



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Irradiación solar en una superficie plana con
diferentes esquemas de seguimiento del Sol

T E S I S

que para obtener el título de:

F I S I C O

presenta:

María Anayeli Ramírez Ramírez

Director de tesis:

Dr. David Riveros Rosas



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Hoja de Datos del Jurado

1.	Datos del alumno: Ramírez Ramírez María Anayeli 55 35 62 75 20 Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ciencias Física 306215865
2.	Datos del tutor Dr. David Riveros Rosas
3.	Datos del sinodal 1 Fis. Andrés Valentín Porta Contreras
4.	Datos del sinodal 2 Dr. Camilo Alberto Arancibia Bulnes
5.	Datos del sinodal 3 Dr. Víctor Manuel Velasco Herrera
6.	Datos del sinodal 4 Dr. Giovanni Alberto Carabalí Sandoval
7.	Datos de la Tesis Título: Irradiación solar en una superficie plana con diferentes esquemas de seguimiento del Sol 84 p. 2017

Agradecimientos

- Agradezco a mis papá y hermana por la paciencia durante todo este proceso, desde el inicio de esta carrera hasta su culminación. Gracias papá por darnos tanto a Dalia y a mí. Gracias mamá por ser quien eres.
- Al Dr. David Riveros Rosas agradezco también su paciencia, sus enseñanzas y que haya depositado su confianza en mí para desarrollar este trabajo.
- A mis sinodales por su tiempo para enriquecer con sus comentarios esta tesis.
- Gracias infinitas a la Universidad Nacional Autónoma de México, no sólo por mi carrera sino por prestarme sus pasillos para recorrerlos con el mayor asombro que podía caber en una niña tan pequeña. He vivido gracias a ti, querida Universidad, pero ahora me das herramientas para vivir para ti.
- A la sra. Dulce y el sr. Víctor por todo su apoyo y cariño; porque siempre estuvieron ahí, creyendo siempre en mí.
- A Heri, y a Román por sacarme del hoyo en tantas veces, gracias por su ayuda invaluable.
- A Vic porque esto definitivamente también es tuyo.
- A Jimmy por ser mi hermano de carrera.
- Finalmente, agradezco a la Universidad de Sonora por la beca brindada para realizar este trabajo.

Resumen

En este trabajo de tesis se analizó la cantidad diaria, mensual y anual de energía solar incidente en una superficie plana de área unitaria bajo cinco diferentes esquemas de seguimiento del Sol y dos casos de superficie plana sin movimiento, mediante el uso de un modelo numérico escrito en MATLAB. Para tal fin, y con ayuda del modelo de cielo claro desarrollado por el European Solar Radiation Atlas (ESRA), se calculó la irradiancia solar incidente en una placa plana horizontal. Los esquemas analizados fueron, como casos base: 1) Superficie horizontal; 2) Superficie inclinada con la latitud; y como casos de seguimiento solar: 3) Eje horizontal orientado en dirección Este-Oeste; 4) Superficie inclinada con la latitud, rotando sobre un eje vertical; 5) Eje horizontal orientado en dirección Norte-Sur; 6) Eje polar y finalmente; 7) Dos ejes.

Con el objetivo de hacer una correcta comparación entre los esquemas de seguimiento fue necesario fijar condiciones atmosféricas iguales en todos los casos. Para cada caso de seguimiento solar se hizo un barrido de latitudes desde 19.428° hasta 49.428° . Lo anterior permite ver qué casos de seguimiento solar reportan mayor cantidad de energía incidente en cada latitud. El análisis comparativo, en esta tesis, se hizo por medio de porcentajes.

También, se escalonó el movimiento de dos de los cinco sistemas de seguimiento solar [8) Eje vertical escalonado y 9) Eje Polar escalonado] con el fin de compararlo con su respectivo movimiento continuo, los escalones fueron 10 minutos, 30 minutos, 60 minutos y 120 minutos. Se encontró que los movimientos escalonados reportan valores de radiación solar incidente anual por arriba del 95 % respecto del movimiento continuo en el intervalo más amplio; es decir, a los 120 minutos. En los intervalos de menor tiempo el porcentaje es mejor que 95 %.

Este trabajo se estructura de la siguiente forma: en el primer capítulo se presenta una introducción donde se muestra el objetivo general y los objetivos específicos que persigue esta tesis y se hace, también, una revisión de los conceptos a utilizar. Se contextualiza el uso de la energía solar incidente en superficies planas y de los sistemas de seguimiento solar. En el capítulo dos se establecen las condiciones escogidas para el desarrollo de esta tesis, así como la descripción de la rutina y de los modelos utilizados. En el capítulo tres se presentan, mediante tablas de porcentajes, los resultados de todos los casos analizados: superficies fijas, esquemas de seguimiento solar y esquemas escalonados. Finalmente, en el capítulo cuatro se concluye sobre los resultados de esta tesis.

Índice general

Agradecimientos	v
Resumen	vii
Lista de símbolos	xi
1. Introducción	1
1.1. Introducción	1
1.2. Conceptos Generales	3
1.2.1. El Sol	3
1.2.2. Radiación solar	4
1.2.3. Interacción de la radiación solar con la tierra	5
1.2.4. Dirección de la radiación incidente en superficies arbitrariamente orientadas	9
1.2.5. Sistemas de seguimiento solar	11
2. Modelo y método	15
2.1. Radiación sobre una superficie horizontal	15
2.2. Descripción del Modelo de ESRA	15
2.3. Radiación sobre superficies inclinadas	17
2.4. Factores de transposición	19
2.5. Casos escogidos	20
2.6. Método	22
3. Resultados	25
3.1. Superficies fijas	26
3.1.1. Superficie horizontal	26
3.1.2. Superficie inclinada	30
3.2. Sistemas de seguimiento solar	34
3.2.1. Eje horizontal orientado Este-Oeste	34
3.2.2. Eje Vertical	38

3.2.3. Eje horizontal orientado Norte-Sur	42
3.2.4. Eje Polar	46
3.2.5. Dos Ejes	50
3.3. Seguimientos escalonados	55
3.4. Irradiación anual	59
4. Conclusiones	61
A. Gráficas de irradiancia global	63
B. Tablas de radiación incidente	67
C. Código en MATLAB	73
Referencias	83

Lista de símbolos

θ	Ángulo de incidencia
θ_z	Ángulo cenital
β	Ángulo de inclinación de la placa respecto a la horizontal
α	Altura solar
δ	Declinación
ϕ	Latitud
ω	Ángulo horario
ω_e	Ángulo horario al amanecer
γ_s	Ángulo acimutal solar
δ_R	Integral de Rayleigh
m	Masa óptica relativa
ϵ	Factor de corrección
I_0	Constante solar
γ	Ángulo acimutal de la superficie
ρ	Albedo
B_C	Componente horizontal directa de la radiación
D_C	Componente horizontal difusa de la radiación
B_{incl}	Componente inclinada directa de la radiación
D_{incl}	Componente inclinada difusa de la radiación
I_h	Irradiancia global incidente sobre la superficie horizontal
I_I	Irradiancia global incidente sobre la superficie inclinada
DNI	Irradiancia directa normal
R_d	Factor de transposición
$T_L(M)$	Factor de Turbidez de Linke
$T_L(M2)$	Factor de Turbidez de Linke para una aeromasa igual a 2
β'	Ángulo entre la línea del eje y la proyección del mismo en el plano horizontal
γ'	Ángulo entre la proyección de la línea del eje sobre el plano horizontal y el meridiano local

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

El uso de energías renovables se ha extendido en todo el mundo con el paso del tiempo, en particular, la energía solar es de principal interés debido a que el Sol es una fuente inagotable de energía.

El potencial energético es variable de acuerdo a la hora del día, época del año y situación atmosférica: día o noche, estación del año, condiciones climatológicas y condiciones de contaminación. Sin embargo, se estima que la energía solar es la fuente renovable más abundante de nuestro planeta. De acuerdo con la Agencia Internacional de la Energía en un reporte publicado en 2014 [1], las tecnologías solares serían la fuente de energía más utilizada para el año 2050, y con ello, se lograría reducir notablemente la emisión dióxido de carbono anual.

El trabajo de cuantificar la radiación solar que alcanza la superficie terrestre es un problema que se ha abordado desde principios del siglo XX. Varios autores en la década de 1960 desarrollaron los primeros modelos para la estimación de la radiación difusa sobre superficies inclinadas. En el año de 1983, Braun y Mitchell establecieron las ecuaciones de la geometría de superficies inclinadas fijas y superficies en movimiento. El ángulo de incidencia de la radiación sobre superficies que se orientan arbitrariamente respecto al meridiano local está descrito por varios autores como Benrod and Bock (1939), Kondratyev (1969), Cofari (1977) [2], etc.

Actualmente, se conoce mucho sobre sistemas de seguimiento solar y en muchos lugares del mundo se implementan éstos para aprovechar al máximo el recurso solar, dependiendo de la demanda y de las necesidades en cada lugar.

La energía solar ha sido una alternativa atractiva para enfrentar los problemas del uso de combustibles fósiles, debido a que su utilización es relativamente económica. Sin embargo, los sistemas de captación tienen altos costos de instalación y mantenimiento y, en algunos casos, bajo poder de producción. Para aumentar la ganancia de paneles solares es común orientarlos con cierta inclinación respecto al suelo. La motivación de este trabajo radica en conocer mediante un modelo numérico la radiación que incide en una placa con diferentes esquemas de seguimiento solar y, a su vez, determinar el mejor seguimiento solar correspondiente a cada latitud. Al conocer la cantidad de radiación solar que alcanza la superficie es posible determinar cuál es el seguimiento solar que más conviene al lugar en cuestión de acuerdo con sus condiciones atmosféricas. Se pretende que esta información sirva a otras entidades interesadas en conocer cuánta producción se obtendrá y determinar si es conveniente invertir en captadores solares y en qué tipo de ellos.

Objetivo general

- Analizar la energía solar incidente en una placa plana de área unitaria con diferentes esquemas de seguimiento solar mediante cálculos numéricos.

Objetivos específicos

- Determinar la geometría requerida que describa algunos esquemas de seguimiento solar.
- Elaborar las rutinas para el cálculo de irradiancia de cielo claro en diferentes ubicaciones geográficas.
- Elaborar las rutinas de cálculo de posición de una placa plana para los diferentes esquemas de seguimiento.
- Calcular la irradiación solar incidente bajo condiciones de cielo claro en los diferentes esquemas de seguimiento del Sol.
- Calcular el seguimiento escalonado para determinados esquemas de seguimiento.

1.2. Conceptos Generales

1.2.1. El Sol

El Sol es una esfera de gas cuya temperatura de cuerpo negro se calcula en $5777K$, aunque en las regiones interiores la temperatura varía entre 8 y $40 \times 10^6 K$. Tiene un diámetro de 1.39×10^9 m y una masa de 2.0×10^{30} Kg [3]. En el Sol se llevan a cabo procesos nucleares siendo el más importante el de la fusión del Hidrógeno convirtiéndose en Helio. Toda la energía producida en el Sol se transfiere en todas las direcciones del espacio, alcanzando a los planetas del Sistema Solar.

La energía que emite el Sol llega a la Tierra en forma de radiación electromagnética principalmente en el rango de longitudes de onda de 200 nm a $5 \mu m$ (Figura 1.1). El porcentaje más alto de energía emitida por el Sol se encuentra en la región visible seguida por el infrarrojo cercano, el infrarrojo medio y la región ultravioleta (Tabla 1.1).

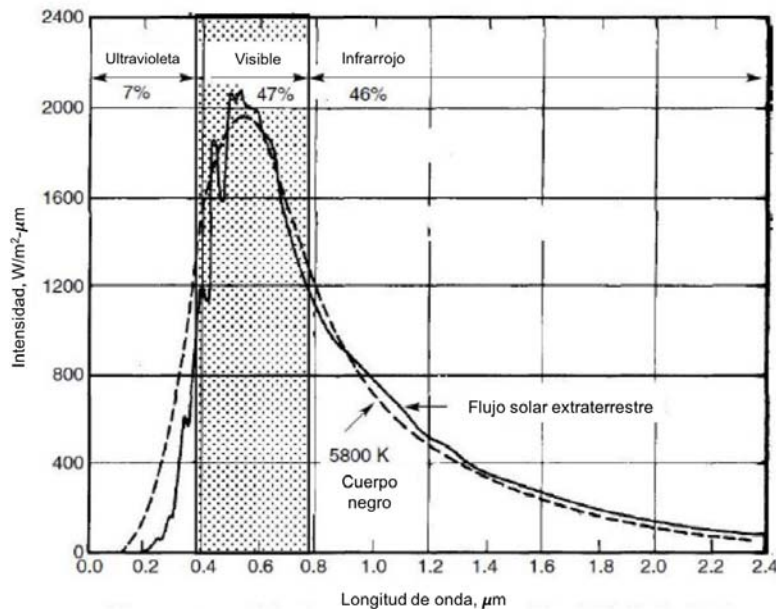


Figura 1.1: Distribución espectral de la radiación solar extraterrestre [4].

El Sol es para la Tierra la fuente de energía más importante pues gracias a su radiación se desarrolla la vida y se realizan procesos importantes como los ciclos del agua y del carbono.

Radiación	Contribución al espectro
Ultravioleta lejano	< 0,02 %
Ultravioleta medio	2.0 %
Ultravioleta cercano	5.3 %
Visible	43.5 %
Infrarrojo cercano	36.8 %
Infrarrojo medio	12.1 %
Infrarrojo lejano	< 0,3 %

Tabla 1.1: Distribución porcentual del espectro de la radiación solar [5].

1.2.2. Radiación solar

Entre los conceptos más utilizados para caracterizar la radiación solar se enlistan los siguientes:

Constante solar

Es la energía proveniente del Sol, recibida por unidad de tiempo por una superficie de área unitaria perpendicular a la dirección de propagación de la radiación a la distancia promedio entre el Sol y la Tierra. Su valor es de 1367 W/m^2 .

Radiación directa

Es la radiación que atraviesa la atmósfera sin sufrir ningún tipo de atenuación o dispersión.

Radiación difusa

Es la radiación que ve afectada su trayectoria por los constituyentes de la atmósfera, como gases, aerosoles, nubes, etc. Esta componente, a pesar de que no puede ser concentrada, sí contribuye en los colectores planos.

Radiación reflejada

Es la radiación que se refleja desde el suelo hacia la superficie de interés.

Radiación global

Es la suma de las componentes directa, difusa y reflejada de la radiación.

Irradiancia

Es la potencia que llega a una superficie por unidad de área, sus unidades son W/m^2 .

Irradiación

Energía que incide en una superficie por unidad de área, se encuentra sumando la irradiancia sobre un tiempo específico. Sus unidades son Wh/m^2 donde h es hora.

1.2.3. Interacción de la radiación solar con la tierra

La radiación solar interactúa con la tierra y con su atmósfera de acuerdo con tres factores:

1. La geometría de la Tierra y sus movimientos de rotación y traslación. Aquí intervienen ángulos como la latitud, la declinación, etc.
2. Factores locales como la altitud, así como la orientación e inclinación de la superficie.
3. Atenuación atmosférica. Procesos de dispersión y la absorción de la radiación solar por la presencia de gases, partículas sólidas y líquidas, y nubes (o agua condensada).

Los factores antes mencionados influyen en la cantidad de radiación solar que alcanza una superficie en cuestión. Para el primer factor, por ejemplo, existen diversos modelos que toman en cuenta los movimientos de la Tierra tanto en su traslación alrededor del Sol como de rotación sobre su propio eje. El modelo más sencillo es el reportado por Duffie [3] que permite calcular en un año de 365 días el ángulo cenital y acimutal solar en cualquier hora y día del año.

Los factores locales, a los que se refiere el segundo factor, inciden en los procesos de atenuación a los que se hace referencia en el tercer factor.

Finalmente, en el tercer y último grupo, que se refiere a la atenuación atmosférica, se consideran los conceptos de masa óptica relativa y espesor óptico, específicamente, para los constituyentes gaseosos. Los gases existentes en la atmósfera como las moléculas de aire y el ozono, definen una atmósfera clara y seca o de Rayleigh. No toda la radiación proveniente del Sol alcanza a la superficie de la Tierra de manera directa, sino que sufre atenuaciones debido a la composición de la atmósfera. Los principales procesos de atenuación son:

- Dispersión de Rayleigh: debida a la presencia de gases constituyentes de la atmósfera, principalmente oxígeno y nitrógeno molecular.
- Dispersión de Mie: debida a la presencia de partículas suspendidas en la atmósfera y a las que se le denominan aerosoles.

- Reflexión por nubes.
- Absorción: se refiere al proceso por el cual la radiación es captada por los componentes atmosféricos como el ozono, el vapor de agua y el dióxido de carbono.

Masa óptica

La masa óptica describe la masa atmosférica contenida a lo largo de la longitud de camino óptico de la radiación solar en la atmósfera (Figura 1.2) y puede calcularse mediante la siguiente integral donde ρ se refiere a la densidad del aire en función de la distancia s recorrida a lo largo de una dirección determinada en la atmósfera.

$$(1.1) \quad \int_0^{\infty} \rho ds$$

Sin embargo, en la mayoría de los casos, el parámetro requerido se refiere a la masa óptica relativa que corresponde al número de atmósferas que debe recorrer la radiación solar cuando el Sol tiene un cierto ángulo cenital (θ_z) respecto a la trayectoria recorrida desde el cenit:

$$(1.2) \quad m_r = \frac{\int_0^{\infty} \rho ds_z}{\int_0^{\infty} \rho ds_\nu}$$

Conforme el ángulo de altura solar se hace más pequeño, la longitud de camino óptico aumenta y disminuye conforme la altitud local aumenta. A nivel del mar de acuerdo a la definición de masa óptica relativa, es de esperarse que $m = 1$ cuando el Sol se encuentra en el cenit.

Las nubes son las principales responsables de la atenuación de la radiación solar; sin embargo, no es fácil estimar la cantidad de radiación atenuada por ellas, por lo que se utilizan métodos empíricos para su evaluación. Por otro lado, el estudio de la radiación bajo condiciones de cielo claro se ha vuelto muy importante en el desarrollo de aplicaciones como los sistemas de captación solar.

Particularmente, para este trabajo de tesis, se estudió el modelo de cielo claro desarrollado por el European Solar Radiation Atlas (ESRA). Este modelo se usa para estimar la cantidad de radiación que alcanza la superficie horizontal en ausencia de nubes. Toma en

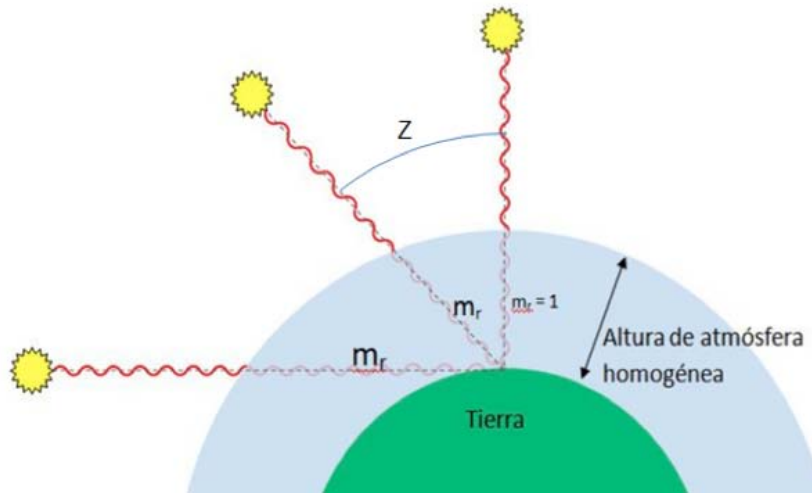


Figura 1.2: Masa óptica relativa [6].

consideración el factor de turbidez de Linke y la elevación local, es por ello que, de acuerdo con Rigollier et. al, (2000) [7] para diferentes rangos del factor de turbidez de Linke y para diferentes ángulos de elevación solar, es el modelo más robusto y preciso.

Factor de Turbidez de Linke

El factor de turbidez de Linke $T_L(M)$ describe el grado de transparencia de la atmósfera. Es una función que permite cuantificar la dispersión y difusión de la radiación solar que atraviesa la atmósfera causada por los componentes atmosféricos así como partículas sólidas y partículas líquidas existentes en un cielo despejado o cielo claro. Depende de la masa óptica de aire; sin embargo, se han propuesto algunos modelos para quitar esta dependencia. Uno de los métodos más usados consiste en considerar el factor de turbidez de Linke para una masa de aire igual a 2 ($T_L(M2)$) y es la forma en la que se utilizó en este trabajo.

Alcanza valores bajos durante el invierno y valores más grandes en el verano y varía, además, de acuerdo a la región, así como con el nivel de urbanización e industrialización. Cuanto más grande es el factor, más grande también es la atenuación de la radiación y viceversa.

Espesor óptico

Es la integral en la vertical del coeficiente de extinción a lo largo de cualquier camino en la atmósfera.

Albedo

El albedo es un parámetro que indica la fracción de energía incidente que refleja una superficie. En este trabajo se utilizó un albedo $\rho = 0.2$ para el suelo en todos los casos considerados. Lo anterior debido a que se requiere que las condiciones de suelo como de características atmosféricas se mantengan constantes a fin de poder comparar únicamente las ventajas de cada esquema de seguimiento utilizado. En la tabla 1.2 se muestra el albedo de algunas superficies.

Superficie	Albedo aproximado
Cuerpo negro	0
Bosque	0.05-0.2
Pasto	0.1-0.25
Superficies oscuras	0.1-0.2
Arena seca	0.25-0.45
Arcilla	0.15-0.35
Arena	0.2-0.4
Albedo prom. Tierra	0.36
Granito	0.3-0.35
Hielo glacial	0.3-0.4
Superficies claras	0.4-0.5
Recubrimiento de sal	0.5
Nieve fresca	0.9
Agua	0.1-1
Superficie blanca	1

Tabla 1.2: Albedo de algunas superficies [8].

