



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA
MAESTRÍA EN ARQUITECTURA. CAMPO DE CONOCIMIENTO TECNOLOGÍA

IRRADIACIÓN SOLAR GLOBAL EN PLANOS VERTICALES PARA APLICACIÓN ARQUITECTÓNICA

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRA EN ARQUITECTURA

PRESENTA:
LILIANA YERALDINE MALDONADO SANCHEZ

DIRECTOR DE TESIS
DR. MAURO VALDÉS BARRÓN. INSTITUTO DE GEOFISICA

COMITÉ TUTOR
MTRO. ARTURO VALERIANO FLORES. FACULTAD DE ARQUITECTURA
MTRO. FRANCISCO REYNA GÓMEZ. FACULTAD DE ARQUITECTURA
DR. DAVID RIVERO ROSAS. INSTITUTO DE GEOFISICA
MTRO. LEONARDO ZEEVAERT ALCÁNTARA. FACULTAD DE ARQUITECTURA.

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX ENERO 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.



“IRRADIACIÓN SOLAR GLOBAL EN PLANOS VERTICALES PARA APLICACIÓN ARQUITECTÓNICA”

TESIS
QUE PARA OPTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN ARQUITECTURA
CAMPO DE CONOCIMIENTO TECNOLOGÍA

PRESENTA:
LILIANA YERALDINE MALDONADO SANCHEZ

PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA



FACULTAD DE ARQUITECTURA



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
HISTORICAS



FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES ARAGÓN

MMXVII

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Mauro Valdés Barrón

SINODALES:

Ma. Arturo Valeriano Flores.

Dr. Francisco Reyna Gómez

Dr. David Rivero Rosas

Ma. Leonardo Zeevaert Alcántara.

AGRADECIMIENTOS

Al Observatorio de Radiación Solar del Instituto de Geofísica.

Al Dr. Mauro Valdés Barrón, por su guía, apoyo y comprensión continua. Por sus críticas constructivas y el impulso para hacer bien las cosas.

Al Dr. David Rivero Rosas por su disposición en aclarar dudas e ideas.

Al Geógrafo Héctor Raúl Estévez Pérez por no darme todas las respuestas y el estímulo en el autoaprendizaje.



A la UNAM y su Posgrado de Arquitectura

Al Mtro. Arturo Valeriano Flores por su disponibilidad, apoyo y orientación en todo momento.

Al Mtro. Leonardo Zeevaert Alcántara por sus preguntas y la búsqueda de objetivos más ambiciosos.



Al Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas CIEMAT.

A Nuria Martín Chivelet y Jesús Polo Martínez por sus enseñanzas, ayuda y consejos.





Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
(CONACYT) Por el apoyo económico otorga-
do para la realización de esta investigación.

DEDICATORIAS

In memoriam

A Sofía, por tu alegría y franqueza. Por ser un ejemplo de vida.

A mi familia y amigos

Por su apoyo incondicional, paciencia y comprensión.

CONTENIDO

ESTADO DEL ARTE	11
1.1 RADIACIÓN SOLAR	12
1.2 APLICACIONES DE LA ENERGÍA SOLAR	17
1.3 CUANTIFICACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR	25
1.4 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN	26
1.5 RADIACIÓN SOLAR HORIZONTAL	27
1.6 DISPONIBILIDAD DE ENERGÍA SOLAR EN PLANOS VERTICALES PARA ARQUITECTURA.	29
1.6.1 MODELOS MATEMÁTICOS.....	31
1.6.2 ESTUDIOS RELACIONADOS CON LA MEDICIÓN Y CÁLCULO DE LA RADIACIÓN SOLAR EN PLANOS VERTICALES PARA ESPACIOS ARQUITECTÓNICOS.....	33
1.7 NORMATIVIDAD SOBRE EL USO DE LA RADIACIÓN SOLAR	36
MATERIALES Y MÉTODO	38
2.1 ETAPAS DESARROLLADAS	39
2.2 ASPECTOS BÁSICOS	40
2.3 ESTACIONES DE MEDICIÓN	43
2.4 PROCESAMIENTO DE DATOS	49
2.4.1 CONTROL DE CALIDAD DE DATOS.....	51
2.5 CARACTERIZACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR.....	55
2.6 SELECCIÓN DE MODELOS	56
2.6.1 EVALUACIÓN DE MODELOS	58
2.6.2 INDICADORES ESTADÍSTICOS	59
2.6.3 PRUEBA DE MODELOS	60
2.6.4 MODELO NUEVO	60
RESULTADOS	61
3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA RADIACIÓN GLOBAL EN SUPERFICIES VERTICALES.	62
3.1.1 IRRADIACIÓN SOLAR MEDIDA.....	62
3.1.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	70
3.2 RESULTADOS EVALUACIÓN DE MODELOS	73
3.2.1 PRUEBA DE MODELOS	73
3.2.2 DESARROLLO DE MODELO NUEVO.....	77
3.3 RESULTADO MODELO NUEVO	79
3.3.1 EVALUACIÓN MODELO NUEVO	84
APLICACIÓN ARQUITECTÓNICA.....	86
CONCLUSIONES Y PROSPECTIVA.....	98
4.1 CONCLUSIONES.....	99
4.2 CONTRIBUCIONES.....	101
4.3 TRABAJO FUTURO	101
REFERENCIAS.....	103
GLOSARIO	106
ANEXO 1 y 2.....	108
ANEXO 3.....	108
ANEXO 4.....	110

INTRODUCCIÓN

El diseño arquitectónico depende de los factores naturales del lugar de emplazamiento, el ser humano y su medio ambiente se relacionan de manera directa.

Al considerar que el arquitecto trabaja con envolventes y que gran parte de estos son planos verticales, se vuelve fundamental el conocimiento del recurso solar. Es importante recalcar el concepto de "recurso solar", pues como otros fenómenos físicos, tiene un comportamiento dependiendo de su localización geográfica. Por lo tanto, se debe conocer el recurso para posteriormente utilizarlo en un ámbito arquitectónico.

En nuestro país, lo que se conoce sobre radiación solar, se ha centrado mayormente en el estudio de la radiación solar global horizontal, altamente utilizado en la agricultura, geografía o física., varias estaciones también miden radiación directa y difusa en planos horizontales. Sin embargo, siendo de los países que recibe mayor radiación en el mundo (40% del territorio recibe 21 MJ/m²/día), no existen estaciones que midan la radiación Solar en superficies verticales, es decir, en fachadas.

Alrededor del mundo, la radiación solar global horizontal también ha sido medida en muchas estaciones meteorológicas, habiendo pocas que midan la radiación global en superficies verticales. Debido a que la mayoría de los países no cuentan con estaciones de medición vertical, investigaciones en modelos de irradiancia vertical fueron realizadas.

Diferentes modelos matemáticos han sido desarrollados para calcular la irradiancia solar en fachadas a partir de mediciones reales horizontales; desarrollados mayormente en Norteamérica y algunos países europeos. Algunos de estos modelos se encuentran dentro de programas de cómputo arquitectónicos.

Dentro de las desventajas del desconocimiento del recurso solar se encuentran los diseños arquitectónicos incorrectos, en el último cuarto de siglo muchos sistemas de aire acondicionado en edificios fueron sobredimensionados por programas de cómputo, superando los verdaderos requerimientos hasta un 30% debido a los procedimientos utilizados para las estimaciones de carga.¹

Por otro lado, los beneficios del estudio de la radiación solar en arquitectura son varios: Cuando se conoce la carga térmica real y su distribución temporal, se puede saber con mayor precisión cuál será el desempeño de determinado material o tecnología aplicada en edificios antes de su edificación, representando ahorro económico.

