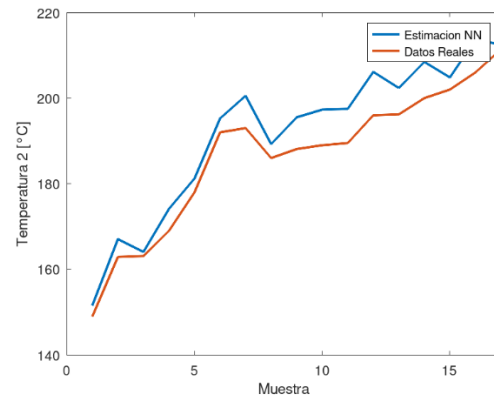
Hora	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	I (W/m ²)
10:59	142.3	149	1,170
11:03	162	162.9	1,170
11:07	163	163.1	1,170
11:11	166.8	169	1,170
11:15	174	178	1,170
11:19	180	192	1,170
11:24	186	193	1,170
11:30	184	186	1,150
11:34	188	188.1	1,150
11:38	188.5	189	1,150
11:42	189	189.5	1,150
11:46	190	196	1,150
11:50	190	196.2	1,150
11:54	196	200	1,150
11:58	199	202	1,150
12:02	204	206	1,150
12:06	206	211.4	1,150

Gráfica 7.6 Modelo NN para la Temperatura 1



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 7.7 Modelo NN para la Temperatura 2



Fuente: Elaboración propia

Tabla 7.6 Error medio cuadrado

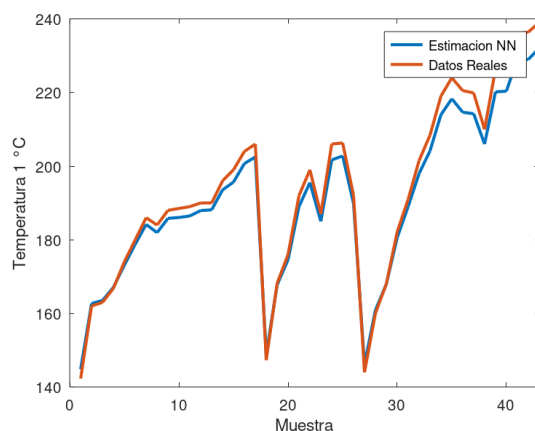
Temperatura Medida (°C)	RMSE (°C)
1	0.436193
2	0.827722

Discusión: La Tabla 6.5 muestra las temperaturas medidas en la superficie de la cámara de tostado. La Gráfica 6.6. muestra una mejor precisión del modelo de Redes Neuronales Artificiales, comparado a la Gráfica 6.7, esto lo podemos comprobar con el error medio cuadrado mostrado en la Tabla 6.6.

Anteriormente se mostraron los resultados por separado, según los datos de temperatura de cada día registrado, pero cabe destacar que entre más datos tenemos, más preciso es el modelo RNA.

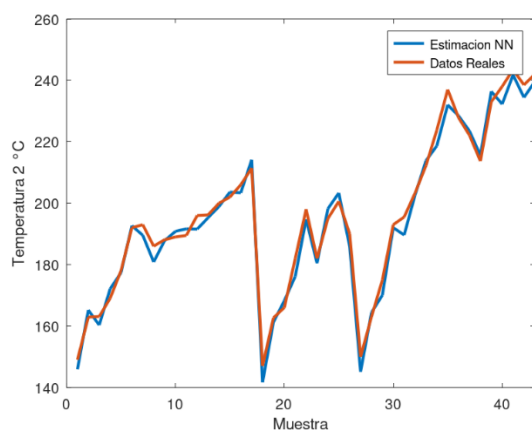
Para minimizar esa desviación, concatenamos todos los datos de temperatura medidos. En la Gráfica 6.8 podemos ver los resultados obtenidos para la temperatura 1 y en la Gráfica 6.9 los resultados obtenidos para la temperatura 2:

Gráfica 7.8 Modelo NN para la Temperatura 1



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 7.9 Modelo NN para la Temperatura 2



Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

Las conclusiones derivadas de este proyecto se resumen a continuación:

1. De acuerdo con los resultados obtenidos se considera que el tostador solar estudiado es funcional y que su efectividad depende de las condiciones climáticas. Su efectividad es mayor en lugares que presenten la mayor heliofanía. Ver anexo A.4
2. Para alcanzar la temperatura óptima de tostado de granos de café (aproximadamente 210 °C), la radiación solar según lo observado debe tener un valor mínimo de 1,100 W/m².
3. Entre mayor es la velocidad del viento, mayor es la pérdida por convección en la cámara de tostado, por lo tanto, los tiempos de tostado son mayores.
4. La potencia media del concentrador solar estudiado es de 1,629.7 W y su eficiencia media es de 49.03%.
5. El modelo que más se ajusta al comportamiento de la temperatura en la cámara de tostado, según la irradiancia en ese momento, es el modelo de Redes Neuronales Artificiales, lográndose un error cuadrado de 0.436193°C, en cambio con el modelo autorregresivo, ARX, se logró un error cuadrado de 12.9369 °C. Ver Anexo A.5

RECOMENDACIONES Y TRABAJO A FUTURO

1. Incorporar un sistema de visor a la cámara de tostado o un sistema que permita tomar muestras, para ir supervisando las distintas fases del proceso de tueste de los granos de café. Ver anexo A.2
2. Adicionar un dispositivo que permita escuchar con precisión los cracks en el proceso de torrefacción del café. Ver anexo A.2
3. Adicionar un mecanismo automático de seguimiento del sol, cuidando de que los rayos incidan de forma perpendicular en el área de apertura del concentrador y lograr así, una mejor captación de la radiación solar.
4. La cámara de tostado debe ser aislada térmicamente, con un material transparente a la radiación, en forma de cuboide rectangular ya sea de plástico laminado o de vidrio, para evitar que escape el calor hacia el ambiente y reducir así las pérdidas por convección.
5. Mejorar el mecanismo que permite regular la velocidad de rotación de la cámara de tostado, ya que la rotación del cilindro determina el tiempo durante el cual están sometidos los granos de café a la radiación solar concentrada en la cámara de tostado. Si la revolución es baja, el tueste es más rápido. Se pueden hacer pruebas variando ese parámetro y así poder obtener el orden de revoluciones por minuto más indicado.
6. Hacer simulaciones en un estudio futuro que permita estudiar la factibilidad a escala industrial, ya que se cuenta con resultados experimentales que pueden servir como base para realizar las adaptaciones.
7. Por seguridad de la persona que opere el concentrador solar de forma manual, se debe guardar el concentrador cóncavo hacia abajo y sujeto en ambos lados con cadenas ajustables. Al momento de sacarlo para empezar el proceso de tostado, se debe tener cuidado al darle vuelta y es preferible que lo hagan dos personas. En todo el proceso se debe ir ajustando la orientación del concentrador haciendo uso de esas cadenas para sostenerlo en la posición deseada.

GLOSARIO

Absortividad: Propiedad de un material que determina la cantidad de radiación incidente que puede absorber (Martínez Sanz, 2014).

Apertura del concentrador: Es la sección transversal por la cual entra la radiación solar al concentrador (Chambi Mamani & Vilca Rodriguez, 2013).

Concentrador solar: Es un tipo de colector solar que concentra la energía solar. Su funcionamiento se basa en la explotación de la reflexión de los rayos solares a través de superficies reflectantes. Normalmente es un arreglo de espejos alineados. El objetivo es concentrarlos en un receptor de tamaño contenido (Planas, 2020).

Crack: Se deriva del sonido que produce. Es el estallido de los granos de café, por la liberación de vapor de agua y otros gases (Urnex, 2021).

Efecto albedo: Se define como la relación entre la energía reflejada y la energía incidente sobre una unidad de área, de lo cual se puede inferir que existe cierta similitud entre el albedo y la reflectancia (Liu, y otros, 2012).

Eficiencia: Se define como la razón entre la energía útil que proporciona un dispositivo y la energía que entra al dispositivo (Tomé López, 2017).

Eficiencia del colector: Se define como la relación entre el calor útil ganado por el colector por unidad de área de apertura (W/m^2) y la irradiación total del colector (W/m^2) (Ebrahimi & Keshavarz, 2015).

Emisividad: Representa la proporción entre la energía radiada por dicho material y la energía que radiaría un cuerpo negro ideal, dada la misma temperatura y superficie (Martínez Sanz, 2014).

Espejos de Fresnel: Son espejos capaces de concentrar la energía del sol aproximadamente 30 veces su intensidad normal (Babu, Raj, & Arasu, 2019).

Factor de concentración: Es la relación entre el área de apertura, A_a , y el área del receptor, A_r (Duffie & Beckman, 2013).

Factor de intercepción: Es la fracción de la radiación especular reflejada, que es interceptada por la superficie del receptor (Sustainable Energy Science and Engineering Center).

Heliofanía: Representa la duración del brillo solar u horas de sol (Instituto Metereológico Nacional de Costa Rica, s.f.).

Irradiancia: Es la velocidad a la que la energía radiante incide sobre una superficie (Sandoval & Hinostroza, 2011).

Mancha de la imagen solar: Se refiere solamente a la zona del receptor donde impactan los rayos solares (López, 2018). Ver anexo A.2.3

Óptica anidólica: También conocida como óptica sin imágenes, es la rama de la óptica que se ocupa de la transferencia de luz óptima entre una fuente y un objetivo. A diferencia de la óptica de formación de imágenes, las técnicas utilizadas para la óptica anidólica no forman una imagen de la fuente (Adopptics, 2021).

Potencia: Es la relación de paso de energía de un flujo por unidad de tiempo; esto quiere decir, la cantidad de energía entregada o absorbida por un elemento en un tiempo determinado (Obando, Ortiz, & Loya, 2016).

Receptor: Es el dispositivo donde se produce la conversión de la radiación solar concentrada, en energía térmica (Velasco, 2012).

Reflectividad: Representa la fracción de la radiación incidente que es reflejada por una superficie (Martínez Sanz, 2014).

Torrefacción del café: También conocido como tostado de café. Este proceso provoca que se produzcan cambios químicos a medida que los granos se elevan rápidamente a temperaturas muy altas, por lo tanto, se resalta el aroma y el sabor que están encerrados dentro de los granos de café (National Coffee Association USA, s.f.).

ANEXOS

A.1 Especificaciones técnicas del equipo utilizado en las mediciones

A.1.1 Termómetro digital Infrarrojo FLUKE 62 MAX

Rango de temperatura	- 30 °C a 500 °C
Resistencia	Probado en una caída de 3 metros
Resolución óptica	10:1
Precisión	+1,5 °C o +1,5 % de la lectura (lo que sea mayor)
Clasificación	IP54 (Tiene una protección frente al polvo o humedad completas. Además, está protegido contra salpicaduras de agua.)
Alimentación	Una sola pila AA

Fuente: FLUKE

A.1.2 Anemómetro de mano BTMETER BT-100-WM

Rango de velocidad del viento	0.67 mph a 67.1 mph (+/- 5 % de las lecturas)
Rango de la temperatura del viento	-10 °C a 45 °C
Resolución	0.1 m/s; 0.2°C
Alimentación	Dos pilas AAA / 1.5 V

Fuente: The weather

A.1.3 Balanza digital EK6015

Capacidad	176 oz / 11 lb / 5000 g / 5000 ml
Dimensiones	180cm x 14 cm x 1.8 cm
Unidades	g / ml / oz / lb oz
Auto-Off	60 s
Alimentación	Dos pilas AAA / 1.5 V

Fuente: ETEKCITY

A.1.4 Multímetro y medidor de irradiancia

Factor de conversión del medidor de irradiancia	$1\text{ mV} = 1 \frac{W}{m^2}$
Bornes de conexión	3
Tensión en CC	200/2000 mV; 20/200/1000 V
Tensión en CA	200/750 V
Corriente en CC	200/2000 μ A; 20/200mA 2/10A
Probador de diodos	Si
Alimentación	Dos pilas AA / 250 V

Fuente: Equipo usado en la asignatura de electrónica, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Argentina

A.2 Etapas de la investigación

A.2.1 Etapa de construcción del Concentrador Solar de Fresnel





Con el ingeniero Francisco Montes en la construcción del Concentrador Solar

A.2.2 Primeras pruebas para comprobar el funcionamiento del equipo



Con el Dr. Marco A. Flores mi director de tesis



Dr Raúl Raudales del Mesoamerican Development Institute (Lowell, Massachusetts)

A.2.3 Trabajo experimental

Montaje completo



Preparación de muestra



Medición de la temperatura de la cámara de tostado



Medición de la velocidad del viento



Mancha solar



A.2.4 Visita Técnica realizada el día 21 de marzo de 2022

Con la finalidad de profundizar el conocimiento sobre el proceso de torrefacción del café, se visitó Agroindustria BT, ubicada en Siguatepeque, cuyo propietario es el Ingeniero Keven Barahona.



Uso de un estetoscopio para escuchar el primer crack



Sistema visor en la cámara de tostado

A.3 Código en octave para los datos de temperatura concatenados

```
1  clc
2  clear all
3  %load isothermas_temp
4
5  T1a=[142.3
6  162
7  163
8  166.8
9  174
10 180
11 186
12 184
13 188
14 188.5
15 189
16 190
17 190
18 196
19 199
20 204
21 206
22 147.3
23 168.2
24 176
25 192
26 199
27 187
28 206
29 206.3
30 192];
```

```

31
32 T2a=[149
33 162.9
34 163.1
35 169
36 178
37 192
38 193
39 186
40 188.1
41 189
42 189.5
43 196
44 196.2
45 200
46 202
47 206
48 211.4
49 147
50 162.7
51 166
52 182
53 198
54 182
55 195
56 200.6
57 190];
58

```

```

59 T1b=[144
60 160
61 168
62 182.2
63 191
64 201.5
65 208.4
66 219
67 224
68 220.5
69 219.9
70 210
71 226.3
72 226.8
73 236
74 236.4
75 239];
76
77 T2b=[150
78 163
79 175
80 193
81 195.5
82 203.3
83 212.2
84 223.8
85 237
86 227.8
87 222.1
88 213.7
89 233
90 238

```

```
91 243.5
92 238.5
93 242];
94
95
96 U1=[
97 1170
98 1170
99 1170
100 1170
101 1170
102 1170
103 1170
104 1150
105 1150
106 1150
107 1150
108 1150
109 1150
110 1150
111 1150
112 1150
113 1150
114 1213.50
115 1220
116 1220
117 1220
118 1220
119 1220
120 1223
121 1223
122 1223];
```

```
123 U1b=[1225
124 1225
125 1233
126 1238
127 1238
128 1238
129 1238
130 1238
131 1238
132 1230
133 920
134 1240
135 1240
136 1240
137 1240
138 1240
139 1240];
140
141 T1=[T1a;T1b];
142 T2=[T2a;T2b];
143 TM=[T1,T2];
144 [mt,nt]=size(TM);
145
146
147
148
149
150
```

```

154
155
156 %%numero de entradas
157 ni=1;
158
159 %%numero de salidas
160 no=2;
161
162 %%numero de neuronas
163 nn=5000;
164
165 %%numero de epochs
166 epochs=4;
167
168 %%tasa de aprendizaje
169 eta=0.9;
170
171
172 %%matriz de pesos
173 W1=rand(mt,epochs);
174 W2=rand(mt,epochs)*5;
175 Wnorm=rand(1,epochs);
176 thetai=rand(nn,1,epochs);
177 thetaj1=rand(mt,nt,epochs);
178 thetaj2=rand(mt,nt,epochs)*5;
179 thetajnorm=rand(1,epochs);
180 bias=0;
181 %%vectores de entrada y salidas
182 X=[U1;U1b];
183
184
185