1.2.4. Dirección de la radiación incidente en superficies arbitrariamente orientadas

Se puede determinar la relación que existe entre la posición del Sol y una superficie plana mediante diferentes ángulos:

- Latitud ϕ . Es el ángulo formado por la vertical a la superficie terrestre en dicho punto y el plano del ecuador. También se puede ver como la localización angular del ecuador. Negativa hacia el sur y positiva hacia el norte, $-90 < \phi < 90$.
- Declinación δ . Es el ángulo entre el vector Tierra-Sol y el plano ecuatorial.

$$\delta = 23,45 \sin\left(\frac{284 + (\text{día juliano})}{365}\right), -23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ \quad (1.3)$$

- Inclinación de la placa β . Es el ángulo formado entre la placa respecto a la superficie horizontal.
- Ángulo acimutal de la placa γ . Es el ángulo formado entre la proyección sobre la superficie horizontal de la normal a la superficie inclinada y el meridiano local, $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$.
- Ángulo horario ω . Es el desplazamiento angular del meridiano local de este a oeste debido a la rotación de la Tierra sobre su eje. Una hora corresponde a 15 grados.
- Ángulo de incidencia θ . Es el ángulo formado entre el rayo solar incidente sobre una superficie con el vector normal a dicha superficie.
- Ángulo cenital θ_z . Es el ángulo formado entre la vertical y el rayo solar incidente.

Para conocer la posición del Sol, en su movimiento por el cielo, respecto de un observador situado en la Tierra, son necesarios dos ángulos:

- Ángulo acimutal γ_s . Es al ángulo entre el meridiano y el plano vertical que pasa por el Sol.
- Altura solar α . Es el ángulo entre el Sol y el plano horizontal. Es el complemento del ángulo cenital; es decir $\alpha = 90 - \theta_z$

Para determinar la posición del Sol respecto a una superficie inclinada es necesario conocer la relación entre el ángulo de inclinación de la superficie con respecto al suelo y su orientación en relación al meridiano local, es decir, su ángulo acimutal. Ver figuras 1.3 y 1.4

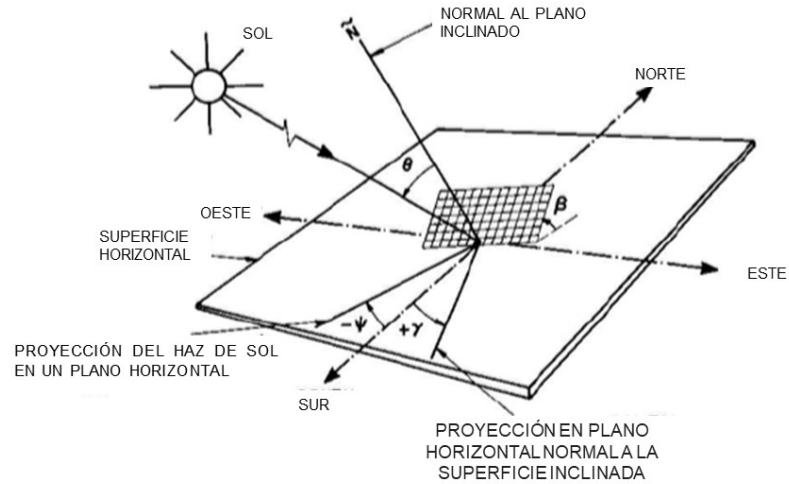


Figura 1.3: Superficie arbitrariamente orientada [2].

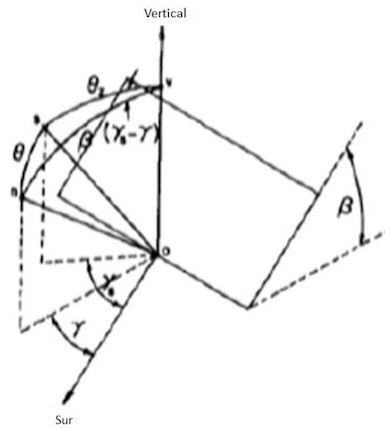


Figura 1.4: Análisis geométrico necesario para el cálculo del ángulo de incidencia [9].

Para una superficie que se orienta en cualquier dirección respecto al meridiano local, la ley de cosenos para triángulos esféricos permite conocer el ángulo de incidencia en términos del ángulo cenital, el ángulo de inclinación de la superficie, así como el ángulo acimutal solar y el ángulo acimutal de la superficie [2,3,9].

$$\cos\theta = \cos\beta\cos\theta_z + \sin\beta\sin\theta_z\cos(\gamma_s - \gamma) \quad (1.4)$$

O bien, con ayuda de la siguiente fórmula dada por Benrod and Bock [2]:

$$(1.5) \quad \begin{aligned} \cos\theta = & (\sin\phi\cos\beta - \cos\phi\sin\beta\cos\gamma)\sin\delta \\ & + (\cos\phi\cos\beta + \sin\phi\sin\beta\cos\gamma)\cos\delta\cos\omega \\ & + \cos\delta\sin\beta\sin\gamma\sin\omega \end{aligned}$$

Asimismo, se pueden obtener expresiones para el ángulo cenital y el ángulo acimutal solar en términos del ángulo horario, la latitud y la declinación [9].

$$\cos\theta_z = \sin\delta\sin\phi + \cos\delta\cos\phi\cos\omega \quad (1.6)$$

$$\sin\gamma_s = \frac{\sin\omega\cos\delta}{\sin\theta_z} \quad (1.7)$$

En el caso de una superficie horizontal, el ángulo de incidencia es igual al ángulo cenital, pues es claro que $\beta = 0$.

En el caso de la superficie inclinada, el ángulo de incidencia de la radiación directa se calcula de la siguiente manera [2,3]:

$$\cos\theta = \cos(\phi - \beta)\cos\delta\cos\omega + \sin(\phi - \beta)\sin\delta \quad (1.8)$$

1.2.5. Sistemas de seguimiento solar

Los sistemas de seguimiento solar son necesarios para favorecer la captación de energía solar, especialmente en aplicaciones como sistemas de concentración.

Los seguidores solares se pueden agrupar en dos tipos: seguidores de un eje y seguidores de dos ejes. En el primer grupo se encuentran:

- Seguidor de eje vertical. Este seguidor es mejor conocido como seguidor acimutal. El eje de rotación es colineal con el eje cenital. La superficie tiene una inclinación fija respecto a la horizontal generalmente igual a la latitud local. Para maximizar la radiación incidente sobre la superficie se tiene que cumplir que derivando la ecuación (1.2) respecto al ángulo γ [9] resulta:

$$\frac{d(\cos\theta)}{d\gamma} = -\sin\theta_z\sin\beta\sin(\gamma_s - \gamma) = 0 \quad (1.9)$$

Lo cual se cumple si y sólo si

$$\gamma_s = \gamma \quad (1.10)$$

Por lo que:

$$\cos\theta = \cos\beta\cos\theta_z + \sin\beta\sin\theta_z \quad (1.11)$$

$$\beta = cte. \quad (1.12)$$

- Seguidor de eje horizontal. El eje de rotación de este seguidor permanece siempre paralelo a la superficie de la Tierra. Se orienta en dirección Este-Oeste o bien, en la dirección Norte-Sur.
 - Plano que rota sobre un eje horizontal orientado en la dirección Este-Oeste con ajuste diario. En este caso, la radiación es normal a la superficie en el medio día solar.

$$\cos\theta = \sin^2\delta + \cos^2\delta\cos\omega \quad (1.13)$$

La inclinación de la superficie tiene que ajustarse diariamente de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\beta = |\phi - \delta| \quad (1.14)$$

El ángulo acimutal de la superficie está dado por:

$$Si(\phi - \delta) > 0, \gamma = 0^\circ \quad (1.15)$$

$$Si(\phi - \delta) < 0, \gamma = 180^\circ \quad (1.16)$$

- Plano que rota sobre un eje horizontal este-oeste con ajuste continuo para maximizar el ángulo de incidencia.

$$\cos\theta = (1 - \cos^2\delta\sin^2\omega)^{\frac{1}{2}} \quad (1.17)$$

La inclinación de la superficie es:

$$\tan\beta = \tan\theta_z|\cos\gamma_s| \quad (1.18)$$

Mientras que el ángulo acimutal de la superficie es:

$$Si|\gamma_s| < 90^\circ, \gamma = 0^\circ \quad (1.19)$$

$$Si|\gamma_s| > 90^\circ, \gamma = 180^\circ \quad (1.20)$$

- Plano que rota sobre un eje horizontal norte-sur con ajuste continuo para minimizar el ángulo de incidencia.

$$\cos\theta = (\cos^2\theta_z + \cos^2\delta\sin^2\omega)^{\frac{1}{2}} \quad (1.21)$$

La inclinación de la superficie está dada por:

$$\text{Si } \gamma_s > 0, \gamma = 90^\circ \quad (1.22)$$

$$\text{Si } \gamma_s < 0, \gamma = -90^\circ \quad (1.23)$$

- Seguidor de eje inclinado. Su eje de rotación está inclinado respecto a la superficie terrestre, generalmente esta inclinación es igual a la latitud local.

$$\cos\theta = \cos\beta\cos\theta_z + \sin\beta\sin\theta_z\cos(\gamma_s - \gamma) \quad (1.24)$$

El ángulo acimutal de la superficie está dado por

$$\gamma = \gamma_0 + 180C_1C_2 \quad (1.25)$$

Donde,

$$\gamma_0 = \gamma' + \tan^{-1}\left(\frac{\sin\theta_z\sin(\gamma_s - \gamma')}{\cos\theta'\sin\beta'}\right) \quad (1.26)$$

$$C_1 = \begin{cases} 0 & \text{si } (\gamma_0 - \gamma')(\gamma_s - \gamma') \geq 0 \\ 1 & \text{de otra manera} \end{cases}$$

$$C_2 = \begin{cases} 1 & \text{si } (\gamma_s - \gamma') \geq 0 \\ -1 & \text{de otra manera} \end{cases}$$

La inclinación de la placa es:

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{\tan\beta'}{\cos(\gamma - \gamma')}\right) + 180C_3 \quad (1.27)$$

Donde,

$$C_3 = \begin{cases} 0 & \text{si } \tan^{-1}\left(\frac{\tan\beta'}{\cos(\gamma - \gamma')}\right) \geq 0 \\ 1 & \text{de otra manera} \end{cases}$$

C_1, C_2 y $C_3 = \text{ctes}$

En el segundo grupo están:

- Seguidor de dos ejes. Su eje de rotación acimutal debe ser paralelo al eje cenital, mientras que el eje de elevación rota siempre ortogonal al eje acimutal como también es paralelo a la superficie de la Tierra. Esta superficie se ajusta de tal manera que siempre es normal al rayo incidente, entonces, la radiación es máxima cuando:

$$\frac{d(\cos\theta)}{d\beta} = 0 \quad (1.28)$$

$$\frac{d(\cos\theta)}{d\gamma} = 0 \quad (1.29)$$

Es decir, cuando $\gamma = \gamma_s$ y $\beta = \theta_z$

- Seguidor tilt-roll. Uno de sus ejes de rotación está alineado de manera paralela al eje de rotación de la Tierra, esto deriva en que la inclinación del eje es igual a la latitud local. El otro eje de rotación es perpendicular al eje polar. El ángulo de seguimiento de este eje depende del ángulo de declinación, mientras que el ángulo de seguimiento del eje polar es igual al ángulo horario.

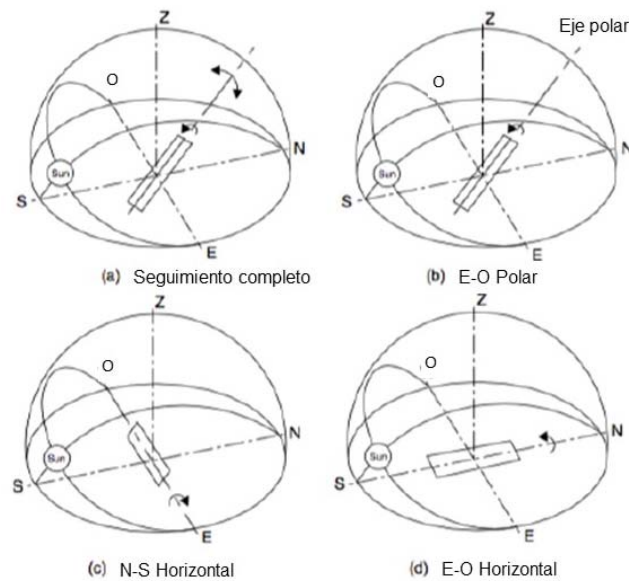


Figura 1.5: Algunos esquemas de seguimiento solar [10].

Capítulo 2

Modelo y método

2.1. Radiación sobre una superficie horizontal

Existen diversas formas de estimar la cantidad de radiación incidente en superficies horizontales o también llamada radiación horizontal, por ejemplo, mediante estaciones meteorológicas que miden la irradiancia global y difusa.

2.2. Descripción del Modelo de ESRA

El modelo desarrollado por el Atlas Europeo de Radiación Solar (ESRA, por sus siglas en inglés) es un modelo de cielo claro que estima la cantidad de radiación global o total I_h que alcanza una superficie horizontal, mediante la suma de las componentes horizontal directa I_{hB} y difusa I_{hD} bajo la consideración de cielo despejado [7].

$$I_h = I_{hB} + I_{hD} \quad (2.1)$$

Componente directa

$$I_{hB} = I_0 \epsilon \sin \gamma_s e^{(-0,8662 T_L m \delta_r)} \quad (2.2)$$

Componente difusa

$$I_{hD} = I_0 \epsilon T_{rd}(T_L) F_d(\gamma_s, T_L) \quad (2.3)$$

Donde

I_0 : $1,367W/m^2$

T_L : Factor de turbidez de Linke

δ_r : Espesor óptico

ϵ : Factor de corrección debido a la variación de la distancia Tierra-Sol

$$\epsilon = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi * (\text{día juliano})}{365,25}\right) \quad (2.4)$$

$T_{rd}(T_L)$: Función de transmisión difusa

$$T_{rd}(T_L) = -1,5843 \times 10^{-2} + 3,0543 \times 10^{-2} T_L + 3,797 \times 10^{-4} T_L^2 \quad (2.5)$$

$F_d(\gamma_s, T_L)$: Función difusa angular

$$F_d(\gamma_s, T_L) = A_0 + A_1 \sin \gamma_s + A_2 (\sin \gamma_s)^2 \quad (2.6)$$

Donde los coeficientes A_0 , A_1 y A_2 sólo dependen del factor de turbidez de Linke y son adimensionales. Están dados por:

$$A_0 = 2,6463 \times 10^{-1} - 6,1581 \times 10^{-2} T_L + 3,1408 \times 10^{-3} T_L^2$$

$$A_1 = 2,04402 + 1,8945 \times 10^{-2} T_L - 1,1161 \times 10^{-2} T_L^2$$

$$A_2 = -1,3025 + 3,9231 \times 10^{-2} T_L + 8,5079 \times 10^{-3} T_L^2$$

m : masa óptica relativa

$$m(\gamma_s^{\text{true}}) = \frac{\exp(z/z_h)}{\sin \gamma_s^{\text{true}} + 0,50572(\gamma_s^{\text{true}} + 6,07995)^{-1,6364}} \quad (2.7)$$

Donde z es la elevación del sitio y z_h es la altura de una atmósfera de Rayleigh cuyo valor es $8434,5m$. Y γ_s^{true} es la altura solar corregida por difracción.

$$\gamma_s^{\text{true}} = \gamma_s + \Delta \gamma_{\text{refr}} \quad (2.8)$$

Todas las ecuaciones anteriores fueron sacadas de la referencia [7].

2.3. Radiación sobre superficies inclinadas

Se puede estimar la radiación que incide sobre superficies inclinadas mediante modelos que integran la distribución de radiación vista por la superficie. O bien, ésta puede calcularse a partir de datos conocidos de radiación horizontal. [11]

Los modelos de transposición son modelos que ayudan a estimar la radiación total que incide en superficies inclinadas mediante la suma de las componentes directa, difusa y reflejada, sólo difieren entre ellos de acuerdo a considerar si la radiación difusa es isotrópica o no. Un modelo de transposición tiene la forma [12,13]:

$$I_I = I_{\beta B} + I_{\beta D} + I_{\beta R} \quad (2.9)$$

Donde I_I es la irradiancia global incidente en la superficie inclinada o irradiancia inclinada global. $I_{\beta B}$ es la irradiancia inclinada directa, $I_{\beta D}$ es la irradiancia inclinada difusa y $I_{\beta R}$ es la irradiancia reflejada por el suelo o también llamada Albedo.

La irradiancia inclinada directa $I_{\beta B}$ se calcula a partir de la irradiancia directa normal DNI y del ángulo de incidencia. Es decir, dadas la posición del Sol y la orientación de la placa, el cálculo de la irradiancia inclinada directa se obtiene de manera sencilla por consideraciones geométricas:

$$I_{\beta B} = \text{DNI} \cos \theta \quad (2.10)$$

DNI es la irradiancia que recibe una superficie normal al rayo solar:

$$\text{DNI} = \frac{I_{hB}}{\cos \theta_z} \quad (2.11)$$

Por otro lado, la componente reflejada de la radiación se modela de la siguiente manera:

$$I_{\beta R} = \rho I_h R_r \quad (2.12)$$

donde ρ es el albedo.

El factor de transposición de la irradiancia reflejada R_r se modela a su vez, en condiciones isotrópicas y toma la forma:

$$R_r = \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (2.13)$$

Finalmente, la componente difusa inclinada implica un mayor reto para calcularla ya que es afectada por la dispersión por aerosoles y otros componentes de la atmósfera. Como ya se dijo anteriormente, se puede calcular usando datos de radiación horizontal, como sigue:

$$I_{\beta D} = I_{hD} R_d \quad (2.14)$$

Donde I_{hD} es la componente difusa horizontal y R_d es el llamado factor de transposición. Este factor se ha modelado por varios autores en condiciones isotrópicas y otros más lo han hecho considerando condiciones anisotrópicas.

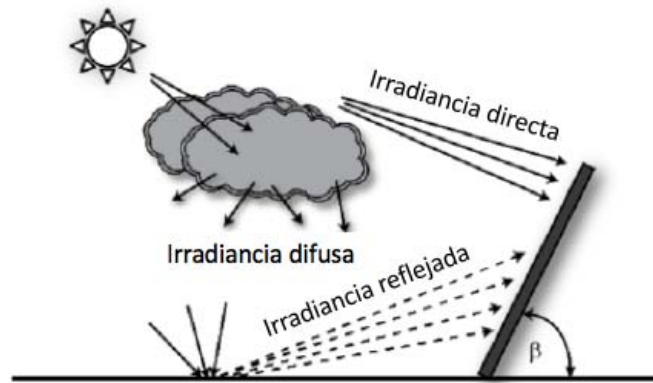


Figura 2.1: Radiación inclinada [12].

2.4. Factores de transposición

El primer modelo isotrópico se desarrolló en 1961 por Liu y Jordan donde se asume que la irradiancia difusa se distribuye uniformemente en el hemisferio; sin embargo, Kondratyev y Manolova en 1960 demostraron que la irradiancia difusa no es isotrópica en el cielo, así que posterior a ello, se desarrollaron nuevos modelos que consideraban también la naturaleza isotrópica de la componente difusa. Muchos de estos modelos se han analizado ampliamente en la literatura, siendo algunos más complejos que otros [12,13].

A continuación, se mencionan algunos factores de transposición clasificados en isotrópicos y anisotrópicos.

■ Isotrópicos

1. Modelo de Liu-Jordan [13]. Fue reportado por primera vez en 1961 por Liu y Jordan. Sólo depende de la inclinación de la placa de la siguiente manera:

$$R_d = \frac{1 + \cos\beta}{2} \quad (2.15)$$

2. Modelo de Koronakis [13]. Este modelo modifica al modelo de Liu-Jordan bajo la suposición de que la parte sur en el hemisferio norte es responsable del 63 % de la radiación difusa total. Fue reportado en 1986.

$$R_d = \frac{1}{3}(2 + \cos\beta) \quad (2.16)$$

3. Modelo de Badescu [12]. Este es un modelo pseudo isotrópico reportado en el año 2002.

$$R_d = \frac{1}{4}(3 + \cos 2\beta) \quad (2.17)$$

■ Anisotrópicos

1. Modelo de Bugler [13]. Reportado en 1977, donde se asume que una componente de la región circunsolar provee la anisotropía sumándole el 5 % del DNI al modelo de Liu-Jordan.

$$R_d = \frac{1 + \cos\beta}{2} + 0,5 \frac{DNI \cos\theta}{I_{hB}} \quad (2.18)$$

2. Modelo de Willmot [12]. Se reportó en 1982. Depende de la inclinación de la placa mediante un polinomio de segundo orden conocido como factor de reducción anisotrópico. I_0 es la constante solar.

$$R_d = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} \frac{\text{DNI}}{I_0} + (1,0115 - 0,20293\beta - 0,080823\beta^2) \frac{I_0 - \text{DNI}}{I_0} \quad (2.19)$$

3. Modelo de Temps and Coulson [12]. El término $(1 + \sin^3 \frac{\beta}{2})$ toma en cuenta el efecto del brillo del horizonte y el término $(1 + \cos^2 \theta \sin^3 \theta_z)$ es el efecto del brillo de la región circumsolar. Fue reportado también en 1977.

$$R_d = \cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right) \left(1 + \sin^3 \frac{\beta}{2}\right) (1 + \cos^2 \theta \sin^3 \theta_z) \quad (2.20)$$

2.5. Casos escogidos

Con el objetivo de ver únicamente el efecto de la latitud en los casos de este trabajo, tanto el factor de Linke como la longitud y la altitud se mantuvieron con los mismos valores de la ciudad escogida como referencia, en este trabajo se escogió la CDMX cuya latitud es 19.428° [14]. En la tabla 2.1 se muestran los casos de latitud escogidos. El factor de Linke se obtuvo de la base de datos de SoDa (Solar Radiation Data) como el promedio de los valores de todos los meses del año [15].

Latitud	Altitud	Longitud	Turbidez Linke
19.428°	2240 m	-99.127	3.58
29.428°	2240 m	-99.127	3.58
39.428°	2240 m	-99.127	3.58
49.428°	2240 m	-99.127	3.58

Tabla 2.1: Latitudes escogidas

En este trabajo se escogieron cinco seguimientos solares (3 - 7) los cuales son los que más comúnmente se utilizan en la industria. Mientras que, como casos base tenemos a la superficie horizontal y la superficie inclinada (1 y 2) ya que no se mueven para seguir la trayectoria del Sol, sino que permanecen fijos. Al ser siete casos, se tiene una amplia gama de posibilidades para analizar y así determinar el seguimiento más adecuado para cada latitud.

1. Superficie horizontal. Es la placa plana de área unitaria colocada en la superficie de la Tierra que permanece fija a lo largo del año.
2. Superficie fija inclinada con la latitud. La superficie inclinada permanece fija a lo largo del año y se inclina de acuerdo a la latitud; es decir, en este trabajo esta placa se inclinó a 19.428° , 29.428° , 39.428° y 49.428° .

