

CARACTERIZACIÓN Y DISEÑO DE UN HORNO SOLAR MEDIANTE TONATIUH PARA ANALIZAR LA EFICIENCIA EN LA COCCIÓN DE PAN

CHARACTERIZATION AND DESIGN OF A SOLAR OVEN USING TONATIUH FOR EVALUATING BAKING EFFICIENCY

Verdugo-Urías José Bulmaro

Tecnológico Nacional de México/ I.T. De Los Mochis

<https://orcid.org/0009-0007-6178-3722>

jose.vu@tecnm.mx

Argüeso-Mendoza Yeniba

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Los Mochis

<https://orcid.org/0000-0002-5691-7841>

yeniba.am@mochis.tecnm.mx

Ochoa-Espinoza Valente

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Los Mochis

<https://orcid.org/0009-0005-6163-962X>

valente.oe@mochis.tecnm.mx

Miranda-Arnold Juan Andrés

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Los Mochis

<https://orcid.org/0009-0003-7597-4248>

juan.ma@mochis.tecnm.mx

Ruiz-Ibarra Jesús Iván

Tecnológico Nacional de México/ I.T. De Los Mochis

<https://orcid.org/0000-0001-8800-9314>

jesus.ri@mochis.tecnm.mx

DOI: <https://doi.org/10.61273/neyart.v4i1.206>

Recibido: 19/02/2026 | Aceptado: 25/04/2026 | Publicado: 27/05/2026

Esta obra está bajo
una licencia internacional
Creative Commons Atribución 4.0.



Resumen-- Este proyecto se enfoca en la caracterización y diseño de un horno solar que utiliza una antena parabólica como concentrador, con especificaciones de 70 cm de diámetro, 61.25 cm de distancia focal y 5 cm de profundidad. Las pruebas incluyeron el diseño de un heliostato plano con seguidor solar (configurado como un cuadrado de dimensiones Lado x Lado) y la estimación de la distribución de flujo radiante y la potencia máxima obtenida sobre un objetivo circular de 20 cm de diámetro ubicado en la distancia focal. Se realizó un análisis paramétrico para evaluar cómo la posición del objetivo respecto a la distancia focal (alcance inclinado o slant range), el tamaño del receptor (diámetro), el ángulo cenital y el porcentaje de reflectividad del concentrador afectan la eficiencia del horno en términos de potencia (Watts), así como también la máxima potencia obtenida en las distintas 4 estaciones (solsticios o equinoccios) del año 2024. También se llevaron a cabo pruebas sin el uso de heliostato, analizando el efecto de la radiación solar directa en el diseño del horno. Los resultados indican que la potencia máxima sobre el objetivo de 20 cm de diámetro es de 312 Watts con heliostato y de 332 Watts sin heliostato. Las estimaciones fueron realizadas utilizando el software de trazado de rayos de código abierto "Tonatiuh".

Palabras clave-- Cocción de pan, energía solar, horno solar, software Tonatiuh.

Abstract-- This project focuses on the characterization and design of a solar oven that uses a satellite dish as a concentrator, with specifications of 70 cm in diameter, 61.25 cm in focal length and 5 cm in depth. The tests included the design of a planar heliostat with a solar tracker (configured as a square of dimensions Side x Side) and the estimation of the radiant flux distribution and the maximum power obtained on a circular target of 20 cm in diameter located in the distance focal. A parametric analysis was performed to evaluate how the position of the objective with respect to the focal length (slant range), the size of the receiver (diameter), the zenith angle and the percentage of reflectivity of the concentrator affect the efficiency of the furnace in terms of power (Watts), as well as the maximum power obtained in the different 4 seasons (solstices or equinoxes) of the year 2024. Tests were also carried out without the use of a heliostat, analyzing the effect of direct solar radiation on the design from the oven. The results indicate that the maximum power on the 20 cm diameter target is 312 Watts with the heliostat and 332 Watts without the heliostat. The estimates were made using the open source ray tracing software "Tonatiuh".

Keywords: Bread baking, solar energy, solar oven, Tonatiuh software.

INTRODUCCIÓN

Los hornos solares son sencillos artefactos que aprovechan la energía solar para la cocción de alimentos (Gastronomía Solar, 2023), (Roulet, 2010). La búsqueda de alternativas sostenibles y eficientes para la cocción de alimentos ha sido un tema de interés creciente en el ámbito de la investigación científica y tecnológica (Esteves y otros, 2006), (González y otros, 2014), (Del Río y otros, 2010). En este contexto, los hornos solares se presentan como una opción prometedora que no solo reduce la dependencia de combustibles fósiles, sino que también contribuye a la mitigación del impacto ambiental. Este proyecto de tesis tiene como objetivo la caracterización y diseño de un horno solar utilizando el software Tonatiuh, enfocado en el análisis de la eficiencia en términos de potencia en el proceso de cocción de pan.

La presente investigación también promueve el desarrollo de tecnologías limpias y accesibles impactando en el objetivo 7 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible ODS (Energía asequible y no contaminante) (NACIONES UNIDAS, 2018). Este enfoque integral tiene el potencial de proponer una alternativa para el proceso de cocción de pan pita que se lleva a cabo en la actualidad en una pizzería ubicada en Los Mochis Sinaloa, México mediante el uso de Gas LP a un diseño de horno solar que satisfaga las necesidades térmicas del proceso utilizando la innovación tecnológica en el campo de las energías limpias, en este caso, la energía solar.

La actividad humana que afecta en mayor proporción la huella ecológica a nivel mundial es el sistema de producción de alimentos, es decir, la forma en que producimos lo que comemos está degradando rápidamente nuestro planeta, siendo la causa del 70 % de la pérdida de biodiversidad en la tierra y el 50% en el agua dulce, y responsable de alrededor del 30 % de las emisiones de gases de efecto invernadero (World Wildlife Fund, 2022). Además, de acuerdo a La Comisión Económica para América Latina (CEPAL), la población mundial crece de manera acelerada, alcanzando en 2021 un total de 8 mil millones de habitantes, una población cuatro veces mayor de la que había en el mundo en 1927; la revisión 2022 de las estimaciones y proyecciones de población de Naciones Unidas proyecta que esa población alcanzará los 9 mil millones en 15 años y 10 mil millones en 2058 (CEPAL, 2022).

DESARROLLO

Metodología

Para la elaboración del trabajo realizado se tomaron en cuenta dos etapas principales: La simulación de trazado de rayos mediante el software Tonatiuh y el procesamiento de los datos arrojados por el software, la elaboración de gráficos, ajuste de curvas, análisis de las variables involucradas y sus respectivos indicadores mediante la opción análisis de flujo del software, esto mediante un marco referencial fundamentado en los siguientes estudios (Marín, 2017), (Flores y otros, 2021), (Sánchez, 2016).

Software Tonatiuh

Tonatiuh utiliza el método Montecarlo para calcular mapas de flujo y eficiencias ópticas en sistemas termosolares, lo que lo hace especialmente adecuado para estructuras complejas y campos de heliostatos, es un software gratuito que permite a los usuarios acceder y modificar el código, fomentando la colaboración y el desarrollo continuo; Tonatiuh incluye una librería gráfica que permite crear geometrías tridimensionales simples y complejas, facilitando el modelado de diferentes superficies y estructuras; las aplicaciones específicas del software son: modelar y simular un captador cilindro parabólico, que es una de las tecnologías utilizadas en sistemas de energía solar térmica y simulación de un campo de heliostatos (Espejos que siguen la trayectoria del sol) para concentrar la radiación solar en un receptor; el software ofrece (una vez que se cuente con todo el sistema) previo a la simulación, un análisis de flujo que incluye información como distribución del flujo incidente, potencia máxima, flujo máximo, flujo promedio, flujo mínimo, error y uniformidad; también es capaz de devolver archivos tipo binarios y SQL que contienen información de los fotones sobre la superficie que se requiere estudiar (CENER, 2017), (Blanco, 2018).

1. Parámetros iniciales del software

Tonatiuh utiliza una serie de parámetros de entrada para definir la forma en que la radiación solar se distribuye en el espacio y en el tiempo dentro de la simulación. Estos parámetros incluyen aspectos como la distribución óptica, geométrica y energética de la forma solar. La correcta selección y ajuste de los parámetros de entrada en Tonatiuh es fundamental para garantizar que la simulación refleje de manera adecuada el comportamiento del sistema solar real (Canales, 2022).

1.1 Forma solar

Dentro de sus funcionalidades, Tonatiuh ofrece dos formas solares que se pueden utilizar para simular la radiación solar en diferentes aplicaciones, para esta investigación se utilizó la forma Buie (es considerada

la más cercana a la forma real del Sol) (Flores y otros, 2021) con una relación circunsolar (CSR) de 0.02 y una irradiancia de 1000 W/m². La figura 1 muestra la selección del parámetro inicial de la forma solar en el software Tonatiuh.