Una carga térmica adaptada a diferentes tipos de confort se traduce en mayores rendimientos laborales y bienestar en viviendas.

La irradiación solar y la luz natural están relacionadas, diseñar con luz natural de forma correcta, puede producir un ahorro del 20 a 40% para los edificios de oficinas que utilizan la luz natural eficazmente.²

1 Muneer, T., Gueymard, C., Kambezidis, H., & Muneer, T. (2004). *Solar radiation and daylight models*: (with software available from companion web site). Oxford: Elsevier Butterworth Heinemann.

2 Muneer, T. (1997). *Solar Radiation and Daylight Model*. Architectural Press, Great Britain.

El hombre ha utilizado la energía solar a través de tecnologías en constante evolución. A principios del siglo XIX la ingeniería ambiental trajo consigo innovaciones en el control mecánico del medio ambiente (iluminación artificial y el aire acondicionado). La gran facilidad con la que se pudo controlar mecánicamente el medio ambiente hizo que el hombre se olvidara del impacto que tiene el clima sobre sus edificaciones .

La continuidad del cambio climático, la escasez de energía y el incremento de los costos de esta última, obligan a diseñar arquitectura que no solo mantenga altos estándares comerciales y estéticos., alcanzar niveles de habitabilidad diseñando edificios con el mínimo gasto de energía se ha vuelto cada vez más prioritario.

Por lo anterior, este trabajo tiene la finalidad de incrementar el conocimiento de la radiación solar en la arquitectura de nuestro país. Analiza la climatología solar de la Ciudad de México en los diferentes flujos de energía en los que se ve rodeado una envolvente, describiendo la radiación solar alrededor de un edificio.

Se espera contribuir a la creación de edificios amigables con bajos costos de energía en su mantenimiento, volviendo a elementos fundamentales del diseño.

OBJETIVOS

Objetivo General:

Obtener valores de ganancias energéticas por Irradiación Solar global en planos verticales para ser utilizados en aplicaciones arquitectónicas de la Ciudad de México.

Específicos:

- Generar una base de datos de Irradiación Solar total en planos verticales de la Ciudad de México.
- Describir el comportamiento de la Irradiación Solar en planos verticales en la Ciudad de México.
- Analizar estadísticamente los datos de Irradiación Solar Vertical obtenidos para simplificarlos y facilitar su comprensión y aplicación.
- Analizar diferentes modelos de cálculo de Irradiación solar en planos verticales para su aplicación en proyectos arquitectónicos.

La tesis presenta el proceso del alcance de estos objetivos descritos. El 1er capítulo da información fundamental, habla de la radiación solar desde el nivel extraterrestre pasando por la atmósfera hasta llegar a la superficie terrestre. Los tres componentes de la radiación solar directa, difusa y reflejada (albedo terrestre y de materiales). Reseña brevemente las aplicaciones de la radiación solar y cómo estas tecnologías se aprovechan en el sector arquitectónico. Cómo se cuantifica la radiación solar y los instrumentos de medición más comunes. Cuánta disponibilidad de radiación solar para arquitectura existe en el mundo y en México. Se clasifican los modelos para el cálculo de radiación solar en fachadas de acuerdo en cómo tratan la radiación difusa y los principales factores considerados; qué normatividad existente en México sobre el uso de la radiación solar arquitectónico.

El capítulo 2do describe el método experimental, da consideraciones para la óptima medición del recurso solar. Se presenta la localización y disposición de las dos estaciones de medición (localizados en Ciudad Universitaria, UNAM), haciendo referencia del equipo utilizado. Se explica el control de calidad de datos. Se describe la forma en que se caracterizará la radiación solar medida y los modelos de la literatura seleccionados para probar su precisión, las fórmulas para el cálculo de los componentes solares difusa y directas son presentadas.

En el capítulo 3ro, los resultados anuales, mensuales y diarios de la irradiación se presentan con gráficas y tablas para las cuatro orientaciones cardinales en superficies verticales y horizontal. Se muestra el resultado del análisis horario de los modelos y la propuesta de un nuevo modelo adaptado a la Ciudad de México. El análisis se realiza con los indicadores estadísticos Desviación media del error (MBE) , la Raíz del Error Medio Cuadrático (RMSE) y gráficas de dispersión.

El capítulo 4to describe breves ejemplos de la utilización de datos reales en arquitectura junto con un ejemplo a detalle del cálculo manual y simulado de la generación de energía fotovoltaica en las fachadas de dos edificios de la Ciudad de México.

Las conclusiones en el capítulo 4to indican la importancia del tema tratado, teniendo comentarios sobre el control de calidad de datos, las mediciones, los modelos analizados y el modelo propuesto, finalizando con los posibles trabajos futuros.

Las aportaciones del presente trabajo, ganancias energéticas reales por radiación solar en fachadas con orientaciones norte, sur, este y oeste. Con base en ellas, análisis de la precisión de modelos de la literatura para reproducir el comportamiento de la radiación solar en fachadas. Una propuesta de modelo adaptado a la ciudad de México.

ESTADO DEL ARTE

1

1.1 RADIACIÓN SOLAR

El sol es una esfera gaseosa que produce una enorme cantidad de energía de radiación, solo una pequeña parte es interceptada por nuestro planeta. Se puede considerar como un continuo reactor de fusión convirtiendo el hidrógeno en helio a temperaturas de varios millones de grados.

La energía emitida por el sol representa la combustión o transformación de masa en energía: Cuatro protones de Hidrógeno se combinan para formar un átomo de Helio, la masa perdida se estima en 4 Megatoneladas por segundo, la cual se convierte en energía de radiación electromagnética o fotones.³

La energía liberada por un gramo de hidrógeno equivale a 250 millones de kWh de energía. Si esto se transforma en energía eléctrica, podría satisfacer los requerimientos eléctricos de más de 130 mil viviendas (con un promedio de cuatro integrantes por familia) durante un año.⁴

Esta energía electromagnética se transfiere desde su núcleo hasta su superficie (fotosfera) a través de una sucesión de procesos radiacionales y convectivos incluidos fenómenos de emisión, absorción y re-radiación (Muhlia,2002).

La energía radiada por el sol al espacio se conoce como radiación solar, se distribuye en todas direcciones a diferentes longitudes de onda (λ); desde las más largas (ondas de radio) hasta las más cortas (rayos X y gamma); siendo la de menor longitud la más energética.

Para llegar a la tierra en el tope de la atmosfera, la radiación solar recorre 149.7 millones de kilómetros. La cantidad de energía recibida en este punto es de 1.36 kWh/m²; en términos de potencia, cada segundo recibimos 1367 W/m². Este valor conocido como constante solar (G_{sc}) ha variado muy poco durante años debido a que el sol mantiene una temperatura casi constante y en consecuencia la energía que proviene de su superficie también lo hace.⁵

3 Muhlia, Agustín. (2006). *Notas del Curso: Solarimetría. Semana Nacional de Energía Solar, del 2 al 6 de Octubre de 2006*, Asociación Nacional de Energía Solar .A.C..Veracruz.México.

4 Riveros Rosas, D., Valdés Barrón, M., Arancibia Bulnes, C. A., & Bonifaz Alfonso, R. (2012). *La radiación solar*. México, D.F.: UNAM: Editorial Terracota.