Los casos de seguimiento solar a continuación se explicaron ampliamente al igual que sus ecuaciones en el capítulo anterior:

3. Seguidor de eje vertical inclinado con la latitud
4. Seguidor de eje horizontal N-S
5. Seguidor de eje horizontal E-O
6. Seguidor de eje inclinado (Eje Polar)
7. Seguidor de dos ejes

Adicionalmente, se determinó que el seguimiento de eje vertical y el seguimiento de eje polar se escalonarían, es decir, mantendrían fijo su movimiento durante 10, 30, 60 y 120 minutos con el objetivo de comparar la energía incidente con la energía que incide en su respectivo movimiento continuo, lo anterior permite observar cuánta energía incidente deja de captar la placa al no moverse continuamente. Transcurrido el intervalo de tiempo, la placa se posiciona nuevamente de manera que se minimiza el ángulo de incidencia en ese instante, posteriormente vuelve a quedar fija por el mismo intervalo y así sucesivamente hasta el final de su movimiento.

8. Seguidor de eje vertical escalonado
 - 10 min
 - 30 min
 - 60 min
 - 120 min
9. Seguidor de eje polar
 - 10 min
 - 30 min
 - 60 min
 - 120 min

2.6. Método

En el entorno MATLAB (ver Apéndice C) se escribió una rutina que calcula, primeramente, mediante la función PosSolar.m los ángulos de posición del Sol para cada día del año. Los datos de entrada de esta función son:

- Día juliano
- Latitud ϕ
- Hora solar

Los datos arrojados son:

- Ángulo de incidencia θ
- Declinación δ
- Ángulo acimutal solar γ_s

Posteriormente se escribió la rutina basada en el modelo de cielo claro de ESRA para calcular las componentes directa y difusa de la radiación horizontal así como la radiación directa normal DNI. Con la suma de la irradiancia directa más la irradiancia difusa se obtiene la irradiancia global que incide en una superficie horizontal cada minuto efectivo de luz para cada día del año (ver Apéndice A). La rutina también calcula el amanecer, la duración del día y el anochecer. Éste último se calcula a su vez como la hora en que amanece más la duración del día.

Una vez obtenidos los datos de radiación horizontal se calcularon los datos de radiación inclinada. Para ello, se escribió una rutina que se basa en el modelo isotrópico de Liu-Jordan para el cálculo de la radiación difusa inclinada.

Posteriormente se implementaron las ecuaciones que calculan los ángulos de incidencia para cada sistema de seguimiento solar. Este ángulo, como se mencionó antes, es necesario para calcular la irradiancia directa inclinada.

En esta parte de la rutina se incluyeron los esquemas escalonados en el tiempo; para el seguimiento de eje vertical es el ángulo acimutal de la superficie el que debe quedar fijo para que, después de transcurrido el tiempo, se vuelva a igualar al ángulo acimutal del Sol. En el caso del seguimiento de Eje Polar, tanto el ángulo de inclinación de la placa como el ángulo acimutal se mantienen sin cambiar durante los intervalos de tiempo escogidos mencionados anteriormente. Finalmente, se consideró un albedo igual a 0.2 para todos los casos.

Se determinó que se barrerían las latitudes desde 19.428° hasta 49.428° en el hemisferio norte de 10 en 10 grados para cada uno de los esquemas de seguimiento solar (para abarcar la mayor parte del Hemisferio Norte en las latitudes más representativas). Con el objetivo de ver el efecto de la latitud en la irradiación anual incidente en cada esquema de seguimiento, se fijaron los valores del índice de Linke y de la altitud, los cuales pertenecen a la Ciudad de México, es decir 3.58 el promedio anual y 2240 metros sobre el nivel del mar, respectivamente.

La rutina en MATLAB estima la irradiancia global instantánea correspondiente a cada minuto que incide sobre una placa de área unitaria. Para obtener la irradiación horaria se multiplicó por el factor $1/60$. Posteriormente, para calcular la radiación diaria se sumó la irradiación horaria correspondiente a las horas efectivas de luz; es decir, desde el amanecer hasta el anochecer.

Para obtener la irradiación mensual se sumó la irradiación diaria de los días correspondientes a cada mes. Finalmente, para obtener la irradiación anual se sumaron las irradiaciones mensuales de los doce meses del año.

A manera de conclusión de este capítulo se recalca que para conocer cuánta cantidad de radiación incide en una superficie arbitrariamente orientada fue necesario saber primero la cantidad de radiación que alcanza una superficie horizontal. Se diseñó un método para alcanzar tal fin y se analizarán y compararán cada uno de los casos en las 4 latitudes escogidas en el capítulo 3.

Capítulo 3

Resultados

En este capítulo se muestran, para cada uno de los esquemas considerados:

- El día cuyo valor de irradiación es máximo y el día de mínima irradiación correspondientes a cada latitud.
- La irradiación anual estimada en cada latitud.
- La irradiación mensual estimada en cada latitud.
- La irradiación anual de los seguimientos escalonados en cada latitud.

Asimismo, se muestran las gráficas obtenidas para cada caso considerado de acuerdo a la latitud en la que se localizan.

Gráficas de irradiación diaria

En estas gráficas se muestra la irradiación acumulada durante cada día para los 365 días del año. Los días se separaron de acuerdo a la estación del año correspondiente.

Gráficas de irradiación diaria promedio mensual

Muestra la irradiación acumulada durante los días respectivos de cada mes. Se graficaron, entonces, 12 valores correspondientes a cada mes del año para cada una de las latitudes consideradas.

(Ver Apéndice B donde se muestran las tablas con los valores numéricos de la cantidad de radiación mensual para cada caso)

3.1. Superficies fijas

3.1.1. Superficie horizontal

Irradiación diaria

Latitud	Valor	Día Juliano	Fecha	Irradiación [Wh/m^2] - %
19.428°	Máximo	159	08-junio	8754.6 - 100 %
	Mínimo	356	22-diciembre	5481.1 - 62.6 %
29.428°	Máximo	171	20-junio	9118.7 - 100 %
	Mínimo	356	22-diciembre	4077.0 - 44.7 %
39.428°	Máximo	172	21-junio	9234.1 - 100 %
	Mínimo	356	22-diciembre	2648.4 - 28.6 %
49.428°	Máximo	172	21-junio	9115.6 - 100 %
	Mínimo	356	22-diciembre	1331.1 - 14.6 %

Tabla 3.1: Superficie horizontal.

La tabla 3.1 resume los valores mínimos y máximos correspondientes a cada latitud. En la latitud 19.428° la diferencia entre ellos es de 38 %. En la latitud 29.428° la diferencia es de 55.3 %. En la latitud 39.428° hay una diferencia de 71.4 % y finalmente en la latitud 49.428° la diferencia es de 85.4 %. Lo anterior muestra que la diferencia entre valor máximo y valor mínimo incrementa al aumentar también la latitud. El valor más grande de irradiación diaria, para este caso, se dio en la latitud 39.428°. En la figura 3.1 se muestra una gráfica con todos los días del año y su respectivo valor de radiación estimado.

Superficie horizontal

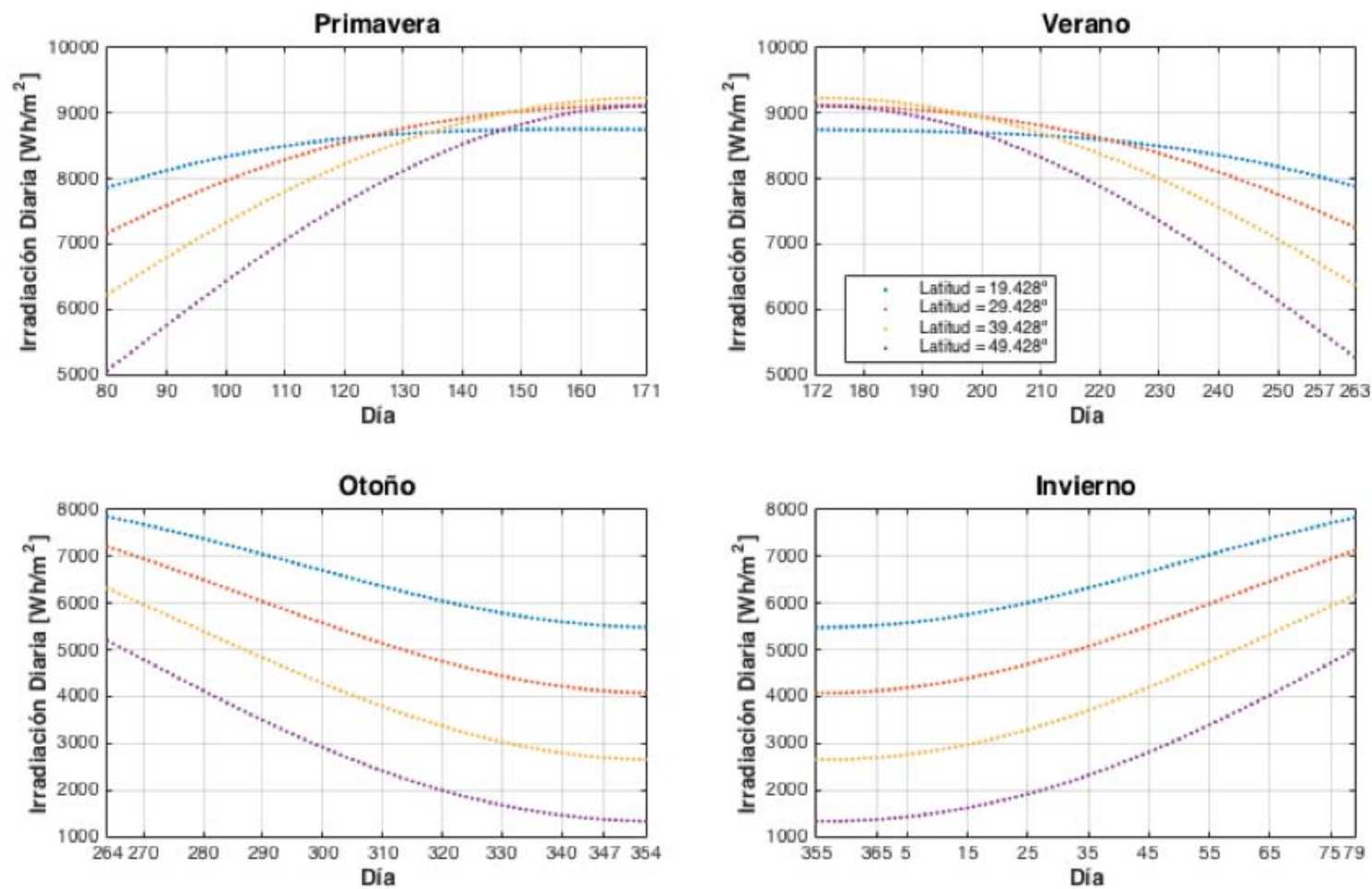


Figura 3.1: Irradiación diaria.

Irradiación mensual

Mes	Latitud			
	19.428°	29.428°	39.428°	49.428°
Enero	63.21 %	48.49 %	33.10 %	18.33 %
Febrero	65.82 %	54.54 %	41.72 %	28.17 %
Marzo	83.75 %	75.41 %	64.46 %	51.38 %
Abril	88.57 %	85.59 %	79.72 %	71.16 %
Mayo	94.71 %	96.24 %	94.84 %	90.68 %
Junio	95.20 %	98.99 %	100 %	98.43 %
Julio	94.70 %	97.55 %	97.57 %	94.93 %
Agosto	92.53 %	91.59 %	87.66 %	80.94 %
Septiembre	84.00 %	78.16 %	69.60 %	58.62 %
Octubre	77.01 %	66.19 %	53.26 %	38.90 %
Noviembre	64.06 %	50.53 %	35.99 %	21.55 %
Diciembre	60.22 %	45.05 %	29.53 %	15.12 %

Tabla 3.2: Porcentajes mensuales. Superficie Horizontal.

La gráfica 3.2 y los resultados resumidos en la tabla 3.2 muestran que en los meses del verano el porcentaje de irradiación recibida aumenta gradualmente desde enero, siendo, para este caso, máxima en el mes de junio y a partir de ahí tenemos un decrecimiento hasta diciembre en donde se tiene el valor mínimo. Este comportamiento se repite en todas las latitudes, pero fue en la latitud 39.428° que se estimó el 100 % (este no es un comportamiento esperado, ya que lo que uno pensaría es que al estar más cerca del ecuador, se registre una incidencia mayor de energía).

La irradiación mensual máxima que se estimó en la superficie horizontal corresponde al mes de junio en la latitud 39.428° y la menor alcanzó el 15.12 % en el mes de diciembre en la latitud 49.428°.

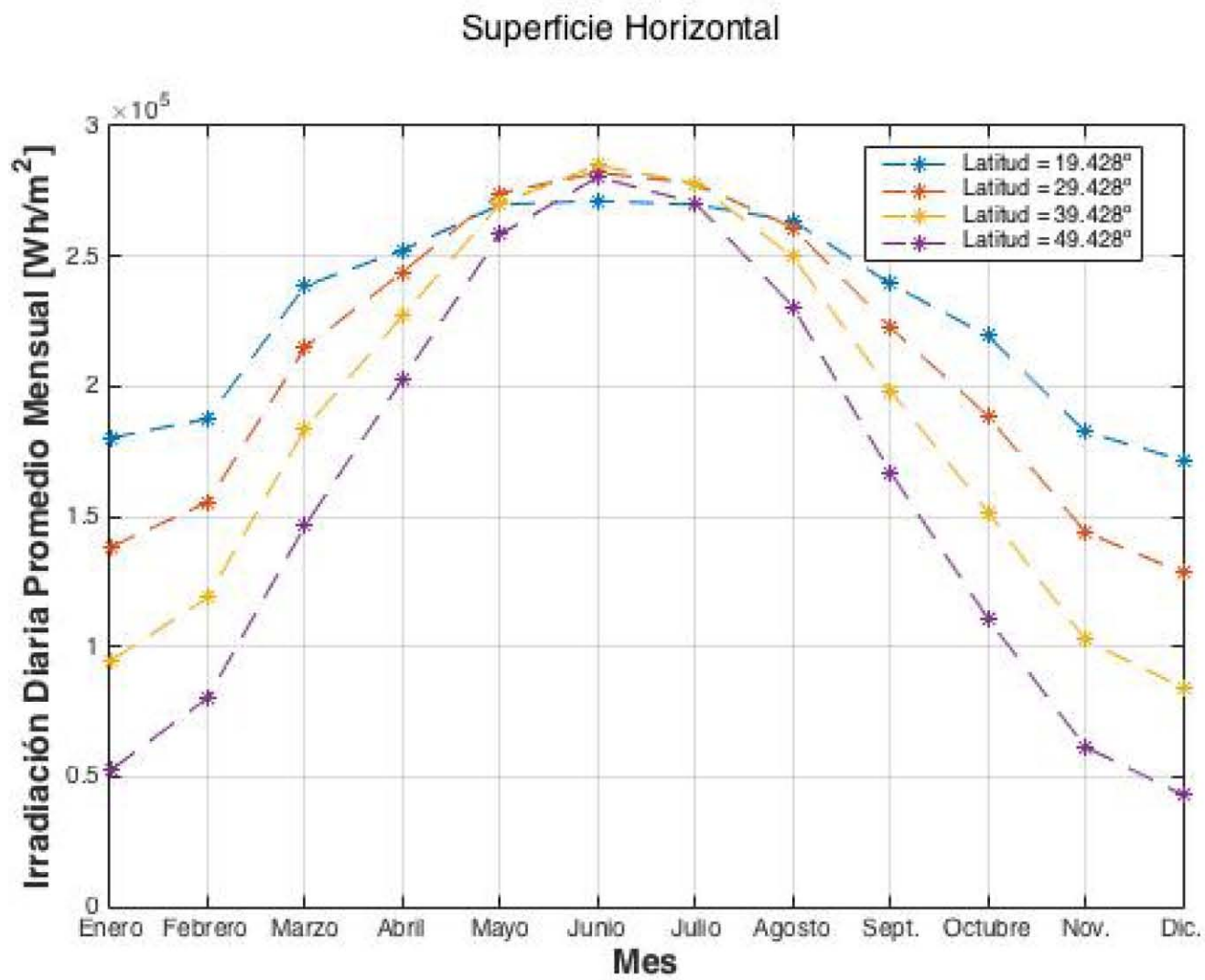


Figura 3.2: Irradiación diaria promedio mensual.

3.1.2. Superficie inclinada

Irradiación diaria

Latitud	Valor	Día Juliano	Fecha	Irradiación [Wh/m^2] - %
19.428°	Máximo	92	2-abril	8309.3 - 100 %
	Mínimo	356	22-diciembre	6895.9 - 82.9 %
29.428°	Máximo	103	13-abril	8215.0 - 100 %
	Mínimo	356	22-diciembre	6127.7 - 74.6 %
39.428°	Máximo	115	26-abril	8084.0 - 100 %
	Mínimo	356	22-diciembre	5062.6 - 62.6 %
49.428°	Máximo	128	8-mayo	7901.7 - 100 %
	Mínimo	356	22-diciembre	3586.6 - 45.3 %

Tabla 3.3: Superficie inclinada con la latitud.

En la tabla 3.3 se observa que la diferencia entre los valores mínimo y máximo es de 17.1 % para la latitud 19.428°. En la latitud 29.428°, la diferencia es de 25.4 %. En la latitud 39.428° la diferencia tiene un porcentaje de 37.4 % y finalmente en la latitud 49.428° existe una diferencia de 54.7 %. En este caso, tal como en el caso de la superficie horizontal, también se observa que al aumentar la latitud crece el valor de la diferencia. Para este esquema, la máxima irradiación fue para la latitud 19.428° con un valor de 8309.3 Wh/m^2 y la mínima fue para la latitud 49.428° con valor de 7901.7 Wh/m^2 . La diferencia entre estos valores es de 407.6 Wh/m^2 . Es decir, el valor máximo de la latitud 19.428° y el valor máximo de la latitud 49.428° son muy cercanos entre sí. Mientras tanto, la diferencia de los valores mínimos de las latitudes 19.428° y 49.428° es de 3309.3 Wh/m^2 . En la figura 3.3 se muestran los valores de radiación para todos los días del año.

Superficie Inclinada

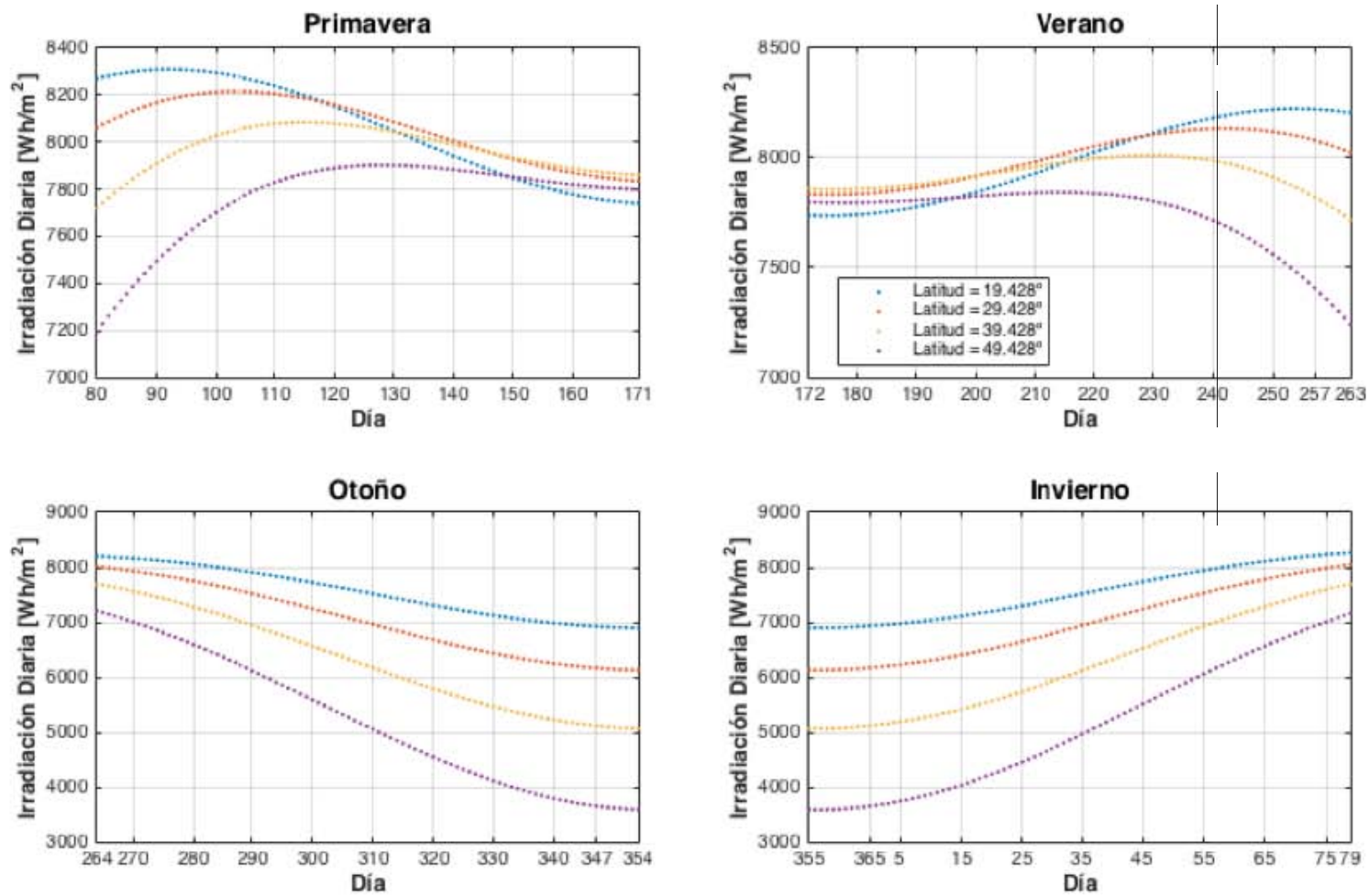


Figura 3.3: Irradiación diaria.

Irradiación mensual

Mes	Latitud			
	19.428°	29.428°	39.428°	49.428°
Enero	87.0863 %	78.6017 %	66.7609 %	50.2240 %
Febrero	85.2000 %	79.7925 %	72.0152 %	60.9250 %
Marzo	100 %	96.9582 %	92.1520 %	84.9170 %
Abril	97.3237 %	96.6399 %	94.7928 %	91.4053 %
Mayo	97.2962 %	97.9132 %	97.5791 %	96.0543 %
Junio	94.6121 %	95.7321 %	95.9757 %	95.1740 %
Julio	95.3941 %	96.3176 %	96.3373 %	95.2605 %
Agosto	98.5538 %	98.5184 %	97.4219 %	94.9540 %
Septiembre	96.6831 %	94.8636 %	91.6332 %	86.4929 %
Octubre	96.3687 %	91.7079 %	84.8345 %	74.8722 %
Noviembre	86.3868 %	79.0497 %	68.7180 %	54.2049 %
Diciembre	84.5083 %	75.3124 %	62.5520 %	44.8400 %

Tabla 3.4: Porcentajes mensuales. Superficie Inclinada.