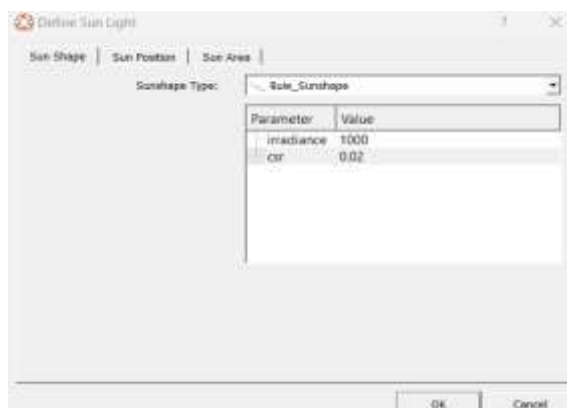


Figura 1. *Parámetro inicial para la forma solar elegida en la simulación.*

Nota: Se estableció la forma solar tipo Buie y una irradiancia de 1000 W/m².

Fuente. elaboración propia.

1.2 Posición solar

Este parámetro varía según el momento de observación del sistema solar y depende de dos ángulos: el acimutal y el de elevación (respecto al horizonte), ambos medidos en grados. Para efectos de esta investigación se tomó en cuenta un ángulo de elevación de 90° y un ángulo acimutal de 0°. La figura 2 muestra en el software los parámetros de posición solar descritos anteriormente.

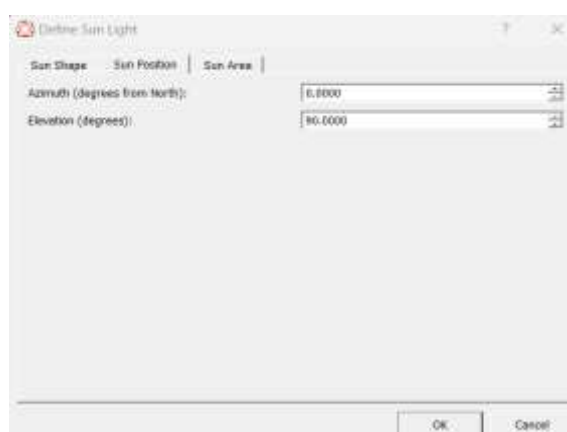


Figura 2. *Definición de los parámetros: ángulo acimutal y de elevación en el software.*

Nota: Se muestran ambas configuraciones de ángulos, acimutal de 0° y elevación de 90°.

Fuente. elaboración propia.

1.3 Calidad óptica

El indicador de este parámetro se mide a través del error óptico, este reúne los diferentes errores existentes asociados a una desviación normal del sistema reflectivo, en este caso del heliostato y el receptor. Tonatiuh asigna y agrupa a través del parámetro sigma slope todos los errores ópticos (errores causado por la distribución angular no uniforme de los rayos del sol, error de pendiente por parte del concentrador, error de especularidad, error de puntería, entre otros que tienen que ver con el seguimiento y sensores), su unidad de medida es mrad (Flores y otros, 2021). Un valor estándar para el error en los sistemas de disco parabólico es de 6.7 mrad de acuerdo con Stine y Greyer, 2001 citado en (Flores y otros, 2021). La ecuación 1a determina el error óptico total de un horno solar.

$$\sigma^2 = \sigma^2_{sol} + \sigma^2_{pen} + \sigma^2_{espe} + \sigma^2_{pun} \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde:

σ^2 = Error óptico total

σ^2_{sol} = Error causado por la distribución angular no uniforme de los rayos del sol

σ^2_{pen} = Error de pendiente del concentrador.

σ^2_{espe} = Error de la especularidad

σ^2_{pun} = Error de puntería (el receptor no está colocado exactamente en el punto focal)

Como punto de partida, se establecerá el error óptico de las superficies del concentrador, heliostato y receptor en el valor predeterminado por el software, 3 mili radianes (Figura 3); posteriormente, evaluaremos el impacto en la eficiencia del horno solar con valores de 1.5 y 7 mrad.

Specular_Standard_Material	
Parameter	Value
m_reflectivity	0.94
m_sigmaSlope	3
m_distribution	NORMAL
m_ambientColor	0.2 0.2 0.2
m_diffuseColor	0.80000001 0.80000001 0.80000001
m_specularColor	0 0 0
m_emissiveColor	0 0 0
m_shininess	0.2
m_transparency	0

Figura 3. Estimación del error óptico (sigma slope).

Nota: Se muestra la configuración correspondiente a un error óptico de 3 mrad. Las demás configuraciones permanecen en sus valores por defecto.

Fuente. elaboración propia.

2. Simulación

Siguiendo la metodología propuesta, se procede a implementar la simulación numérica del sistema solar. El modelo desarrollado considera cuatro componentes principales: una fuente de radiación solar (Previamente definidas en parámetros iniciales), un heliostato con un sistema de control para el seguimiento solar, un concentrado parabólico y el receptor. La simulación permitirá evaluar la eficiencia del horno en términos de potencia.

2.1 Geometría de los elementos del sistema

Tonatiuh presenta un gran número de geometrías para simular cada uno de los elementos del sistema solar, las más importantes son: cono, esfera, cilindro, rectángulo y disco parabólico (figura 4). Para generar cada elemento, el software utiliza dos tipos de nodos (figura 5): Group node, el cual se le asigna a cada elemento del sistema y tiene los atributos de posición y rotación espacial del elemento y Surface node, que se utiliza para asignar una geometría y atributos correspondientes a cada elemento como un disco parabólico al concentrador, rectángulo al heliostato y una circunferencia al receptor; dentro de los nodos de superficie, se asigna el material deseado a través de Specular_Standard_Material, cada uno de los nodos y superficies del sistema se muestran en la figura 6.



Figura 4. Geometrías disponibles en Tonatiuh.

Nota: Para este estudio utilizaremos parabolic disk, flat plate y flat rectangle.

Fuente. elaboración propia.

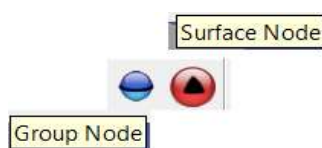


Figura 5. Tipos de nodos.

Nota: Nodo de grupo y de superficie. En este trabajo de investigación, se utilizaron exclusivamente nodos de grupo para la asignación de los distintos elementos y superficies.

Fuente. elaboración propia.

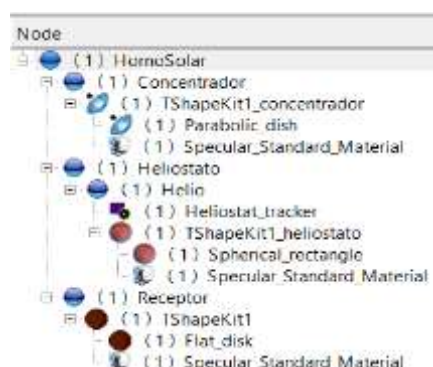


Figura 6. Diferentes nodos que componen el sistema, geometría y materiales.

Nota: Se representan el nodo principal, correspondiente al horno solar, y los subnodos asociados a los elementos del sistema: concentrador, heliostato y receptor.

Fuente. elaboración propia.

2.2 Caracterización de los elementos

Una vez que se hayan definido los nodos principales, así como los nodos de superficie y las formas geométricas de los elementos, se procederá a establecer los atributos correspondientes para el concentrador, el heliostato y el receptor del sistema solar.

2.2.1 Concentrador parabólico

Se encuentra posicionado dentro del nodo horno solar, las especificaciones del concentrador son las siguientes:

Tabla 1. Especificaciones del concentrador parabólico.

Parámetro	Medición	
	Centímetros	Conversión (m)
Diámetro	70 cm	.70 m
Profundidad	5cm	0.05 m
Distancia focal	61.25 cm	.6125 m

Nota: Se muestran los parámetros de diámetro, profundidad y distancia focal.

Fuente. elaboración propia.

Los atributos de *posición* (rotación a 90 grados respecto a la horizontal que corresponden a $\frac{\pi}{2} \text{ rad} = 1.5708$); *geometría* (Distancia focal 0.6125m, radio mínimo 0m, radio máximo 0.35m) y *material* (porcentaje de reflexividad del 94%, error óptico de 3 mrad) se capturaron en el nodo correspondiente al concentrador se muestran en la figura 7, los demás atributos se mantienen en sus valores predeterminados.

Transform		Parabolic_dish		Specular_Standard_Material	
Parameter	Value	Parameter	Value	Parameter	Value
translation	0 0 0	focusLength	0.61250001	m_reflectivity	0.94
rotation	0 0 1 1.5707999	dishMinRadius	0	m_sigmaSlope	3
scaleFactor	1 1 1	dishMaxRadius	0.34999999	m_distribution	NORMAL
scaleOri...	0 0 1 0	phiMax	6.2831855	m_ambientColor	0.2 0.2 0.2
center	0 0 0	activeSide	INSIDE	m_diffuseColor	0.80000001 0.80000001 0.80000001
				m_specularColor	0 0 0
				m_emissiveColor	0 0 0
				m shininess	0.2
				m_transparency	0

Figura 7. Parámetros del concentrador.

Nota: Se muestran los atributos relacionados a los valores óptimos para el concentrador, estos son: posición, geometría y porcentaje de reflectividad.

Fuente. elaboración propia.