```

```

186
187 Y=TM;
188
189 Yhat=zeros(mt,nt,no);
190 Y=TM;
191 P=ones(nn,1);
192 pi=0;
193
194 %%matriz de error
195 E=zeros(mt,nt,epochs);
196 E(:, :, 1)=Yhat(:, :, 1)-Y;
197 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
198 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Empieza el entrenamiento
199 %load NN_training_set
200
201
202 for r=3:epochs
203
204     Yhat(:, 1, r)=W1(:, r-1)*(1./(1+exp(-X))) + thetaj1(:, 1, r-1);
205     Yhat(:, 2, r)=W2(:, r-1)*(1./(1+exp(-X))) + thetaj2(:, 2, r-1);
206     E(:, 1, r)=Yhat(:, 1, r)-Y(:, 1);
207     E(:, 2, r)=Yhat(:, 2, r)-Y(:, 2);
208     %%%%% Steepest decent algorithm
209
210     W1(:, r)=W1(:, r-1)-eta*(E(:, 1, r-1)-E(:, 1, r-2));
211     W2(:, r)=W2(:, r-1)-eta*(E(:, 2, r-1)-E(:, 2, r-2));
212     thetaj1(:, 1, r)=thetaj1(:, 1, r) - eta*(E(:, 1, r-1)-E(:, 1, r-2));
213     thetaj2(:, 1, r)=thetaj2(:, 1, r) - eta*(E(:, 2, r-1)-E(:, 2, r-2));
214     % Wnorm(1, r)=norm(W(:, :, r));
215     % thetajnorm(1, r)=norm(thetaj(:, :, r));
216
217

```

```

217 -
218 %for j=1:no
219 % error(j)=error(j) + (1/2)*(Y(k,z,j)-Yhat(k,z,j))^2;
220 %end
221
222
223 end
224
225 pkg load control
226
227
228 yi = T1a;
229 z1=iddata(yi,U1);
230 z2 = iddata([T2a],[U1]);
231 sys = arx([z1],1);
232 sys2 = arx([z2],1);
233 [y1]=lsim(sys,[U1,randn(length(U1),1)],1:length(U1),[T1a(1)]);
234 [y2]=lsim(sys2,[U1,1.5*randn(length(U1),1)],1:length(U1),[T2a(1)]);
235
236
237 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
238 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Culmina el entrenamiento %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
239
240
241 m1=-1;
242 n1=110;
243
244 m2=-1;
245 n2=-220+35+442-(Y(:,2)-Yhat(:,2));
246

```

```

250 ##
251 ##printf('La ISE 1a es %d:\n',sqrt(sum((Yhat(:,1)*m1-n1-Y(:,1)).^2))*(1/length(U1)))
252 ##printf('La ISE 1b es %d:\n',sqrt(sum((y1 -Y(:,2)).^2))*(1/length(U1)))
253 ##printf('La ISE 2a es %d:\n',sqrt(sum((Yhat(:,2)*m2-n2-Y(:,2)).^2))*(1/length(U1)))
254 ##printf('La ISE 2b es %d:\n',sqrt(sum((y2 -Y(:,2)).^2))*(1/length(U1)))
255
256 plot(1:mt,(Yhat(:,1)*m1 -n1),'linewidth',2,1:mt,Y(:,1),'linewidth',2)
257 xlabel('Muestra')
258 ylabel('Temperatura 1 °C')
259 legend('Estimacion NN','Datos Reales')
260 axis([0 mt])
261 print Ytraining01.png
262
263
264 figure
265 plot(1:mt,Yhat(:,2)*m2-n2,'linewidth',2,1:mt,Y(:,2),'linewidth',2)
266 xlabel('Muestra')
267 ylabel('Temperatura 2 °C')
268 legend('Estimacion NN','Datos Reales')
269 axis([0 mt])
270 print Ytraining02.png
271
272 %figure
273 %plot(1:mt,(Yhat(:,1)*-1 -108)-Y(:,1),'linewidth',2)
274 %xlabel('Muestra')
275 %ylabel('Temperatura 1 °C')
276 %legend('Estimacion NN','Datos Reales')
277 %axis([0 mt])
278 %print Etraining01.png
279 %
280 %

```

```

280 %
281 %figure
282 %plot(1:mt,(Yhat(:,2)*-1 -108)-Y(:,2),'linewidth',2)
283 %xlabel('Muestra')
284 %ylabel('Temperatura 2 °C')
285 %axis([0 mt])
286 %print Etraining02.png

```

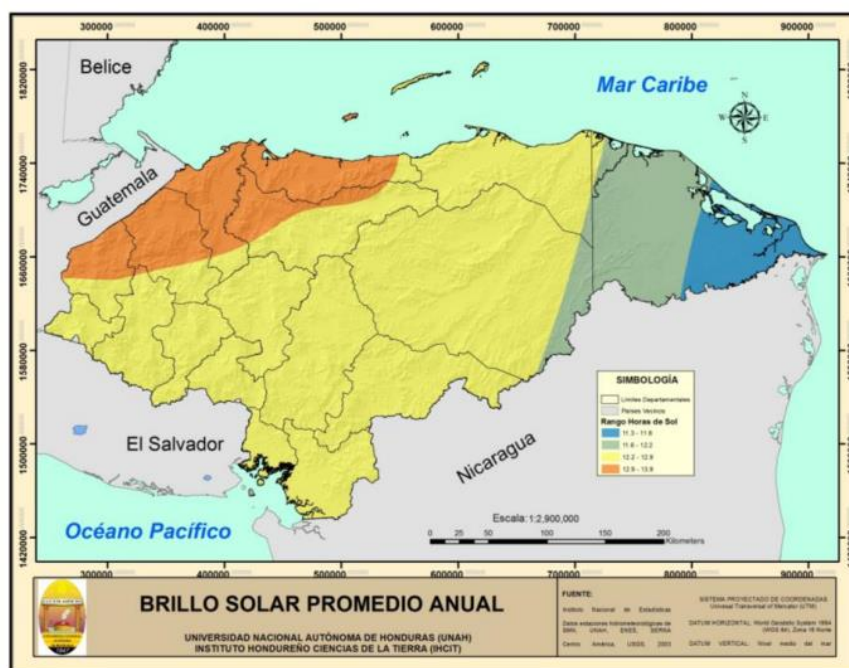
A.4 Caracterización de datos climáticos en Honduras

A.4.1. Heliofanía/Brillo solar

Según el Atlas climático y de gestión de riesgo de Honduras (2012) elaborado por el Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra, IHCIT, el brillo solar representa el tiempo total durante el cual incide luz solar directa sobre alguna localidad, entre el alba y el atardecer. Esta variable nos ayuda a cuantificar la disponibilidad de la luz del sol para el aprovechamiento de la energía solar en el país.

En la Figura A.4.1, se muestra el mapa de brillo solar promedio anual de Honduras.

Figura A.4.1 Brillo solar promedio anual



Fuente: Atlas climático y de gestión de riesgo de Honduras, IHCIT (2012)

De igual forma, a partir de un registro de 28 años de Heliofanía en estaciones meteorológicas de la Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente SERNA, comité permanente de contingencias COPECO y la estación meteorológica de la UNAH, se elaboró la Tabla A.4.1 que contiene los valores mínimos, máximos y promedios de horas de heliofanía por zona y en la Tabla A.4.2 se muestran estos valores por departamento en Honduras, según los meses del año:

Tabla A.4.1 Valores mínimos, máximos y promedios de horas de heliofanía mensuales por zona en Honduras

	Enero			Febrero			Marzo		
Zona	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom
Norte	6.0	6.6	6.3	6.4	8.0	7.2	7.2	8.0	7.6
Centro	5.8	8.2	7.0	6.6	8.8	7.7	7.0	9.0	8.0
Sur	7.4	9.4	8.4	8.2	9.8	9.0	8.6	9.6	9.1
Occidente Sur	6.4	8.8	7.6	6.6	9.2	7.9	7.6	9.0	8.3
Occidente Norte	6.0	6.6	6.3	6.4	7.4	6.9	7.4	8.0	7.7
Insular	6.3	6.7	6.5	7.8	8.1	8.0	7.8	8.1	8.0

	Abril			Mayo			Junio			Julio		
Zona	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom
Norte	6.8	7.8	7.3	6.0	7.8	6.9	5.6	7.6	6.6	5.0	7.0	6.0
Centro	6.8	7.9	7.4	6.0	7.0	6.5	5.4	6.6	6.0	4.8	7.4	6.1
Sur	7.6	8.8	8.2	6.4	7.4	6.9	6.2	7.2	6.7	5.6	8.4	7.0
Occidente Sur	6.8	8.2	7.5	5.8	7.2	6.5	5.4	6.4	5.9	6.8	7.7	7.3
Occidente Norte	6.8	7.8	7.3	6.0	7.2	6.6	6.2	6.7	6.5	6.8	7.2	7.0
Insular	7.8	8.1	8.0	7.3	7.8	7.6	7.2	7.7	7.5	6.8	6.9	6.9

	Agosto			Septiembre			Octubre		
Zona	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom
Norte	5.8	7.6	6.7	6.0	7.4	6.7	5.4	6.8	6.1
Centro	5.8	7.5	6.7	5.8	6.3	6.1	5.4	7.0	6.2
Sur	6.4	8.2	7.3	5.8	7.0	6.4	7.0	7.6	7.3
Occidente Sur	6.4	7.4	6.9	5.0	6.2	5.6	5.0	6.7	5.9
Occidente Norte	6.8	7.2	7.0	5.8	6.5	6.2	5.4	6.0	5.7
Insular	7.2	7.7	7.5	6.9	7.5	7.2	6.2	7.0	6.6

	Noviembre			Diciembre			Anual		
Zona	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom
Norte	4.8	5.6	5.2	5.0	5.8	5.4	6.0	7.0	6.5
Centro	4.9	7.6	6.3	5.2	7.8	6.5	5.8	7.6	6.7
Sur	7.0	8.6	7.8	6.8	9.2	8.0	6.8	8.4	7.6
Occidente Sur	5.2	7.6	6.4	5.4	8.2	6.8	6.5	7.6	7.1
Occidente Norte	4.8	6.0	5.4	5.2	6.2	5.7	6.4	6.9	6.7
Insular	5.2	5.3	5.3	5.6	5.9	5.8	6.8	7.2	7.0

Fuente: SERNA, COPECO y estación meteorológica de la UNAH

Tabla A.4.2 Valores mínimos, máximos y promedios de horas de heliofanía mensuales por zona en Honduras

	Lempira			Ocotepeque			Copán			Santa Bárbara		
	Min.	Max.	Prom.	Min.	Max.	Prom.	Min.	Max.	Prom.	Min.	Max.	Prom.
Enero	6.2	8.6	7.4	6.5	8.8	7.7	6.0	7.0	6.5	6.0	6.6	6.3
Febrero	6.8	9.0	7.9	7.3	9.0	8.2	6.6	7.5	7.1	6.4	7.0	6.7
Marzo	7.5	8.9	8.2	7.8	8.9	8.4	7.4	7.9	7.7	7.5	7.8	7.7
Abril	7.2	8.0	7.6	7.5	8.2	7.9	7.3	7.9	7.6	7.0	7.4	7.2
Mayo	6.3	6.9	6.6	6.6	7.2	6.9	6.5	7.1	6.8	6.2	7.0	6.6
Junio	6.2	6.4	6.3	6.2	6.4	6.3	6.3	6.4	6.4	6.2	6.5	6.4
Julio	6.8	7.6	7.2	6.8	7.2	7.0	6.8	7.0	6.9	6.8	6.8	6.8
Agosto	7.0	7.2	7.1	6.8	7.2	7.0	7.0	7.2	7.1	6.9	7.2	7.1
Septiembre	5.9	6.2	6.1	6.0	6.0	6.0	6.0	6.2	6.1	5.8	6.2	6.0
Octubre	5.4	6.4	5.9	5.6	6.6	6.1	5.4	6.0	5.7	5.4	5.8	5.6
Noviembre	5.3	7.2	6.3	5.4	7.2	6.3	5.2	5.8	5.5	4.9	5.4	5.2
Diciembre	5.4	7.6	6.5	5.8	8.0	6.9	5.2	6.2	5.7	5.2	5.8	5.5
Anual	6.5	7.4	7.0	6.7	7.4	7.1	6.4	6.7	6.6	6.4	6.8	6.6

	Cortés			Atlántida			Islas de la Bahía			Yoro		
	Min.	Max.	Prom.	Min.	Max.	Prom.	Min.	Max.	Prom.	Min.	Max.	Prom.
Enero	6.0	6.4	6.2	5.6	6.4	6.0	6.2	6.7	6.5	6.0	6.4	6.2
Febrero	6.4	7.2	6.8	7.0	7.4	7.2	7.6	8.1	7.9	6.4	7.2	6.8
Marzo	7.8	8.0	7.9	7.2	8.0	7.6	7.8	8.1	8.0	7.2	8.0	7.6
Abril	7.0	7.8	7.4	7.2	7.8	7.5	7.8	8.0	7.9	7.0	7.6	7.3
Mayo	6.2	7.4	6.8	6.6	7.8	7.2	7.3	7.8	7.6	6.2	7.2	6.7
Junio	6.3	7.2	6.8	6.4	7.6	7.0	7.2	7.7	7.5	5.9	7.2	6.6
Julio	6.8	6.8	6.8	6.0	7.2	6.6	6.8	6.9	6.9	5.4	6.8	6.1
Agosto	6.8	7.5	7.2	6.5	7.5	7.0	7.4	7.7	7.6	6.0	7.2	6.6
Septiembre	5.8	6.9	6.4	6.4	7.0	6.7	7.0	7.5	7.3	6.1	6.6	6.4
Octubre	5.4	6.2	5.8	5.4	6.2	5.8	6.4	7.0	6.7	5.6	6.0	5.8
Noviembre	4.8	5.2	5.0	5.0	5.4	5.2	5.2	5.3	5.3	4.8	5.4	5.1
Diciembre	5.2	5.4	5.3	5.0	5.6	5.3	5.4	5.9	5.7	4.8	5.2	5.0
Anual	6.6	6.8	6.7	6.4	6.8	6.6	6.8	7.2	7.0	6.2	6.6	6.4