Este caso muestra que en las latitudes 29.428°, 39.428° y 49.428° hay un aumento gradual de irradiación a partir del mes de enero hasta mayo, en el mes de junio el valor de irradiación cae y nuevamente, aumenta de manera gradual durante julio y agosto, a partir de ahí hay una disminución hasta el mes de diciembre. Mientras tanto, en la latitud 19.428° se estimó un valor de irradiación más grande en enero respecto a febrero, en marzo la radiación aumentó volviéndose máxima y a partir de ahí disminuye gradualmente hasta junio, la irradiación vuelve a aumentar hasta encontrar otro máximo en agosto y, finalmente, a partir de agosto decrece la irradiación de manera gradual hasta diciembre.

La irradiación mensual máxima que se estimó en la superficie inclinada corresponde al mes de marzo en la latitud 19.428° y la menor alcanzó el 44.84 % en el mes de diciembre en la latitud 49.428°.

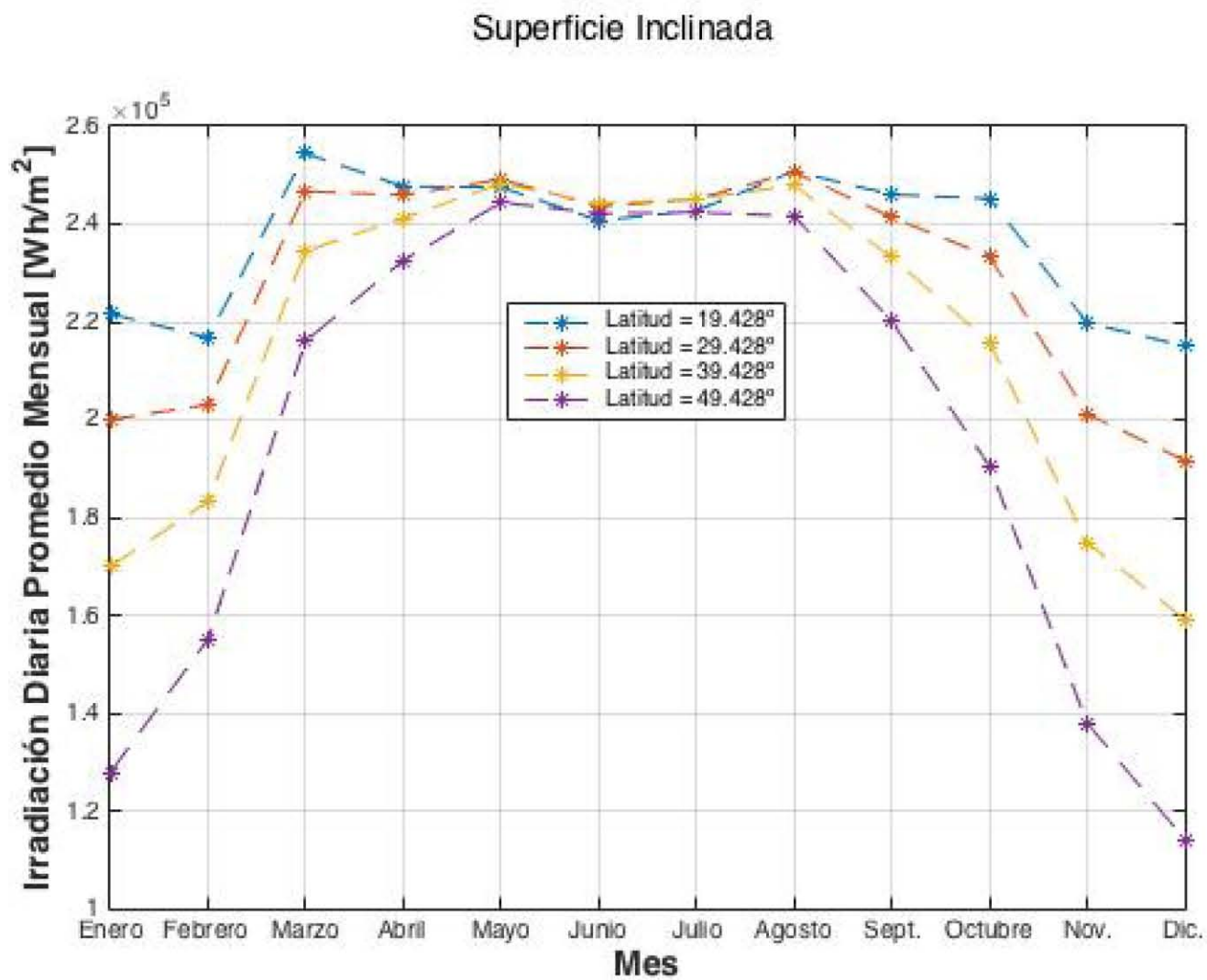


Figura 3.4: Irradiación diaria promedio mensual.

3.2. Sistemas de seguimiento solar

3.2.1. Eje horizontal orientado Este-Oeste

Irradiación diaria

Latitud	Valor	Día Juliano	Fecha	Irradiación [Wh/m^2] - %
19.428°	Máximo	171	20-junio	9191.0 - 100 %
	Mínimo	355	20-diciembre	7795.8 - 84.8 %
29.428°	Máximo	171	20-junio	9478.2 - 100 %
	Mínimo	355	21-diciembre	6849.6 - 72.2 %
39.428°	Máximo	171	21-junio	9748.1 - 100 %
	Mínimo	356	22-diciembre	5593.3 - 57.3 %
49.428°	Máximo	172	21-junio	10052.0 - 100 %
	Mínimo	356	22-diciembre	3915.0 - 38.9 %

Tabla 3.5: Eje horizontal orientado Este-Oeste.

En este caso, de acuerdo con la tabla 3.5, se puede ver que la diferencia entre mínimo y máximo respectivo a cada latitud se hace mayor al alejarse del ecuador. Sin embargo, a pesar de que en la latitud 49.428° se tiene el valor más grande de radiación, también se tiene el valor más pequeño; esto quiere decir que los valores de irradiación a lo largo del año, para esta latitud, descienden hasta un valor de 3915 Wh/m^2 . Mientras que en la latitud 19.428° la radiación a lo largo de los días está acotada entre 9191.0 y 7795.8 Wh/m^2 . La figura 3.5 muestra la radiación que incidió en los 365 días del año.

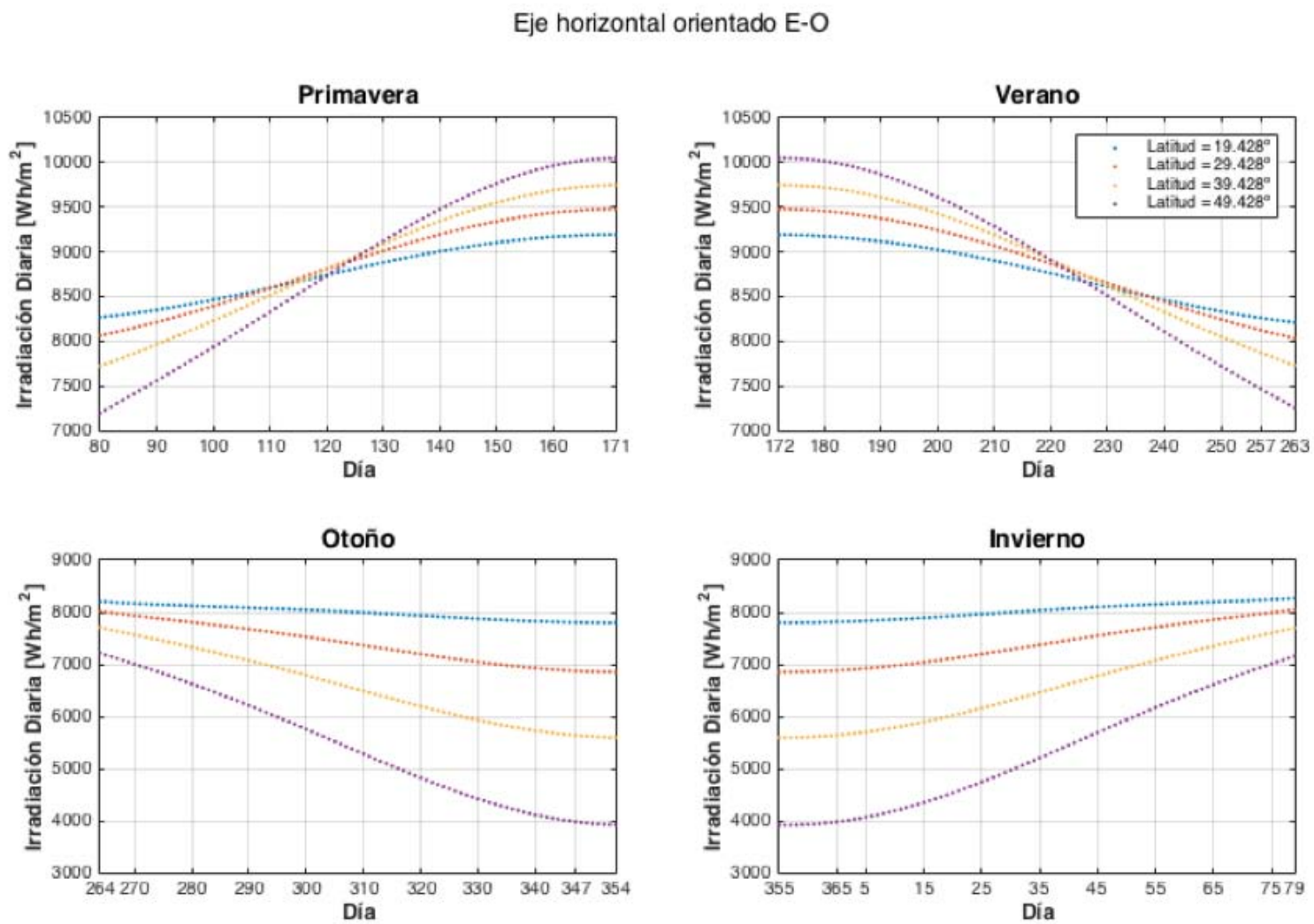


Figura 3.5: Irradiación diaria.

Irradiación mensual

Mes	Latitud			
	19.428°	29.428°	39.428°	49.428°
Enero	79.17 %	70.80 %	59.55 %	44.34 %
Febrero	73.26 %	68.34 %	61.40 %	51.68 %
Marzo	82.62 %	80.09 %	76.09 %	70.09 %
Abril	82.80 %	82.49 %	81.33 %	79.06 %
Mayo	89.65 %	91.28 %	92.46 %	93.36 %
Junio	91.87 %	94.62 %	97.17 %	100 %
Julio	90.58 %	92.86 %	94.82 %	96.81 %
Agosto	86.55 %	87.09 %	86.93 %	86.01 %
Septiembre	80.07 %	78.62 %	76.04 %	71.91 %
Octubre	81.01 %	76.95 %	71.01 %	62.49 %
Noviembre	76.95 %	69.89 %	60.28 %	47.15 %
Diciembre	78.25 %	68.97 %	56.63 %	40.12 %

Tabla 3.6: Porcentajes mensuales. Eje horiz orientado E-O.

De acuerdo con la tabla 3.6 y la figura 3.6, en todas las latitudes se alcanzó la máxima irradiación durante el mes de junio. En las latitudes 19.428° y 29.428° decayó el valor de irradiación de enero a febrero. Y en la latitud 19.428° aumentó de septiembre a octubre para disminuir de nuevo en noviembre y, finalmente, aumentar en diciembre.

La irradiación mensual máxima que se estimó en el seguimiento de eje horizontal orientado este-oeste corresponde al mes de junio en la latitud 49.428° y la menor alcanzó el 40.12 % en el mes de diciembre, también en la latitud 49.428°.

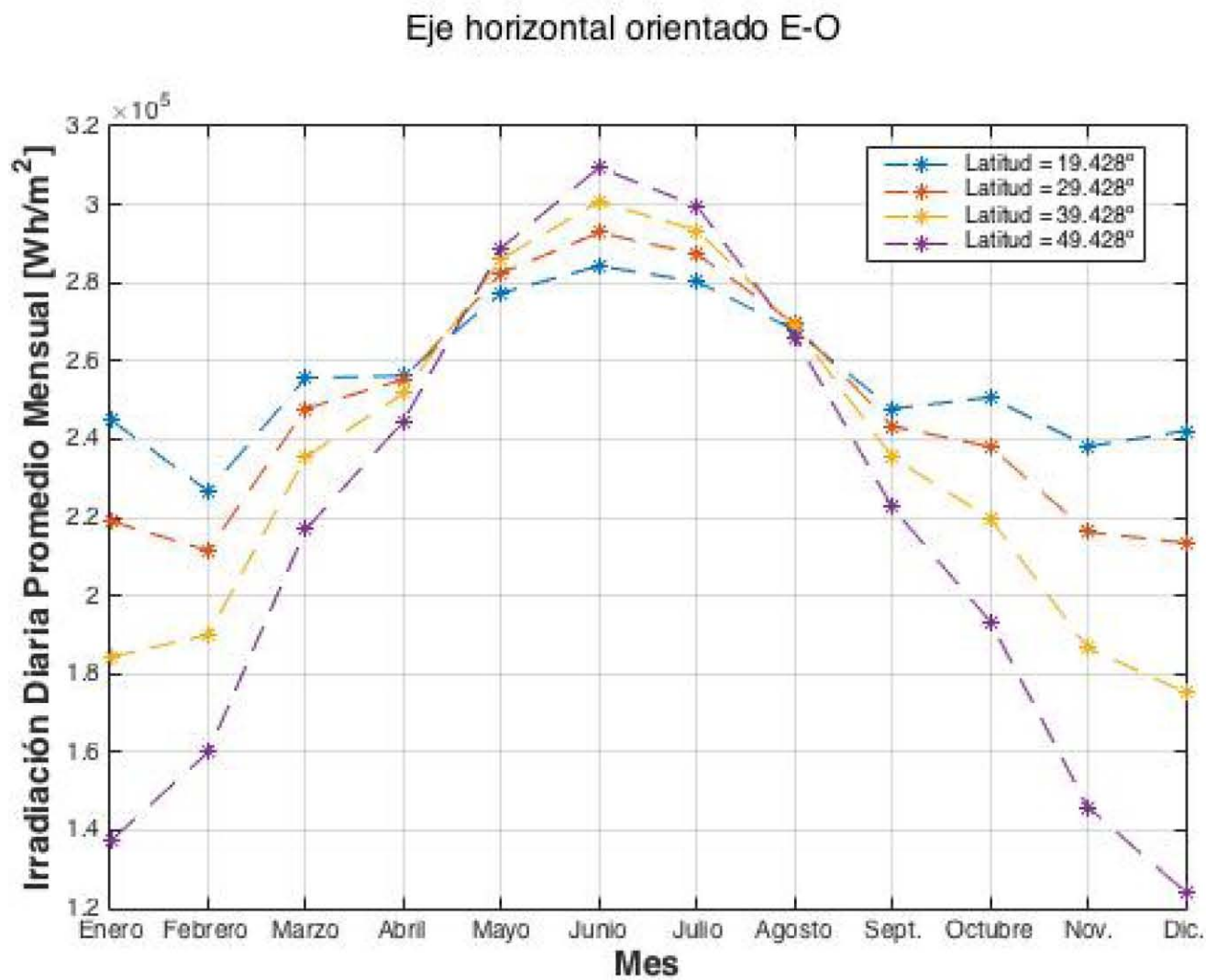


Figura 3.6: Irradiación diaria promedio mensual.

3.2.2. Eje Vertical

Irradiación diaria

Latitud	Valor	Día Juliano	Fecha	Irradiación [Wh/m^2] - %
19.428°	Máximo	167	16-junio	10339.0 - 100 %
	Mínimo	356	22-diciembre	7457.1
29.428°	Máximo	169	18-junio	11294.0 - 100 %
	Mínimo	356	22-diciembre	6727.1 - 59.5 %
39.428°	Máximo	170	19-junio	12139.0 - 100 %
	Mínimo	356	22-diciembre	5563.6 - 45.8 %
49.428°	Máximo	171	20-junio	12943.0 - 100 %
	Mínimo	356	22-diciembre	3887.6 - 30.0 %

Tabla 3.7: Eje Vertical.

La tabla 3.7 muestra que las latitudes más alejadas del ecuador presentan una diferencia mayor entre sus respectivos valores mínimo y máximo. En la latitud 19.428°, la diferencia es de 27.9%. En la latitud 29.428°, la diferencia es de 40.5%. En la latitud 39.428°, la diferencia es de 54.2% y finalmente, en la latitud 49.428° la diferencia es del 70%. Esto quiere decir, tal como en los casos anteriores, que al alejarnos más del ecuador incide menos radiación sobre la placa alcanzando números más pequeños. Ver la figura 3.7 donde se muestran todos los valores de radiación para cada día del año en cada latitud.

Seguimiento de eje vertical

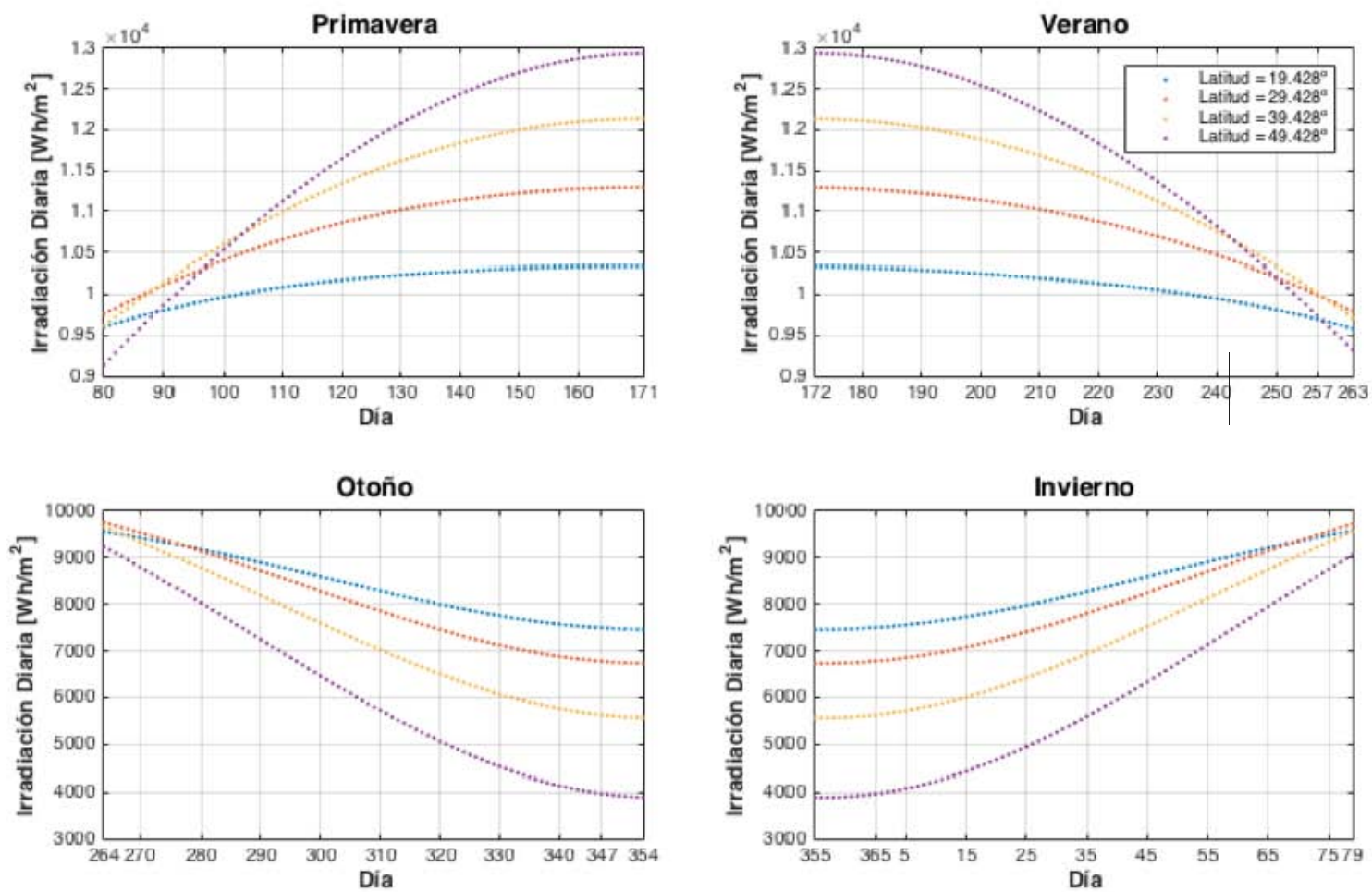


Figura 3.7: Irradiación diaria.

Irradiación mensual

Mes	Latitud			
	19.428°	29.428°	39.428°	49.428°
Enero	60.38 %	55.47 %	47.29 %	35.20 %
Febrero	60.35 %	58.01 %	53.01 %	44.83 %
Marzo	73.47 %	74.11 %	72.33 %	67.78 %
Abril	75.28 %	79.11 %	81.14 %	81.42 %
Mayo	79.62 %	86.00 %	91.07 %	95.24 %
Junio	80.18 %	87.52 %	93.94 %	100 %
Julio	79.64 %	86.58 %	92.44 %	97.70 %
Agosto	78.09 %	83.17 %	86.65 %	88.73 %
Septiembre	72.52 %	74.56 %	74.52 %	72.21 %
Octubre	69.22 %	67.97 %	64.01 %	56.84 %
Noviembre	60.30 %	56.31 %	49.28 %	38.59 %
Diciembre	58.28 %	52.74 %	43.87 %	31.03 %

Tabla 3.8: Porcentajes mensuales. Eje Vertical.

De acuerdo con la tabla 3.8 y la figura 3.8, en todas las latitudes, durante el mes de junio se acumuló más energía solar y en diciembre se alcanzaron los mínimos incluso por debajo de los meses de enero respectivos.

La irradiación mensual máxima que se estimó en el seguimiento de eje vertical pertenece al mes de junio en la latitud 49.428° y la menor alcanzó el 31.03 % en el mes de diciembre en la latitud 49.428°.