2.2.2 Heliostato

El heliostato presenta una geometría cuadrada, con dimensiones de 1.4 metros por lado (Ecuación 2 y 3). Su ubicación está a 1.84 m del concentrador, El material reflector, que tiene forma de rectángulo plano posee un porcentaje de reflectividad del 94%.

$$L = D + 2 \cdot d \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad \text{Ec. (2)}$$

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{D}{F} \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde:

L=Lado del Heliostato

D=Diámetro del concentrador

F y d= Distancia focal del concentrador

Para llevar a cabo la simulación del heliostato, es fundamental establecer un nodo principal (Heliostato) que contenga los atributos de posición y rotación. A continuación, se debe incorporar un nodo tipo superficie (Helio) que incluya un seguidor solar (Heliostat tracker), esta configuración permite simular el ajuste automático de la orientación del heliostato en función de la posición del sol. En la figura 8 se presentan los atributos necesarios para la simulación del heliostato.



Figura 8. Nodos para el heliostato en el simulador y distintos parámetros de diseño y ópticos.

Nota: Se muestran los atributos relacionados al heliostato: forma geométrica, parámetros de medición, reflectividad, distancia respecto al concentrador y error óptico.

Fuente. elaboración propia.

2.2.3 Receptor

El receptor se sitúa a la distancia focal del concentrador (0.6125 metros), su forma geométrica es un disco plano con un diámetro de 20 cm, lo que corresponde aproximadamente al tamaño del pan que se someterá a cocción, en este lugar es donde se concentrará toda la energía.

Para modelar el receptor en el simulador, se agrega un nodo principal denominado "Receptor" al nodo del horno solar en el cual se definen posición y rotación. Dentro de este nodo principal, se inserta un nodo de superficie llamado "Plato", al cual se le asigna la geometría de un disco plano (flat_disk) y se especifica un material especular con una reflectividad del 0% con el objetivo de maximizar la absorción de radiación solar. Los atributos del receptor se ilustran en la figura 9.



Figura 9. Caracterización del receptor, atributos de diseño y ópticos.

Nota: Se muestran los atributos relacionados al receptor: forma geométrica, parámetros de diseño (radio), reflectividad y error óptico.

Fuente. elaboración propia

La Figura 10 muestra una representación gráfica detallada del diseño final del sistema de horno solar en el software Tonatiuh, en la cual se pueden observar todos los componentes que lo integran.

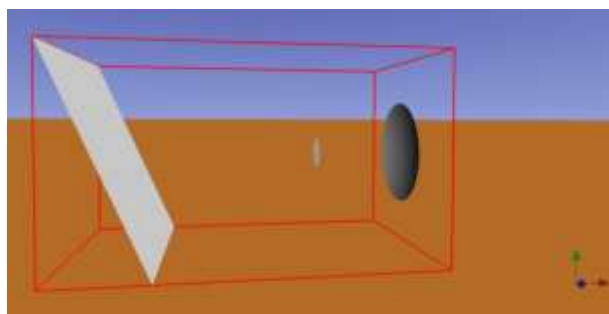


Figura 10. Diseño final del horno solar en el software Tonatiuh, vista frontal.

Nota: Se muestran de izquierda a derecha, el heliostato, el receptor y el concentrador solar.

Fuente. elaboración propia.

La Figura 11 presenta una simulación del sistema de horno solar, en la cual se han trazado 1000 rayos solares para visualizar sus trayectorias y evaluar la eficiencia de concentración.

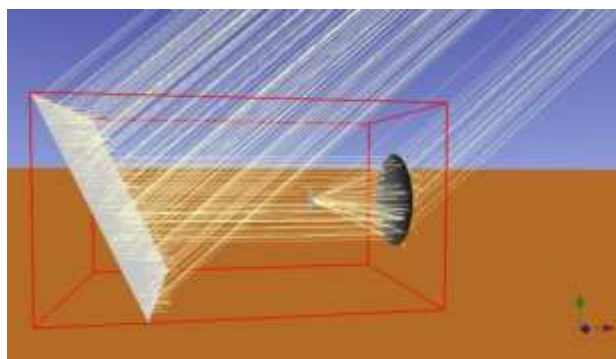


Figura 11. Simulación con 1000 rayos.

Nota: Se muestra la vista frontal del sistema solar con la incidencia de 1000 rayos.

Fuente. elaboración propia.

La figura 12 muestra el total de nodos, estos son: superficie, geometría y material especular de cada uno de los elementos que conforman el horno solar.

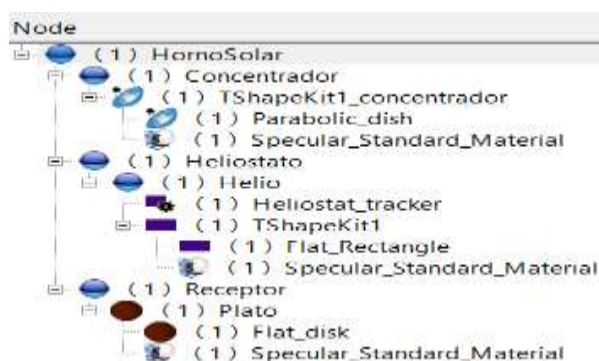


Figura 12. Ventana de código con todos los nodos que conforman el sistema solar.

Nota: Se presentan los tres elementos que conforman el horno solar agrupados en nodos y subnodos según los elementos requeridos.

Fuente. elaboración propia

2.3 Parámetros de simulación-ejecución

Una vez finalizada la definición del sistema, se llevó a cabo la simulación, primeramente, se determina el número de rayos a trazar, considerando que una mayor cantidad de rayos resulta en una disminución

del error estadístico en los resultados obtenidos (Sánchez, 2016), el máximo número de rayos a trazar del software son 75 millones, para este número de rayos, el error se encuentra aproximadamente en 0.5% (Sánchez, 2016). Para definir el número de rayos en el software se sigue la siguiente secuencia de comandos: Menú Ray Trace/Ray Trace Options..., la figura 13 muestra la ventana de código para definir el número de rayos.

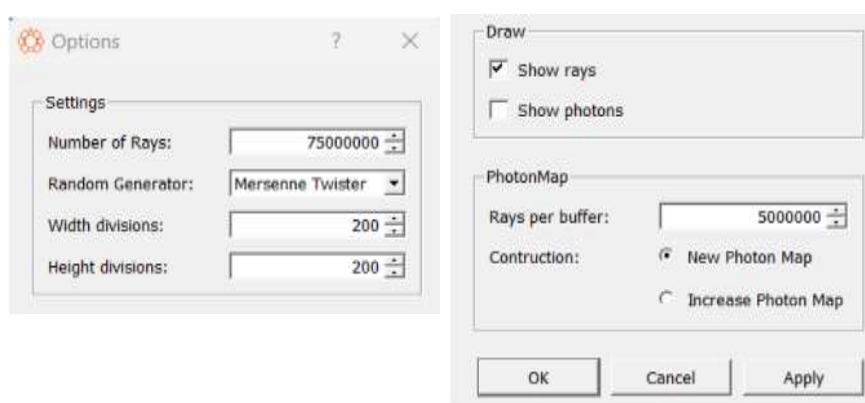


Figura 13. Ventana de opciones para el trazado de rayos de Tonatiuh.

Nota: Se presenta la configuración de numero de rayos máximos y la activación de la opción mostrar rayos en la simulación.

Fuente. elaboración propia.

Una vez seleccionado el número de rayos, se ejecuta la simulación mediante la serie de comandos Ray Trace/Run. El software ofrece tres opciones para almacenar los datos: SQL Database, Binary File y Not

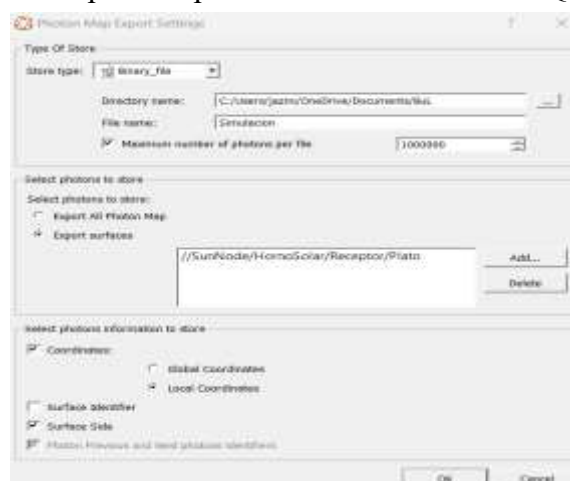


Figura 3. Ventana de ejecución de Tonatiuh para almacenar datos binarios

Nota: Se muestran los atributos necesarios para correr la simulación con la configuración de diseño propuesto.

Fuente. elaboración propia.

Export. Para las dos primeras opciones, se debe seleccionar una carpeta de destino en la que se guardarán los datos, así como el nombre del archivo. Posteriormente, se elige la superficie a estudiar, que en este caso es el receptor, donde los rayos solares provenientes del concentrador inciden en la distancia focal definida (Figura 14).

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se plantearon cuatro hipótesis, las cuales serán evaluadas conforme a la metodología propuesta y contrastadas con los resultados obtenidos a partir del análisis de flujo realizado mediante el software Tonatiuh usando para cada análisis el máximo número de rayos, 75 millones.

Análisis de hipótesis 1

Ho: El error óptico (Sigma Slope) asignado al material reflectante de los elementos del horno solar no influye en la eficiencia en términos de potencia.

La potencia del horno solar, con los valores de error óptico o sigma slope de 3 mrad, capturado como atributo en la superficie del material (Specular Standard Material) en los tres elementos del sistema: heliostato, concentrador y receptor arroja una potencia de 314.57 Watts. La figura 15 muestra los resultados del análisis de flujo con dichos parámetros.