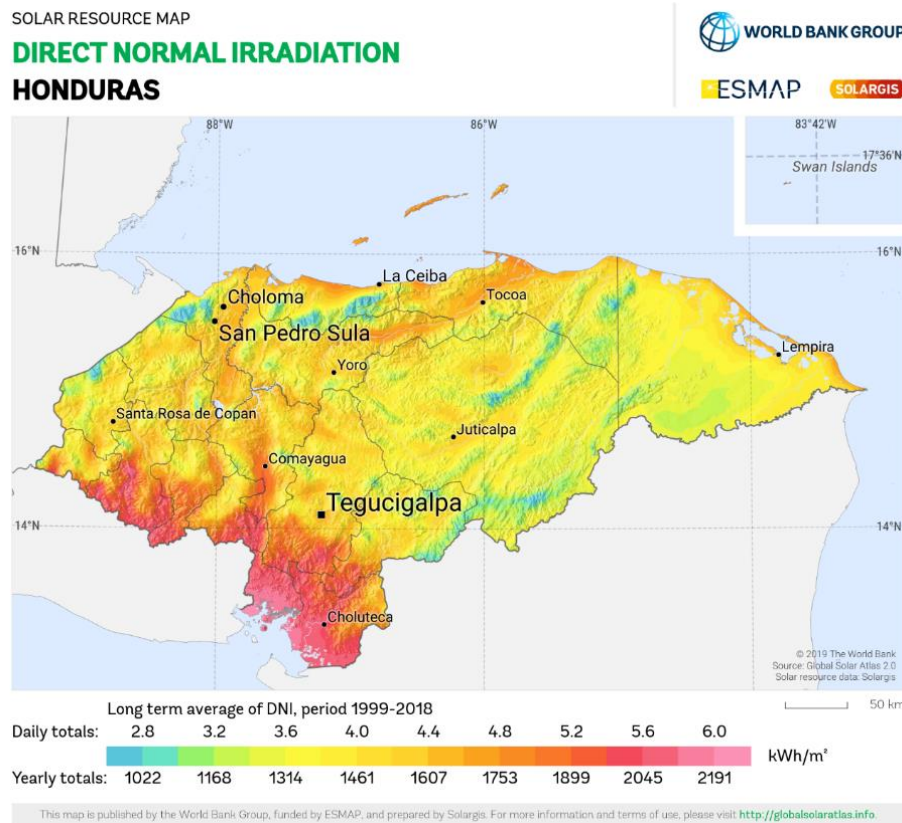
	Intibucá			La Paz			Comayagua			Fco. Morazán		
	Min.	Max.	Prom.	Min.	Max.	Prom.	Min.	Max.	Prom.	Min.	Max.	Prom.
Enero	6.4	8.8	7.6	7.0	8.4	7.7	6.2	7.8	7.0	6.2	8.6	7.4
Febrero	6.6	9.0	7.8	7.0	9.0	8.0	6.6	8.4	7.5	7.2	9.0	8.1
Marzo	7.8	9.1	8.5	8.0	9.1	8.6	7.7	8.8	8.3	7.5	9.2	8.4
Abril	6.8	7.8	7.3	6.8	8.0	7.4	6.8	7.6	7.2	7.2	8.2	7.7
Mayo	6.0	6.6	6.3	5.8	7.0	6.4	6.0	6.8	6.4	6.4	7.2	6.8
Junio	6.0	6.4	6.2	5.4	6.7	6.1	6.2	6.4	6.3	5.6	6.8	6.2
Julio	6.8	7.8	7.3	6.4	7.4	6.9	6.3	6.8	6.6	5.0	7.4	6.2
Agosto	6.6	7.4	7.0	6.4	7.5	7.0	6.3	7.2	6.8	6.2	7.5	6.9
Septiembre	5.4	6.2	5.8	5.0	6.4	5.7	5.8	6.2	6.0	5.6	6.4	6.0
Octubre	5.4	6.8	6.1	5.0	7.0	6.0	5.4	6.6	6.0	5.8	7.1	6.5
Noviembre	5.3	7.6	6.5	6.0	7.8	6.9	5.1	7.2	6.2	5.4	7.8	6.6
Diciembre	5.6	8.2	6.9	6.4	8.0	7.2	5.2	7.3	6.3	4.8	8.2	6.5
Anual	6.8	7.6	7.2	6.6	7.6	7.1	6.4	7.3	6.9	6.2	7.8	7.0

	Valle			Choluteca			El Paraíso			Olancho		
	Min.	Max.	Prom.	Min.	Max.	Prom.	Min.	Max.	Prom.	Min.	Max.	Prom.
Enero	8.4	9.4	8.9	8.4	9.2	8.8	6.6	8.8	7.7	5.8	6.6	6.2
Febrero	8.9	9.8	9.4	9.0	9.4	9.2	7.2	9.2	8.2	6.6	7.6	7.1
Marzo	9.1	9.6	9.4	9.1	9.2	9.2	7.8	9.2	8.5	7.0	8.2	7.6
Abril	8.0	8.8	8.4	7.9	8.3	8.1	7.5	8.1	7.8	6.8	8.0	7.4
Mayo	7.0	7.2	7.1	7.1	7.4	7.3	6.2	7.2	6.7	6.0	6.8	6.4
Junio	6.7	7.2	7.0	6.8	7.2	7.0	5.8	7.0	6.4	5.4	6.2	5.8
Julio	7.3	8.4	7.9	6.8	7.8	7.3	5.0	7.0	6.0	4.8	6.1	5.5
Agosto	7.5	8.2	7.9	7.1	7.8	7.5	6.2	7.2	6.7	5.8	6.8	6.3
Septiembre	6.4	7.0	6.7	6.3	6.6	6.5	5.6	6.4	6.0	5.8	6.4	6.1
Octubre	7.0	7.6	7.3	7.0	7.6	7.3	6.6	7.4	7.0	5.8	6.8	6.3
Noviembre	7.8	8.6	8.2	7.6	8.2	7.9	6.8	7.8	7.3	5.6	6.8	6.2
Diciembre	8.2	9.2	8.7	8.0	8.8	8.4	5.8	8.2	7.0	4.9	6.4	5.7
Anual	7.6	8.4	8.0	7.6	8.2	7.9	6.6	7.8	7.2	5.8	6.8	6.3

Fuente: SERNA, COPECO y estación meteorológica de la UNAH

Sumado a los datos de estas tablas, en Global Solar Atlas se encuentra el mapa de irradiación normal directa en Honduras, mostrado en la Figura A.4.2, donde se puede observar que la mayor irradiancia en nuestro país se encuentra en la Zona Sur y en la Zona Occidental Sur.

Figura A.4.2 Mapa de irradiación normal directa en Honduras



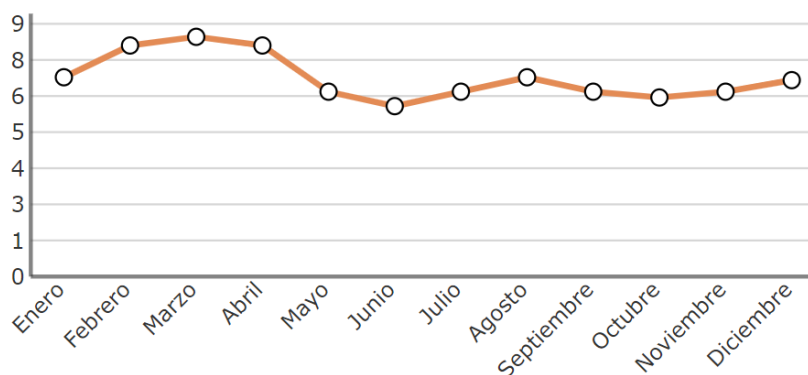
Fuente: Global Solar Atlas

A.4.2. Diagramas climáticos para 10 Departamentos de Honduras

1. Francisco Morazán: La temperatura promedio ronda los 22.1 °C, con valores máximos medios de 30 °C y valores mínimos medios de 16.3, los meses con temperaturas más bajas son de noviembre a febrero debido a la incidencia de masas de aire frío provenientes de los polos y los meses más cálidos son de marzo a abril.

Brillo solar: es el número de horas de heliofanía al día, es decir, el tiempo en que el sol es realmente visible. Con un promedio de 7 horas diarias oscilando entre los 6.2 y 7.8 horas dependiendo del mes, marzo es el mes más soleado en la región de Francisco Morazán ya que en este mes se presentan los días más despejados sobre la región, en cambio, el mes de junio es el menos soleado, esto está sujeto a que en este mes se presentan las mayores cantidades de nubes sobre la región, como se muestra en la Figura A.4.3.

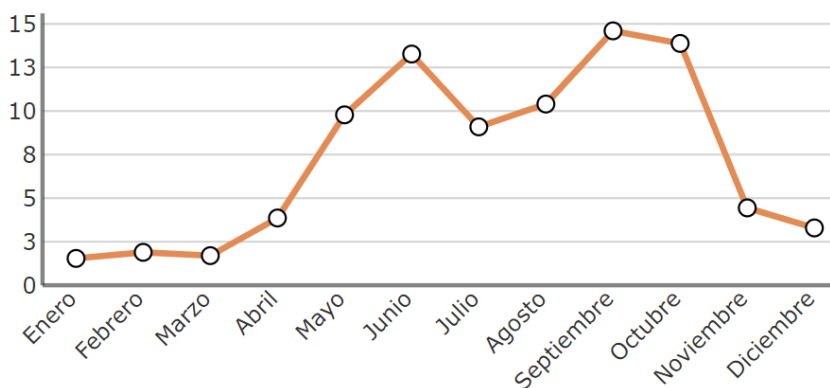
Figura A.4.3 Horas de Sol promedio diario mensual en Francisco Morazán



Fuente: (Datosmundial.com, s.f.)

Días de lluvia al mes: un día con lluvia es aquel en el que, caen al menos 0.1 mm de precipitación (0.1 litros) por metro cuadrado. No es necesario que llueva todo el día. Con 15 días de lluvia, septiembre ofrece la mayor cantidad de días lluviosos y enero la menor como se muestra en la Figura A.4.4.

Figura A.4.4 Días de lluvia al mes en Francisco Morazán

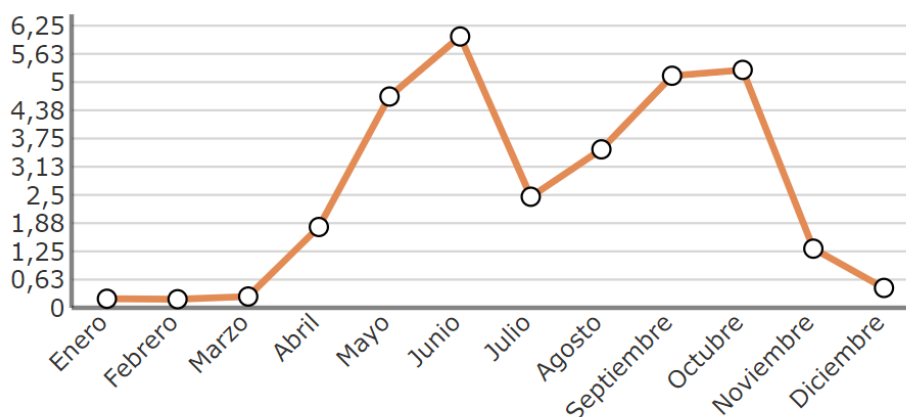


Fuente: (Datosmundial.com, s.f.)

Cantidad de precipitación: se mide en milímetros por metro cuadrado. Por lo tanto, si tenemos 2 mm/día significa que caen 2 litros de agua en un metro cuadrado en 24 horas. En la región de Francisco Morazán, el comportamiento pluviométrico es bimodal, esto significa que se presentan dos picos máximos de precipitación en los meses de junio y octubre, la temporada lluviosa inicia en el mes de mayo y termina en noviembre, presentándose una disminución de las cantidades de lluvia en los meses de julio y agosto, fenómeno conocido como Canícula.

La menor cantidad de lluvia cae en febrero. El mes de junio, en cambio, es el más lluvioso, como se muestra en la Figura A.4.5

Figura A.4.5 Cantidad de precipitación en mm/día en Francisco Morazán



Fuente: (Datosmundial.com, s.f.)

Irradiación global horizontal (GHI): es la suma de la irradiación directa más la difusa, es el parámetro más importante para la evaluación del potencial de la energía solar en una región en particular. En la Figura A.4.6 se muestra la GIH promedio para la ciudad de Tegucigalpa.

Figura A.4.6 GHI mensual promedio durante el 2019 en la ciudad de Tegucigalpa

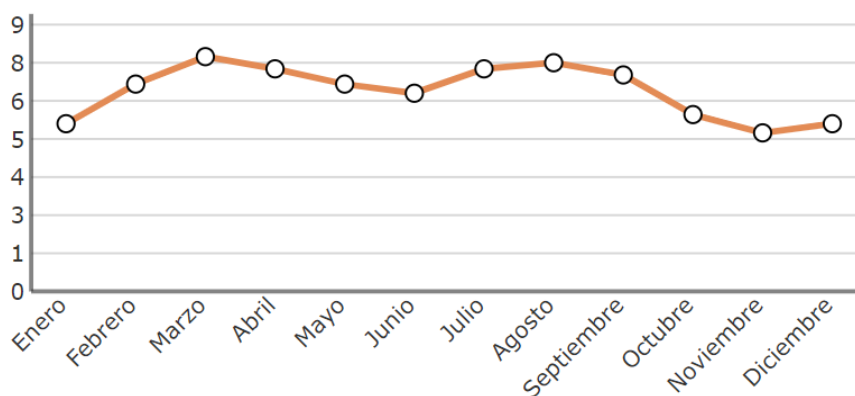


Fuente: (Datosmundial.com, s.f.)

2. Atlántida: La alta humedad y las temperaturas elevadas hacen que el tiempo sea agradable a veces, pero también húmedo en el trópico. Hace calor todo el año. La temperatura media oscila en 25.3 °C con máximas promedio de 27 °C y mínimas promedio de 23.4 °C

Brillo solar: Este departamento presenta los valores más bajos de brillo solar con 6.6 horas oscilando entre 6.4 y 6.8 horas, esto se debe a que esta región se presentan grandes cantidades de nubosidad, gracias a los huracanes y frentes fríos, como se muestra en la Figura A.4.7.

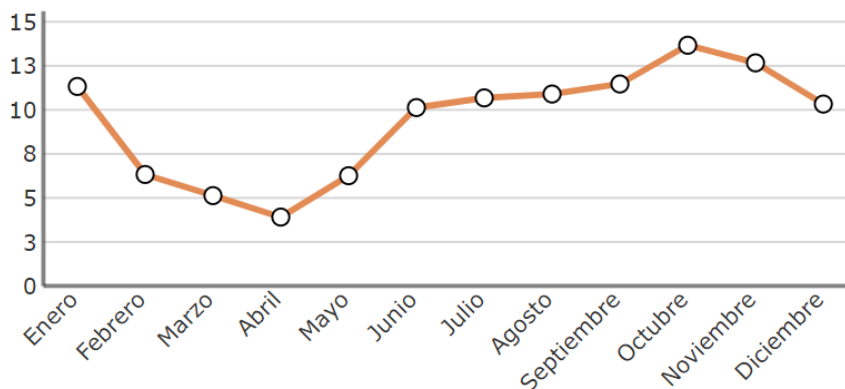
Figura A.4.7 Horas de Sol promedio diario mensual en Atlántida



Fuente: (Datosmundial.com, s.f.)

Días de lluvia al mes: con 14 días de lluvia, octubre ofrece la mayor cantidad de días lluviosos y abril la menor, como se muestra en la Figura A.4.8.

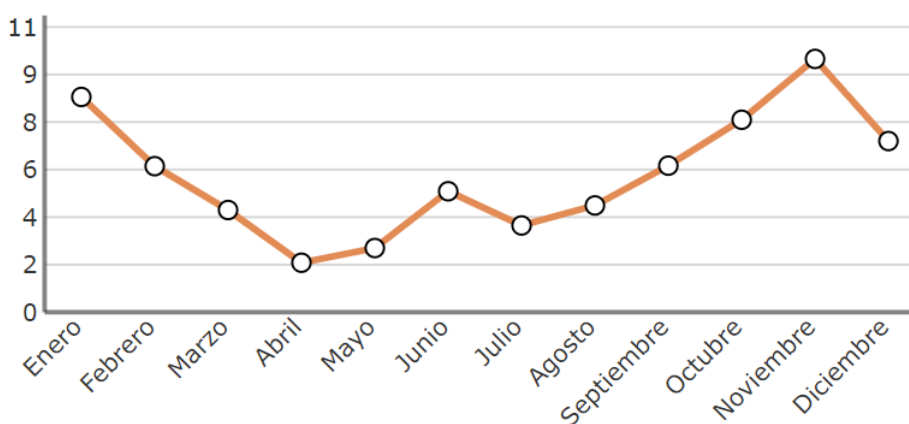
Figura A.4.8 Días de lluvia al mes en Atlántida



Fuente: (Datosmundial.com, s.f.)