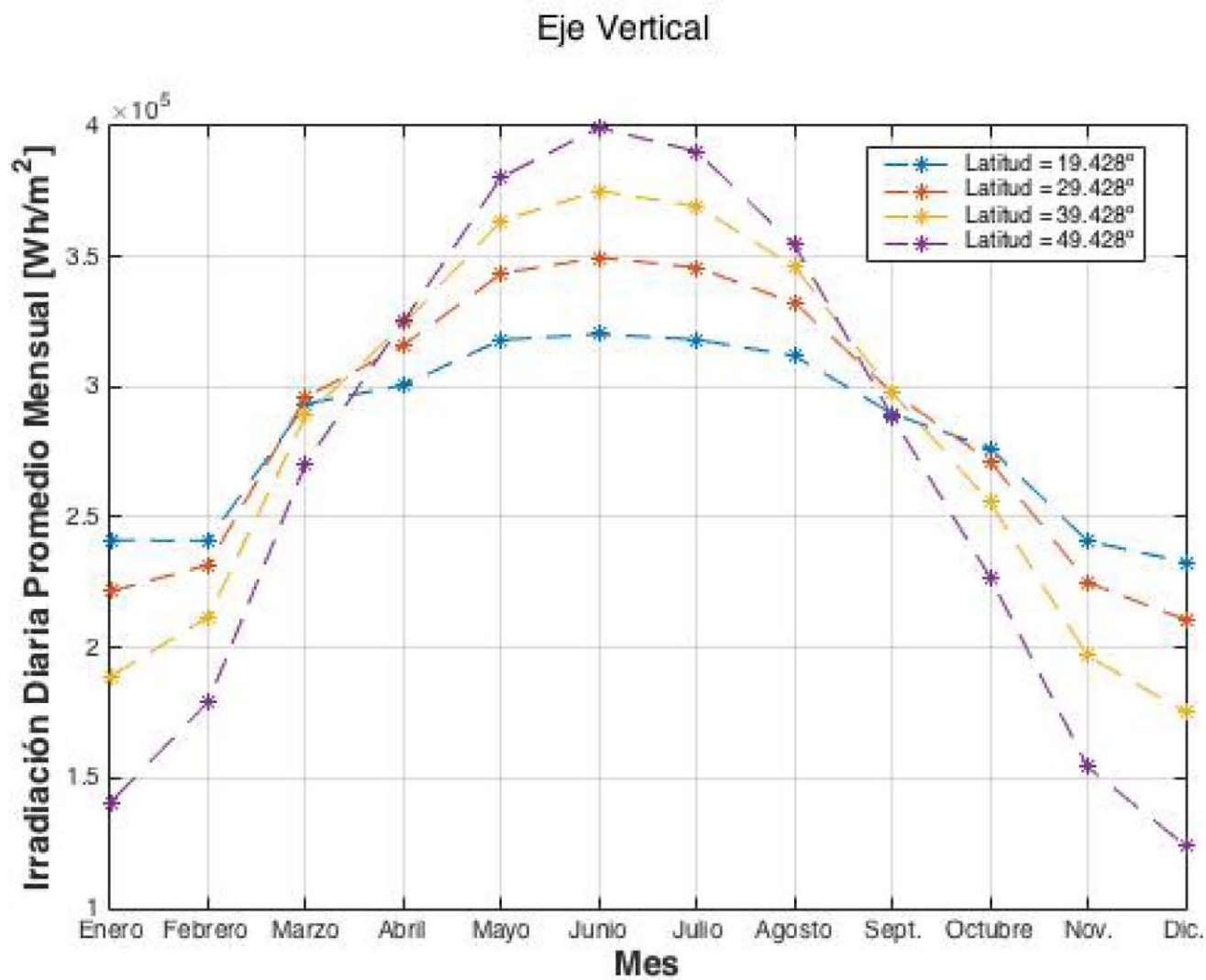


Figura 3.8: Irradiación diaria promedio mensual.

3.2.3. Eje horizontal orientado Norte-Sur

Irradiación diaria

Latitud	Valor	Día Juliano	Fecha	Irradiación [Wh/m^2] - %
19.428°	Máximo	143	23-mayo	11540.0 - 100 %
	Mínimo	356	22-diciembre	7510.9 - 65.0 %
29.428°	Máximo	168	17-junio	12129.0 - 100 %
	Mínimo	356	22-diciembre	5817.4 - 47.9 %
39.428°	Máximo	170	19-junio	12556.0 - 100 %
	Mínimo	356	22-diciembre	4022.1 - 32.0 %
49.428°	Máximo	172	21-junio	12851.0 - 100 %
	Mínimo	356	22-diciembre	2227.0 - 17.3 %

Tabla 3.9: Eje horizontal orientado Norte-Sur.

En la tabla 3.9 se puede ver que la diferencia entre valor máximo y valor mínimo, en la latitud 19.428°, es del 35 %. En la latitud 29.428°, la diferencia es de 52.1 %, en la latitud 39.428° se puede ver que la diferencia es de 68 % y en la latitud 49.428° la diferencia alcanzó el 82.7 %. Conforme nos alejamos del ecuador el valor máximo correspondiente crece, pero al mismo tiempo el valor mínimo disminuye. Los valores de irradiación correspondientes a cada día del año se pueden ver en la figura 3.9.

Eje horizontal orientado N-S

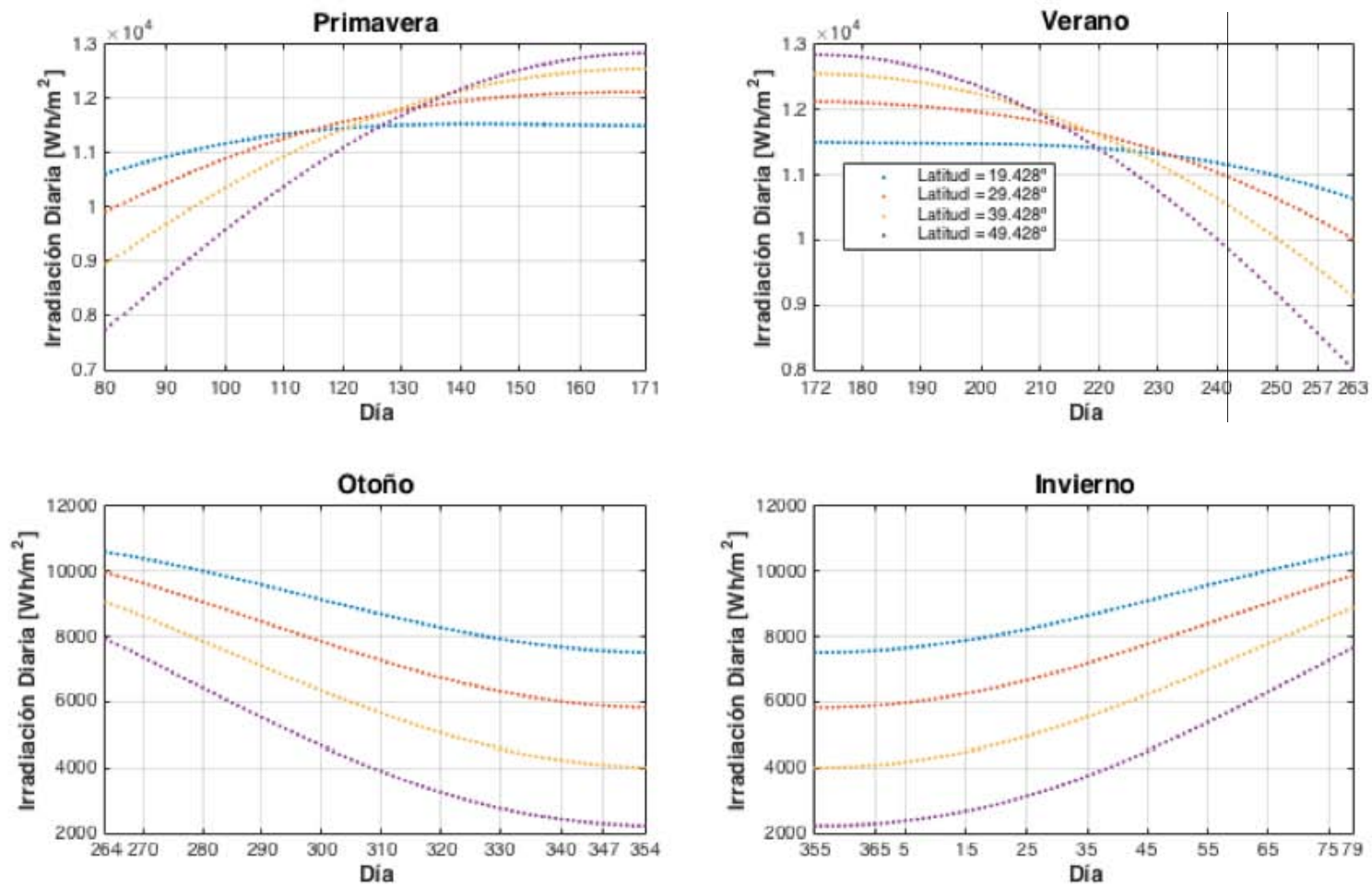


Figura 3.9: Irradiación diaria.

Irradiación mensual

Mes	Latitud			
	19.428°	29.428°	39.428°	49.428°
Enero	62.25 %	49.61 %	35.91 %	21.79 %
Febrero	64.55 %	55.23 %	44.43 %	32.42 %
Marzo	81.50 %	75.26 %	66.98 %	56.84 %
Abril	85.26 %	83.96 %	80.72 %	75.75 %
Mayo	90.19 %	92.93 %	93.93 %	93.56 %
Junio	90.11 %	94.81 %	97.94 %	100 %
Julio	89.86 %	93.75 %	96.00 %	97.06 %
Agosto	88.65 %	89.21 %	87.86 %	84.92 %
Septiembre	81.39 %	77.44 %	71.50 %	63.75 %
Octubre	75.30 %	66.64 %	56.15 %	44.02 %
Noviembre	63.00 %	51.52 %	38.80 %	25.32 %
Diciembre	59.37 %	46.22 %	32.23 %	18.16 %

Tabla 3.10: Porcentajes mensuales. Eje horiz. orientado N-S.

En el caso de la superficie sobre un esquema de eje horizontal orientado norte-sur y de acuerdo con la figura 3.10, fue en el mes de junio que se acumuló más energía en todas las latitudes de interés. Asimismo, el crecimiento es gradual desde enero hasta junio y de ahí, hay un decrecimiento gradual hasta alcanzar el mínimo en diciembre.

La irradiación mensual máxima que se estimó en la superficie sobre un eje horizontal orientado norte-sur, correspondió al mes de junio en la latitud 49.428° y la menor alcanzó el 18.16 % en el mes de diciembre en la latitud 49.428°.

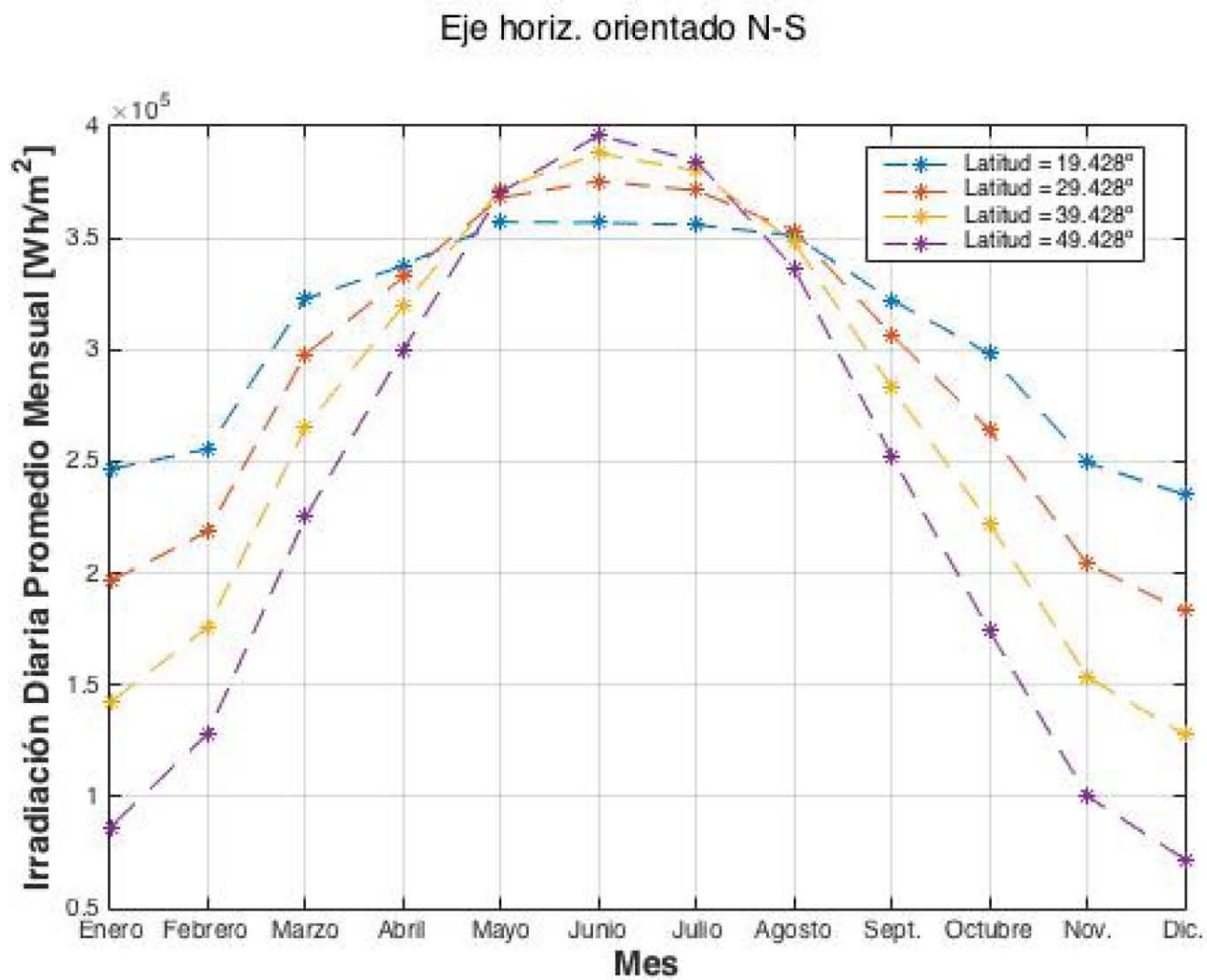


Figura 3.10: Irradiación diaria promedio mensual.

3.2.4. Eje Polar

Irradiación diaria

Latitud	Valor	Día Juliano	Fecha	Irradiación [Wh/m^2] - %
19.428°	Máximo	108	18-abril	11220.15 - 100 %
	Mínimo	356	22-diciembre	8583.51 - 76.5 %
29.428°	Máximo	134	14-mayo	11464.0 - 100 %
	Mínimo	356	22-diciembre	7393.9 - 64.4 %
39.428°	Máximo	167	16-junio	11928.0 - 100 %
	Mínimo	356	22-diciembre	5901.3 - 50.7 %
49.428°	Máximo	169	18-junio	12502.0 - 100 %
	Mínimo	356	22-diciembre	4013.1 - 32.0 %

Tabla 3.11: Eje Polar.

En este caso, de acuerdo con la tabla 3.11, se observa que conforme la latitud crece, el valor máximo respectivo aumentó y el valor mínimo respectivo decreció. Sin embargo, la diferencia entre el máximo de la latitud 19.428° y el máximo de la latitud 49.428° corresponde a 1281.85 Wh/m^2 , esto quiere decir que hubo una ganancia muy pequeña al aumentar la latitud. Por otro lado, la diferencia entre los mínimos respectivos de las latitudes 19.428° y 49.428° es de 4570.41 Wh/m^2 . Lo anterior indica que en la latitud 19.428° se acumuló más energía respecto a las latitudes restantes. En la figura 3.11 se muestran el valor de irradiación estimado para cada día del año en cada una de las latitudes.

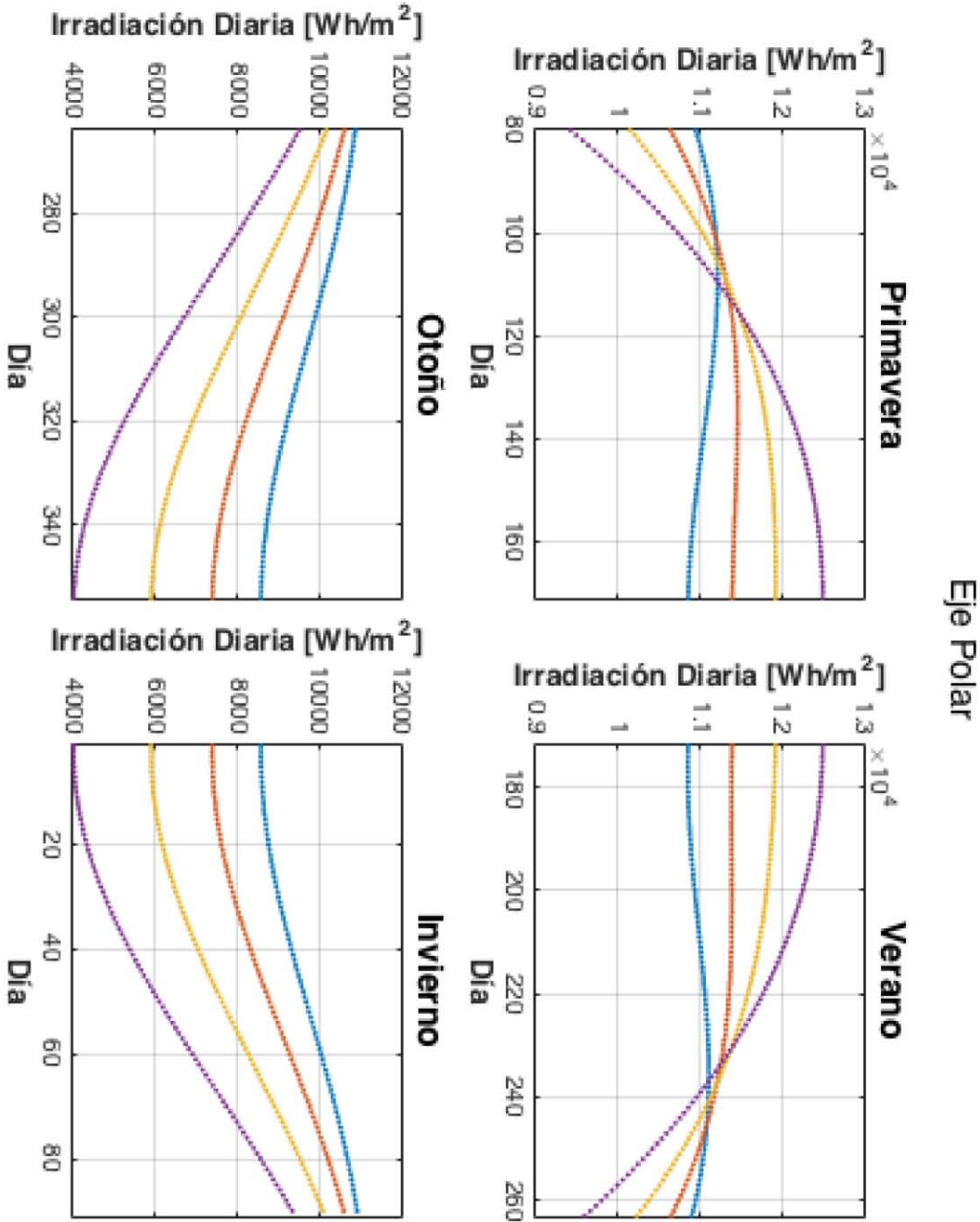


Figura 3.11: Irradiación diaria.

Irradiación mensual

Mes	Latitud			
	19.428°	29.428°	39.428°	49.428°
Enero	71.88 %	63.08 %	51.92 %	37.63 %
Febrero	71.85 %	66.01 %	58.31 %	48.07 %
Marzo	86.73 %	83.64 %	79.00 %	72.32 %
Abril	86.85 %	87.25 %	86.76 %	85.25 %
Mayo	88.79 %	91.82 %	94.47 %	96.97 %
Junio	87.27 %	91.46 %	95.55 %	100 %
Julio	87.60 %	91.32 %	94.82 %	98.46 %
Agosto	88.87 %	90.52 %	91.50 %	91.84 %
Septiembre	84.92 %	83.47 %	80.80 %	76.56 %
Octubre	82.23 %	77.19 %	70.30 %	60.92 %
Noviembre	71.83 %	64.09 %	54.17 %	41.32 %
Diciembre	69.32 %	59.91 %	48.10 %	33.11 %

Tabla 3.12: Porcentajes mensuales. Eje Polar.

La irradiación mensual máxima que se estimó en la superficie sobre un eje polar corresponde al mes de junio en la latitud 49.428° y la menor alcanzó el 33.11 % en el mes de enero en la latitud 49.428°. En el mes de junio de todas las latitudes se localizan los máximos de radiación incidente.