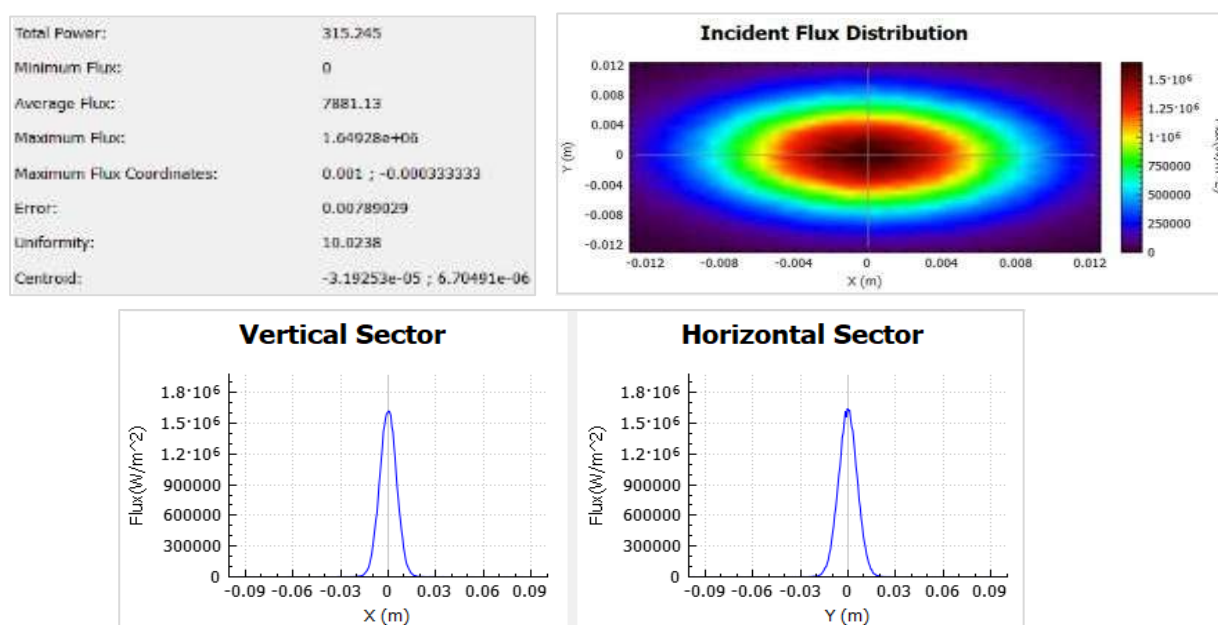


Figura 15. Análisis de flujo para un error óptico de 3 mrad y la potencia reflejada en la parte trasera del receptor.

Nota: De acuerdo a los datos, la potencia del sistema fue de 315.245 Watts, el flujo máximo incidente en el receptor de 1.65 MW/m^2 , se observa que el flujo incidente, tanto en el sector vertical como en el horizontal, alcanza un máximo de 3 cm.

Fuente. Elaboración propia.

Al cambiar el error óptico a 5 mrad en la superficie de los materiales de los tres elementos del horno solar, bajo las mismas condiciones del análisis anterior, el software arroja en el receptor una potencia de 315.08 Watts. La figura 16 muestra los resultados del análisis de flujo con dichos parámetros.

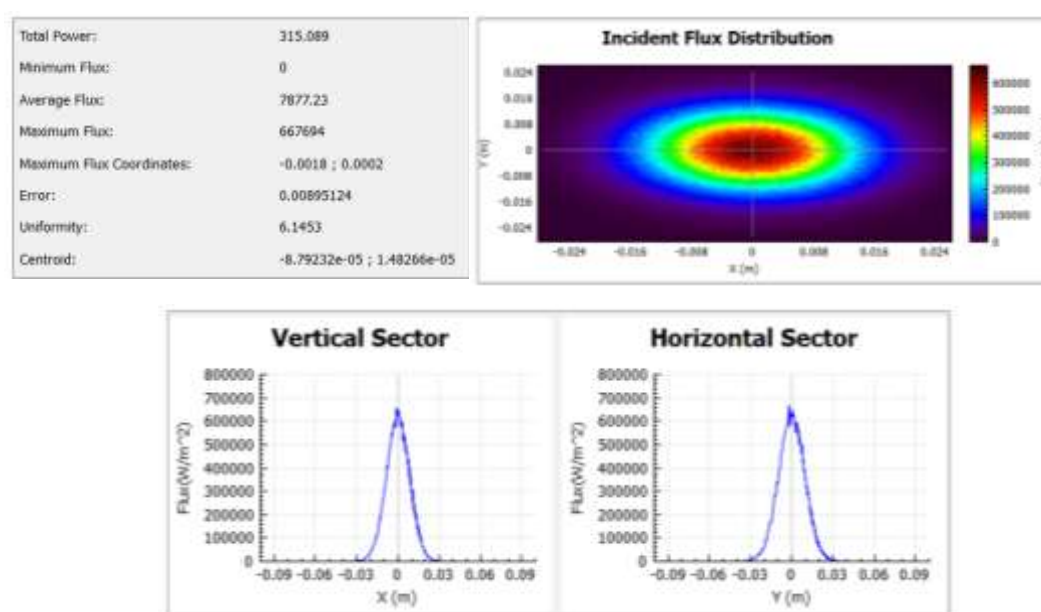
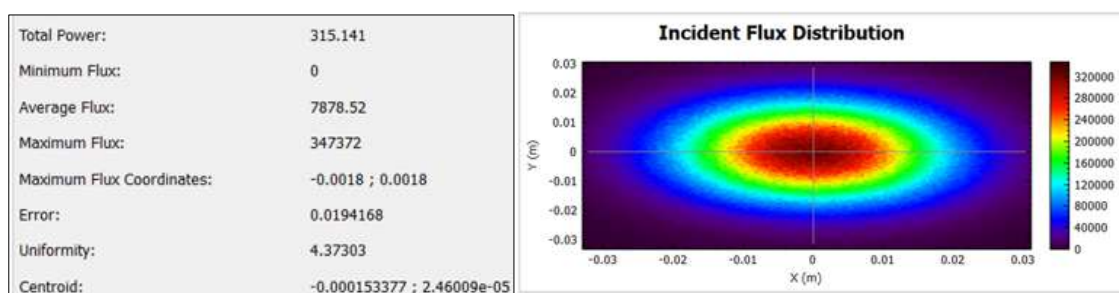


Figura 16. Análisis de flujo para un error óptico de 5 mrad y la potencia reflejada en la parte trasera del receptor.

Nota: De acuerdo a los datos, la potencia del sistema fue de 315.089 Watts, el flujo máximo incidente en el receptor de 0.667 MW/m^2 , se observa que el flujo incidente tanto en el sector vertical y horizontal tiene un alcance máximo de 3cm.

Fuente. Elaboración propia.

Finalmente, al capturar el error óptico a 7 mrad en la superficie de los materiales de los tres elementos del horno solar, bajo las mismas condiciones del análisis anterior, el software arroja en el receptor una potencia de 315.141 Watts. La figura 17 muestra los resultados del análisis de flujo con dichos parámetros.



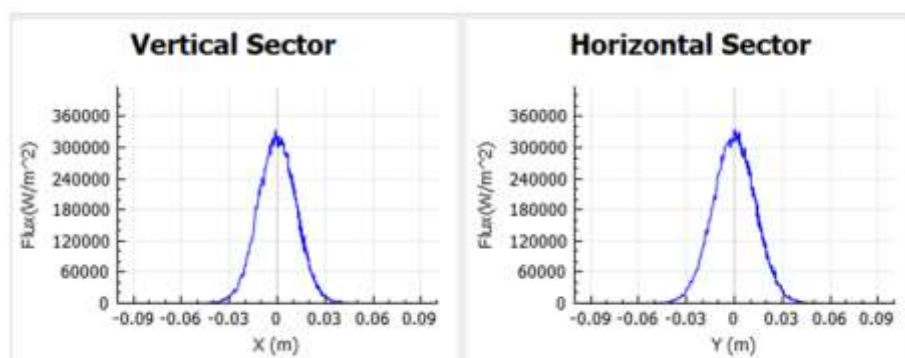


Figura 17. Análisis de flujo para un error óptico de 7 mrad y la potencia reflejada en la parte trasera del receptor.

Nota: De acuerdo a los datos, la potencia del sistema fue de 315.141 Watts, el flujo máximo incidente en el receptor de 0.347 MW/m², se observa que el flujo incidente tanto en el sector vertical y horizontal tiene un alcance máximo de 3cm.

Fuente. elaboración propia.

Análisis de Hipótesis 2

Ho: La distancia focal (Slant Range) del receptor respecto al concentrador solar no influye en la eficiencia del horno solar en términos de potencia.

Se analiza la influencia de la posición del receptor con respecto al foco (Slant range), considerando una variación de $f = 0.6125m, \pm 0.15m$. En este análisis, los parámetros comunes serán el error óptico, establecido por defecto en 3 mrad, y el número de rayos, fijado en 75 millones. Los valores de posición, ordenados numéricamente, son los siguientes: 0.3125 m, 0.4625 m, 0.6125 m, 0.7625 m y 0.9125 m.