Cantidad de precipitaciones: Es uno de los departamentos que presenta mayores cantidades de lluvia en el territorio hondureño, esto debido a la incidencia de la humedad del Atlántico, frentes fríos, ondas tropicales, ciclones tropicales, entre otros. La cantidad de lluvia anual oscila en los 3,300 mm, siendo el mes de noviembre el que presenta los valores máximos de precipitación. La menor cantidad de lluvia diaria que se ha registrado se presenta en el mes de abril con sólo 2,0 mm.. como se muestra en la Figura A.4.9.

Figura A.4.9 Cantidad de precipitación en mm/día en Atlántida

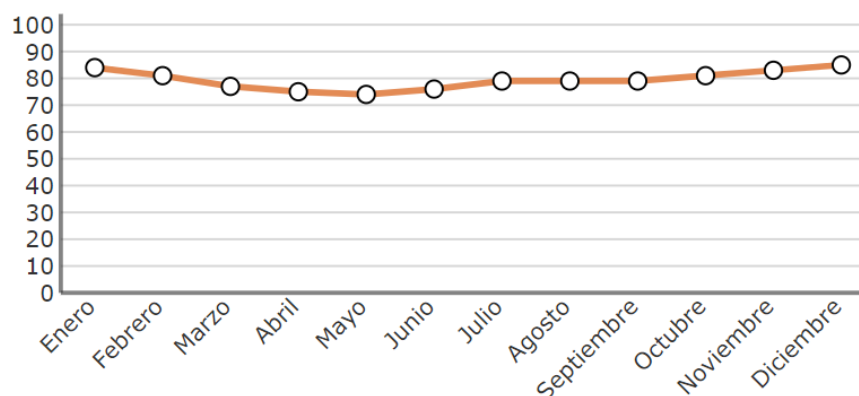


Fuente: (Datosmundial.com, s.f.)

Humedad relativa

El valor promedio anual de la humedad es de 82% oscilando entre 79% y 85%, el mes de diciembre presenta la mayor humedad relativa y el mes de mayo la menor, como se muestra en la Figura A.4.10.

Figura A.4.10 Humedad relativa del aire en % en Atlántida



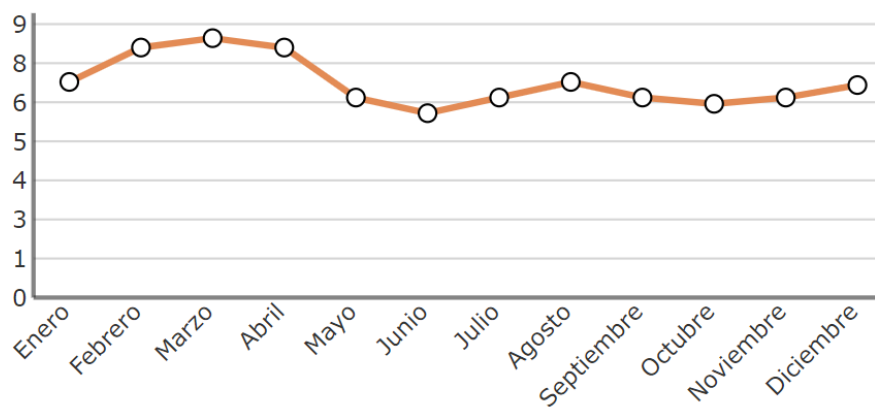
Fuente: (Datosmundial.com, s.f.)

3. Comayagua

Brillo solar

Con un promedio de 9 horas diarias de heliofanía, marzo es el mes más soleado en el departamento de Comayagua, como se muestra en la Figura A.4.11.

Figura A.4.11 Horas de Sol promedio diario mensual en Comayagua

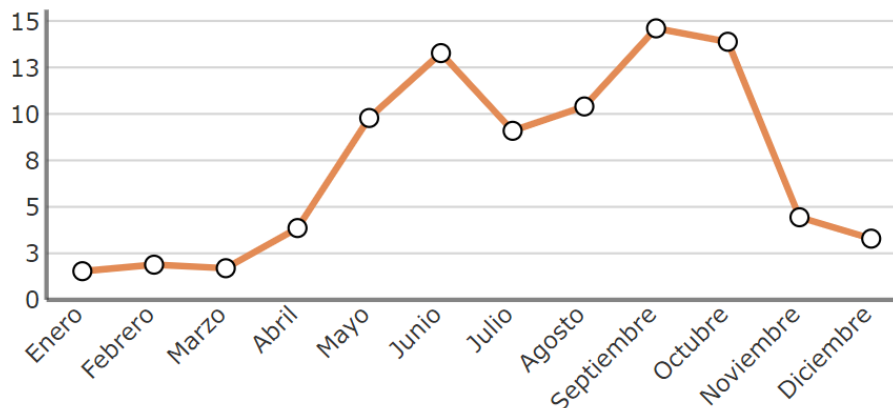


Fuente: (Datosmundial.com, s.f.)

Días de lluvia al mes

Con 15 días de lluvia, el mes de septiembre presenta la mayor cantidad de días lluviosos y enero la menor, como se muestra en la Figura A.4.12.

Figura A.4.12 Días de lluvia al mes en Comayagua

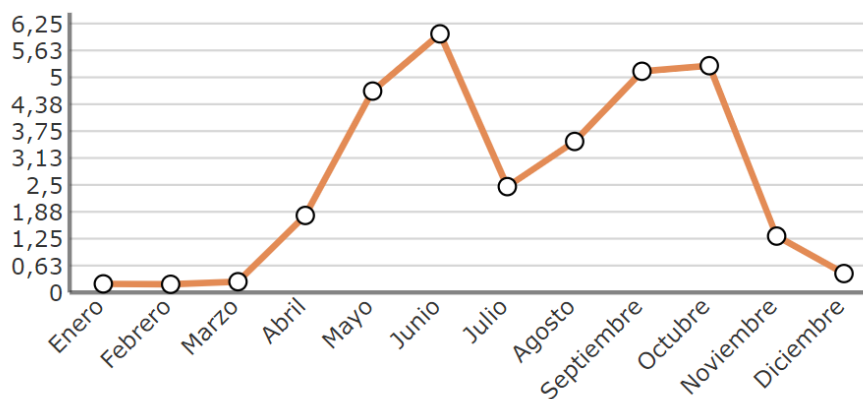


Fuente: (Datosmundial.com, s.f.)

Cantidad de precipitaciones

La cantidad de precipitación promedio anual es de 827.2 mm oscilando entre 639 y 1179 mm. La menor lluvia diaria cae en febrero con sólo 0,2 mm. El mes de junio, en cambio, es el mes que presenta los días con más lluvia. Dentro de la temporada lluviosa los meses de julio y agosto presentan los días con menos lluvia, esto debido al efecto de la canícula, ver Figura A.4.13.

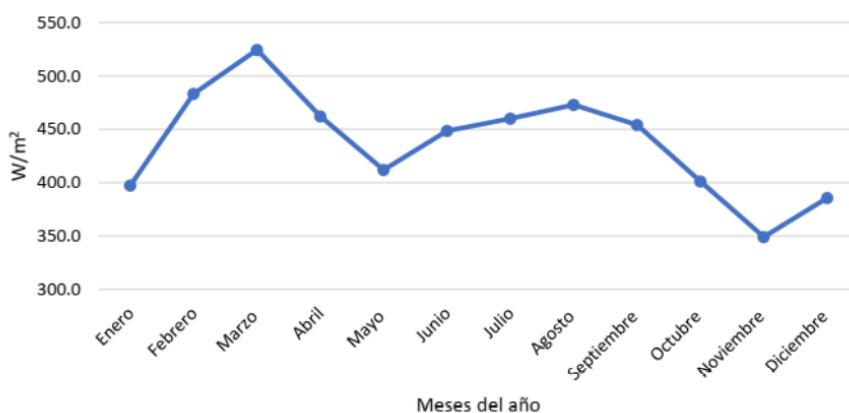
Figura A.4.13 Cantidad de precipitación en mm/día en Comayagua



Fuente: (Datosmundial.com, s.f.)

Irradiación global horizontal: es mayor los meses de febrero marzo, abril y agosto en la Ciudad de Comayagua, como se muestra en la Figura A.4.14.

Figura A.4.14 GHI mensual promedio durante el 2019 en la ciudad de Comayagua



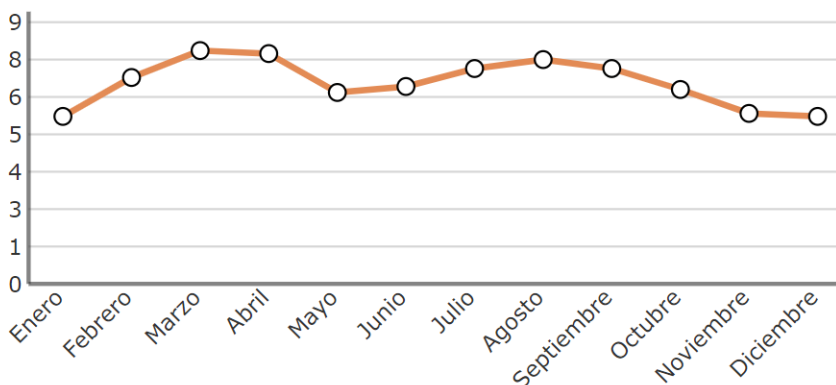
Fuente: (Datosmundial.com, s.f.)

4.Cortés

Es una de las regiones más cálidas y húmedas de Honduras y tiene una temperatura media diaria máxima de 31 °C, con valores medios mensuales de 26.3 °C, temperaturas máximas de 40 °C y temperaturas mínimas de 16.3. La alta humedad y las temperaturas elevadas hacen que clima no sea tan agradable, hace calor todo el año.

Brillo solar: con un promedio de 8 horas diarias de heliofanía, marzo es el mes más soleado en el departamento de Cortés, como se muestra en la Figura A.4.15.

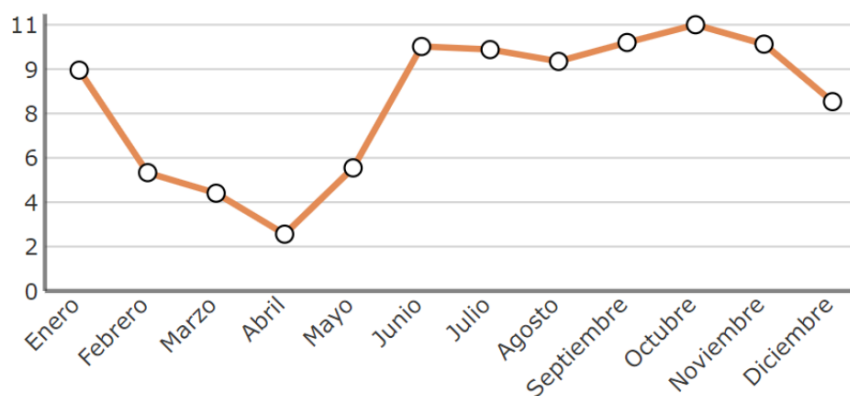
Figura A.4.15 Horas de Sol promedio diario mensual en Cortés



Fuente: (Datosmundial.com, s.f.)

Días de lluvia al mes: Con 12 días de lluvia, el mes de octubre presenta la mayor cantidad de días lluviosos y abril la menor, como se muestra en la Figura A.4.16.

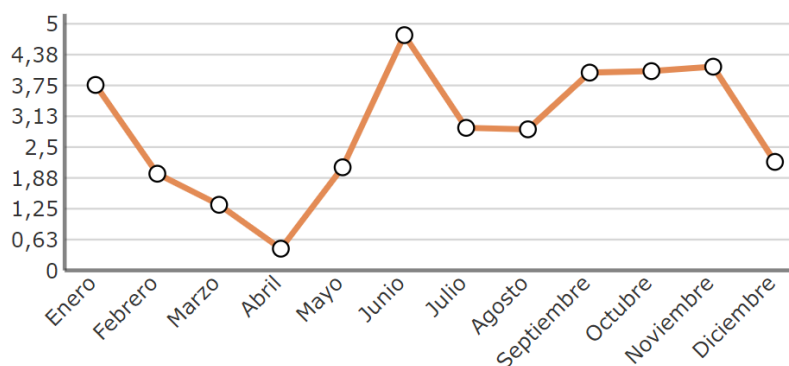
Figura A.4.16 Días de lluvia al mes en Cortés



Fuente: (Datosmundial.com, s.f.)

Cantidad de precipitaciones: La cantidad media anual de precipitación oscila en los 1,215 mm, la cantidad menor lluvia cae en abril con sólo 0,4 mm. El mes de junio, en cambio, es el más lluvioso, como se observa en la Figura A.4.13.

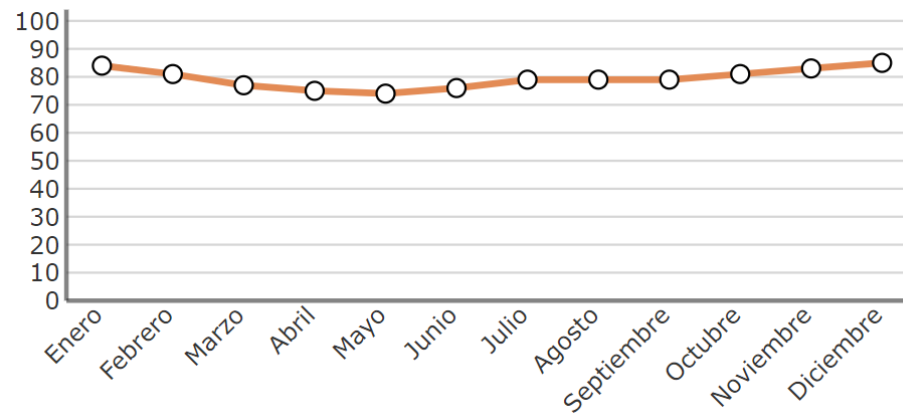
Figura A.4.17 Cantidad de precipitación en mm/día en Cortés



Fuente: (Datosmundial.com, s.f.)

Humedad relativa: los valores medios oscilan en 80%. El mes de diciembre presenta la mayor humedad relativa. En cambio, el mes de mayo presenta la menor, como se observa en la Figura A.4.18.