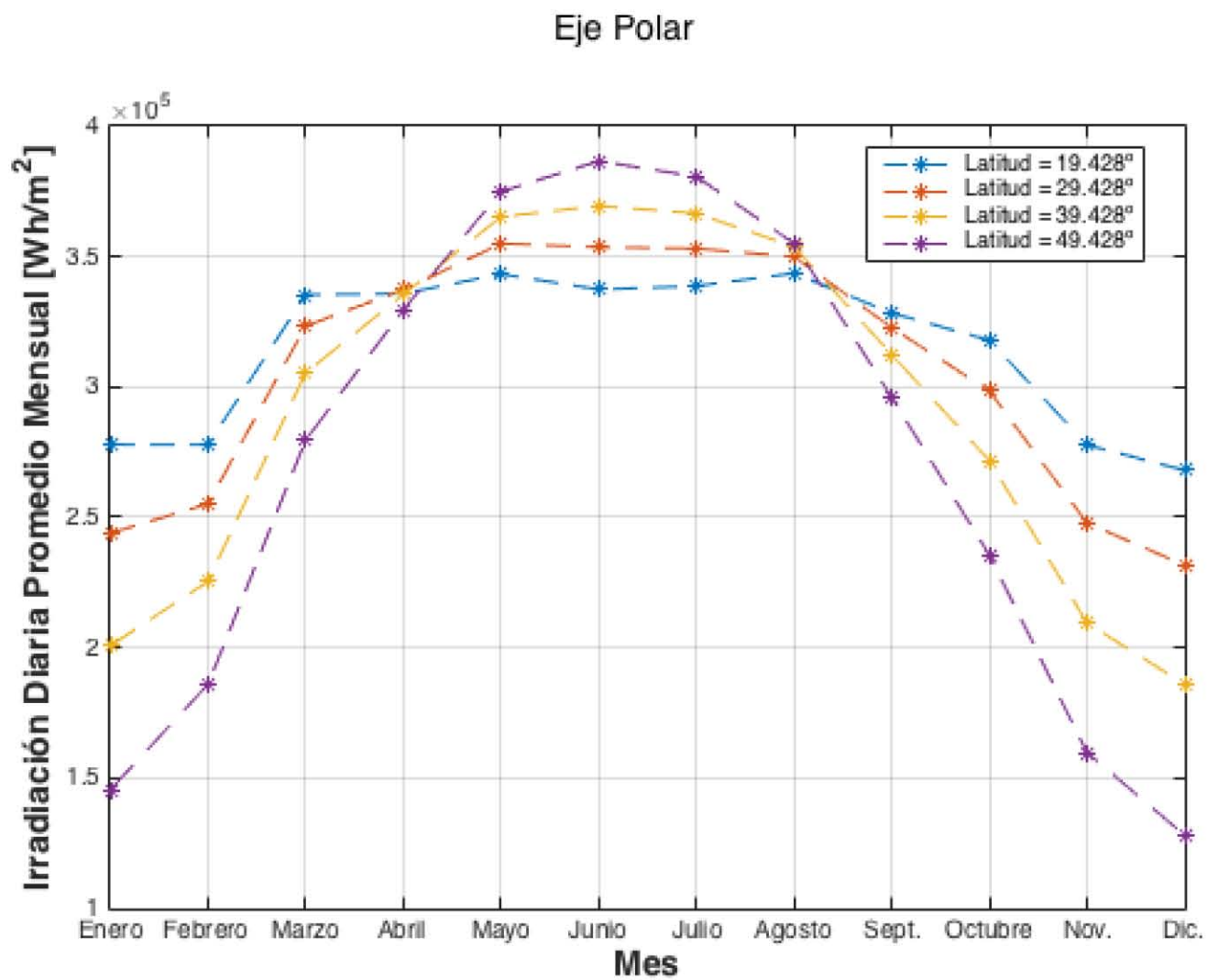


Figura 3.12: Irradiación diaria promedio mensual.

3.2.5. Dos Ejes

Irradiación diaria

Latitud	Valor	Día Juliano	Fecha	Irradiación [Wh/m^2] - %
19.428°	Máximo	167	16-junio	11707.0 - 100 %
	Mínimo	355	21-diciembre	9261.9 - 79.1 %
29.428°	Máximo	168	17-junio	12269.0 - 100 %
	Mínimo	356	22-diciembre	7966.2 - 64.9 %
39.428°	Máximo	170	19-junio	12830.0 - 100 %
	Mínimo	356	22-diciembre	6344.3 - 49.4 %
49.428°	Máximo	171	20-junio	13457.0 - 100 %
	Mínimo	356	22-diciembre	4302.8 - 31.9 %

Tabla 3.13: Dos Ejes.

La tabla 3.13 indica, al igual que en cada uno de los esquemas anteriores, que el valor mínimo de irradiación diaria decrece al aumentar la latitud, aunque el valor máximo aumenta. En este caso la diferencia entre los máximos de la latitud más cercana y más alejada del ecuador es de $1750 Wh/m^2$, mientras que la diferencia entre los mínimos respectivos a dichas latitudes es de $4959.1 Wh/m^2$. La figura 3.13 muestra para este caso, la irradiación que se obtuvo durante cada día del año en las cuatro latitudes de interés.

Seguimiento Dos Ejes

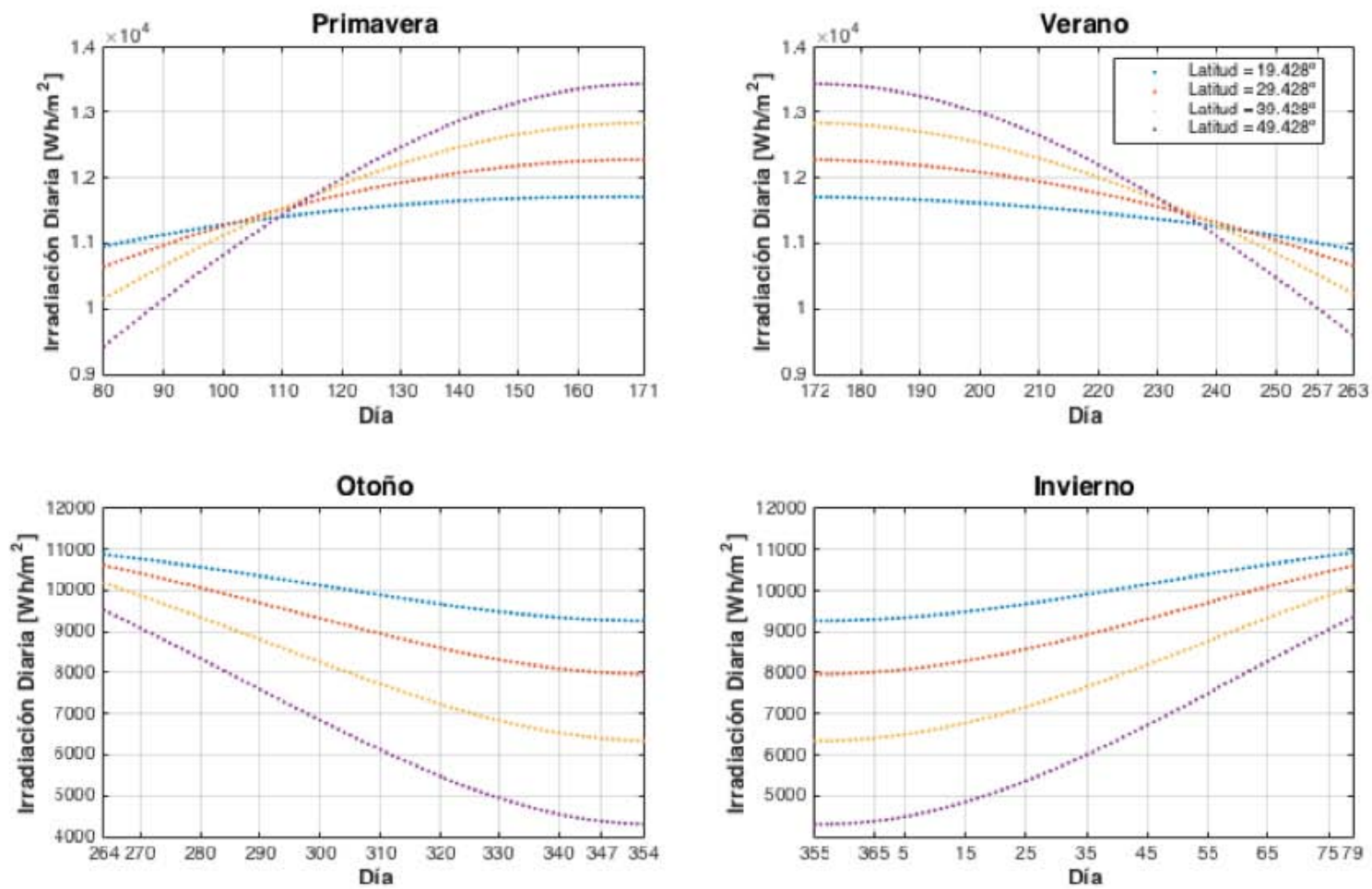


Figura 3.13: Irradiación diaria.

Irradiación mensual

Mes	Latitud			
	19.428°	29.428°	39.428°	49.428°
Enero	71.13 %	62.32 %	51.20 %	37.01 %
Febrero	68.59 %	62.97 %	55.56 %	45.73 %
Marzo	80.98 %	78.09 %	73.75 %	67.49 %
Abril	81.97 %	82.33 %	81.89 %	80.51 %
Mayo	86.74 %	89.63 %	92.21 %	94.71 %
Junio	87.37 %	91.48 %	95.52 %	100 %
Julio	86.78 %	90.38 %	93.81 %	97.46 %
Agosto	85.00 %	86.54 %	87.49 %	87.88 %
Septiembre	79.32 %	77.96 %	75.47 %	71.53 %
Octubre	77.50 %	72.72 %	66.18 %	57.29 %
Noviembre	70.10 %	62.47 %	52.71 %	40.11 %
Diciembre	69.48 %	59.95 %	48.03 %	32.98 %

Tabla 3.14: Porcentajes mensuales. Dos Ejes.

La irradiación mensual máxima que se estimó en el seguimiento de Dos Ejes corresponde al mes de junio en la latitud 49.428° y la menor alcanzó el 32.98 % en el mes de diciembre en la latitud 49.428°. Aquí se puede ver que en el mes de junio, la cantidad de radiación va creciendo conforme la latitud incrementa alcanzando el 100 % en la latitud que está más al norte. De hecho, este mismo comportamiento ocurre en los meses de mayo, junio, julio y agosto. Mientras que en los meses restantes, la cantidad de radiación que alcanza la superficie decrece conforme la latitud aumenta.

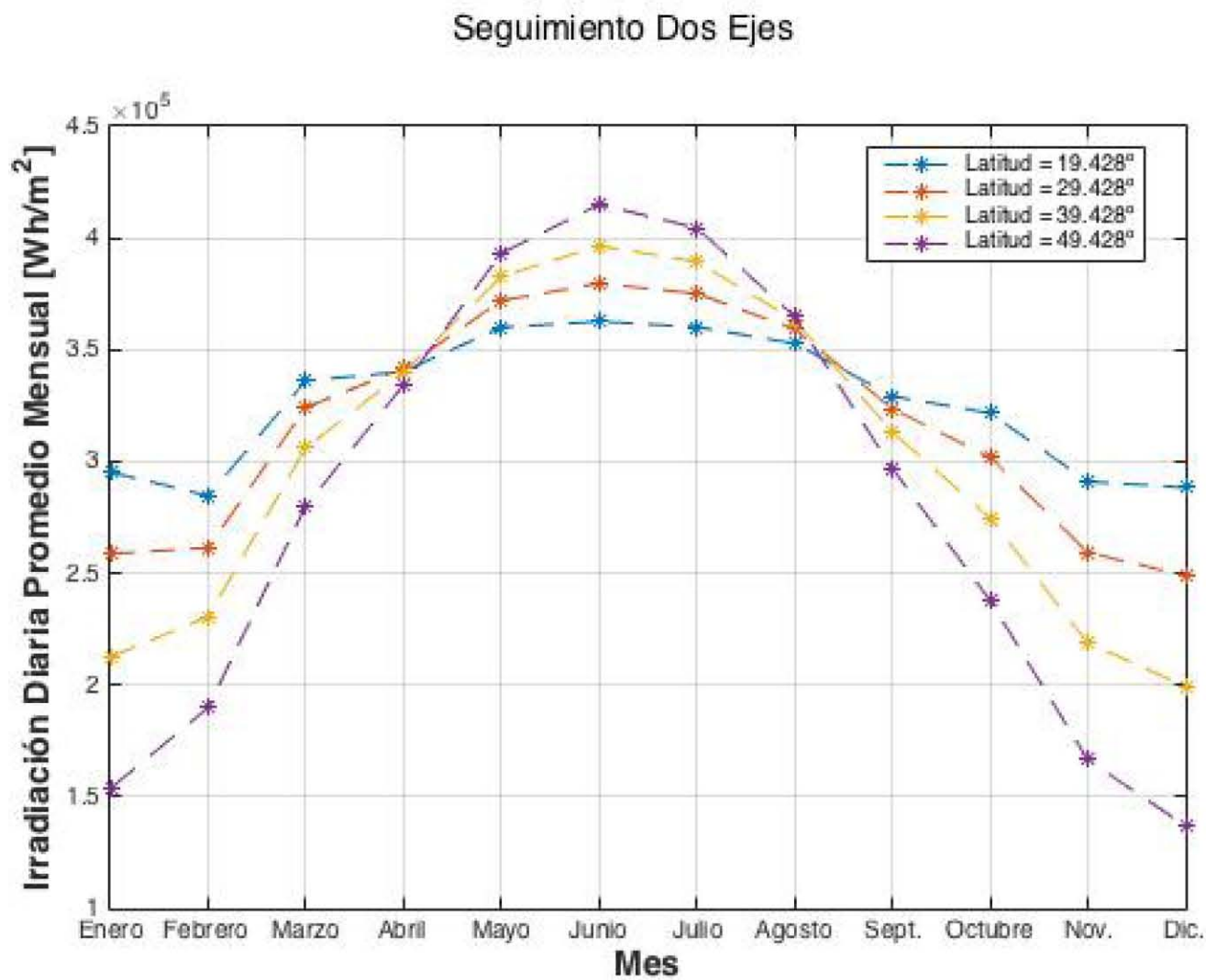


Figura 3.14: Irradiación diaria promedio mensual.

Comparación de los casos

La tabla 3.15 resume los resultados, en porcentajes, de irradiación diaria máxima y mínima de todos los esquemas analizados. Compara cada valor obtenido con el máximo estimado, que a su vez corresponde al seguimiento de Dos Ejes en el día 20 de junio en la latitud 49.428° . A partir de este dato, tomado como el 100 %, se calculó el porcentaje de los valores máximos y mínimos de la radiación diaria de todos los seguimientos en todas las latitudes. El valor más pequeño que se estimó pertenece a la superficie horizontal el día 22 de diciembre, también en la latitud 49.428° .

Como era de esperarse, el seguimiento de Dos Ejes tiene el día con el valor más alto de energía incidente mientras que la superficie horizontal tiene el valor mínimo. Ambos valores se estimaron en la latitud 49.428° . Asimismo, también se esperaba que la superficie horizontal alcanzara la mínima irradiación en la latitud más alejada del ecuador.

Por otro lado, para el seguimiento de Dos Ejes, a pesar de que el 100 % se encuentra en la latitud más alejada, se puede apreciar, también, que los valores mínimos decrecen al alejarnos del ecuador. Esto es, todos los valores de irradiación diaria se encuentran por arriba del 68.83 %, en el caso de la latitud 19.428° . Mientras que en la latitud 49.428° los valores diarios pueden caer hasta el 31.97 %. Al final, en la suma de irradiación diaria total, es en la latitud 19.428° donde se estimó más energía como se podrá ver más adelante en el análisis de irradiación anual (tabla 3.18).

	Latitud							
	19.428°		29.428°		39.428°		49.428°	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Horizontal	65.06 %	40.73 %	67.76 %	30.30 %	68.62 %	19.68 %	67.74 %	09.89 %
Inclinado	66.33 %	51.24 %	61.05 %	45.54 %	60.07 %	37.62 %	58.71 %	26.65 %
Horiz. E-O	68.31 %	57.93 %	70.43 %	50.90 %	72.44 %	41.56 %	74.70 %	29.09 %
Eje vertical	76.83 %	55.41 %	83.93 %	49.99 %	90.21 %	41.34 %	96.18 %	28.89 %
Horiz. N-S	85.75 %	55.81 %	90.13 %	43.23 %	93.30 %	29.89 %	95.50 %	16.55 %
Eje polar	83.37 %	63.78 %	85.19 %	54.94 %	88.64 %	43.85 %	92.90 %	29.82 %
Dos ejes	87.00 %	68.83 %	91.17 %	59.20 %	95.34 %	47.14 %	100.0 %	31.97 %

Tabla 3.15: Porcentajes de irradiación diaria máxima y mínima para cada latitud.

3.3. Seguimientos escalonados

A continuación se muestra en porcentaje la irradiación anual que incidió en el movimiento continuo (1 minuto) y en el movimiento escalonado para cada intervalo de tiempo y para cada latitud de los esquemas de Eje Vertical y Eje Polar.

Se tomó como el 100 % los valores del seguimiento continuo, puesto que en este trabajo es la cantidad máxima de energía que se estimó.

- Eje Vertical escalonado

Latitud	1 min.	10 min.	30 min.	60 min.	120 min.
19.428°	100 %	99.4162 %	99.3510 %	99.1436 %	98.3020 %
29.428°	100 %	99.9883 %	99.8921 %	99.5627 %	98.2393 %
39.428°	100 %	99.9852 %	99.8580 %	99.4233 %	97.6905 %
49.428°	100 %	99.9813 %	99.8261 %	99.2922 %	97.1068 %

Tabla 3.16: Porcentajes de irradiación anual por escalón. Eje vertical escalonado.

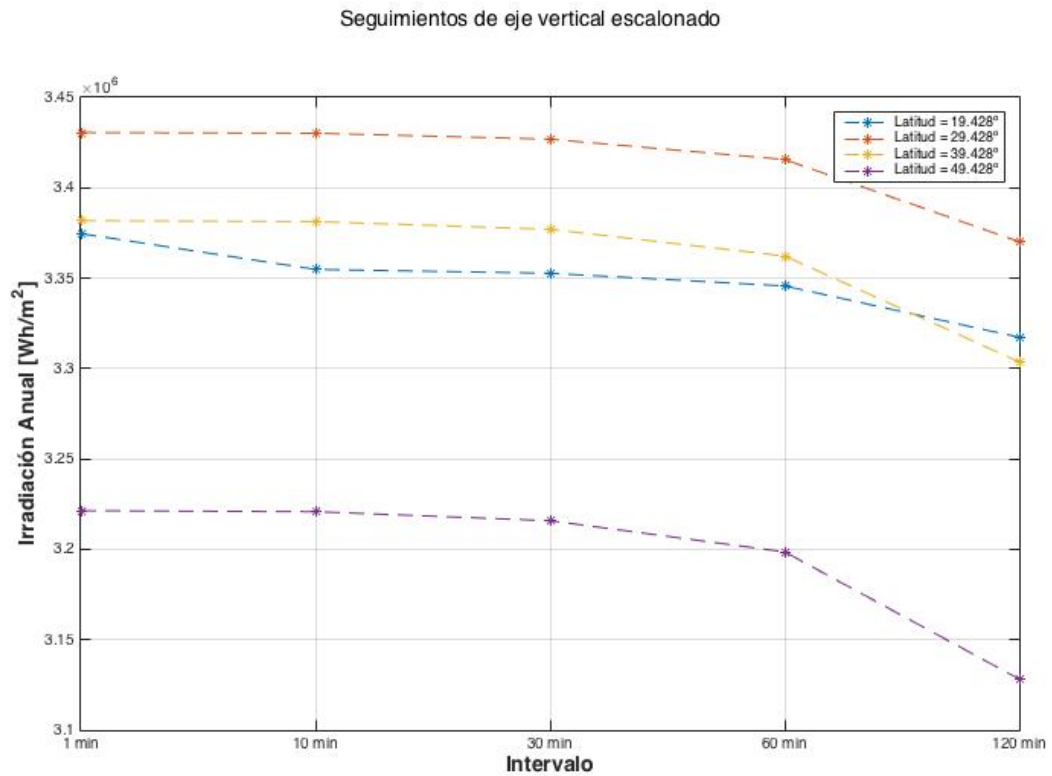


Figura 3.15: Irradiación anual del eje vertical escalonado.

- Eje Polar escalonado

Latitud	1 min.	10 min.	30 min.	60 min.	120 min.
19.428°	100 %	99.9763 %	99.7634 %	99.0355 %	96.1315 %
29.428°	100 %	99.9754 %	99.7623 %	99.0330 %	96.1130 %
39.428°	100 %	99.9770 %	99.7621 %	99.0287 %	96.0833 %
49.428°	100 %	99.9753 %	99.7596 %	99.0200 %	95.9971 %

Tabla 3.17: Porcentajes de irradiación anual por escalón. Eje polar escalonado.

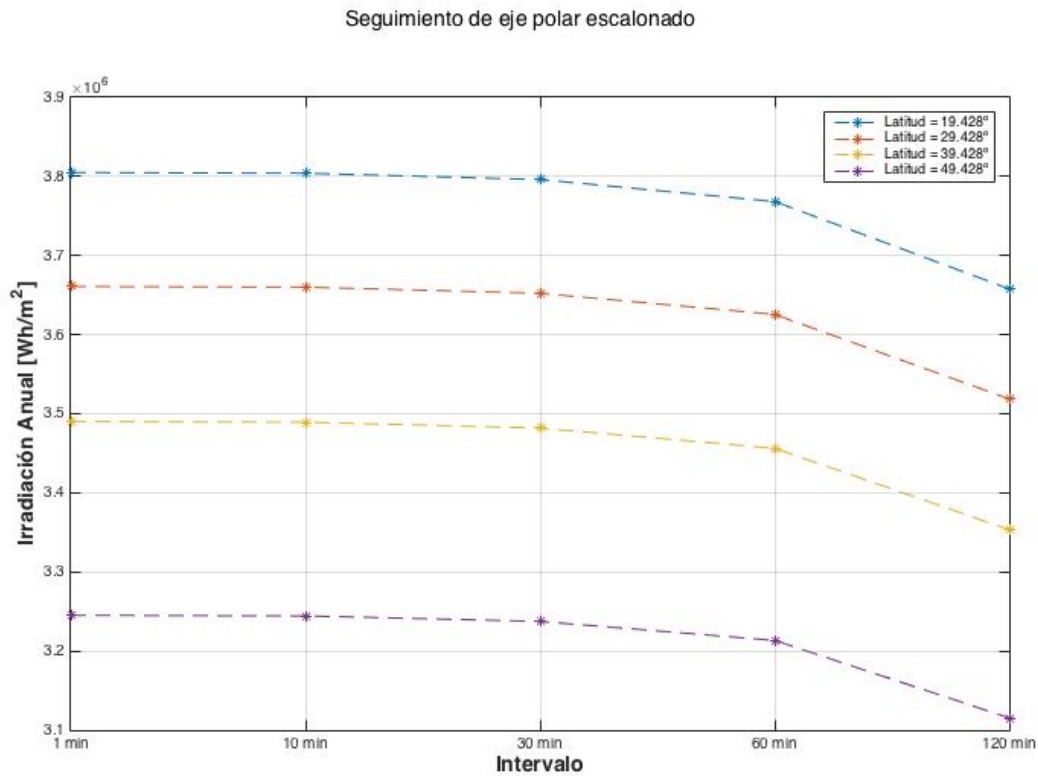


Figura 3.16: Irradiación anual del eje polar escalonado.