La figura 18 muestra la configuración de los parámetros fijos, error óptico (m_sigma) a 3 mrad y el número de rayos al valor máximo posible por el simulador, 75 millones.

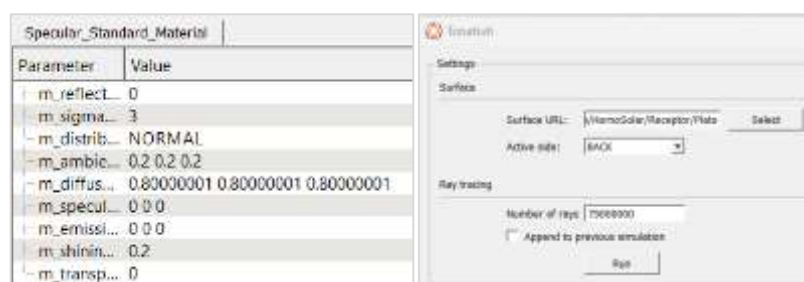


Figura 18. Parámetros de configuración para analizar distintos valores de Slant Range

Nota: Se ajustó el número máximo de rayos y se mantuvo el valor por defecto del error óptico en 3 mrad para cada elemento del sistema.

Fuente. Elaboración propia.

El análisis de flujo para cada una de las variaciones de distancia focal (Slant Range) se muestran a continuación.

La figura 19 muestra el análisis de flujo para un Slant Range de 0.3125 m.

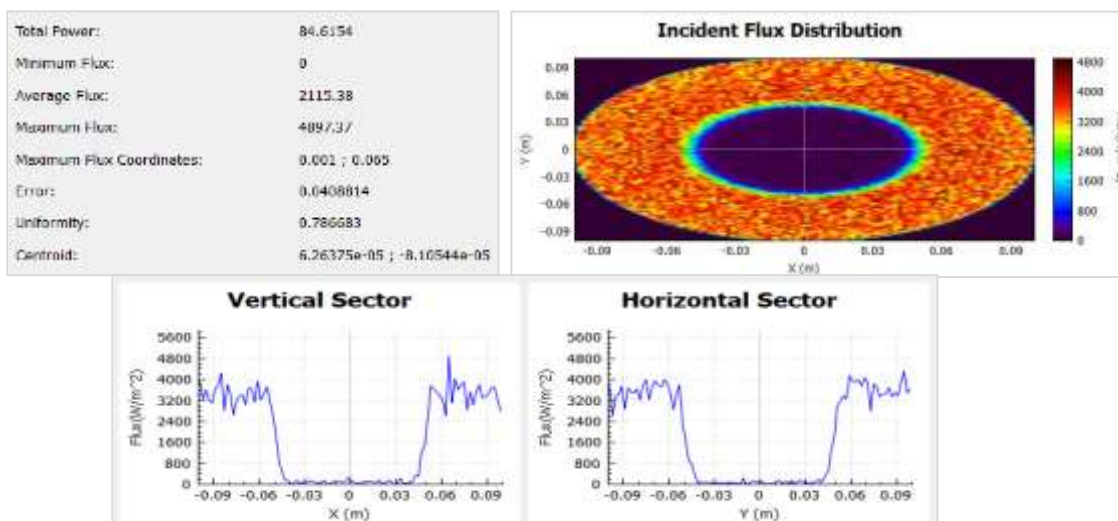


Figura 19. Flujo para un Slant Range.

Nota: Se observa que la potencia del sistema fue de 84.6154 Watts, un flujo máximo incidente en el receptor de 4.897 KW/m². En los sectores vertical y horizontal, se observa una pérdida de flujo de aproximadamente 5 cm en el centro del receptor, causada por el cambio en la posición ajustado.

Fuente. elaboración propia.

La figura 20 muestra el análisis de flujo al posicionar al receptor a un Slant Range de 0.4625 m.

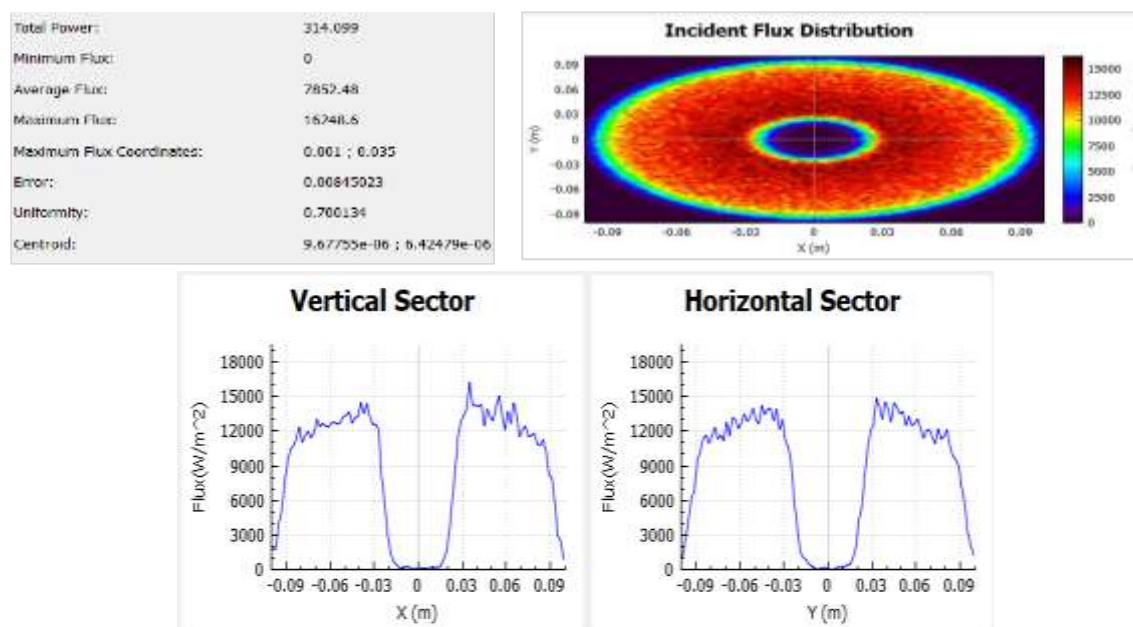


Figura 20. Análisis de flujo para un Slant Range de 0.4625m.

Nota: Se observa que la potencia del sistema fue de 314.099 Watts, el flujo máximo incidente en el receptor de 16.248 KW/m². En los sectores vertical y horizontal se observa una pérdida de flujo de aproximadamente 2.8 cm en el centro del receptor. Fuente: elaboración propia.

La figura 21 muestra el análisis de flujo al posicionar al receptor a un Slant Range de 0.6125 m.

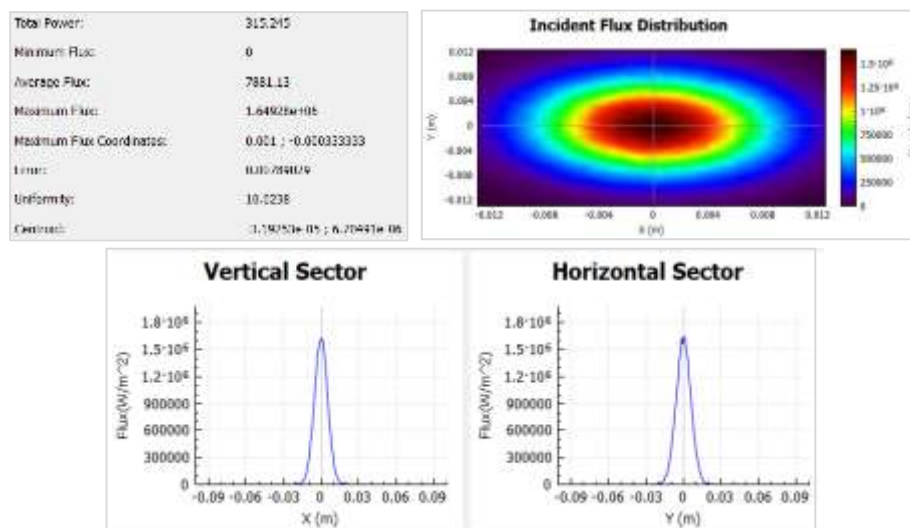


Figura 21. Análisis de flujo para un Slant Range de 0.6125 m.

Nota: Se observa que la potencia del sistema fue de 315.245 Watts, el flujo máximo incidente en el receptor de 1.65 MW /m². Se observa también que el flujo incidente máximo se encuentra en el centro del receptor y se pierde por encima de los 3cm.

Fuente. Elaboración propia.

La figura 22 muestra el análisis de flujo al posicionar al receptor a un Slant Range de 0.7625 m.