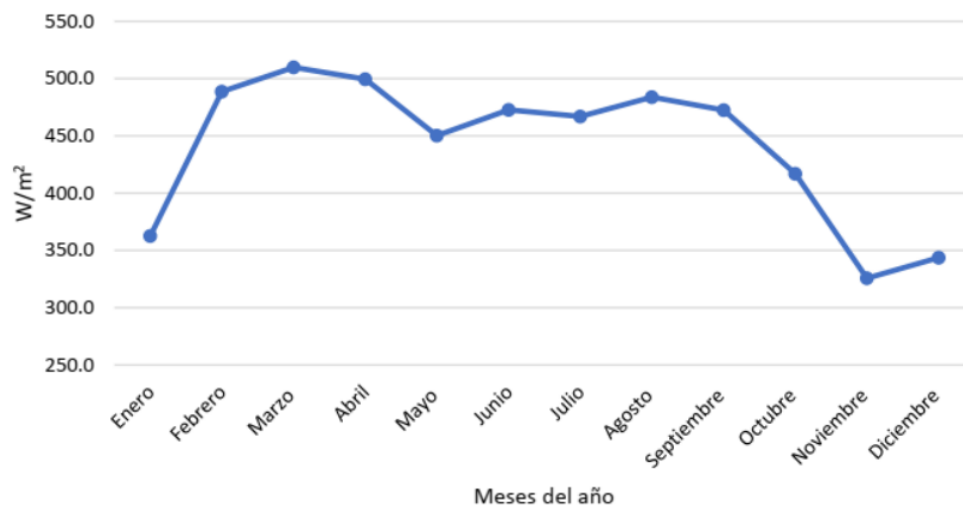
Figura A.4.18 Humedad relativa del aire en % en Cortés



Fuente: (Datosmundial.com, s.f.)

Irradiación global horizontal: es mayor en los meses de febrero, marzo y abril en la Ciudad de San Pedro Sula, como se muestra en la Figura A.4.19.

Figura A.4.19 GHI mensual promedio durante el 2019 en la ciudad de San Pedro Sula

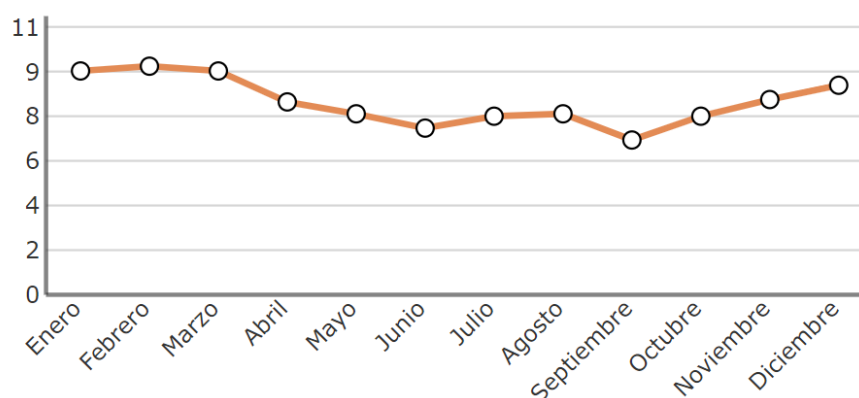


Fuente: (Datosmundial.com, s.f.)

5. Choluteca: es una de las regiones más cálidas de Honduras y tiene una temperatura media mensual de 28.8 °C, con temperaturas máximas promedio de 40 °C y temperaturas medias mínimas de 18.6 °C, la temperatura diaria máxima es de 43.7 °C. Hace calor todo el año.

Brillo solar: con un promedio de 10 horas diarias de heliofanía, febrero es el mes más soleado en el departamento de Choluteca, como se muestra en la Figura A.4.20.

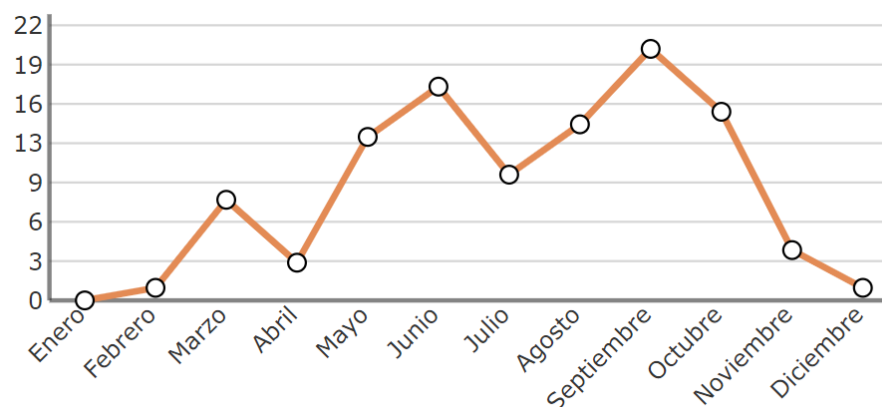
Figura A.4.20 Horas de Sol promedio diario mensual en Choluteca



Fuente: (Datosmundial.com, s.f.)

Días de lluvia al mes: con 20 días de lluvia, el mes de septiembre presenta la mayor cantidad de días lluviosos y enero la menor, como se muestra en la Figura A.4.21. La cantidad anual de precipitación promedio es de 1,764 mm.

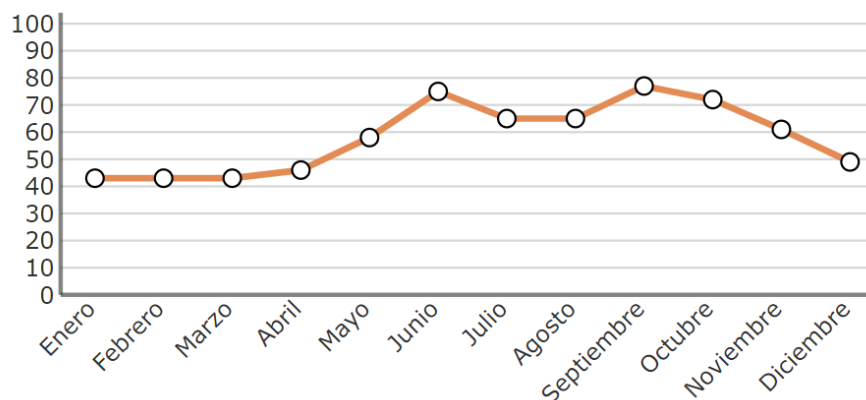
Figura A.4.21 Días de lluvia al mes en Choluteca



Fuente: (Datosmundial.com, s.f.)

Humedad relativa: en este departamento, el valor medio histórico es de 67%, el mes de septiembre presenta la mayor humedad relativa. En cambio, marzo la menor, como se muestra en la Figura A.4.22.

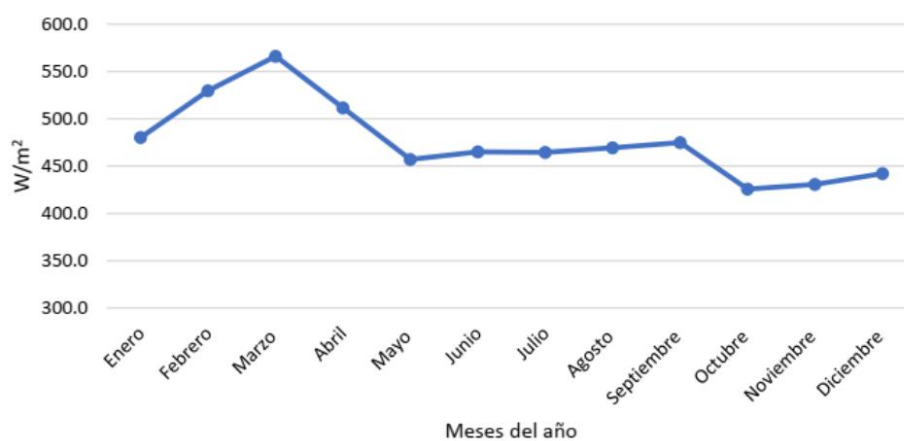
Figura A.4.22 Humedad relativa del aire en % en Choluteca



Fuente: (Datosmundial.com, s.f.)

Irradiación global horizontal: es mayor los meses de febrero, marzo y abril en la Ciudad de Choluteca, como se observa en la Figura A.4.23.

Figura A.4.23 GHI mensual promedio durante el 2019 en la ciudad de Choluteca

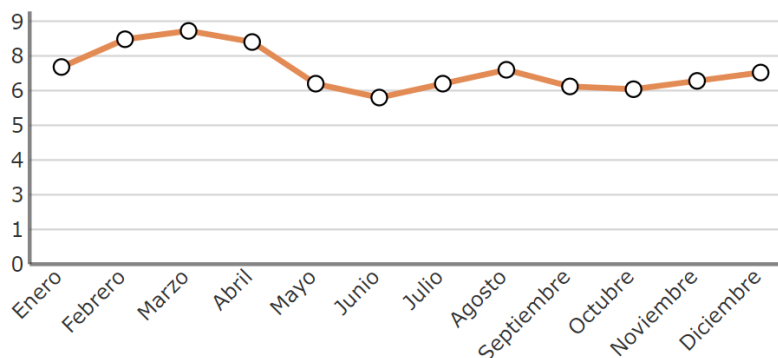


Fuente: (Datosmundial.com, s.f.)

6. El Paraíso

Brillo solar: con un promedio de 9 horas diarias de heliofanía, marzo es el mes más soleado en el departamento de El Paraíso, como se muestra en la Figura A.4.24.

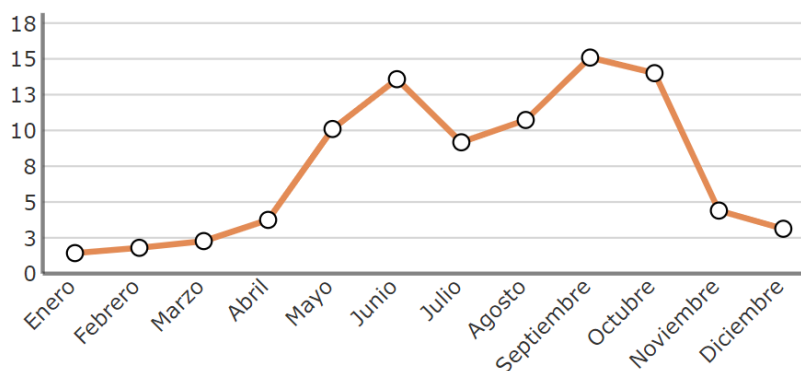
Figura A.4.24 Horas de Sol promedio diario mensual en El Paraíso



Fuente: (Datosmundial.com, s.f.)

Días de lluvia al mes: con 16 días de lluvia, el mes de septiembre presenta la mayor cantidad de días lluviosos y enero la menor, como se muestra en la Figura A.4.25.

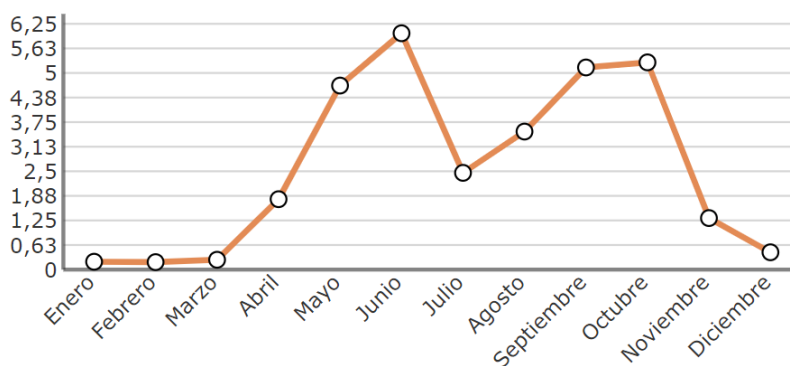
Figura A.4.25 Días de lluvia al mes en El Paraíso



Fuente: (Datosmundial.com, s.f.)

Cantidad de precipitaciones: el promedio anual de precipitación es de 999 mm con cantidades máximas anuales de 1600 mm. La menor lluvia cae en febrero con sólo 0,2 mm. El mes de junio, en cambio, es el más lluvioso, como se muestra en la Figura A.4.26.

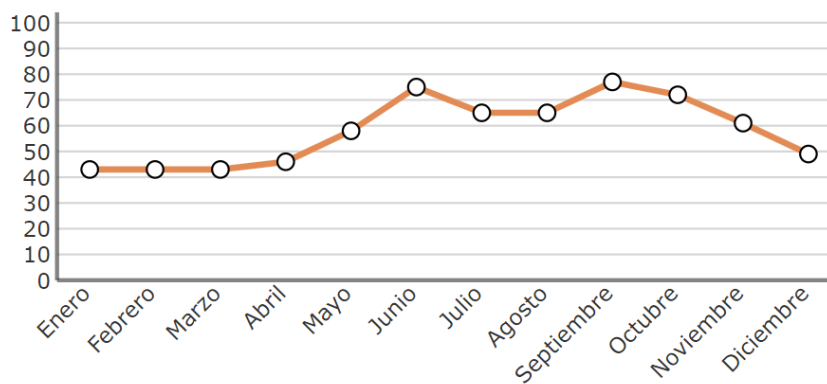
Figura A.4.26 Cantidad de precipitación en mm/día en El Paraíso



Fuente: (Datosmundial.com, s.f.)

Humedad relativa: el mes de septiembre presenta la mayor humedad relativa. En cambio, marzo la menor, como se muestra en la Figura A.4.27.

Figura A.4.27 Humedad relativa del aire en % en El Paraíso

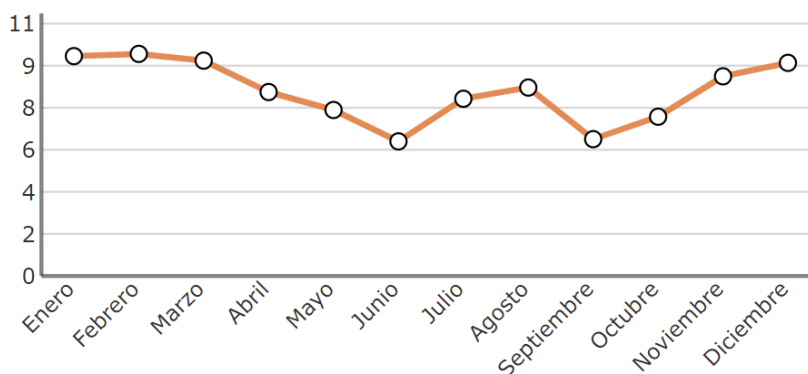


Fuente: (Datosmundial.com, s.f.)

7. Lempira: El clima es muy cálido, con una media anual de 30 °C, tiene pocos meses verdaderamente tropicales y hace calor todo el año.

Brillo solar: con un promedio de 10 horas diarias de heliofanía, febrero es el mes más soleado del departamento de Lempira, como se muestra en la Figura A.4.28.

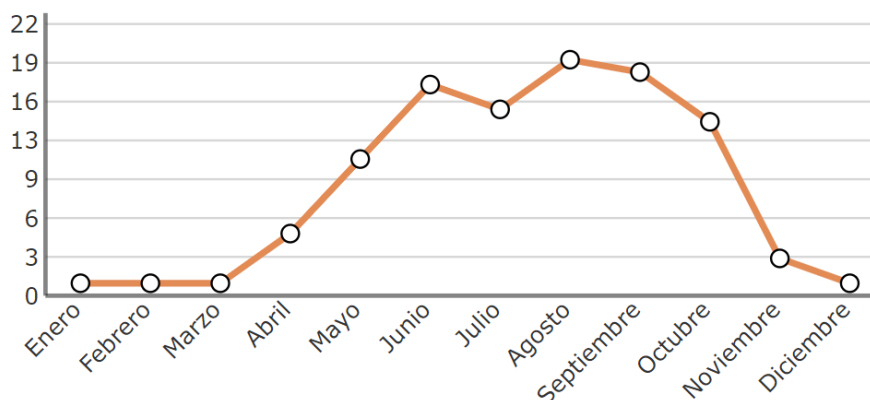
Figura A.4.28 Horas de Sol promedio diario mensual en Lempira



Fuente: (Datosmundial.com, s.f.)