5 En los últimos años muchos enfoques se han hecho por numerosos científicos y un gran número de valores se han introducido. El valor de 1367 W / m², ha sido adoptado por el Centro Radiométrico Mundial, por la Comisión para Instrumentos y Métodos de Observación y por la Organización Meteorológica Mundial (WRC, CIMO y WMO por sus siglas en inglés).

Esta variación está influenciada por la elíptica de la Tierra alrededor del Sol, que provoca una fluctuación en la distancia Sol-Tierra en un 1.7% y conduce a una variación de energía alrededor del 3.4%.⁶⁷

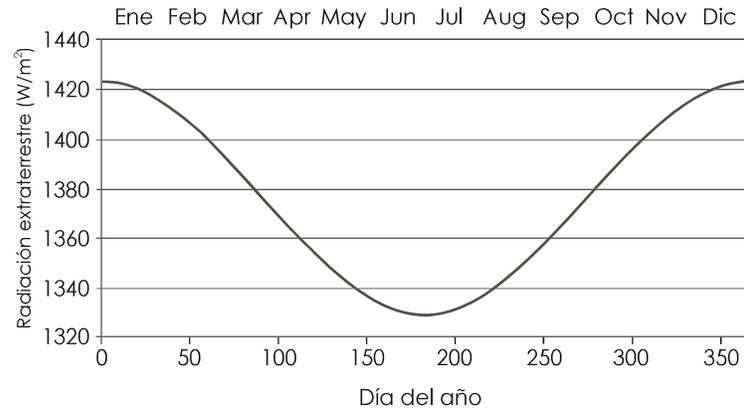


Figura 1 . Gráfica de los valores de radiación extraterrestre de la Tierra (Reproducido de girou, 2009).

La distribución de energía de radiación según su longitud de onda, se denomina Constante Solar Espectral. Energéticamente las longitudes de onda más importantes se encuentran entre los 0.285 a 3.00 micrómetros.

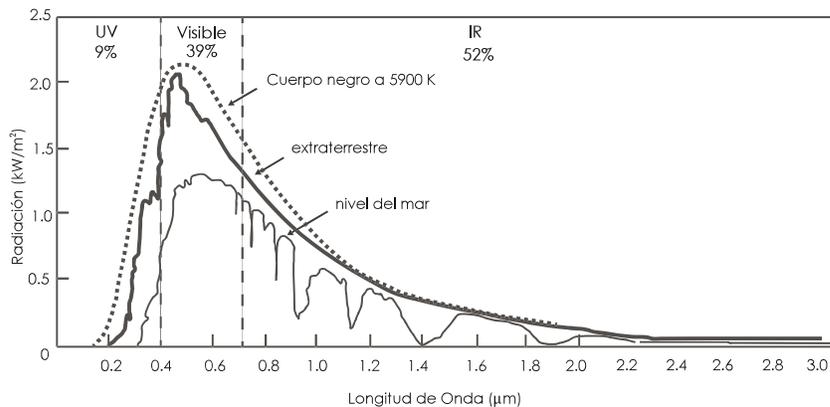


Figura 2. Constante Solar Espectral según Centro Radiométrico Mundial.⁸

Atmósfera y radiación

La radiación solar sufre transformaciones al atravesar la atmósfera terrestre, es dispersada, reflejada y absorbida por moléculas gaseosas y aerosoles atmosféricos. Sufre una extinción cuya magnitud depende del número de moléculas y partículas interceptadas por cada rayo.⁹

6 Duffie J.A., Beckman W.A. (2006). *Solar Engineering of Thermal Processes*, 3 edition, John Wiley & Sons, New York, ISBN 978-0-471-69867-8.

7 Iqbal M. (1983). *An Introduction to Solar Radiation*, Academic Press, Toronto.

8 Navarro A, Andres.(2013). *Seminario de ingeniería en energía fotovoltaica:UPEG*. Recuperado de <https://es.slideshare.net/andrsalans/ingenieria-fotovoltaiva>

9 Chauhauguet, Charles.(1978). *La Energía solar en la edificación*. Barcelona:Editores tecnicos asociados.

La mayor parte de la energía solar es reflejada hacia el espacio por las nubes y aerosoles. Parte de la radiación que queda es difractada en todas direcciones donde gases como ozono, vapor de agua y dióxido de carbono absorben gran parte de esta., el oxígeno, nitrógeno y dióxido de nitrógeno lo hacen en menor medida.

El factor más importante para determinar el total de radiación solar que alcanza la superficie de la Tierra es el espesor de atmósfera que debe atravesar la radiación para llegar a la superficie. En el mediodía solar, la radiación atraviesa el mínimo espesor de la atmósfera para llegar a la superficie en el punto de observación. En el atardecer (horizonte) este trayecto aumenta.

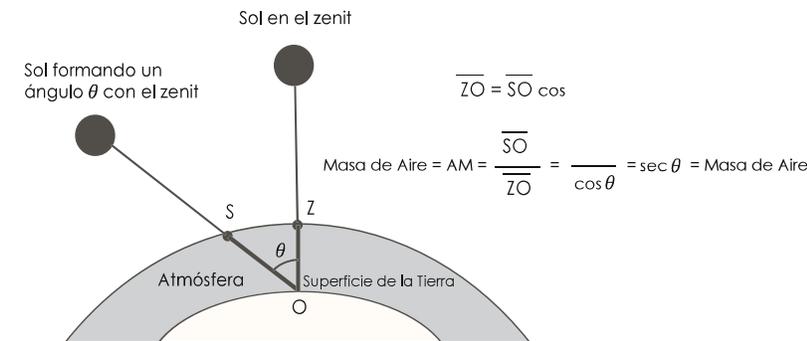


Figura 3. La masa de aire determina la intensidad de la radiación directa.¹⁰

A mayor espesor de la atmósfera menor su contenido energético por la absorción y difracción de moléculas gaseosas y partículas.

El contenido de energía de la radiación solar en localidades de gran altura sobre el nivel del mar es mayor, ya que la radiación recorre una menor distancia.

Debido a la traslación y rotación de la Tierra, este espesor va variando según la hora del día y mes del año.¹¹

La inclinación del eje de la tierra en la traslación y rotación es responsable de la variación estacional del clima alrededor de la órbita solar. Esto también determina presencias de determinadas partículas en la atmósfera y las trayectorias del sol vistas desde la Tierra, marcando la duración de horas luz en el día.

El eje de la tierra está inclinado a $23,47^\circ$ respecto a la perpendicular al plano que forma la órbita terrestre alrededor del sol.

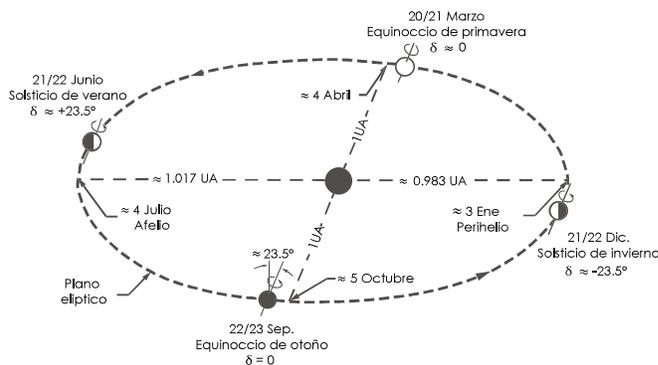


Figura 4. Movimiento de la tierra alrededor del sol, la declinación de la tierra se mantiene constante (Reproducido de Iqbal,1983.).