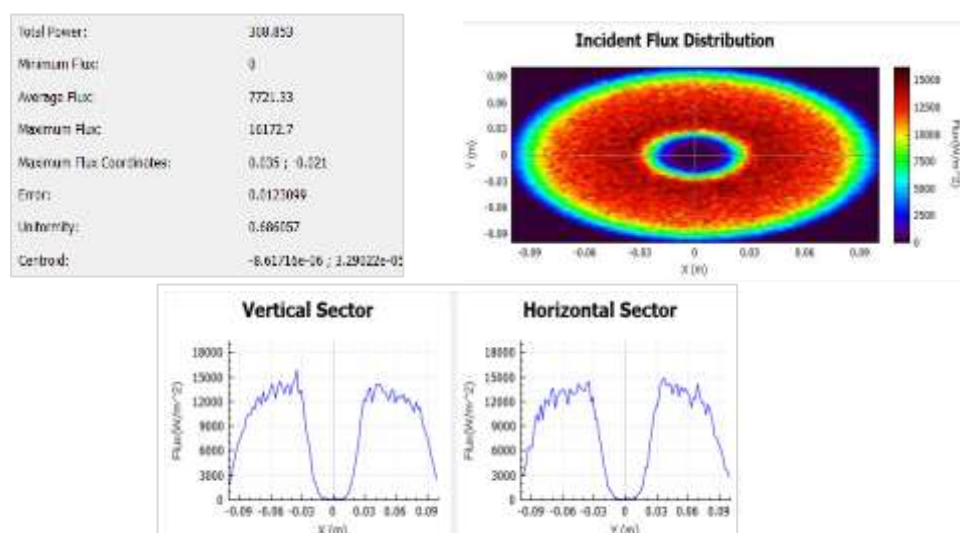


Figura 22. Análisis de flujo para un Slant Range de 0.7625m

Nota: Se observa que la potencia del sistema fue de 308.853 Watts, el flujo máximo incidente en el receptor de 16.172 KW/m^2 . En los sectores vertical y horizontal, se observa una pérdida de flujo de aproximadamente 3 cm en el centro del receptor.

Fuente. Elaboración propia.

La figura 23 muestra el análisis de flujo al posicionar al receptor a un Slant Range de 0.9125 m.

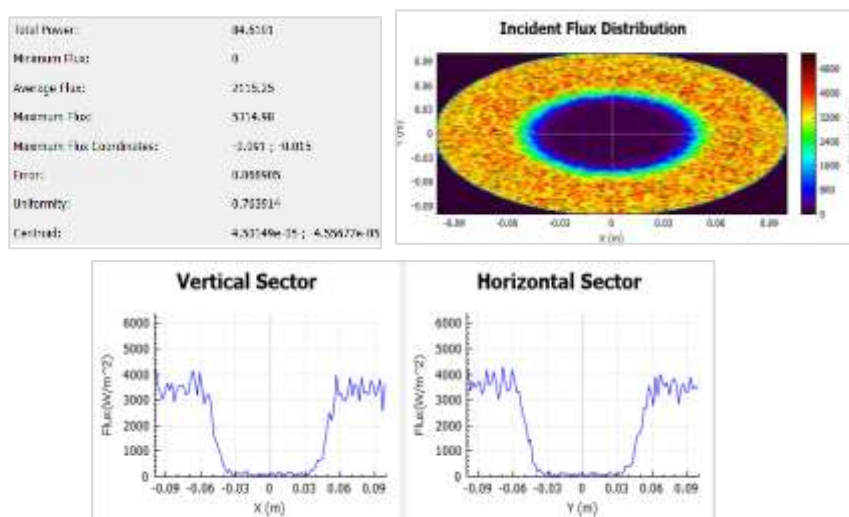


Figura 23. Análisis de flujo para un Slant Range de 0.9125m.

Nota: Se observa que la potencia del sistema fue de 84.6101 Watts, el flujo máximo incidente en el receptor de 5.314 KW/m^2 . En los sectores vertical y horizontal, se observa una pérdida de flujo de aproximadamente 5 cm en el centro del receptor.

Fuente. Elaboración propia

La siguiente figura 24 resume las configuraciones de Slant Range consideradas en este estudio para el receptor y el concentrador solar.

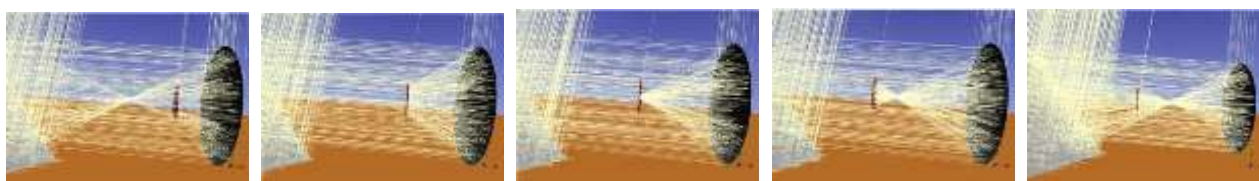


Figura 24. Diferentes posicionamientos o Slant Range.

Nota: Se observan en orden los posicionamientos o Slant Range de 0.3125m; 0.4625m; 0.6125m; 0.7625m y 0.9125m, de izquierda a derecha.

Fuente. elaboración propia

Análisis de Hipótesis 3

Ho: El uso de un heliostato a determinada distancia del concentrador solar no influye en la eficiencia del horno en términos de potencia.

La eficiencia óptima del horno solar se determina bajo las siguientes condiciones: un error óptico de 3 mrad, una distancia focal de 0.6125 m, y un porcentaje de reflectividad del 94 % tanto en la superficie del concentrador como en la del heliostato. Este último tiene dimensiones de 1.4 m por lado y está ubicado a una distancia de 1.84 m con respecto al concentrador.

Además, el heliostato cuenta con un sistema de seguimiento solar que le permite reflejar continuamente los rayos del sol hacia el concentrador, independientemente del ángulo acimutal y de elevación solar en el momento de las pruebas. La Figura 20 (Análisis de flujo para un Slant Range de 0.6125 m) presenta el análisis completo del flujo, en donde la potencia arrojada por el simulador fue de 315.245 Watts y un flujo máximo incidente en el receptor de 1.65 MW/m^2 .

Para realizar un análisis comparativo del horno solar sin el uso del heliostato, fue necesario ajustar los parámetros de rotación del concentrador y del receptor, así como la posición solar. Se decidió ubicar el concentrador solar orientado hacia arriba (Figura 25), colocando el receptor a una distancia focal de 0.6125 m. En cuanto a la posición solar, se configuró un ángulo de elevación de 90° , permitiendo que los rayos solares incidan directamente sobre el concentrador y sean reflejados hacia el receptor.

En este caso, se utilizó la radiación solar directa predeterminada en el software, equivalente a 1000 W/m^2 . La Figura 25 presenta el análisis de flujo bajo las condiciones descritas.

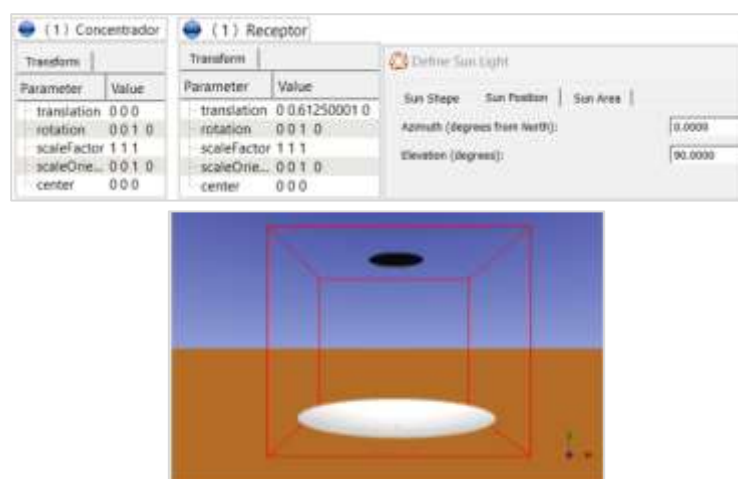


Figura 25. Posición del concentrador y receptor.

Nota: Tanto el concentrador como el receptor presentan un valor de 0 radianes en la cuarta coordenada (0, 0, 1, 0), lo que los orienta hacia arriba. Cabe destacar que el parámetro de traslación del receptor en el eje y es de 0.6125 (0, 0.6125, 0), lo que permite posicionarlo a la distancia focal. Además, se incluyen los atributos de posición solar establecidos previamente a la simulación.

Fuente. Elaboración propia

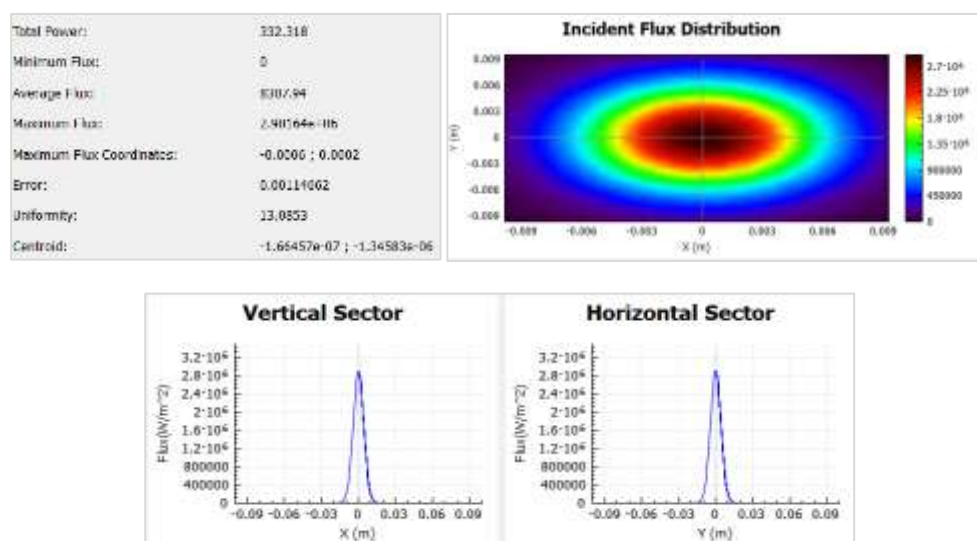


Figura 26. Análisis de flujo sin el uso del heliostato (radiación solar directa).