Días de lluvia al mes: con 19 días de lluvia, el mes de agosto presenta la mayor cantidad de días lluviosos y diciembre la menor, como se muestra en la Figura A.4.29.

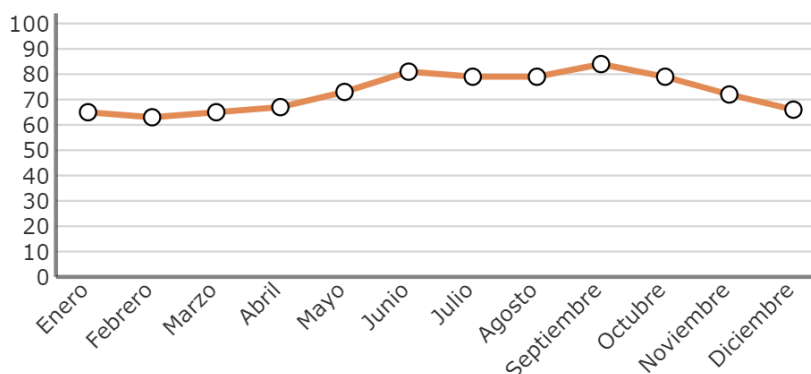
Figura A.4.29 Días de lluvia al mes en Lempira



Fuente: (Datosmundial.com, s.f.)

Humedad relativa: el mes de septiembre presenta la mayor humedad relativa. En cambio, el mes de febrero la menor, como se muestra en la Figura A.4.30.

Figura A.4.30 Humedad relativa del aire en % en Lempira

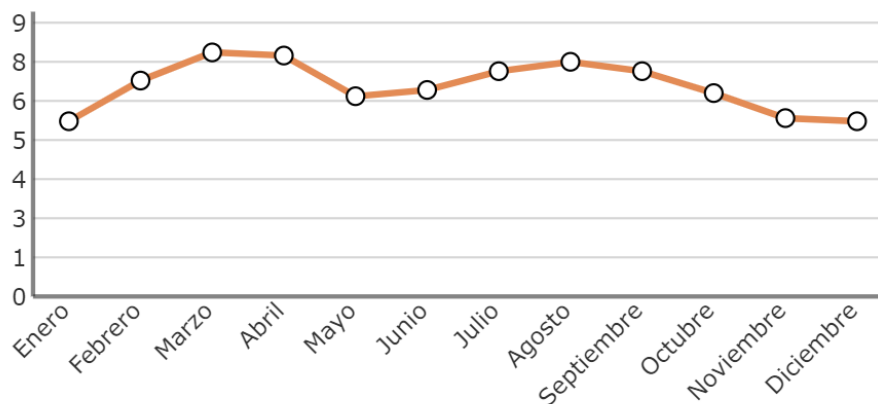


Fuente: (Datosmundial.com, s.f.)

8. Santa Bárbara: es una de las regiones más cálidas de Honduras y tiene una temperatura media diaria máxima de 31 °C.

Brillo solar: con un promedio de 8 horas diarias de heliofanía, marzo es el mes más soleado, como se observa en la Figura A.4.31.

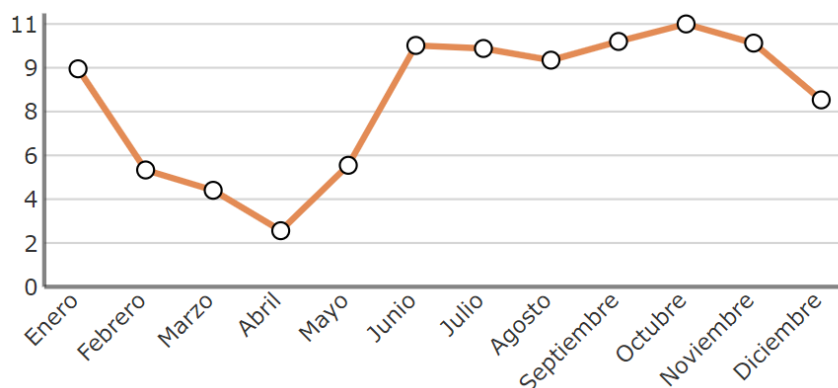
Figura A.4.31 Horas de Sol promedio diario mensual en Santa Bárbara



Fuente: (Datosmundial.com, s.f.)

Días de lluvia al mes: con 12 días de lluvia, el mes de octubre presenta la mayor cantidad de días lluviosos y el mes de abril la menor, como se muestra en la Figura A.4.32.

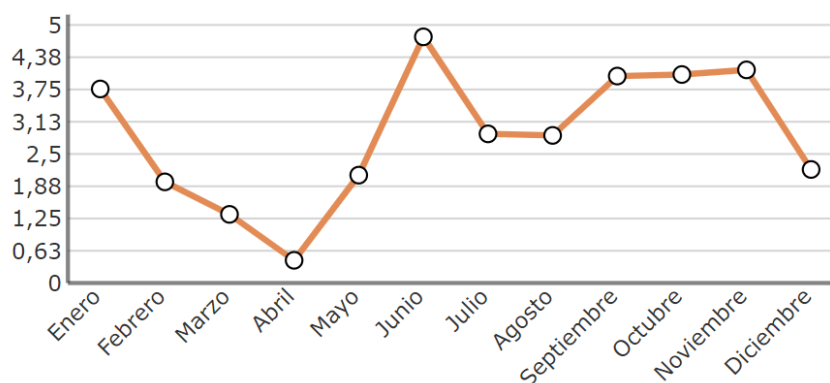
Figura A.4.32 Días de lluvia al mes en Santa Bárbara



Fuente: (Datosmundial.com, s.f.)

Cantidad de precipitaciones: la menor lluvia cae en abril con sólo 0,4 mm. El mes de junio, en cambio, es el más lluvioso, como se observa en la Figura A.4.33.

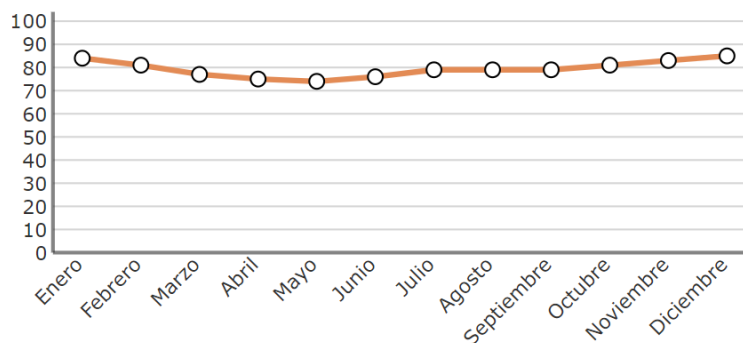
Figura A.4.33 Cantidad de precipitación en mm/día en Santa Bárbara



Fuente: (Datosmundial.com, s.f.)

Humedad relativa: el mes de diciembre presenta la mayor humedad relativa. En cambio, el mes de mayo la menor, como se muestra en la Figura A.4.34.

Figura A.4.34 Humedad relativa del aire en % en Santa Bárbara

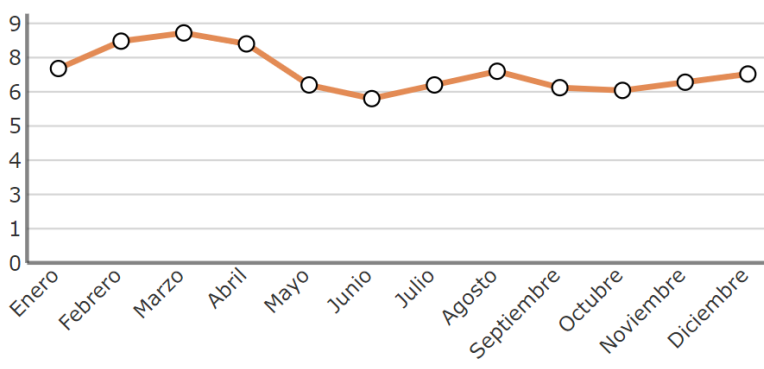


Fuente: (Datosmundial.com, s.f.)

9. Valle:

Brillo solar: con un promedio de 9 horas diarias de heliofanía, marzo es el mes más soleado en el departamento de Valle, como se muestra en la Figura A.4.35.

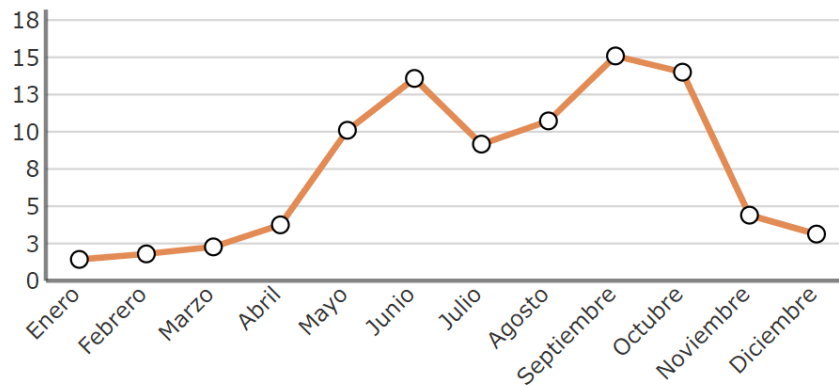
Figura A.4.35 Horas de Sol promedio diario mensual en Valle



Fuente: (Datosmundial.com, s.f.)

Días de lluvia al mes: con 16 días de lluvia, el mes de septiembre presenta la mayor cantidad de días lluviosos y enero la menor, como se muestra la Figura A.4.36.

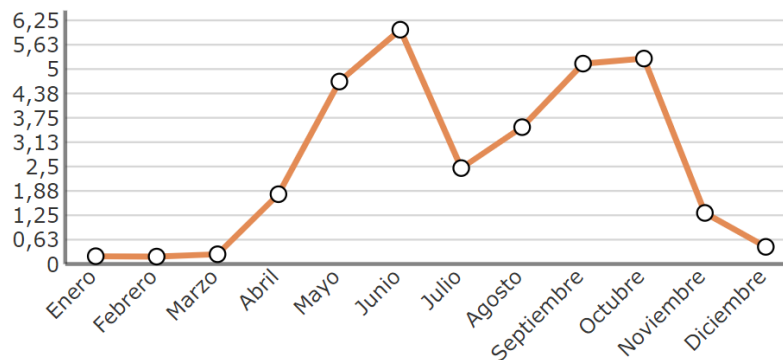
Figura A.4.36 Días de lluvia al mes en Valle



Fuente: (Datosmundial.com, s.f.)

Cantidad de precipitaciones: La menor lluvia cae en febrero con sólo 0,2 mm. El mes de junio, en cambio, es el más lluvioso, como se muestra en la Figura A.4.37

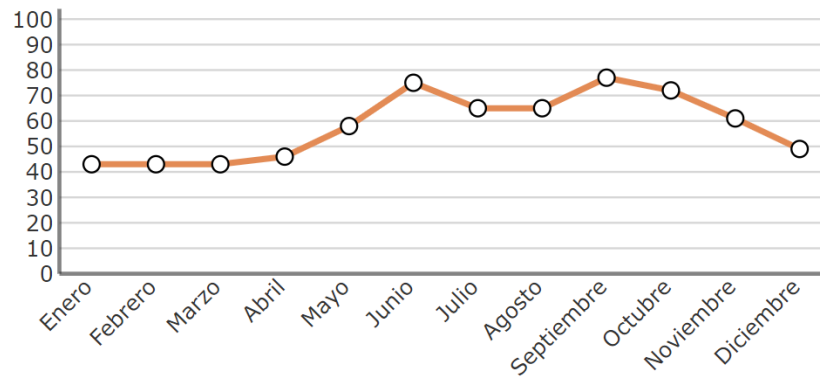
Figura A.4.37 Cantidad de precipitación en mm/día en Valle



Fuente: (Datosmundial.com, s.f.)

Humedad relativa: el mes de septiembre presenta la mayor humedad relativa. En cambio, el mes de marzo la menor, como se observa en la Figura A.4.38.

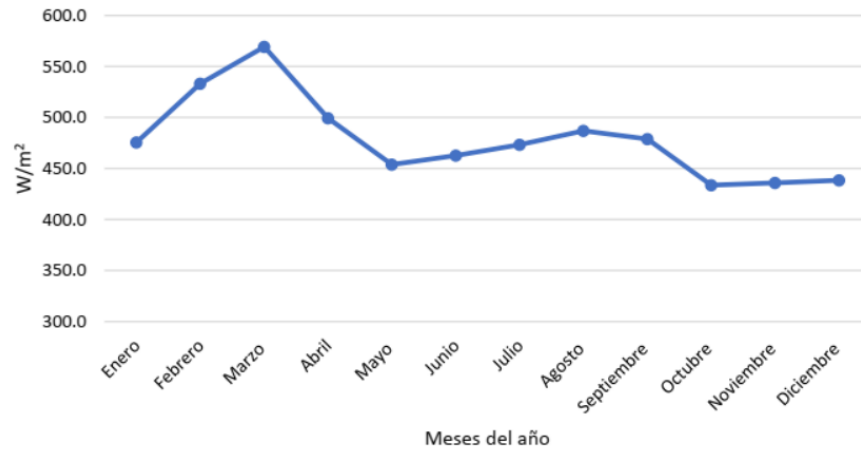
Figura A.4.38 Humedad relativa del aire en % en Valle



Fuente: (Datosmundial.com, s.f.)

Irradiación global horizontal: es mayor los meses de febrero, marzo y abril en la Ciudad de Nacaome, como se muestra en la Figura A.4.39.

Figura A.4.39 GHI mensual promedio durante el 2019 en la ciudad de Nacaome

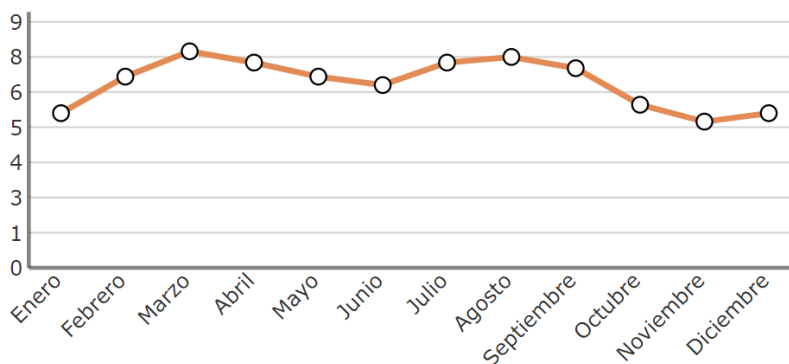


Fuente: (Datosmundial.com, s.f.)

10. Yoro:

Brillo solar: con un promedio de 8 horas diarias de heliofanía, marzo es el mes más soleado. En cambio, la heliofanía es menor en noviembre, como se muestra en la Figura A.4.40.