De acuerdo a las tablas 3.16 y 3.17, tanto para el seguimiento escalonado de eje vertical como para el seguimiento escalonado de eje polar:

1. En todas las latitudes ocurrió que la diferencia, respecto al valor continuo, crece al aumentar el intervalo de tiempo; es decir, en el intervalo de 120 minutos se notó el valor de menor incidencia de irradiación anual.
2. La diferencia entre los valores de irradiación del movimiento escalonado respecto al movimiento continuo (1 minuto) es menor al 1 % en los intervalos de 10, 30 y 60 minutos. Es decir, los valores de irradiación correspondientes a estos escalones están, todos, por arriba del 99 %.
3. En el caso del seguimiento de eje vertical, la irradiación más baja que se registró alcanzó un 97.10 %. Y en el caso del seguimiento de eje polar, la irradiación más pequeña, alcanzó el 95.99 % del total. Ambos valores corresponden a la latitud 49.428° en el escalón de 120 minutos, consistentemente con la observación 1.

Los resultados anteriores se interpretan de la siguiente manera: en cualquier latitud es posible escalar el movimiento de estas dos superficies en un intervalo de 1 a 120 minutos sin perder una cantidad considerable de energía. Lo anterior serviría para reducir costos en la instalación y/o mantenimiento de los sistemas de captación o concentración. Lo anterior debido a que a un seguimiento que se mueve por escalones de tiempo puede resultar más barato y aún, a pesar de ello, brindar una producción bastante cercana a un seguimiento continuo.

3.4. Irradiación anual

	Latitud			
Seguimiento	19.428°	29.428°	39.428°	49.428°
Horizontal	70.01 %	64.53 %	57.20 %	48.54 %
Inclinado	74.44 %	70.15 %	66.21 %	60.28 %
Horiz. E-O	78.32 %	75.89 %	72.08 %	66.50 %
Eje vertical	86.30 %	87.74 %	86.52 %	82.45 %
Horiz. N-S	94.04 %	88.51 %	81.02 %	72.05 %
Eje polar	96.43 %	93.62 %	89.28 %	83.05 %
Dos ejes	100 %	97.02 %	92.46 %	86.00 %

Tabla 3.18: Porcentajes de irradiación anual de todos los esquemas considerados.

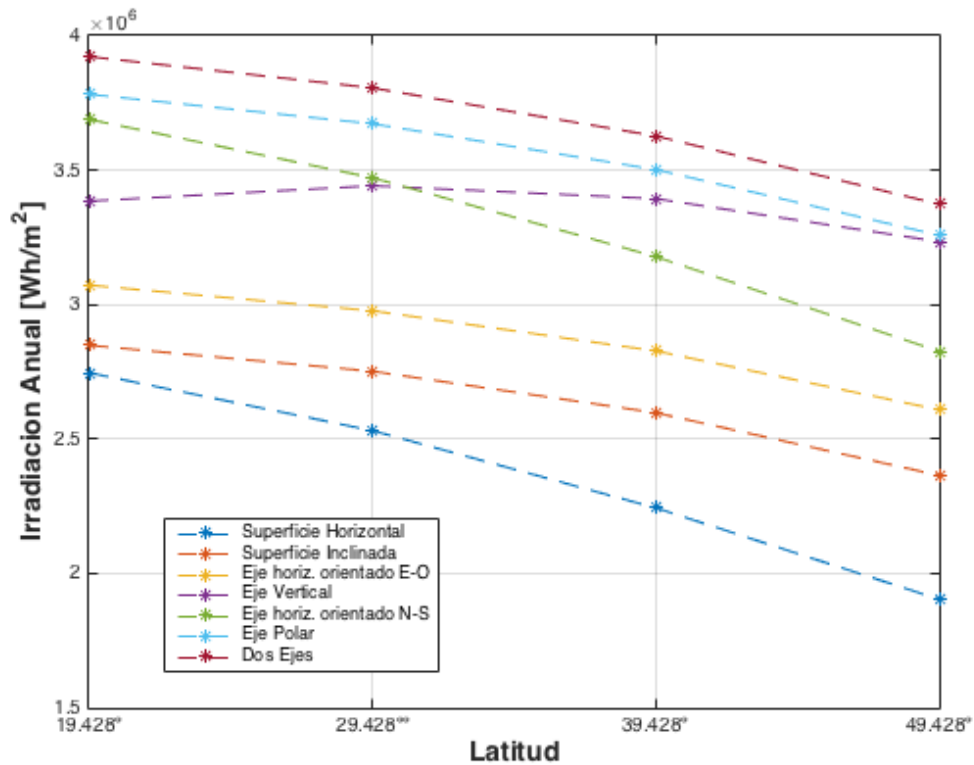


Figura 3.17: Irradiación anual.

La tabla 3.18 muestra, en porcentaje, el valor obtenido de la irradiación anual correspondiente a cada uno de los siete casos analizados en cada una de las cuatro latitudes. El 100 % se tomó como el valor más grande de irradiación estimado en este trabajo y corresponde al seguimiento de Dos Ejes en la latitud 19.428° .

Es importante notar que todos los esquemas de seguimiento solar, en todas las latitudes, alcanzan un porcentaje mayor al 50 % del valor máximo estimado. En el caso de la superficie horizontal esto no sucede pues en la latitud 49.428° se tiene un porcentaje de 48.54 %, mientras que en las restantes latitudes (más cercanas al ecuador) los valores sí superan el 50 %.

Se puede ver, además, que todos los esquemas reciben mayor radiación anual en latitudes cercanas al ecuador respecto a aquellas latitudes que están más alejadas. Se observó; sin embargo, que el seguimiento de eje vertical muestra el valor máximo de irradiación en la latitud 29.428° , seguido por el valor de la latitud 39.428° , posteriormente el valor de la latitud 19.428° y finalmente, la irradiación anual más pequeña se estimó en la latitud 49.428° .

Asimismo, es claro que el mejor seguimiento del Sol es el de Dos Ejes en virtud de que la superficie siempre está orientada ortogonalmente a los rayos solares incidentes. El seguimiento que menos radiación anual recibió fue la superficie horizontal respecto a las correspondientes latitudes de los demás esquemas analizados.

Capítulo 4

Conclusiones

Al comparar los casos de seguimiento solar contra los casos de superficies que permanecen fijas se llegó a la conclusión de que:

- Llega más cantidad de radiación anual a las superficies que cumplen con algún esquema de seguimiento del Sol respecto a las superficies que no se mueven.
- La superficie a la que menos energía solar incide anualmente es la superficie horizontal. La irradiación anual estimada de este caso se encuentra casi 30 % por debajo del máximo valor calculado correspondiente al seguimiento de Dos Ejes en la latitud más favorable (19.428°).

Al comparar entre los casos de superficie horizontal que permanece fija (esquema 1) y superficie inclinada con la latitud que también permanece fija (esquema 2), concluimos que la cantidad de radiación mensual que llega al esquema 2 no siempre es mayor que la cantidad de radiación que alcanza el esquema 1, pues dependiendo de la latitud el esquema 1 registra valores más altos en diferentes meses:

- Latitud 19.428°
Irradiación_mensual Esquema 1 > Irradiación_mensual Esquema 2: abril, mayo, julio y agosto.
- Latitud 29.428°
Irradiación_mensual Esquema 1 > Irradiación_mensual Esquema 2: mayo, junio, julio y agosto.
- Latitud 39.428°
Irradiación_mensual Esquema 1 > Irradiación_mensual Esquema 2: mayo, junio, julio y agosto.

- Latitud 49.428°
Irradiación mensual Esquema 1 > Irradiación mensual Esquema 2: mayo, junio, julio.

Finalmente, también se concluye que:

- El valor de irradiación mensual más alto se estimó para el mes de junio en la mayoría de los esquemas considerados en la latitud 49.428° . Las excepciones ocurrieron en el esquema de superficie horizontal, donde ocurrió que el máximo valor se registró en la latitud 39.428° . Otra excepción ocurre en el esquema de superficie inclinada con la latitud pues en este caso el valor más alto fue durante el mes de marzo en la latitud 19.428° .
- Se encontró asimismo que el mejor seguimiento para captar energía solar es el seguimiento de Dos Ejes, como se esperaba, puesto que el ángulo de incidencia es cero.
- El seguimiento de Eje Vertical escalonado (esquema 8) capta más energía respecto al seguimiento Eje Polar escalonado (esquema 9) durante todos los escalones de tiempo.
- Todos los esquemas analizados captan más energía entre más cerca se encuentren del ecuador, a excepción del seguimiento de eje vertical, cuyo valor de irradiación anual es máximo en la latitud 39.428° .
- Como era de esperarse, se acumula más energía, en cualquier superficie orientada arbitrariamente, durante la primavera y el verano.

Apéndice A

Gráficas de irradiancia global

En las gráficas de Irradiancia Global se muestra la irradiancia que incide en la superficie en cada minuto de luz efectiva durante todo el año, en las 4 diferentes latitudes. Las gráficas fueron obtenidas del código de MATLAB que se implementó para el desarrollo de esta tesis.

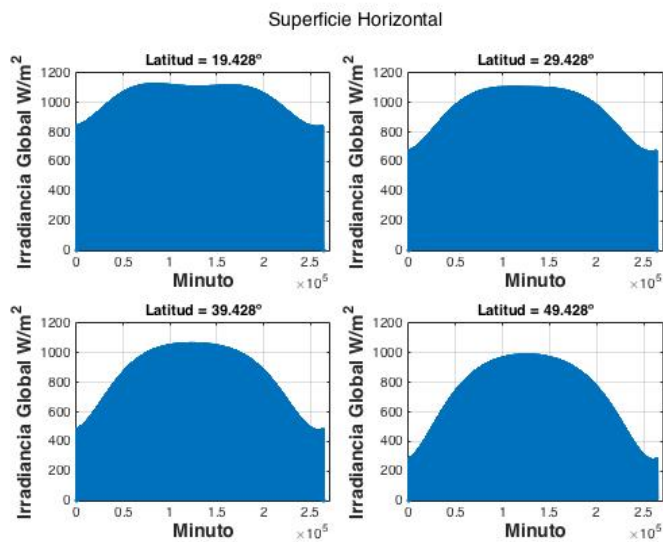


Figura A.1: Irradiancia global.

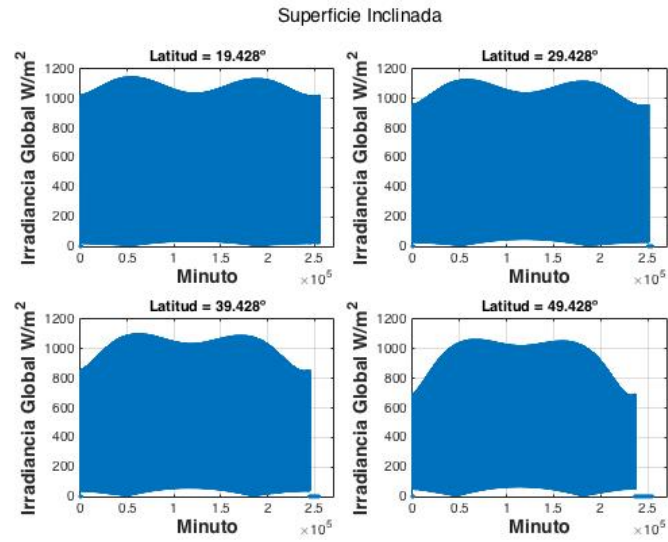


Figura A.2: Irradiancia global.

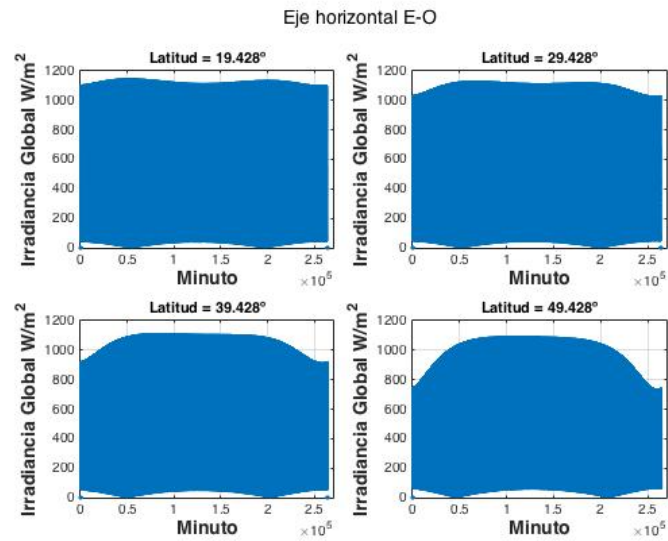


Figura A.3: Irradiancia global.

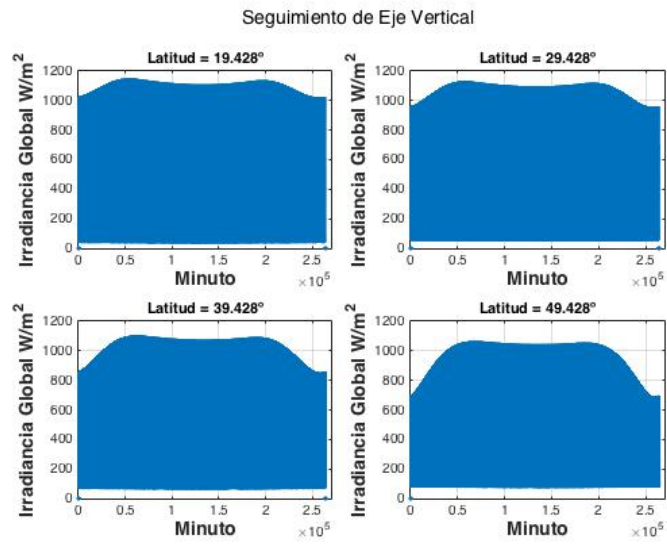


Figura A.4: Irradiancia global.

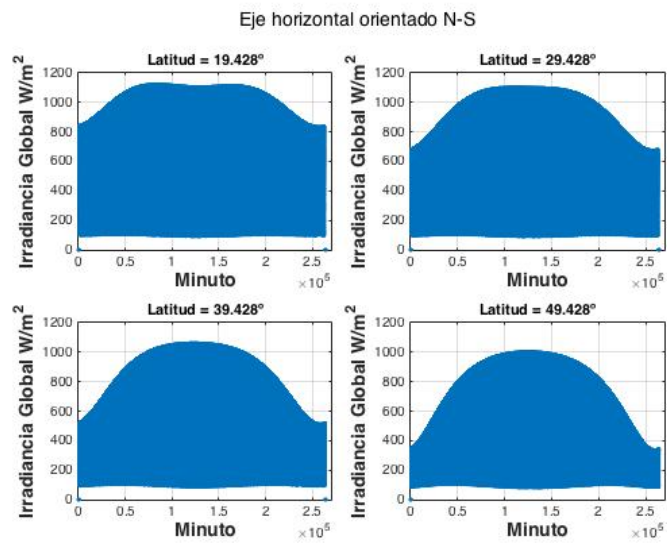


Figura A.5: Irradiancia global.

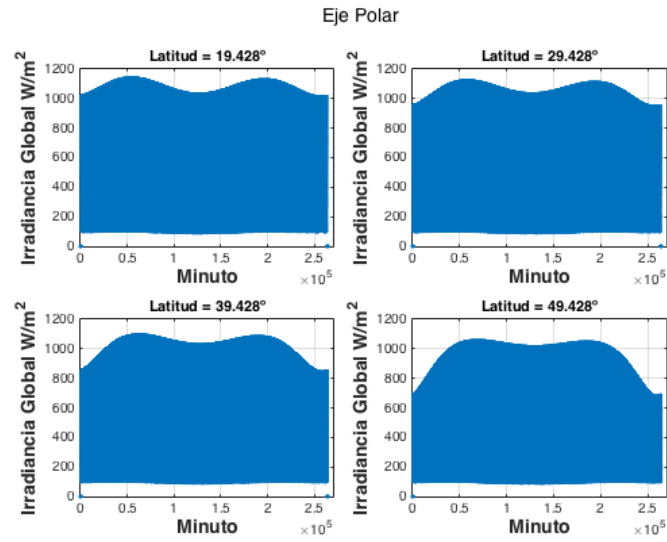


Figura A.6: Irradiancia global.

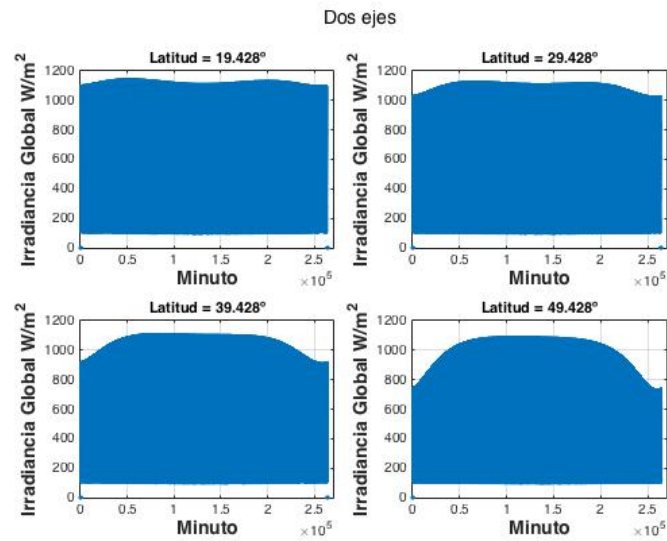


Figura A.7: Irradiancia global.

Apéndice B

Tablas de radiación incidente

Irradiación incidente mensual por latitud

	Irradiación [Wh/m ²]					
Seguimiento	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Horizontal	180110	187550	238630	252350	269860	271260
Inclinado	221600	216800	254460	247640	258770	275930
Horiz. E-O	245000	226700	255680	256210	277420	284280
Eje vertical	241210	241090	293500	300730	318080	320310
Horiz. N-S	246550	255640	322780	337680	357180	356890
Eje polar	277960	277840	335360	335820	343320	337430
Dos ejes	295230	284720	336140	340240	360020	362660

Tabla B.1: Latitud = 19.428°

	Irradiación [Wh/m ²]					
Seguimiento	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Horizontal	269820	263650	239350	219410	182520	171600
Inclinado	268030	250770	246020	245220	219820	215040
Horiz. E-O	280310	267840	247780	250700	238110	242130
Eje vertical	318150	311960	289710	276520	240900	232810
Horiz. N-S	355870	351090	322340	298220	249530	235130
Eje polar	338740	343650	328380	317970	277760	268050
Dos ejes	360210	352820	329230	321680	290980	288380

Tabla B.2: Latitud = 19.428°

Seguimiento	Irradiación [Wh/m ²]					
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Horizontal	138180	155400	214860	243880	274210	282050
Inclinado	200010	203040	246720	245890	249130	243580
Horiz. E-O	219090	211470	247840	255260	282470	292800
Eje vertical	221600	231740	296070	316020	343550	349610
Horiz. N-S	196490	218760	298050	332530	368050	375470
Eje polar	243900	255250	323400	337360	355030	353660
Dos ejes	258700	261390	324120	341740	372040	379690

Tabla B.3: Latitud = 29.428°

Seguimiento	Irradiación [Wh/m ²]					
	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Dic.
Horizontal	277950	260950	222710	188610	143990	128370
Inclinado	245060	250660	241380	233360	201150	191640
Horiz. E-O	287340	269490	243290	238110	216290	213420
Eje vertical	345860	332270	297870	271530	224970	210710
Horiz. N-S	371280	353300	306690	263940	204060	183050
Eje polar	353110	350010	322750	298460	247820	231660
Dos ejes	375150	359210	323580	301840	259320	248860

Tabla B.4: Latitud = 29.428°

Seguimiento	Irradiación [Wh/m ²]					
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Horizontal	94313	118890	183670	227150	270210	284910
Inclinado	169880	183250	234490	241190	248270	244180
Horiz. E-O	184280	190000	235470	251660	286120	300690
Eje vertical	188930	211760	288940	324140	363800	375290
Horiz. N-S	142250	175990	265290	319690	372000	387880
Eje polar	200770	225460	305490	335480	365280	369480
Dos ejes	212510	230610	306120	339910	382720	396460

Tabla B.5: Latitud = 39.428°

Seguimiento	Irradiación [Wh/m ²]					
	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Horizontal	277990	249760	198300	151770	102560	84161
Inclinado	245110	247870	233170	215870	174860	159170
Horiz. E-O	293420	269010	235300	219730	186550	175260
Eje vertical	369270	346150	297700	255710	196860	175270
Horiz. N-S	380200	347980	283190	222370	153680	127660
Eje polar	366640	353800	312430	271830	209450	185980
Dos ejes	389370	363130	313270	274700	218780	199360

Tabla B.6: Latitud = 39.428°

Seguimiento	Irradiación [Wh/m ²]					
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Horizontal	52230	80266	146390	202760	258370	280440
Inclinado	127800	155030	216080	232580	244390	242130
Horiz. E-O	137210	159930	216900	244640	288890	309430
Eje vertical	140640	179080	270760	325260	380450	399460
Horiz. N-S	86306	128410	225120	300010	370540	396020
Eje polar	145530	185900	279640	329620	374970	386650
Dos ejes	153630	189820	280150	334180	393120	415050

Tabla B.7: Latitud = 49.428°

Seguimiento	Irradiación [Wh/m ²]					
	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Dic.
Horizontal	270490	230610	167020	110850	61400	43091
Inclinado	242370	241590	220080	190520	137930	114100
Horiz. E-O	299590	266150	222530	193390	145910	124170
Eje vertical	390290	354450	288480	227080	154160	123990
Horiz. N-S	384400	336330	252480	174360	100310	71934
Eje polar	380720	355110	296040	235560	159780	128050
Dos ejes	404540	364750	296910	237790	166500	136900

Tabla B.8: Latitud = 49.428°

Irradiación incidente anual en esquemas escalonados

Irradiación [Wh/m ²]					
Latitud	1 min	10 min	30 min	60 min	120 min
19.428°	3374600	3354900	3352700	3345700	3317300
29.428°	3430600	3430200	3426900	3415600	3370200
39.428°	3381800	3381300	3377000	3362300	3303700
49.428°	3221400	3220800	3215800	3198600	3128200

Tabla B.9: Eje vertical escalonado

Irradiación [Wh/m ²]					
Latitud	1 min	10 min	30 min	60 min	120 min
19.428°	3805100	3804200	3796100	3768400	3657900
29.428°	3661000	3660100	3652300	3625600	3518700
39.428°	3490200	3489400	3481900	3456300	3353500
49.428°	3245200	3244400	3237400	3213400	3115300

Tabla B.10: Eje polar escalonado

Irradiación incidente anual de los esquemas considerados

Irradiación [Wh/m ²]				
Seguimiento	19.428°	29.428°	39.428°	49.428°
Horizontal	2746100	2531200	2243700	1903900
Inclinado	2920100	2751600	2597300	2364600
Horiz. E-O	3072200	2976800	2827500	2608700
Eje vertical	3385000	3441800	3393800	3234100
Horiz. N-S	3688900	3471700	3178200	2826200
Eje polar	3782280	3672400	3502100	3257600
Dos ejes	3922300	3805600	3626900	3373300