10 Navarro A, Andres.(2013).Seminario de ingeniería en energía fotovoltaica:UPEG. Recuperado de <https://es.slideshare.net/andrsolans/ingenieria-fotovoltaiva>

11 Muhlia, Agustín. (2006). Notas del curso: Solarimetría. XXX Semana Nacional de Energía Solar, del 2 al 6 de Octubre de 2006. Asociación Nacional de Energía Solar,A.C.Veracruz, México.

Componentes de la radiación solar

La radiación solar que llega a la superficie terrestre se puede clasificar como radiación directa y radiación difusa. A la radiación solar que recibimos directamente desde el disco solar se le nombra radiación directa. Como se menciona anteriormente, los rayos solares entran a la atmósfera, interactúan con componentes como ozono, moléculas de agua, polvo, etc. Los fenómenos de absorción, dispersión, refracción y reflexión, distribuyen parte de la radiación directa del sol a toda la extensión del cielo. La radiación que recibe un objeto desde cualquier otra región del cielo se le conoce como radiación difusa.¹²

En una atmósfera limpia la absorción depende principalmente del vapor de agua. Por lo tanto bajo condiciones de días despejados, tendremos radiación directa del sol, radiación difusa proveniente del cielo y en superficies inclinadas o verticales la radiación reflejada por la superficie terrestre.¹³

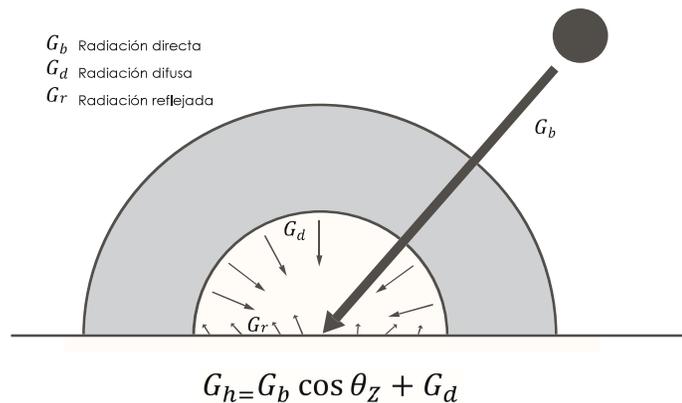


Figura 5. Componentes de la Radiación Global (Reproducido de Muhlia, 2006).

A la suma de las radiaciones directa y difusa se le nombra radiación global. En el caso de una superficie horizontal la radiación global (G_h) es la suma del componente vertical de la radiación directa (G_b) y la radiación horizontal difusa (G_d), es decir:

$$G_h = G_b \cos \theta_z (\text{ángulo cenital}) + G_d$$

Sin embargo, la componente de irradiancia directa está afectada por el ángulo de incidencia, por lo que la suma separada de los valores de irradiancia directa y difusa no siempre coincide con la radiación global.¹⁴

RADIACIÓN Y MATERIALES

¹² Riveros Rosas, D., Valdés Barrón, M., Arancibia Bulnes, C. A., & Bonifaz Alfonso, R. (2012). *La radiación solar*. México, D.F.: UNAM: Editorial Terracota.

¹³ Zeevaert, L. (1984). *Curso de actualización en arquitectura solar*, facultad de arquitectura de la Universidad Nacional Autónoma de Tamaulipas, Asociación Nacional de Energía Solar, ANES. Tamaulipas, México.

¹⁴ *Ibidem*. pp. 40.

La cantidad de energía que recibe una superficie también depende del ángulo con el que inciden los rayos del sol sobre ella. Como la radiación solar incide sobre la Tierra en rayos prácticamente paralelos, una superficie perpendicular a los mismos será la que interceptará una mayor porción de energía. Si los rayos se desvían de la perpendicular habrá una disminución de la energía.

El ángulo que los rayos del sol forman con una perpendicular a la superficie se le denomina ángulo de incidencia. El ángulo de incidencia determina el porcentaje del asoleo de radiación directo, difuso y reflejado que interceptará la superficie¹⁵.

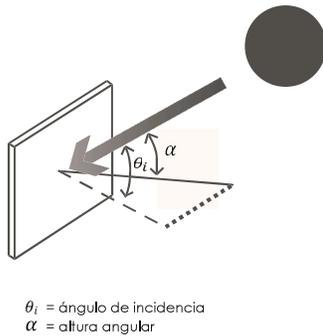


Figura 6. Imagen del Angulo de incidencia (Reproducido de Mazria, 1985).

Una superficie que se separe hasta 25 ° de la perpendicular respecto al Sol, todavía intercepta más del 90 % de la radiación. La radiación difusa puede valer 50% del total cuando el sol está bajo en el horizonte y 100% cuando el cielo está enteramente cubierto., en días despejados la radiación difusa solo representa una pequeña parte del total. Cuanto mayor es el ángulo de incidencia, mayor es la proporción de radiación que se reflejará.

Cuando la radiación solar incide sobre la superficie de un material, puede reflejarse, transmitirse y/o absorberse. Dependiendo de la textura superficial del material, puede ocurrir una reflexión difusa donde la radiación reflejada se difunde (superficie mate) o una reflexión especular donde la radiación se refleja de manera regular (superficie pulida). Las texturas rugosas reflejarán en forma difusa y los espejos o metales pulidos la reflejarán en rayos paralelos. El ángulo de incidencia y el de reflexión de una superficie especular son iguales¹⁶.

Albedo

La reflexión de energía solar por una superficie es llamada albedo de esta superficie. Toda la radiación solar interceptada por la Tierra llega como máximo a 35% de la reflejada al espacio. El albedo de la Tierra en conjunto es del 35 a 40 %. La mayor parte de esta energía es reflejada hacia el espacio por nubes y partículas atmosféricas¹⁷.

En la superficie de la Tierra también se presentan reflexiones, el albedo terrestre o reflectividad del suelo (ρ_g), es un parámetro adimensional utilizado para mostrar en qué porcentaje la radiación directa o difusa incidente en una superficie es reflejada de vuelta.

El albedo es una propiedad fundamental que puede ser alterada con relativa facilidad, dichas
 15 Mazria, E., Serra-florensa, R., & Mazria, E. (1983). *El libro de la energía solar pasiva*. México : Gustavo Gilli.

16 Ibidem. pp.26.

17 Ibidem. pp.21.

alteraciones traen como resultado cambios considerables en el microclima. A su vez el albedo es un factor importante que interviene en el flujo neto de la radiación, principalmente al tratarse de planos inclinados.

El albedo incrementa la radiación total que reciben superficies verticales o inclinadas. Su valor varía de acuerdo con el ángulo de incidencia de los rayos solares incrementándose considerablemente con ángulos agudos. La tabla siguiente muestra algunos de los porcentajes dependiendo de la superficie¹⁸.

Superficie	Porcentaje Reflejado
Suelo seco	10-25
Suelo húmedo	8-9
Arena seca	18-30
Arena húmeda	9-18
Tierra orgánica seca	14
Tierra orgánica húmeda	8
Roca	12-15
Campos de hierba verde	3-15
Campos frondosos de hojas verdes	25-32
Bosques densos	5
Desierto	24-28
Salinas	42
Ladrillos, según el color	23-48
Asfalto	15

Tabla 1. Condiciones de Albedo de suelo en varias superficies (Reproducido de Olgay, 1998).

1.2 APLICACIONES DE LA ENERGÍA SOLAR

¹⁸ Olgay, V., Frontado, J.; & Clavet L. (1998). *Arquitectura y clima: manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas*. Barcelona: Gustavo Gili.