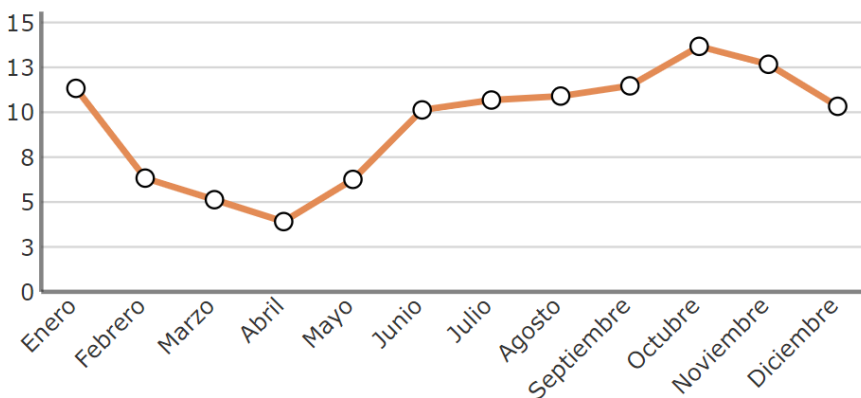
Figura A.4.40 Horas de Sol promedio diario mensual en Yoro



Fuente: (Datosmundial.com, s.f.)

Días de lluvia al mes: con 14 días de lluvia, el mes de octubre presenta la mayor cantidad de días lluviosos y el mes de abril la menor, como se observa en la Figura A.4.41.

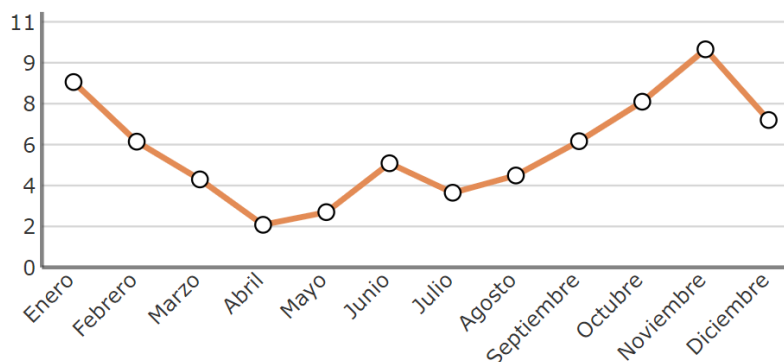
Figura A.4.41 Días de lluvia al mes en Yoro



Fuente: (Datosmundial.com, s.f.)

Cantidad de precipitaciones: la menor lluvia cae en abril con sólo 2,0 mm. El mes de noviembre, en cambio, es el más lluvioso, como se muestra en la Figura A.4.42.

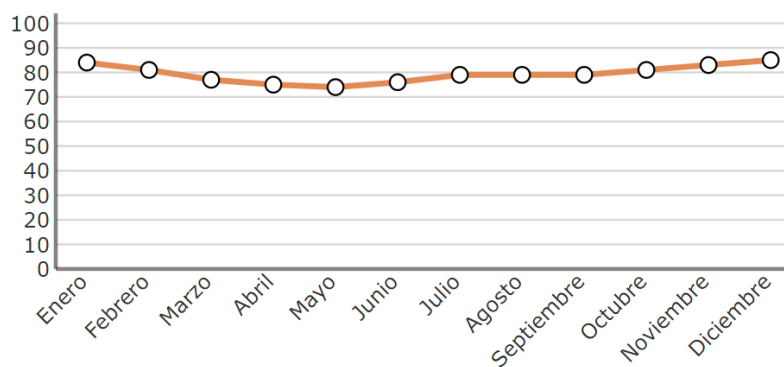
Figura A.4.42 Cantidad de precipitación en mm/día en Yoro



Fuente: (Datosmundial.com, s.f.)

Humedad relativa: el mes de diciembre presenta la mayor humedad relativa. En cambio, el mes de mayo la menor, como se muestra en la Figura A.4.43.

Figura A.4.43 Humedad relativa del aire en % en Yoro

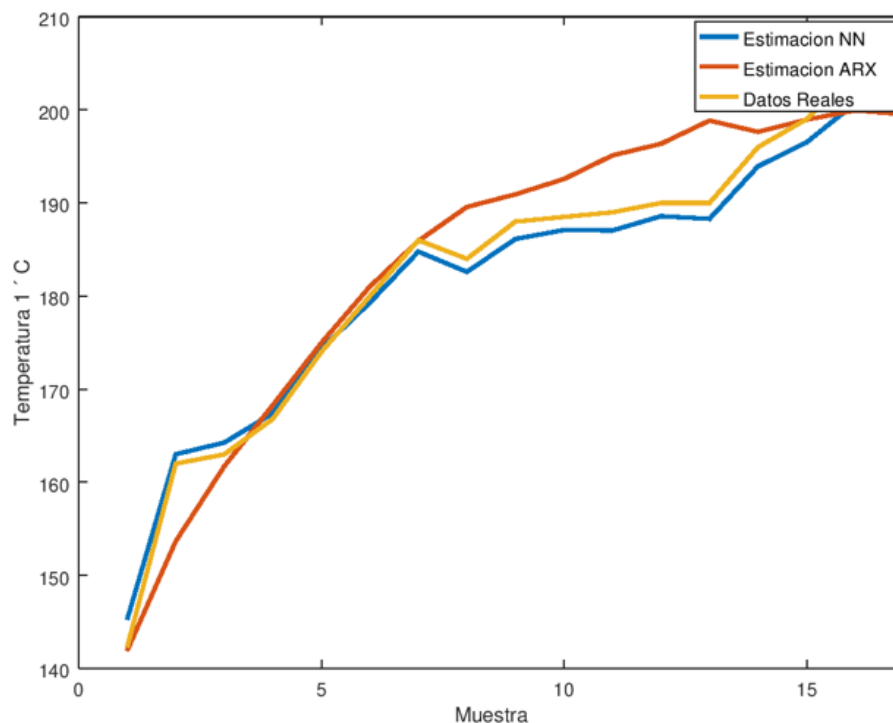


Fuente: (Datosmundial.com, s.f.)

A.5 Comparación de los resultados de la estimación de temperaturas, usando el modelo autorregresivo y el modelo de Redes Neuronales

En la Figura A.5.1 se muestran los resultados obtenidos por el modelo autorregresivo y el modelo de Redes Neuronales, como se observa en la figura, el que más se ajusta es el modelo de redes neuronales, es por eso, que fue el seleccionado en este proyecto de investigación.

Figura A.5.1 Comparación del modelo autorregresivo y el modelo de Redes Neuronales



Fuente: Elaboración propia

A.6 Análisis estadístico de las mediciones

A.6.1. Pruebas de Normalidad

Una vez que se tienen los coeficientes de correlación a nivel de muestra entre las variables, es necesario hacer una inferencia para saber si la correlación es válida para la población y saber cuáles son los valores de correlación en dicha población.

Para poder hacer esa inferencia, se deben cumplir ciertos supuestos y uno de ellos es que las variables tengan normalidad.

En este caso como el tamaño de la muestra es pequeño, lo más conveniente es utilizar la prueba Shapiro-Wilk para saber si las variables son o no son normalizadas.

En la Tabla A.6.1, se muestran las pruebas de normalidad, donde se observa que en el caso de la irradiancia los valores de p-value son menores a 0.05, por lo tanto, se rechaza la normalidad de esa variable.

Tabla A.6.1. Pruebas de normalidad

Parámetro	Fecha	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	Grados de libertad	p-value
Irradiancia I (W/m ²)	04.03.2022	0.873	14	0.046
	06.03.2022	0.690	18	0.000
	09.03.2022	0.560	20	0.000
Temperatura (°C)	04.03.2022	0.956	14	0.661
	06.03.2022	0.917	18	0.115
	09.03.2022	0.800	20	0.001
Velocidad viento (m/s)	04.03.2022	0.964	14	0.795
	06.03.2022	0.925	18	0.161
	09.03.2022	0.936	20	0.201

Cabe destacar que, cuando hay problemas de normalización también hay problemas para hacer la inferencia hacia la población y es oportuno utilizar la transformada de Fischer para obtener los intervalos de confianza para los coeficientes de correlación a nivel de la población.

En la Tabla A.6.2, se muestra el análisis de correlación bivariada, para estimaciones al 95 % de confianza con base en la Transformada de Fisher.

Tabla A.6.2. Análisis de correlación bivariada

						IC95% Para r	
Variables		n	Correlación de Pearson (r)	p-value	Z-Transformada de Fisher	LI	LS
Irradiancia I (W/m ²)	Temperatura (°C)	14	0.781**	0.001	1.048	0.000	0.921
Irradiancia I (W/m ²)	Temperatura (°C)	18	0.921**	0.000	1.596	0.000	0.939
Irradiancia I (W/m ²)	Temperatura (°C)	20	0.939**	0.000	1.730	0.000	0.000
Velocidad viento (m/s)	Temperatura (°C)	14	-0.652*	0.012	-0.779	0.467	0.167
Velocidad viento (m/s)	Temperatura (°C)	18	0.167	0.507	0.169	0.340	- 0.219
Velocidad viento (m/s)	Temperatura (°C)	20	-0.219	0.354	-0.223	0.000	0.000

** La correlación es significativa al nivel 0.01

* La correlación es significativa al nivel 0.05

A.6.2. Histogramas de Pearson

Para poder visualizar el comportamiento normalizado acampanado, se han elaborado histogramas de frecuencia para cada una de las variables (temperatura, velocidad del viento e irradiancia), como se muestran en la Figura A.6.1, Figura A.6.2 y Figura A.6.3.