Tabla B.11: Irradiación anual

Apéndice C

Código en MATLAB

```
1
2% Valores locales de tiempo
3dias = (1:365);
4
5shr_i = 3;           % Hora solar inicial y final
6shr_f = 21;
7dt = 1/60;          % Paso de tiempo en hrs
8
9% Valores locales geograficos y atmosfericos
10altitud = 2240; % Metros sobre el nivel del mar
11kTL = 3.58; % Indice de turbidez de Linke
12
13% Variables para escalonar
14contadorMinutos=0;
15escalon=1;
16azCiclo=0;
17bciclo=0;
18gammaciclo=0;
19
20% Seccion de constantes
21Zh = 8434.5; % Altura de atmosfera homogenea (m)
22Io = 1367; % Constante solar
23
24for P=(1:7)
25     indiceLatitud=1;
26     indiceEstacion=1;
27     for lat = 19.428:10:49.428
28         b=lat;
29
30         if lat==0
31             lat=0.0001;
32         else
33             lat=lat;
34         end
```

```
35
36     i=1;
37     ii=0;
38     indiceMes=1;
39     indiceDias=0;
40     indiceEstacion=1;
41
42     for j = 1:length(dias)
43         dia = dias(j);
44
45         if dia <=31
46             time.month = 1;
47             time.day = dia;
48         elseif dia <= 59
49             time.month = 2;
50             time.day = dia-31;
51         elseif dia <= 90
52             time.month = 3;
53             time.day = dia-59;
54         elseif dia <= 120
55             time.month = 4;
56             time.day = dia-90;
57         elseif dia <= 151
58             time.month = 5;
59             time.day = dia-120;
60         elseif dia <= 181
61             time.month = 6;
62             time.day = dia-151;
63         elseif dia <= 212
64             time.month = 7;
65             time.day = dia-181;
66         elseif dia <= 243
67             time.month = 8;
68             time.day = dia-212;
69         elseif dia <= 273
70             time.month = 9;
71             time.day = dia-243;
72         elseif dia <= 304
73             time.month = 10;
74             time.day = dia-273;
75         elseif dia <= 334
76             time.month = 11;
77             time.day = dia-304;
78         else
79             time.month = 12;
80             time.day = dia-334;
81         end
82
83         factor_correc = 1 + 0.033*cos((2*pi*dia)/365.25); % Factor de
            correccion debido a la variacion de la distancia Tierra-Sol
```

```

84
85     for hrs = hr_i:dt:hr_f
86
87         [dec, ze, az,w] = PosSolar(lat, dia, hrs);
88         [gamma,b,gammaP] = PosPlaca (lat, dia, hrs, contadorMinutos,
89             azCiclo, bciclo, gammaciclo);
90
91         if dec<0
92             we = min(acosd(-tand(lat-b)*tand(dec)),acosd(-tand(lat)*
93                 tand(dec))); % Angulo horario al amanecer ie. ze=90
94                 grados
95         else
96             we = acosd(-tand(lat)*tand(dec));
97         end
98
99         sunrise = 12 - we/15; % Amanecer
100        day_length = 2*we/15;
101
102        sunrise_hr_aux = floor(sunrise);
103        sunrise_minutos_aux = floor( (sunrise-sunrise_hr_aux)*60 );
104        SMin_tot_aux = sunrise*60;
105        sunrise_seg_aux = round( (SMin_tot_aux - floor(SMin_tot_aux))
106            *60 );
107
108        if P == 1 % Placa horizontal, el angulo de incidencia es
109            igual al angulo cenital
110            b = 0;
111            gamma = 0;
112            zo=ze;
113
114        elseif P == 2 % Placa con inclinacion fija igual a la latitud
115            b=lat;
116            gamma = 0;
117            zo=acosd(cosd(dec)*cosd(w));
118
119        elseif P == 3 % Placa que rota sobre un eje horizontal
120            orientado E-O y movimiento N-S
121            b = atand( tand(ze)*abs(cosd(az)) );
122
123            if abs(az)<90
124                gamma=0;
125            end
126            if abs(az)>90
127                gamma=180;
128            end
129
130            zo = acosd(cosd(ze)*cosd(b) + sind(ze)*sind(b)*cosd(az-
131                gamma));
132
133        elseif P == 4 % Eje vertical

```



```

127         b=lat;
128         gamma = az;
129         zo = acosd(cosd(ze)*cosd(b) + sind(ze)*sind(b)*cosd(az-
130             gamma));
131     end
132     if P == 5 %Plano que rota sobre un eje horizontal orientado
133         norte-sur con ajuste continuo y mov E-O
134
135         if az > 0
136             gamma = 90;
137         end
138         if az < 0
139             gamma = -90;
140         end
141
142         b = atand( tand(ze)*abs(cosd(gamma-az)) );
143         zo = acosd(cosd(ze)*cosd(b) + sind(ze)*sind(b)*cosd(az-
144             gamma));
145
146     elseif P == 6 %Eje polar
147
148         zo = acosd(cosd(ze)*cosd(b) + sind(ze)*sind(b)*cosd(az-
149             gammaP));
150
151     elseif P == 7 %Dos ejes
152         b = ze;
153         zo = 0;
154     end
155
156     if (hrs == hr_i)
157         disp(sprintf('Fecha [dd/mm]: %02d/%02d_sunrise:%02d:%02d
158             :%02d_b:%02f_latitud:%d_Placa:%d', time.day, time.
159             month, sunrise_hr_aux, sunrise_minutos_aux,
160             sunrise_seg_aux, b, lat, P));
161     end
162
163     if ((hrs >= sunrise) && (hrs <= sunrise + day.length))
164
165         if zo <= 90; %Quita los valores negativos de Bc_incl.
166             Alt_Solar = 90-ze;
167
168             %Masa optica relativa del aire
169             z = altitud;
170             P_Po = exp(-z/Zh); %Correccion de la presion
171             atmosferica a una altura z
172
173             aux1 = 0.1594+1.1230*(pi/180)*Alt_Solar + 0.065656*((
174                 pi/180)*Alt_Solar)^2;

```

```

167     aux2 = 1 + 28.9344*(pi/180)*Alt_Solar + 277.3971*((pi
168         /180)*Alt_Solar)^2;
169     D_refraccion = 0.061359*(180/pi)*(aux1/aux2);
170     Alt_Solar_verdadera = Alt_Solar + D_refraccion;
171
172     m = P_Po/(sind(Alt_Solar_verdadera) + 0.50572*(
173         Alt_Solar_verdadera + 6.07995)^(-1.6364));
174
175     % Espesor optico de Rayleigh
176     if m <= 20
177         Ry = 1/(6.62960 + 1.75130*m - 0.12020*m^2 +
178             0.00650*m^3 - 0.00013*m^4);
179     else
180         Ry = 1/(10.4 + 0.718*m);
181     end
182
183     % Irradiancia directa Horizontal Bc
184     if Alt_Solar_verdadera > 0
185         Bc = Io * factor_correc * sind(Alt_Solar) * exp
186             (-0.8662*TL*m*Ry);
187     else
188         Bc = 0;
189     end
190
191     % Irradiancia Difusa horizontal Dc
192     Trd = -1.5843e-2 + 3.0543e-2 * TL + 3.797e-4 * TL^2;
193     Ao = 2.6463e-1 - 6.1581e-2 * TL + 3.1408e-3 * TL^2;
194     A1 = 2.0402 + 1.8945e-2 * TL - 1.1161e-2 * TL^2;
195     A2 = -1.3025 + 3.9231e-2 * TL + 8.5079e-3 * TL^2;
196     if Ao*Trd < .002
197         Ao = .002/Trd;
198     end
199
200     Fd = Ao + A1*sind(Alt_Solar) + A2*(sind(Alt_Solar))^2;
201     if Alt_Solar_verdadera > 0
202         Dc = Io * factor_correc * Trd * Fd;
203     else
204         Dc = 0;
205     end
206
207     hora_aux = floor(hrs);
208     minutos_aux = round((hrs-hora_aux)*60, 0);
209     segundos_aux = 0;
210
211     % Irradiancia directa normal
212     ze_aux = 90 - Alt_Solar_verdadera;
213     if Alt_Solar_verdadera > 0
214         DNI = Bc/cosd(ze);

```

```

212     else
213         DNI = 0;
214     end
215
216     % Irradiancia directa sobre la superficie inclinada
217     Bc_incl = DNI*cosd(zo);
218
219     % Irradiancia Difusa inclinada isotropica
220     Dc_incl = Dc * (0.5)*(1 + cosd(b)); % Modelo
        isotropico de Liu
221
222     A_incl = 0.2*(Bc + Dc)*0.5*(1 - cosd(b));
223
224     % Irradiancia Global
225     fecha(i) = dia + hrs/24;
226     Irrad_minuto(i) = Bc_incl + Dc_incl + A_incl;
227     Irrad_global(i) = Bc_incl + Dc_incl + A_incl;
228
229     if dia>1 && dia<=31
230         IG(P,i, indiceLatitud)=Irrad_minuto(i);
231     elseif dia>31 && dia<=59
232         IG(P,i, indiceLatitud)=Irrad_minuto(i);
233     elseif dia>59 && dia<=90
234         IG(P,i, indiceLatitud)=Irrad_minuto(i);
235     elseif dia>90 && dia<=120
236         IG(P,i, indiceLatitud)=Irrad_minuto(i);
237     elseif dia>120 && dia<=151
238         IG(P,i, indiceLatitud)=Irrad_minuto(i);
239     elseif dia>151 && dia<=181
240         IG(P,i, indiceLatitud)=Irrad_minuto(i);
241     elseif dia>181 && dia<=212
242         IG(P,i, indiceLatitud)=Irrad_minuto(i);
243     elseif dia>212 && dia<=243
244         IG(P,i, indiceLatitud)=Irrad_minuto(i);
245     elseif dia>243 && dia<=273
246         IG(P,i, indiceLatitud)=Irrad_minuto(i);
247     elseif dia>273 && dia<=304
248         IG(P,i, indiceLatitud)=Irrad_minuto(i);
249     elseif dia>304 && dia<=334
250         IG(P,i, indiceLatitud)=Irrad_minuto(i);
251     elseif dia>334 && dia<=365
252         IG(P,i, indiceLatitud)=Irrad_minuto(i);
253     end
254
255     i=i+1;
256
257     Az(i)=az;
258     AltSolar(i)=Alt_Solar;
259

```

```

260         disp( sprintf( '%02d:%02d:%02d_Irrad_Global:_%02f_W/
                m_ gamma:%02f_zo:_%02f_az:_%02f_dec:_%02f',
                hora_aux, minutos_aux, segundos_aux, Bc_incl+
                Dc_incl+A_incl, gamma, zo, az, dec) );
261
262         end
263     end
264 end
265
266     ii = ii+1;
267     DEC(indiceDias+1)=dec;
268     indiceDias=indiceDias+1;
269
270     Irradiacion_diaria(ii)=sum(Irrad_minuto)/60;
271     disp( sprintf( '_Irradiacion_diaria:_%02f_[Wh/m ]',
                Irradiacion_diaria(ii) ));
272     IrradiacionDiaria(indiceDias)=Irradiacion_diaria(ii);
273     ID(P, indiceDias, indiceLatitud)=Irradiacion_diaria(ii);
274
275     for indiceEstacion=(1:4)
276         if indiceEstacion==1
277             if indiceDias>=80 && indiceDias<=171;
278                 dias_primavera=(80:171);
279                 iii=indiceDias;
280                 IrradiacionEstacional(indiceLatitud, iii,
                indiceEstacion)=Irradiacion_diaria(ii);
281                 iii=iii+1;
282             end
283         end
284     end
285
286     if indiceEstacion==2
287         if indiceDias>=172 && indiceDias<=263
288             dias_verano=(172:263);
289             iii=indiceDias;
290             IrradiacionEstacional(indiceLatitud, iii,
                indiceEstacion)=Irradiacion_diaria(ii);
291             iii=iii+1;
292         end
293     end
294
295     if indiceEstacion==3
296         if indiceDias>=264 && indiceDias<=354
297             dias_otono=(264:354);
298             iii=indiceDias;
299             IrradiacionEstacional(indiceLatitud, iii,
                indiceEstacion)=Irradiacion_diaria(ii);
300             iii=iii+1;
301         end
302     end

```

```

303         end
304
305         if indiceEstacion==4
306             if (indiceDias >=1 && indiceDias <=79)
307                 dias_invierno1=(1:79);
308                 iii=indiceDias;
309                 IrradiacionEstacional(indiceLatitud , iii ,
310                     indiceEstacion)=Irradiacion_diaria(ii);
311                 iii=iii+1;
312             elseif (indiceDias >=355 && indiceDias <=365)
313                 dias_invierno2=(355:365);
314                 iii=indiceDias;
315                 IrradiacionEstacional(indiceLatitud , iii ,
316                     indiceEstacion)=Irradiacion_diaria(ii);
317                 iii=iii+1;
318             end
319         end
320     end
321     Irrad_minuto=0;
322
323     if dia==31
324         Irradiacion_mensual(indiceMes)=sum(Irradiacion_diaria);
325         IrradiacionDiaria(indiceDias)=Irradiacion_diaria(ii);
326         Irradiacion_diaria=0;
327         ii=0;
328         disp(sprintf('Irradiacion_mensual_enero:_%02d_[Wh/m2]\n',
329             Irradiacion_mensual(indiceMes)));
330         IM(P, indiceMes , indiceLatitud)=Irradiacion_mensual(indiceMes);
331         indiceMes=indiceMes+1;
332     elseif dia == 59
333         Irradiacion_mensual(indiceMes)=sum(Irradiacion_diaria);
334         IrradiacionDiaria(indiceDias)=Irradiacion_diaria(ii);
335         Irradiacion_diaria=0;
336         ii=0;
337         disp(sprintf('Irradiacion_mensual_febrero:_%02d_[Wh/m2]\n',
338             Irradiacion_mensual(indiceMes)));
339         IM(P, indiceMes , indiceLatitud)=Irradiacion_mensual(indiceMes);
340         indiceMes=indiceMes+1;
341     elseif dia == 90
342         Irradiacion_mensual(indiceMes)=sum(Irradiacion_diaria);
343         IrradiacionDiaria(indiceDias)=Irradiacion_diaria(ii);
344         Irradiacion_diaria=0;
345         ii=0;
346         disp(sprintf('Irradiacion_mensual_marzo:_%02d_[Wh/m2]\n',
347             Irradiacion_mensual(indiceMes)));
348         IM(P, indiceMes , indiceLatitud)=Irradiacion_mensual(indiceMes);
349         indiceMes=indiceMes+1;
350     elseif dia == 120
351         Irradiacion_mensual(indiceMes)=sum(Irradiacion_diaria);
352         IrradiacionDiaria(indiceDias)=Irradiacion_diaria(ii);

```

```
348         Irradiacion_diaria=0;
349         ii=0;
350         disp(sprintf('Irradiacion_mensual_abril:_%02d_[Wh/m2]\n',
351                    Irradiacion_mensual(indiceMes)));
352         IM(P, indiceMes, indiceLatitud)=Irradiacion_mensual(indiceMes);
353         indiceMes=indiceMes+1;
354     elseif dia == 151
355         Irradiacion_mensual(indiceMes)=sum(Irradiacion_diaria);
356         IrradiacionDiaria(indiceDias)=Irradiacion_diaria(ii);
357         ii=0;
358         disp(sprintf('Irradiacion_mensual_mayo:_%02d_[Wh/m2]\n',
359                    Irradiacion_mensual(indiceMes)));
360         IM(P, indiceMes, indiceLatitud)=Irradiacion_mensual(indiceMes);
361         indiceMes=indiceMes+1;
362     elseif dia == 181
363         Irradiacion_mensual(indiceMes)=sum(Irradiacion_diaria);
364         IrradiacionDiaria(indiceDias)=Irradiacion_diaria(ii);
365         Irradiacion_diaria=0;
366         ii=0;
367         disp(sprintf('Irradiacion_mensual_junio:_%02d_[Wh/m2]\n',
368                    Irradiacion_mensual(indiceMes)));
369         IM(P, indiceMes, indiceLatitud)=Irradiacion_mensual(indiceMes);
370         indiceMes=indiceMes+1;
371     elseif dia == 212
372         Irradiacion_mensual(indiceMes)=sum(Irradiacion_diaria);
373         IrradiacionDiaria(indiceDias)=Irradiacion_diaria(ii);
374         Irradiacion_diaria=0;
375         ii=0;
376         disp(sprintf('Irradiacion_mensual_julio:_%02d_[Wh/m2]\n',
377                    Irradiacion_mensual(indiceMes)));
378         IM(P, indiceMes, indiceLatitud)=Irradiacion_mensual(indiceMes);
379         indiceMes=indiceMes+1;
380     elseif dia == 243
381         Irradiacion_mensual(indiceMes)=sum(Irradiacion_diaria);
382         IrradiacionDiaria(indiceDias)=Irradiacion_diaria(ii);
383         Irradiacion_diaria=0;
384         ii=0;
385         disp(sprintf('Irradiacion_mensual_agosto:_%02d_[Wh/m2]\n',
386                    Irradiacion_mensual(indiceMes)));
387         IM(P, indiceMes, indiceLatitud)=Irradiacion_mensual(indiceMes);
388         indiceMes=indiceMes+1;
389     elseif dia == 273
390         Irradiacion_mensual(indiceMes)=sum(Irradiacion_diaria);
391         IrradiacionDiaria(indiceDias)=Irradiacion_diaria(ii);
392         Irradiacion_diaria=0;
393         ii=0;
394         disp(sprintf('Irradiacion_mensual_septiembre:_%02d_[Wh/m2]\n',
395                    Irradiacion_mensual(indiceMes)));
396         IM(P, indiceMes, indiceLatitud)=Irradiacion_mensual(indiceMes);
397         indiceMes=indiceMes+1;
```

```

392     elseif dia == 304
393         Irradiacion_mensual(indiceMes)=sum(Irradiacion_diaria);
394         IrradiacionDiaria(indiceDias)=Irradiacion_diaria(ii);
395         Irradiacion_diaria=0;
396         ii=0;
397         disp(sprintf('Irradiacion_mensual_octubre:_%02d_[Wh/m2]\n',
398                     Irradiacion_mensual(indiceMes)));
398         IM(P, indiceMes, indiceLatitud)=Irradiacion_mensual(indiceMes);
399         indiceMes=indiceMes+1;
400     elseif dia == 334
401         Irradiacion_mensual(indiceMes)=sum(Irradiacion_diaria);
402         IrradiacionDiaria(indiceDias)=Irradiacion_diaria(ii);
403         Irradiacion_diaria=0;
404         ii=0;
405         disp(sprintf('Irradiacion_mensual_noviembre:_%02d_[Wh/m2]\n',
406                     Irradiacion_mensual(indiceMes)));
406         IM(P, indiceMes, indiceLatitud)=Irradiacion_mensual(indiceMes);
407         indiceMes=indiceMes+1;
408     elseif dia== 365
409         Irradiacion_mensual(indiceMes)=sum(Irradiacion_diaria);
410         IrradiacionDiaria(indiceDias)=Irradiacion_diaria(ii);
411         Irradiacion_diaria=0;
412         ii=0;
413         disp(sprintf('Irradiacion_mensual_diciembre:_%02d_[Wh/m2]\n',
414                     Irradiacion_mensual(indiceMes)));
414         IM(P, indiceMes, indiceLatitud)=Irradiacion_mensual(indiceMes);
415     end
416 end
417
418
419 IrradiacionAnual(indiceLatitud)=sum(Irradiacion_mensual);
420 IA(P, indiceLatitud)=IrradiacionAnual(indiceLatitud);
421 disp(sprintf('IrradiacionAnual:_%02d_kWh/m2', IrradiacionAnual(
422     indiceLatitud)));
422 indiceLatitud=indiceLatitud+1;
423 end

```

Referencias

- [1] <https://www.iea.org/newsroom/news/2014/september/how-solar-energy-could-be-the-largest-source-of-electricity-by-mid-century.html>
- [2] Iqbal, Muhammad, *An introduction to solar radiation*, Academic Press, 1983.
- [3] John A. Duffie, William A. Beckman, *Solar Engineering of thermal processes*, John Wiley and sons, ed. 2.
- [4] <https://jmirez.wordpress.com/2011/08/>
- [5] Tomada de las notas del curso Radiación Solar impartido por David Riveros Rosas, 2013.
- [6] <http://slideplayer.es/slide/4080091/>
- [7] Christelle Rigollier, Olivier Bauer, Lucien Wald, *On the clear sky model of the ESRA - European Solar Radiation Atlas with respect to the Heliosat method*, Solar Energy, vol. 68(1), 2000.
- [8] Endre Dobos, *Albedo*, University of Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, Hungary.
- [9] J. E. Braun, J. C. Mitchell, *Solar geometry for fixed and tracking surfaces*, Solar Energy, Vol. 31, No. 5, pp. 439-444, 1983.
- [10] Kalogirou Soteris, *Solar energy engineering: processes and systems*, ed.1, 2009.
- [11] Danny H. W. Li, Tony N. T. Lam, *Determining the optimum tilt angle and orientation for solar energy collection based on measured solar radiance data*, City University of Hong Kong, 2007.
- [12] Marko Gulin, Mario Vasak, Mato Baotic, *Estimation of the global solar irradiance on tilted surfaces*, University of Zagreb.

-
- [13] Dazhi Yang, *Solar radiation on inclined surfaces: corrections and benchmarks*, Solar Energy 136(2016), pp. 288-302.
- [14] Ana Monreal, David Riveros-Rosas, Marcelino Sánchez, *Analysis of the influence of the site in the final energy cost of solar furnaces for its use in industrial applications*, Solar Energy, 2015.
- [15] Servicio SoDa: <http://www.soda-pro.com/web-services/atmosphere/turbidity-linke-2003>.
- [16] Aden B. Meinel, Marjorie P. Meinel, *Applied Solar Energy, an introduction*, Addison-Wesley, ed. 4,1976.
- [17] Pierre Ineichen, Richard Perez, *A new airmass independent formulation for the Linke turbidity coefficient*.
- [18] E.D. Mehleri, P.L. Zervas, H. Sarimveis, J.A. Palyvos, N.C. Markatos, *Determination of the optimal tilt angle and orientation for photovoltaic arrays*, Solar Energy, 35(2010), pp. 2468-2475.