Nota: Se observa que la potencia del sistema fue de 332.318 Watts, el flujo máximo incidente en el receptor de 2.9 MW/m². Se observa también que el flujo incidente máximo se encuentra en el centro del receptor y se pierde por encima de los 1.5 cm.

Fuente. Elaboración propia.

Análisis de Hipótesis 4

H₀: El cambio de dimensionamiento del radio del receptor, no influye en la eficiencia del horno solar en términos de potencia.

Se analiza la influencia de la variación en los parámetros de diseño del receptor, específicamente en relación con su radio, considerando un rango de $r = 0.1\text{ m} \pm 0.02\text{ m}$. Los parámetros de simulación establecidos para cada caso son: un error óptico de 3 mrad y un total de 75 millones de rayos. El análisis de flujo incluye los tres elementos, el heliostato y el concentrador configurados con los parámetros de diseño, ópticos y posicionamiento iniciales. Los distintos valores del radio del receptor, ordenados numéricamente, son los siguientes: 0.06 m, 0.08 m, 0.1 m, 0.12 m y 0.14 m.

La Figura 27 presenta el análisis de flujo obtenido al configurar un radio de 0.06 m en el receptor.

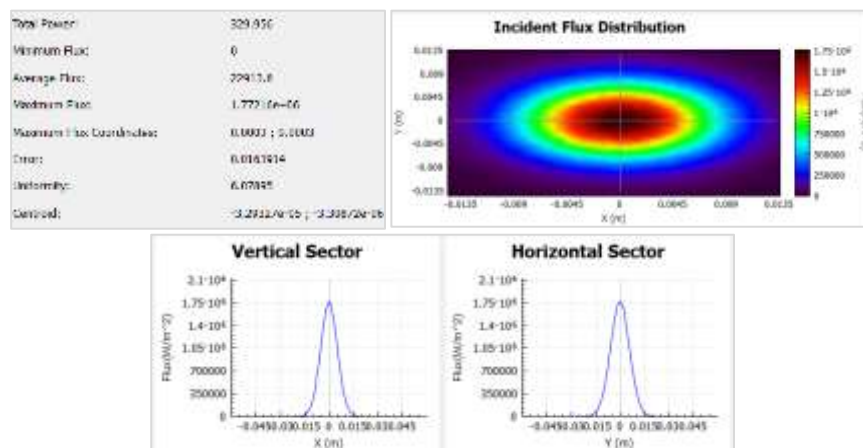


Figura 27. Análisis de flujo en el receptor con radio de 0.06 m.

Nota: Se observa que la potencia del sistema fue de 329.956 Watts, el flujo máximo incidente en el receptor de 1.77 MW/m². Se observa también que el flujo incidente máximo se encuentra en el centro del receptor y se pierde por encima de los 1.5 cm.

Fuente. Elaboración propia.

La Figura 28 presenta el análisis de flujo obtenido al configurar un radio de 0.08 m en el receptor.

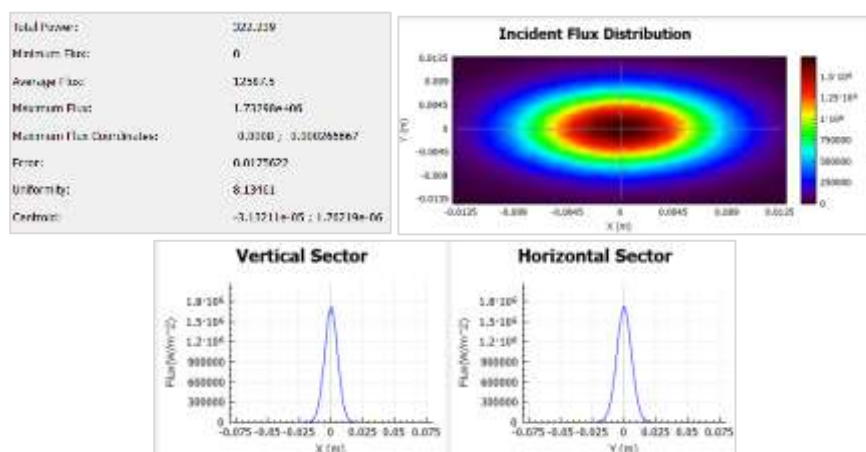


Figura 28. Análisis de flujo en el receptor con radio de 0.08 m.

Nota: Se observa que la potencia del sistema fue de 322.239 Watts, el flujo máximo incidente en el receptor de 1.73 MW/m². Se observa también que el flujo incidente máximo se encuentra en el centro del receptor y se pierde por encima de los 1.25 cm.

Fuente. Elaboración propia.

La Figura 29 presenta el análisis de flujo obtenido al configurar un radio de 0.1 m en el receptor.

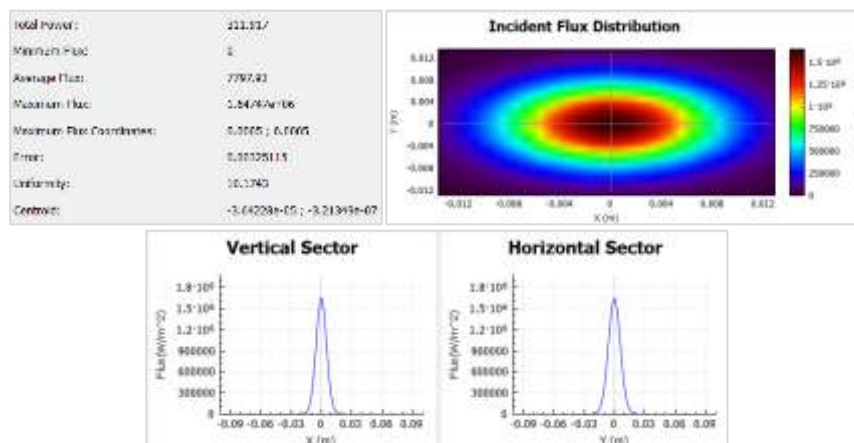


Figura 29. Análisis de flujo en el receptor con radio de 0.1 m.

Nota: Se observa que la potencia del sistema fue de 311.91 Watts, el flujo máximo incidente en el receptor de 1.64 MW/m². Se observa también que el flujo incidente máximo se encuentra en el centro del receptor y se pierde por encima de los 1.5 cm.

Fuente. Elaboración propia.

La Figura 30 presenta el análisis de flujo obtenido al configurar un radio de 0.12 m en el receptor.

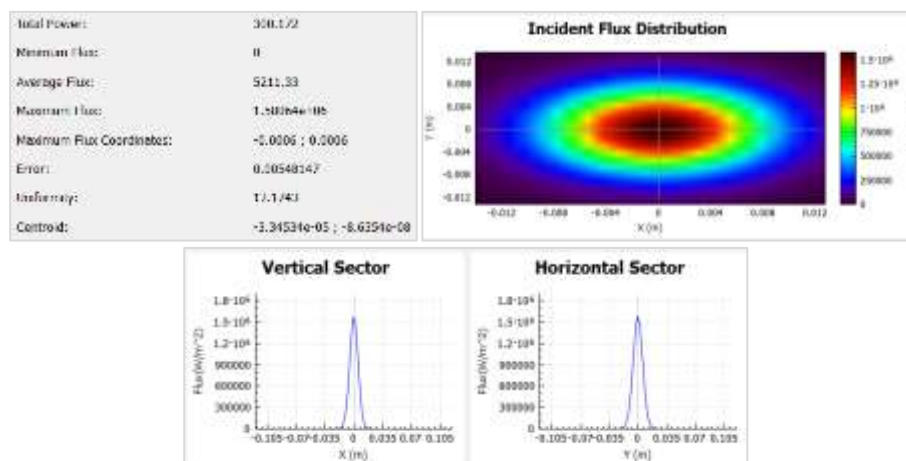


Figura 30. Análisis de flujo en el receptor con radio de 0.12 m.

Nota: Se observa que la potencia del sistema fue de 300.172 Watts, el flujo máximo incidente en el receptor de 1.58 MW/m². Se observa también que el flujo incidente máximo se encuentra en el centro del receptor y se pierde por encima de los 2.1 cm.

Fuente. Elaboración propia.

Por último, la Figura 31 presenta el análisis de flujo obtenido al configurar un radio de 0.14 m en el receptor.