Cualquier aplicación de la Energía Solar requiere una evaluación del recurso solar. Por evaluación del recurso solar se entiende la determinación (de preferencia a partir de mediciones) de la cantidad de energía solar disponible para ser utilizada.

Antecedentes

De los escritos teóricos más significativos a la arquitectura se encuentra Marco Vitruvio Pollion, en su libro *De Arquitectura*, en el libro sexto, en el primer capítulo nos menciona:

“Los edificios privados están correctamente ubicados si se tiene en cuenta, en primer lugar, la latitud y la orientación donde van a levantarse. Muy distinta es la forma de construir en Egipto, en España, en el Ponto, en Roma e igualmente en regiones o tierras que ofrecen características diferentes, ya que hay zonas donde la tierra se ve muy afectada por el curso del sol; otras están muy alejadas ... se debe orientar la disposición de los edificios, atendiendo a las particularidades de cada región y a las diferencias del clima”.¹⁹

Los griegos fueron los primeros en usar diseños de casas para aprovechar la luz del sol en forma pasiva (400 A.C. aprox.) cuyas ciudades y casas residenciales estaban orientadas a los puntos cardinales para tener clima confortable en su interior.

Los romanos usaron vidrio en ventanas para atrapar la luz solar en sus hogares, promulgaron leyes que penaban el bloquear el acceso a la luz a los vecinos; también construyeron casas de cristal o invernaderos para crear condiciones adecuadas para el crecimiento de plantas exóticas o semillas que traían a Roma desde los lejanos confines del imperio.

Lo anterior, refleja la importancia de la arquitectura solar pasiva y de la relación que ha tenido el proceso edificatorio con el clima a lo largo de la historia.

Entre 1839 y 1890, científicos como Horace de Saussure o Edmond Becquerel, utilizaron los principios de la Energía Solar, para intentar fabricar celdas o paneles solares para la utilización de esta energía. Con Saussure surgirán todos los desarrollos posteriores de calentadores solares de agua de placa plana.

En 1861, la tecnología de la concentración solar seguía también avanzando en esta época, con grandes centrales de destilación solar por Charles Wilson y cocinas solares por Mouchot.

El primer calentador de agua solar fue patentado en 1891 por Clarence Kemp. El crecimiento de esta industria fue alto hasta mediados de los 50's, cuando el bajo costo del gas natural hizo que este energético se usara como fuente principal para calentamiento²⁰.

A principios del siglo XIX el impacto de la ingeniería ambiental trajo consigo innovaciones en el control mecánico del medio ambiente; surgió la iluminación artificial y el aire acondicionado.²¹

La gran facilidad con la que se pudo controlar mecánicamente el medio ambiente hizo que el hombre se olvidara por completo del impacto que tiene el clima sobre sus edificaciones.

19 Vitruvio (1934). *De arquitectura, Libro VI, capítulo 1*. Traducido por Frank Granger Ariba.

20 Meinel, A., Aguilar Peris, J., Rubia Pacheco, J. and Meinel, M. (1982). *Aplicaciones de la energía solar*. Barcelona; Reverté.

21 Banham, Reyner. (1969). *"The Architecture of the Well-tempered Environment"*. The architectural. Press. London, Great Britain.

Le Corbusier, comenzó un periodo de investigación de los efectos de la luz solar "Epure du soleil" y la relación de la arquitectura y su entorno, sus dibujos anticiparon los manuales clásicos del bioclimatismo de Olgyay (1963) y Givoni (1969), que servirán de base para las actuales herramientas de simulación informática.

En su manifiesto urbanístico redactado en el CIAM (Congreso Internacional de Arquitectos) en 1933: "el sol, la vegetación y el espacio son las tres materias primas del urbanismo".

En 1940, Georg Fred Keck diseñó la primera casa solar pasiva moderna "Sloan 'Solar' House" en Chicago.

A mediados de los años 50 el arquitecto Frank Bridgers diseñó el primer edificio de oficinas comerciales en el mundo que usaba calefacción de agua solar y con diseño pasivo.

Como resultado de la escasez de energía durante el prolongado período de la Segunda Guerra Mundial, se dió una demanda importante por los Edificios solares pasivos en los Estados Unidos, que Libbey-Owens-Ford Glass Company publicó un libro titulado "Tu Casa Solar", que perfila a cuarenta y nueve de los mejores arquitectos solares de USA.

A raíz de la crisis de energéticos de 1973 se ha tenido un renovado ímpetu por la utilización de soluciones tradicionales. La respuesta arquitectónica enfocada a aprovechar la energía del sol, se le ha llamado arquitectura solar pasiva.²²

En estas fechas también comienza la utilización de sistemas fotovoltaicos en hogares: la Universidad de Delaware construye "Solar One", una de las primeras residencias en el mundo que funcionan con sistema híbrido fotovoltaico/térmico.

En 1978, la NASA instala un sistema de energía solar en la Reserva India Papago situado en el sur de Arizona, siendo el primer sistema comunitario del mundo. Hasta 1983, el sistema se usaba para proporcionar electricidad en el bombeo de agua y uso residencial en 15 viviendas., cuando la red eléctrica llegó a la comunidad, el sistema fotovoltaico se utilizó para bombear agua de un pozo comunitario.

En los 90's termina la construcción del Times Square, Nueva York, incorporando módulos fotovoltaicos en las fachadas sur y oeste del edificio (BIPV por sus siglas en Inglés).

En 2001, comienza la venta de sistemas de energía solar residencial en tiendas Home Depot en San Diego, California, para después expandirse a nivel nacional en Estados Unidos

En la actualidad, la energía solar se usa como potencia térmica solar y en conversiones fotovoltaicas (paneles solares).

La tabla 2 resume las características que poseen los sistemas más utilizados en aplicaciones de energía solar.²³

22 Zeevaert, Leonardo. *Interacción con el Medio*. Posgrado de Arquitectura. Universidad Nacional Autónoma de México. 2016-2.

23 Sarmiento, P. (2007). *Energía solar en arquitectura y construcción*. Santiago, Chile: RIL.

Sistema	Características principales	Uso
Colectores planos	Bajas temperaturas obtenidas	Calentamiento de agua para uso doméstico y piscinas
	Tecnología simple	Calefacción
	Bajo costo	Uso industrial y agrícola
	Industria en desarrollo	Destiladores
Colectores Concentradores	Altas temperaturas obtenidas	Hornos solares
	Alto costo	Refrigeración
	Alta tecnología	Plantas solares termoeléctricas (PST)
	Investigación en desarrollo	Desalinizar agua de mar
		Estufas solares (cocción de alimentos)
Celdas fotovoltaicas	Alta tecnología	Satélites
	Alto costo	Sistemas de alumbrado público
	Manejan eficiencias de entre 8 y 15 %	Granjas solares
		Instalaciones Experimentales
Celdas fotovoltaicas con concentración	Manejan eficiencias del 20 al 40%	
Helio-Arquitectura	Aplicaciones para calefacción y refrigeración de edificios.	Arquitectura bioclimática
		Arquitectura solar
		Instalaciones experimentales

Tabla 2. Sistemas usados en aplicaciones de energía solar (Reproducido de Sarmiento, 2007).

Arquitectura solar

La creación de las tecnologías descritas anteriormente, permiten a la arquitectura utilizar la radiación solar de forma pasiva y activa. Estos enfoques son utilizados en la calefacción y refrigeración solar en los edificios.