Figura A.6.1 Histogramas de Frecuencia versus Irradiancia

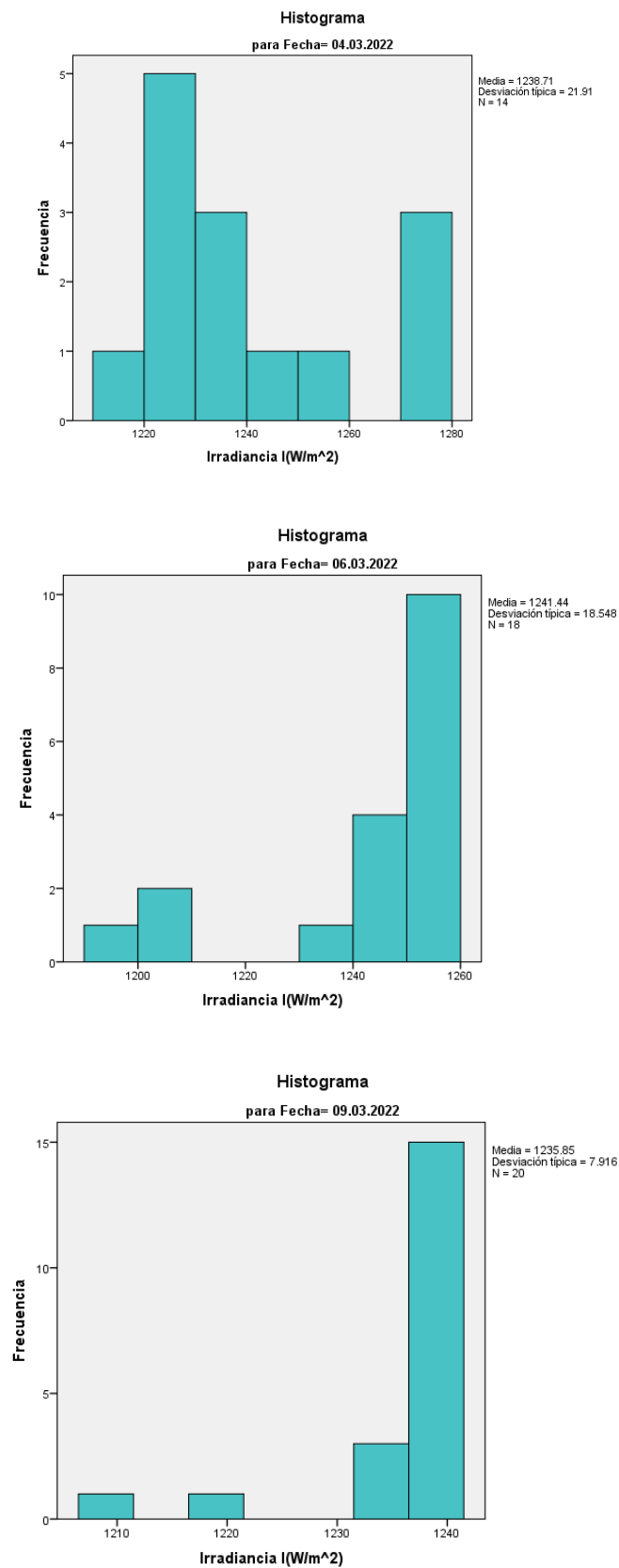


Figura A.6.2 Histogramas de Frecuencia versus Temperatura

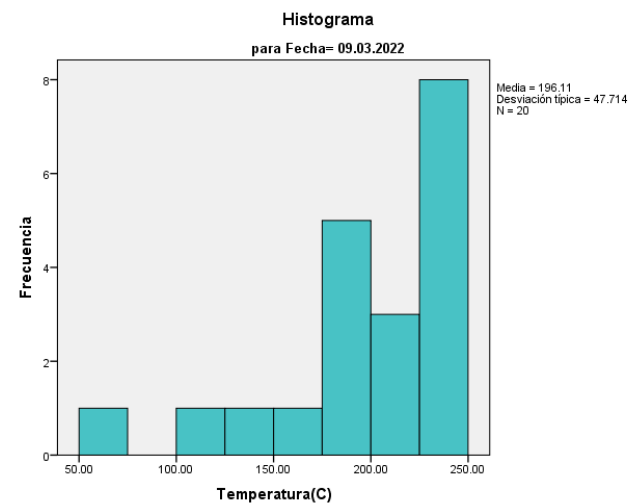
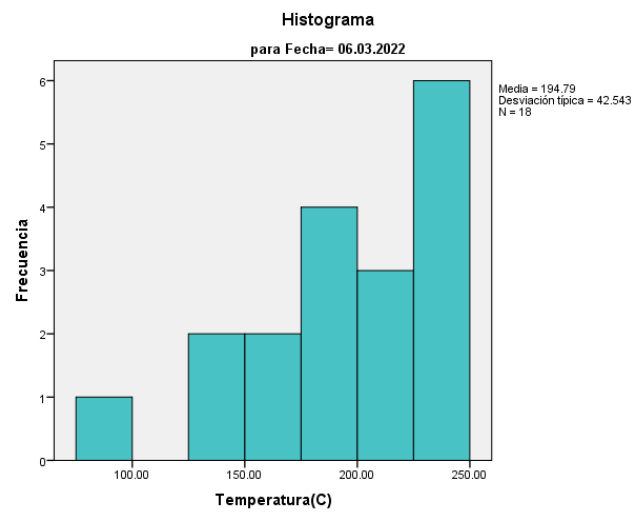
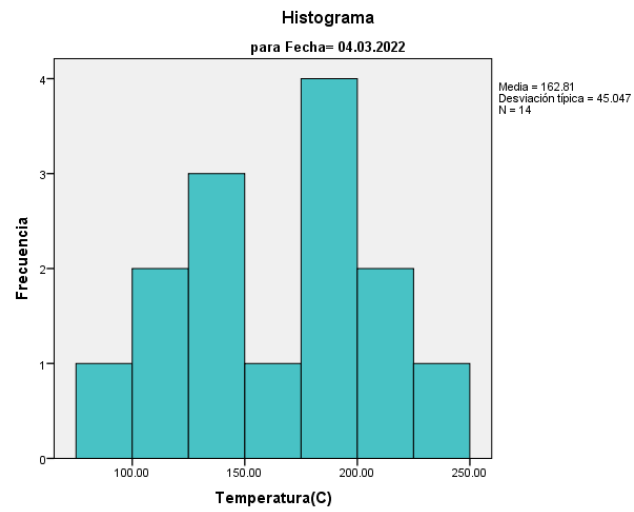
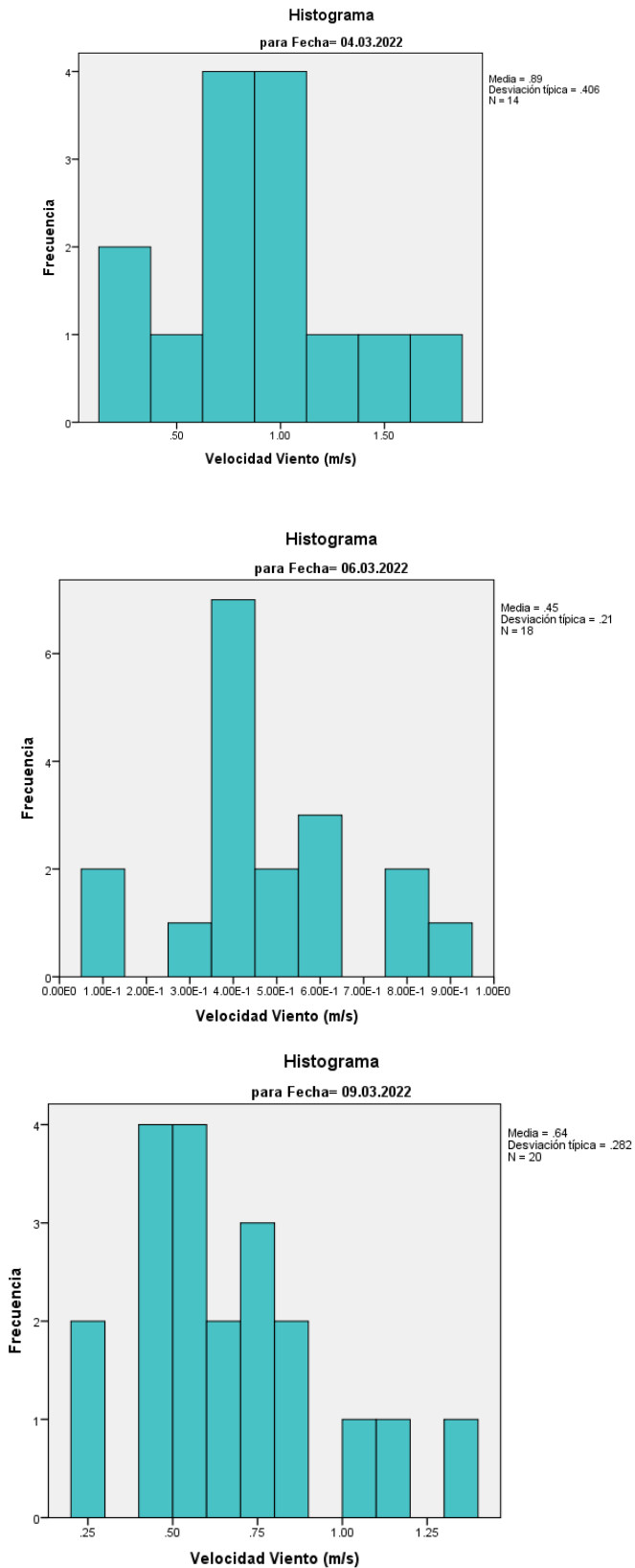


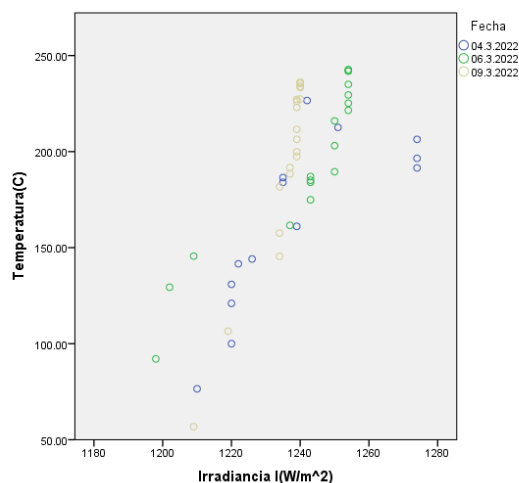
Figura A.6.3 Histogramas de Frecuencia versus Velocidad del viento



A.6.3 Diagramas de dispersión para temperatura e irradiancia

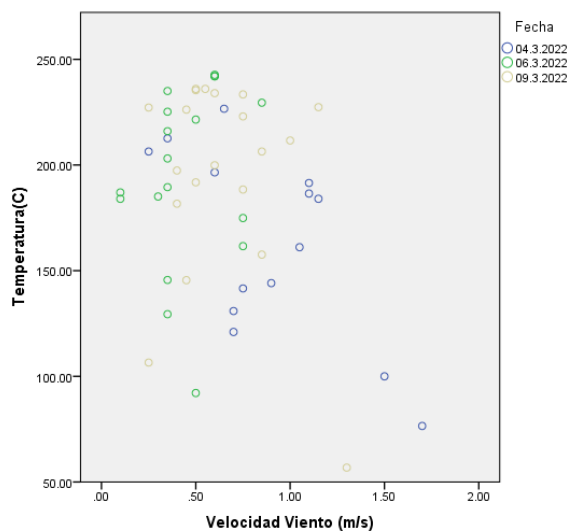
La Gráfica A.6.1, nos muestra que, en la medida que aumenta la irradiancia, la temperatura en la cámara de tostado muestra un incremento, donde, en las gráficas, las circunferencias azules, nos indican los datos para el día 4 de marzo de 2022, las verdes los datos del día 6 de marzo y el color amarillo los datos del 9 de marzo.

Gráfica A.6.1. Diagrama de Dispersión de la Temperatura versus irradiancia



La Grafica A.6.2, nos muestra el diagrama de dispersión para la temperatura y la velocidad del viento en el sitio del experimento, donde para el día 4 de marzo se observa una clara relación inversa entre la temperatura de la cámara de tostado y la velocidad del viento.

Gráfica A.6.2. Diagrama de dispersión de la temperatura versus velocidad del viento



Bibliografía

- Adopptics. (2021). The Complete Guide to Non-Imaging Optics. Retrieved from <https://www.addoptics.nl/optics-explained/non-imaging-optics/>
- Babu, M., Raj, S. S., & Arasu, A. V. (2019, septiembre). Experimental analysis on Linear Fresnel reflector solar concentrating hot water system with varying width reflectors. *Case Studies in Thermal Engineering*, 14. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X19300061>
- Balbuena, A. Á. (2011). *Sistemas ópticos para concentración, captación y guiado de radiación solar. (Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid)*. Retrieved from <https://eprints.ucm.es/id/eprint/15359/1/T33478.pdf>
- Calidad de café tostado, en grano o molido. (2001). *Revista del consumidor*, 1.
- Chambi Mamani, P., & Vilca Rodriguez, E. (2013). *Diseño e implementación de un prototipo de conversion de energía compuesto por un concentrador solar y un motor Stirling para la Region Puno. (.)*. Puno. Retrieved from <https://1library.co/document/yngm37pz-diseno-implementacion-prototipo-conversion-energia-compuesto-concentrador-stirling.html>
- Chemisana Villegas, D. (2009). *Diseño y caracterización de un concentrador térmico - fotovoltaico cuasiestacionario para integración arquitectónica*. Lleida.
- Díaz, J. E. (2021). *Modelado y construcción de un concentrador parabólico compuesto con receptor aletado para uso residencial*. Mérida. Retrieved from https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/1986/1/PCER_D_Tesis_2021_Javier_Enrique_Barron_Diaz.pdf
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
- Ebrahimi, M., & Keshavarz, A. (2015). *Combined Cooling, Heating and Power*.
- EcoInventos. (2015, Febrero 19). Retrieved from <https://ecoinventos.com/intikallana-tostador-solar-de-cafe-desarrollado-en-peru/>
- El país. (2009, enero 15). El universo más allá de lo visible. *El País*. Retrieved from [https://elpais.com/sociedad/2009/01/15/actualidad/1231974010_850215.html#:~:text=El%20espectro%20electromagn%C3%A9tico%20\(EM\)%20es,12%20metros\)%20y%20los%20103m.](https://elpais.com/sociedad/2009/01/15/actualidad/1231974010_850215.html#:~:text=El%20espectro%20electromagn%C3%A9tico%20(EM)%20es,12%20metros)%20y%20los%20103m.)
- ETEK CITY. (n.d.). *ETEK CITY*. Retrieved from <https://www.etekcity.com/products/digital-kitchen-scale-ek8060>
- Faircompanies. (2007, Diciembre 6). Cómo tostar café con energía solar. Retrieved from <https://faircompanies.com/articles/como-tostar-cafe-con-energia-solar/>

- Flores, M. A., Serrano, F., & Cadena, C. (2021). Uso de redes neuronales para la obtención de imágenes termográficas en el absorbedor de un concentrador solar de Fresnel de doble reflexión, a partir de los registros de temperatura en el absorbedor. *ASADES*, 58-59.
- Flores, M. A. (2008) *Reporte de energía, Honduras*.
- FLUKE. (n.d.). *FLUKE*. Retrieved from <https://www.fluke.com/en-us/product/temperature-measurement/ir-thermometers/fluke-62-max>
- Giancoli, D. C. (2008). *Física para Ciencias e ingeniería*. Pearson.
- IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (n.d.). *CARACTERÍSTICAS DE LA RADIACIÓN SOLAR*. Retrieved from <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/caracteristicas-de-la-radiacion-solar#:~:text=Medir%20la%20radiaci%C3%B3n%20solar%20es,y%20uso%20de%20sistemas%20de>
- IDEAM. (n.d.). La radiación solar y su paso por la atmósfera. Retrieved from <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/la-radiacion-solar-y-su-paso-por-la-atmosfera>
- Instituto Hondureño del Café (IHCAFE). (n.d.). *Informe Estadístico 2019-2020*.
- Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica. (n.d.). *Climatological encyclopedia*. Retrieved from <https://www.imn.ac.cr/en/atlas-climatologico#:~:text=Heliophany%20is%20the%20number%20of,by%20an%20instrument%20called%20heliograph>.
- International coffee organization. (n.d.). Retrieved from https://www.ico.org/es/making_coffeec.asp?sect%20ion=Acerca_del_caf%E9#:~:text=Todo%20el%20aroma%20y%20el,de%20tueste%20que%20se%20quiera.
- National Coffee Association USA. (n.d.). *Coffee Roast Guide*. Retrieved from <https://www.ncausa.org/about-coffee/coffee-roasts-guide>
- Leutz, R., & Suzuki, A. (2001). *Design and Performance of Solar Concentrators*.
- Liu, Q., Wen, J., Qu, Y., He, T., Zhang, X., & Wang, L. (2012). Broadband albedo. In *Advanced Remote Sensing*. doi:10.1016/B978-0-12-385954-9.00007-1
- López, J. P. (2018). *Diseño de un concentrador solar compacto de foco fijo de alta eficiencia para aplicaciones de alta temperatura*. Chihuahua.
- Martínez Sanz, M. A. (2014, septiembre 1). *Bioclimatismo y su aplicación a Fachadas*. Retrieved from <https://1library.co/article/caracter%C3%ADsticas-superficiales-de-los-materiales.yrd9px7q>
- Ministerio de Industrias y Productividad. (2016). *Manual básico de buenas prácticas para el tostado de Café*, 15-17. Quito, Ecuador.
- Muerza, A. F. (2012, febrero 23). Siete formas de conseguir energía solar. Retrieved from <https://www.consumer.es/medio-ambiente/siete-formas-de-conseguir-energia-solar.html>

- Narva, O. (2020, junio 27). *El Foro Verde*. Retrieved from <https://elforoverde.org/energias-renovables/la-radiacion-solar/>
- National Aeronautics and Space Administration, Science Mission Directorate. (2010, agosto 10). Retrieved from NASA SCIENCE: https://science.nasa.gov/ems/01_intro
- Obando, S., Ortiz, J., & Loya, A. (2016, junio 19). Potencia y Energía. Retrieved from https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/51094652/POTENCIA_Y_ENERGIA-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1654097887&Signature=QkPI9v-kpl74iT1EEk~XHC5NnwJY1IHSJqujko1UiUzwr2V0VwRhYpjTOgsLm4RvD~M0w4c5qh4sWK~jd69lqDYRTAcbHVHbZMB~PtMtpXu5x0R889Eyy4Oa--V8Yi5GmDyGT3KC
- Perez Escudero, L. (2006). *Estudio teórico y de viabilidad de la radiación solar concentrada en un motor Stirling. Trabajo Final de Carrera en Ingeniería Industrial. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona*.
- Perfect Daily Grind. (2020, marzo 10). (P. D. Grind, Editor) Retrieved from <https://perfectdailygrind.com/es/2020/03/10/explorando-la-historia-de-la-produccion-de-cafe-de-honduras/>
- Phinet. (n.d.). Espectro de radiación solar.
- Planas, O. (2020, junio 3). *Energía Solar*. Retrieved from <https://solar-energia.net/energia-solar-termica/componentes/concentrador-solar>
- Ramírez, R. S., Sosa, I. A., Mendoza, M. G., López, G. G., & Pineda, T. S. (2007). Estudio de la hidrodinámica del café tostado (*Coffea arabica* L.) en lecho fluidizado. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*.
- Revista Fórum Café. (n.d.). La desgasificación del café: ¿Qué, cuándo y por qué? *Fórum Café*. Retrieved from <https://www.revistaforumcafe.com/desgasificacion-del-cafe>
- SABORA. (n.d.). Retrieved from <https://cafesabora.com/es/%C2%BFc%C3%B3mo-es-el-proceso-del-tostado-artesanal-del-caf%C3%A9>
- Sandoval, O. G., & Hinostroza, V. G. (2011). *Diseño de una Planta de Producción de Sistemas Solares Térmicos para la Empresa Enyatec CIA. LTDA*. Quito.
- Saravia Luis y Flores, M. (2004). Concentrador solar con doble reflexión para cocina solar comunal. *Avances en Energía Renovable y Medio Ambiente* (p. 3.31 a 3.36). Salta: ASADES.
- Schenker, S. H. (2002). Impact of roasting condition on the formation of aroma compounds in coffee beans. *Journal of Food Science*.
- Solá, A. (2011). Sabor de Café: Un paseo por la historia del tueste de café. 38-39.
- Sustainable Energy Science and Engineering Center. (n.d.). *Concentrating Collectors - Power Generation*.
- The weather*. (n.d.). Retrieved from <https://the-weather.com/btmeter-bt-100-handheld-anemometer/>

- Tomé López, C. (2017, 05 30). Potencia Y eficiencia de una maquina. *Cultura Científica*. Retrieved from <https://culturacientifica.com/2017/05/30/potencia-eficiencia-una-maquina/>
- Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. (n.d.). Retrieved from <http://www.ing.unp.edu.ar/electronica/asignaturas/ee016/anexo/m-dicopel.pdf>
- Urnex. (2021, Abril 12). Coffee Roasts – What are the Differences? Retrieved from <https://slowforestcoffee.com/different-types-of-coffee-roasts/>
- Velasco, C. P. (2012). *Diseño de Captador Solar Cilíndrico Parabólico para Aplicaciones Rurales en Paraguay*.
- Venegas Coll, C. (2017). *Diseño y construcción de un concentrador lineal Fresnel*. Valparaíso.