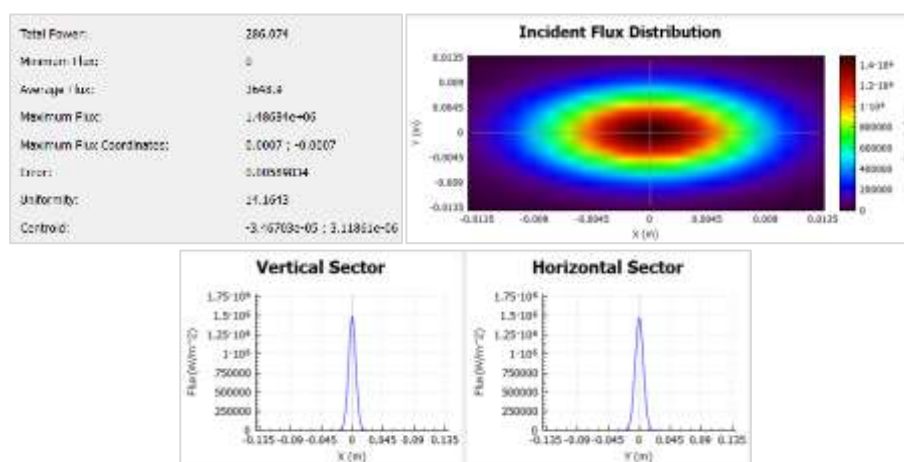


Figura 31. Análisis de flujo en el receptor con radio de 0.14 m.

Nota: Se observa que la potencia del sistema fue de 286.074 Watts, el flujo máximo incidente en el receptor de 1.48 MW/m². Se observa también que el flujo incidente máximo se encuentra en el centro del receptor y se pierde por encima de los 1.5 cm.

Fuente. Elaboración propia.

CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos mediante el análisis de flujo proporcionado por el software, se determinó que la variable *error óptico* (*Sigma Slope*) no afecta significativamente la eficiencia del horno solar. La potencia generada en el receptor se mantuvo constante, alrededor de **315 Watts**, con variaciones mínimas, incluso ante cambios en los valores de esta variable. Por lo tanto, se concluye que el *error óptico* no influye de manera relevante en la potencia del sistema.

El análisis del flujo para la variable *Slant Range* muestra que esta influye significativamente en la eficiencia del horno solar. A distancias muy cortas (0.3125 m) o muy largas (0.9125 m), la potencia disminuye drásticamente a **84.6 Watts**. En contraste, a la distancia focal propuesta en el diseño (0.6125 m), se alcanza la máxima potencia, **315.245 Watts**, lo que la establece como la distancia óptima. Estos resultados demuestran que el diseño propuesto cumple con las exigencias de eficiencia solicitadas.

Al analizar la variable relacionada con el uso del heliostato en el sistema solar, el análisis de flujo revela una diferencia leve en la potencia generada en el receptor.

Específicamente, cuando el heliostato está presente, la potencia alcanzada es de **315.245 Watts**, mientras que, en su ausencia, la potencia generada asciende a **332.318 Watts**. Esto ocurre al omitir el efecto de la reflexión acumulativa generada por la superficie reflejante del heliostato. Cuando el sistema incluye todos sus componentes, los rayos experimentan dos reflexiones (en el heliostato y en el concentrador) antes de alcanzar el receptor, lo que ocasiona pérdidas acumuladas. Estas pérdidas se calculan mediante el producto de los factores de reflectividad de ambas superficies, es decir, $\rho_t = (\rho_h)(\rho_c)$ (Sosa, 2015).

En el caso analizado, ambas superficies tienen un factor de reflectividad de 0.94, lo que da como resultado una pérdida total por reflexión de $0.94 \times 0.94 = 0.8836$.

Finalmente, el análisis de flujo para la variable radio del receptor revela una disminución en la potencia generada a medida que aumenta el radio. Con un radio de 0.06 m, la potencia alcanza los **329.956 Watts**, mientras que al aumentar el radio a 0.14 m, la potencia generada se reduce a **286.074 Watts**.

Trabajo Futuro

Si bien todas las hipótesis planteadas fueron analizadas y probadas de manera satisfactoria, se identificaron ciertas recomendaciones derivadas de la simulación realizada:

- Examinar variaciones en *Sigma Slope* o el error óptico críticos que puedan influir en la potencia del horno solar. Esto permitirá establecer un rango óptimo de valores mínimos y máximos adecuados para el diseño específico propuesto.
- Tras analizar el efecto del *Slant Range* en el diseño, se recomienda, a partir de la distancia focal inicial propuesta, realizar variaciones más pequeñas. Esto permitirá identificar los valores críticos mínimos de alejamiento o acercamiento que afecten la eficiencia.
- Realizar una prueba de sobredimensionamiento del heliostato para evaluar su impacto en la eficiencia, así como pruebas de alejamiento y acercamiento en relación con la distancia focal.

Considerar la posibilidad de identificar un punto óptimo para el dimensionamiento del radio en el diseño del sistema solar propuesto, incluso si dicho valor no coincide exactamente con los requisitos específicos del proyecto.

Referencias

Blanco, M. (2018). Tonatiuh: An object oriented, distributed computing, Monte-Carlo ray tracer for the design and simulation of solar concentrating systems. *University of Texas at Brownsville*, (pp.1-

2).

https://www.researchgate.net/publication/237256255_Tonatiuh_An_object_oriented_distributed_computing_Monte-

[Carlo_ray_tracer_for_the_design_and_simulation_of_solar_concentrating_systems](#)

Canales, B. (2022). CARACTERIZACIÓN DE GEOMETRÍAS DE CONCENTRACIÓN SOLAR UTILIZANDO MODELOS DE TRAZADO DE RAYOS. *Universidad de Chile*.
<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/186634>

CENER. (2017). *Tonatiuh*. <https://github.com/iat-cener/tonatiuh>

CEPAL. (2022). El mundo alcanza los 8 mil millones de habitantes, de los cuales 662 millones viven en América Latina y el Caribe. *Naciones Unidas*. <https://www.cepal.org/es/noticias/mundo-alcanza-8-mil-millones-habitantes-cuales-662-millones-viven-america-latina-caribe>

Del Río, J., Tapia, S., y Jaramillo, O. (2010). Cocedores solares. *Revista digital universitaria .Centro de Investigación en Energía-Universidad Nacional Autónoma de México, Vol.11(No.10)*, p.4.
<https://www.revista.unam.mx/vol.11/num10/art93/art93.pdf>

Esteves, A., Buenanueva, F., y Cavagnaro, L. (2006). *PASTEURIZACION DE LECHE UTILIZANDO UN HORNO SOLAR* (Vol. 10). (A. e. Ambiente, Ed.) Argentina: ASADES.
https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/40499/CONICET_Digital_Nro.f941ff90-f645-4f62-9320-827b800b311b_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Flores, V., Sánchez, M., Bedolla, J., y Bedolla, H. (2021). Concentración y distribución de radiación solar en el receptor de un concentrador de disco parabólico. *MEMORIAS DEL XXVII CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM*.
https://somim.org.mx/memorias/memorias2021/articulos/A4_37.pdf

Gastronomía Solar. (2023). *Horno solar*. España. <https://gastronomiasolar.com/horno-solar/>

González, M., López, L., Servín, H., y González, D. (2014). *ESTUDIO DE PROPIEDADES TÉRMICAS DEL HORNO SOLAR TOLOKATZIN*. Juriquilla, Querétaro, México: MEMORIAS DEL XX CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM.
https://www.researchgate.net/publication/317078518_ESTUDIO_DE_PROPIEDADES_TERMICAS_DEL_HORNO_SOLAR_TOLOKATZIN

- Marín, J. (2017). Estudio de implantación y modelado de un pequeño horno solar en Tonatiuh. *Universidad de Sevilla*.
<https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/91100/fichero/TFG+JLMG.pdf>
- NACIONES UNIDAS. (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe*. Naciones Unidas, Santiago: Publicación de las Naciones Unidas. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/cb30a4de-7d87-4e79-8e7a-ad5279038718/content>
- Roulet, E. (2010). La cocina solar. *DESDE LA PATAGONIA DIFUNDIENDO SABERES, Vol. 7*(No.10).
https://desdelapatagonia.uncoma.edu.ar/wp-content/uploads/2019/01/4.-Revista-N10_Roulet.pdf
- Sánchez, F. (2016). Diseño y análisis de un pequeño horno solar con Tonatiuh. *Universidad de Sevilla*.
<https://idus.us.es/server/api/core/bitstreams/b924edfb-f798-49d6-ae89-5174f6f7ce2c/content>
- Sosa, P. (2015). DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE UN HORNO SOLAR CENTRADO EN EL EJE CON CAPACIDAD TÉRMICA DE 1KW. *UNIVERSIDAD DE SONORA. DIVISIÓN DE INGENIERÍA*.
https://concentrationsolar.org.mx/images/pdf/tesis/m2_pablo_sosa_corregida.pdf
- World Wildlife Fund. (2022). Informe planeta vivo 2022: Hacia una sociedad con la naturaleza en positivo. *Almond*, pp.67-69.
https://wwflpr.awsassets.panda.org/downloads/descarga_informe_planeta_vivo_2022_1_1_1.pdf

Tabla Trabajo Colaborativo

Rol	Autor (es)
Investigación	José Bulmaro Verdugo Urías, Yeniba Argüeso Mendoza
Curación de datos	Yeniba Argüeso Mendoza, Valente Ochoa Espinoza
Escritura - Preparación del borrador original	José Bulmaro Verdugo Urías, Yeniba Argüeso Mendoza
Escritura - Revisión y edición	Jesús Iván Ruiz Ibarra, Yeniba Argüeso Mendoza
Visualización	Jesús Iván Ruiz Ibarra, Yeniba Argüeso Mendoza
Supervisión	Juan Andrés Miranda Arnold, Valente Ochoa Espinoza