Los sistemas activos tienen captadores solares y/o de energías naturales, contruidos específicamente para captar y transportar el calor. La transferencia de calor al interior se lleva por medios mecánicos. Este tipo de sistema utiliza generalmente uno o varios fluidos para coleccionar, transferir, almacenar y distribuir la energía. Estos fluidos circulan a través de tubos o ductos mediante la ayuda de bombas o ventiladores. Su funcionamiento implica mecanismos de transferencia, control y distribución de la energía.²⁴

Los sistemas pasivos se basan en la planificación y construcción acordes con el clima. Coincide con las leyes físicas de radiación, captación, acumulación y distribución del calor.

La construcción del edificio, total o parcialmente, es el sistema y funcionan con la energía aprovechable de su entorno inmediato.^{25 26}, es decir, el sistema funciona sin energía exterior.

²⁴ Zeevaert, Leonardo. *Interacción con el Medio*. Posgrado de Arquitectura. Universidad Nacional Autónoma de México. 2016-2.

²⁵ Mazría, E., Serra-florensa, R., & Mazría, E. (1983). *El libro de la energía solar pasiva*. México : Gustavo Gili.

²⁶ Wachberger, Michael, (1984). *Construir con el sol : Utilización de la energía solar pasiva = construir com o sol*

La estructura se diseña para permitir o rechazar un calentamiento solar, para almacenar el calor, distribuirlo por el espacio habitable sin ninguna ayuda mecánica y utilizarlo de noche. ²⁷

Los sistemas híbridos combinan las características pasivas y activas.

Autores como Mazria, Lebens, Watson, y Givoni describen los elementos mínimos necesarios para considerar un sistema como pasivo.

Superficie (área): Absorbe o emite la radiación (onda larga).

Masa (térmica): Almacena el calor o retiene el frío.

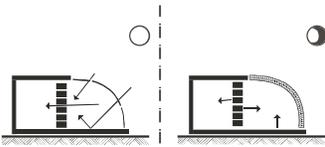
Espacio (habitable): el cual es calentado o enfriado

Sistema de control: regula la cantidad de calor (frío) en el espacio.

Sistema de distribución: transfiere el calor (frío) hacia el espacio habitable. ²⁸

La relación entre el sol, el almacenamiento térmico y el espacio habitable da origen a los sistemas sistemas directos e indirectos.

Varios autores han clasificado los sistemas pasivos de acuerdo a su funcionamiento y/o forma (Tabla 3)²⁹.

Uso	Sistemas	Espacios/Elementos	
Calentamiento	<i>Ganancia Directa</i>	<i>Invernadero</i>	 <p>Figura 7. Esquema de invernadero. (Reproducido de Zeevaert,2013).</p>
	(El espacio habitado en cada momento se calienta directamente con el sol. La luz solar penetra en el espacio, es transformada en calor por superficies absorbentes y es dispersada por el espacio hacia las distintas superficies delimitantes y volúmenes especiales).	(El edificio consiste en dos zonas térmicas, un espacio solar de ganancia directa y un espacio calentado indirectamente separado por una pared de almacenamiento térmico).	

Sistemas	Espacios/elementos
----------	--------------------

:Utilizacáo da energia solar passiv. Barcelona. Gustavo Gili.

27 Zeevaert, Leonardo (2013) . *Interacción con el Medio*. Posgrado de Arquitectura. Universidad Nacional Autónoma de México. Archivo PDF.

28 Ibídem. pp. 50. Clasificación basada en los trabajos de (Givoni,81; Lebens, 80; Mazria, 79;Watson 79,80,81).

29 Ibídem. pp. 52. Clasificación basada en los trabajos de (Bahadori,80; Givoni,80; Lebens, 80; Mazria, 79; Szokolay,80; Watson,80; Zeevaert,81).

Calentamiento	<p><i>Ganancia Indirecta</i></p> <p>(La radiación solar incide primero en una masa térmica situada entre el sol y el ambiente interior, esta radiación se convierte en energía térmica y es transferida después al espacio habitable).</p>	<p><i>Muros y techos térmicos</i></p> <p>(Almacenamiento exterior que transfiere el calor al interior mediante radiación y convección. Incrementa su eficiencia al colocar cubiertas de vidrio frente al muro o techo).</p> <p>Los materiales comunes usados: concreto, piedra, mampostería, arena, agua.</p>	<p>Figura 8. Esquema de muros y techos térmicos. (Reproducido de Zeevaert, 2013).</p>
		<p>Sistemas de termo fusión</p> <p>Colectores planos</p>	
Enfriamiento	<p><i>Protecciones solares</i></p> <p>(La sombra, esencial estrategia de control para prevenir el sobre-calentamiento del espacio interior)</p>	<p><i>Protecciones verticales y horizontales</i></p> <p>(Controlan la cantidad de radiación directa)</p> <p><i>Cristal</i> (Controlan la cantidad de radiación difusa).</p>	<p>Figura 9. Esquema de protección. (Reproducido Zeevaert, 2013).</p>
	<p><i>Ventilación Natural</i></p> <p>(El enfriamiento conductivo se logra a través del movimiento del aire a través del edificio)</p> <p>Para una buena ventilación, deben existir una entrada y una salida de aire en caras opuestas del espacio habitable.</p>	<p>Diferencia debido al movimiento de aire externo (velocidad y dirección del viento).</p> <p>Diferencia de presión debida a la temperatura del aire denominado efecto chimenea. (El aire caliente tiene menor densidad, sube y es reemplazado por aire frío, formando corrientes convectivas)</p>	<p>Figura 10. Esquema de ventilación natural. (Reproducido Zeevaert, 2013).</p>
	<p>Ventilación inducida</p>	<p>Usa la energía solar para producir una diferencia de presión. La radiación solar calienta el aire cambiando su densidad.</p>	
	<p>Conductivo</p>	<p><i>Contacto con el terreno</i></p> <p>(El espacio se encuentra protegido y aislado por el terreno, las bajas temperaturas del subsuelo enfrían la estructura por conducción, manteniéndose la temperatura interior por debajo de la temperatura exterior.)</p>	<p>Figura 11. Esquema de enfriamiento conductivo. (Reproducido Zeevaert 2013).</p>

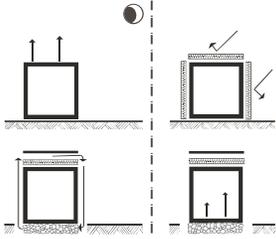
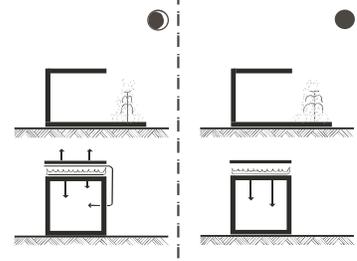
Uso	Sistemas	Espacios/elementos	
Enfriamiento		<p><i>Tubos subterráneos</i> (Utiliza la temperatura del subsuelo para enfriar la temperatura del aire externo, el aire externo circula por los tubos variando su temperatura y humedad antes de llegar al interior del edificio).</p>	
	Radiativo	<p><i>Radiación Nocturna</i> (Propicia pérdidas de calor radiante de las superficies, particularmente de los techos hacia la atmósfera).</p>	 <p>Figura 12. Esquema de enfriamiento conductivo. (Reproducido Zeevaert, 2013).</p>
	Radiativo	<p><i>Rad. Nocturna indirecta</i> (Utiliza los mismos principios de los directos pero se relaciona a los elementos (techo y muros).</p>	
	<p>Humidificación (Evaporativo) Controla la humedad relativa. Puede ser utilizada en el día para mejora del confort térmico.</p>	<p><i>Fuente</i> (Propicia incremento de la humedad relativa del ambiente al colocarla dentro del espacio).</p>	 <p>Figura 13. Esquema de enfriamiento por humidificación. (Reproducido Zeevaert, 2013).</p>
	<p>Dehumidificación (Lugares con niveles de humedad por arriba del 80% es necesario estrategias activas para la disminución de humedad relativa).</p>		

Tabla 3. Elementos de sistema pasivo (Reproducido de Zeevaert 2013).

El diseño arquitectónico depende de los factores naturales del lugar de emplazamiento, el ser humano y su medio ambiente se relacionan de manera directa, por tanto brindar mejores diseños implica el conocimiento del mismo.

Básicamente todas las especies vivas adaptan su fisiología para enfrentarse a los impactos ambientales. La forma en que el hombre ha modificado su hábitat para lograr mayor confort térmico, lumínico y acústico ha sido simple y económica. Utilizando tecnologías y materiales locales ha logrado como resultado formas regionales que reflejan no solo el lugar y el tiempo en que fueron construidas sino también las características ambientales predominantes.³⁰

Jean Dollfus, con su muestrario de viviendas características de todo el mundo, confirma que el principal objetivo de los constructores ha sido siempre la búsqueda de las condiciones óptimas de confort térmico. Concluye que la tipología constructiva se encuentra definida más por las zonas climáticas que por las fronteras territoriales.³¹

La radiación solar necesita de un correcto entendimiento, su análisis cuantitativo y cualitativo para un sitio específico, permitirá crear estrategias de diseño oportunas. Es posible conocer estos aspectos a través de la medición real del recurso solar, con mediciones continuas en largos periodos de tiempo.

Entender la relación que el recurso solar de un sitio específico tiene con la arquitectura, se traduce en brindar un mejor servicio al usuario que lo habita.

30 Zeevaert, Leonardo. *Interacción con el Medio*. Posgrado de Arquitectura. Universidad Nacional Autónoma de México. 2016-2.

31 Olgyay, V., Frontado, J.; & Clavet L. (1998). *Arquitectura y clima: manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas*. Barcelona: Gustavo Gili.

1.3 CUANTIFICACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR

Las unidades radiométricas son puramente físicas, es energía en forma de radiación, la cual está conceptualizada como un fluido formado por fotones de naturaleza dual (onda-partícula).

Las cantidades radiométricas más comunes presentadas en la siguiente tabla están basadas en la CIE (Commission Internationale d'Eclairage), la CIMO (Commission for Instruments and Methods of Observation) y por la ANES

(Asociación Nacional de Energía Solar, México). Las unidades en que se expresan las mediciones se basan en el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Se parte de la cantidad de energía de radiación con la que se cuenta en determinado momento, la cual se expresa con el símbolo ϵ , dada en Joules (J), entonces:

CANTIDAD RADIOMÉTRICA	DADA EN	DEFINICIÓN	EXPRESIÓN MATEMÁTICA
Potencia o flujo de energía de Radiación.	<i>Watts</i> <i>W</i>	La razón o tasa a la cual la energía de radiación la emite o recibe un objeto por unidad de tiempo.	$P = \frac{d\epsilon}{dt}, W$
Irradiancia o densidad de flujo de energía de Radiación.	<i>W/m²</i>	La razón a la cual la energía de radiación es emitida o recibida por un objeto por unidad de tiempo y por unidad de área.	$I = \frac{d}{dA} \left(\frac{d\epsilon}{dt} \right) = \frac{dP}{dA}, W/m^2$
Radiancia.	<i>W/m²/Sr</i>	Densidad de Flujo de energía de radiación por unidad de ángulo sólido (expresado en Stereoradianes, Sr), la cual es emitida o recibida por la superficie de un objeto perpendicular a la dirección de propagación.	$L = \frac{d}{d\omega} \frac{d}{dA} \frac{d\epsilon}{dt}, \frac{W}{m^2/Sr}$
Irradiación	<i>J/m²</i>	Densidad de flujo de energía de radiación que emite o recibe un cuerpo a lo largo de un cierto tiempo (Integral de la Irradiancia)	$R = \int_1^2 \frac{d}{dA} \left(\frac{d\epsilon}{dt} \right) d = \frac{d}{dA} \left[\int_1^2 d\epsilon \right], \frac{J}{m^2}$
Otras expresiones para Irradiación y su equivalencia en (SI)	<i>WH/m²</i> (Watt-Hora/m ²) HP (Horas Pico)	1 Wh/m ² =(3600s)(1 W/m ²)= 3.6 kJ/m² 1 HP=1000 WH/m ² = 3.6 MJ/m²	Donde: 1 kJ = 1000 J 1 MJ = 1,000,000 J

Tabla 4. Tabla de relación de cantidades radiométricas (Reproducido de Muhlia 2006).

1.4 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

La radiometría es la herramienta básica para la obtención de datos de la energía solar.

INSTRUMENTOS	PARÁMETRO	UNIDAD	CÓMO FUNCIONA
<p>PIRHELÍOMETRO</p>  <p>Figura 14. Pirhelímetro para la medición de la radiación solar directa.</p>	Radiación solar directa	W/m^2	Se enfocan continuamente al sol, tienen un sistema de movimiento de relojería que sigue al sol con gran precisión. Reciben energía de un cono de 5° a 7° de apertura, la cual es mayor que la del disco solar ($.5^\circ$).
<p>PIRANÓMETRO</p>  <p>Figura 15. Piranómetro y sus partes.</p>	Radiación solar global	W/m^2	<p>Cuenta con un sensor de superficie negra protegida del enfriamiento y precipitaciones por una doble cúpula.</p> <p>Recibir radiación desde todas direcciones y longitudes de onda.</p> <p>Su sensor también capta radiación difusa y radiación directa que incide perpendicularmente sobre el sensor.</p>
Accesorios	Qué mide	Cómo funciona	
<p>Banda de Sombra</p>  <p>Figura 16. Piranómetro con banda de sombra.</p>	Radiación Difusa	La radiación difusa se mide con un anillo de sombra inclinado que no permite que sobre el sensor del piranómetro incida la radiación directa.	

1.5 RADIACIÓN SOLAR HORIZONTAL

El Centro Mundial de Radiación solar (World Radiation Data Centre; WRDC), localizado en San Petersburgo, Rusia, sirve como archivo central de datos de radiación solar medidos en más de mil sitios alrededor del mundo. Fue por una resolución de la Organización Meteorológica Mundial (World Meteorological Organization; WMO). Los datos abarcan los años 1964 a1993.³⁵

En Estados Unidos existe la Base de Datos Nacional de Radiación Solar (National Solar Radiation Data Base; NSRDB). En ella se almacenan 30 años (1961-1990) de datos de radiación solar y datos meteorológicos complementarios, de 237 sitios en territorio estadounidense, Puerto Rico y Guam. Esta base de datos se almacena en el Renewable Resource Data Center, que es mantenido por el NREL.³⁶

Basándose en los datos de la NSRDB se ha desarrollado un año meteorológico típico (AMT).³⁷ Este AMT consiste en datos horarios de radiación solar y variables meteorológicas, para cada día del año. La intención de hacer disponible estos datos es que puedan ser usados para llevar a cabo simulaciones de sistemas de energía solar y edificios, para ayudar en tareas de diseño y comparación.

Para Europa existe una base de datos de radiación solar por el Institute for Environment and Sustainability, del Joint Research Centre, de la Comisión Europea.³⁸ Esta base de datos está basada en el Atlas Europeo de radiación solar, que contiene información obtenida a partir de datos de más de 500 estaciones meteorológicas en Europa.

La base de datos se ofrece dentro de un Sistema de Información Geográfico y permite llevar a cabo estimaciones de energía disponibles para colectores térmicos y fotovoltaicos de diferentes inclinaciones, para cualquier sitio del continente europeo. También existe la base de datos: The European Database of Daylight and Solar Radiation.³⁹

32 Sensovant.(Noviembre 2015). Recuperado de <http://sensovant.com/productos/meteorologia/radiacion-solar/articulo/medidor-de-radiacion-solar-pirheliometro-DR01.html>

33 Kipp & Zonen.(Noviembre 2015). Piranómetros. Para una Medida Precisa de la Radiación Solar. Recuperado de <http://www.kippzonen.es/Download/725/Brochure-Pyranometers-CMP-series-Spanish?ShowInfo=true>

34 Kipp & Zonen. (Noviembre 2015). Recuperado de <http://www.kippzonen.es/Product/235/Espira-de-Sombra-CM121B-C#.WmapTajibIV>

35 World Radiation Data Center. (Noviembre 2015). Recuperado de <http://wrdc.mgo.rssi.ru/>

36 National Renewable Energy Laboratory. (Noviembre 2015). Recuperado de http://www.nrel.gov/rredc/solar_data.html

37 National Radiation Solar Database (Noviembre 2015). Recuperado de http://rredc.nrel.gov/solar/old_data/nsrdb/

38 Joint Research Centre. Institute for Energy and Transport IET. (Noviembre 2015). Recuperado de <http://iamest.jrc.it/pvgis/solrad/index.htm#databases>

39 The European Database of Daylight and Solar Radiation. (Noviembre 2015). Recuperado de <http://www.satellite-light.com/core.htm>

Las primeras mediciones de radiación solar en México fueron iniciadas en 1911.⁴⁰

Nuestro país recibe una gran cantidad de radiación solar; en casi el 40% de su extensión territorial de aproximadamente 2 millones de kilómetros cuadrados, se reciben unos 21 MJ/m² día.⁴¹

Diversas Instituciones gubernamentales y universidades cuentan con estaciones de medición: Centro de Investigación de Energía, el Instituto de Ciencia Aplicada y el Instituto de Geofísica pertenecientes a la UNAM, además del Grupo de Energía de la Universidad de Sonora.⁴²

Las redes de dependencias gubernamentales en operación comprende el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) con una red de 94 estaciones automáticas.⁴³

La Comisión Federal de Electricidad cuenta con una red de alrededor de 20 piranógrafos y 6 piranómetros. La Secretaría de Marina cuenta con una red de alrededor de 10 piranógrafos, 10 heliógrafos y 22 estaciones meteorológicas automáticas con piranómetro.

La Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, a través de la Red Automatizada de Monitoreo Ambiental (RAMA) cuenta con 9 piranómetros referenciados. Esta red además hace mediciones de radiación solar UVA y UVB en 5 de sus estaciones.

El sitio de Internet del WRDC, tiene información de México de Ciudad Universitaria, Cd. De México (1967- 2013); Chihuahua, Chih. (1967-1976) y Orizabita, Hgo. (1968-1995).

Los datos de los últimos 90 días de las mediciones de la SMN pueden ser consultados en su página en forma de promedios diarios de irradiancia solar global.

Unas cuantas universidades del país han hecho pública en Internet información de radiación solar: desde luego el Observatorio de Radiación Solar del IGF-UNAM y Orizabita Hgo.⁴⁴; el Grupo de Energía de la Universidad de Sonora; y de manera más incipiente el Centro de Investigación en Energía de la UNAM.⁴⁵ Recientemente, el IGF-UNAM ha propuesto la creación de una base de datos nacional, con un servidor de Internet, para hacer ampliamente disponible la información de radiación solar.⁴⁶

No obstante el conocimiento de dicho recurso se ha enfocado en la energía recibida sólo de manera horizontal, observatorios dedicados a las mediciones de radiación solar en superficies verticales por periodos prolongados de tiempo NO existen.

Esto representa un obstáculo para continuar el conocimiento del recurso y un freno para el desarrol-

40 Muhlia, A. (1990). *Algo de Historia de la Solarimetría en México. II Taller de Radiación Solar*. Instituto de Investigaciones Eléctricas. Palmira, Morelos.

41 Galindo I. y Cifuentes G., (1996). "Irradiación Solar Global en la Republica Mexicana" *Valores Horarios Medios*. Instituto de Geofísica. (UNAM). Programa Universitario de Energía.

42 Estrada, Claudio., Arancibia, Camilo., Dorantes, Rubén., Islas, Jorge., Muhlia, Agustín. (2005) *Anexo 6-1 Visión a Largo Plazo Sobre la Utilización de las Energías Renovables en México. Energía Solar*. Centro de Investigación de Energía UNAM.

43 Servicio Meteorológico Nacional. (Noviembre 2015). Recuperado de <http://smn.cna.gob.mx/emas/>

44 Instituto de Geofísica UNAM. (Noviembre 2015). Recuperado <http://www.geofisica.unam.mx/ors-red.html>

45 Instituto de Energías Renovables, Estación Meteorológica y Solarimetría. (Noviembre 2015). Recuperado de <http://xml.cie.unam.mx/xml/se/cs/meteo.xml>

46 Valdés, M. Bonifaz, R., Galindo, L. (2001) *Base Nacional de Datos de Radiación Solar*. En R. J. Dorantes Rodríguez, E. Rincón Mejía, L.E. Hernández, R. Acosta Olea (editores). *Memoria de la XXV Semana Nacional de Energía Solar*. Asociación Nacional de Energía Solar. México. (ISBN 968-5219-02-8). pp. 515-516.

lo de estudios que traten la radiación solar y su relación con las envolventes y espacios arquitectónicos en nuestro contexto.

1.6 DISPONIBILIDAD DE ENERGÍA SOLAR EN PLANOS VERTICALES PARA ARQUITECTURA.

Las investigaciones sobre la radiación solar en planos verticales comenzaron a finales del siglo XIX en Inglaterra, uno de los países con mayor aportación no sólo en el desarrollo de instrumentos de medición sino también en métodos de simulación y cálculo.

El interés por el recurso solar se debe a la poca disponibilidad del mismo dada su ubicación geográfica y su clima, instituciones como el Building Research Establishment (BRE, 1921), quiso conjuntar en un solo organismo la mayor cantidad de información relativa a aspectos científicos y tecnológicos relativos a las edificaciones.

Las primeras mediciones de irradiación solar en planos verticales se realizaron por un corto periodo de tiempo. La utilización de sistemas de calefacción solar pasiva, refrigeración y luz natural utilizados en vanos y paredes para captar o reflejar la radiación solar incidente, las simulaciones de rendimiento de las celdas fotovoltaicas con diversas orientaciones, dieron pie a nuevas investigaciones.

En 1980, Jean Louis Izard en su libro "Arquitectura bioclimática" ya nos hablaba del comportamiento de la radiación solar en planos verticales:

"Cuando el sol está bajo en el sur de la insolación en un plano vertical aumenta, sin embargo tiene una 'inmersión' en invierno donde los días son más cortos y, a menudo nublado. En invierno, la fachada sur recibe mayor cantidad de radiación, a diferencia de las fachadas este y oeste.

En verano el proceso se invierte, la horizontal es la más iluminada seguido de la fachada oeste y de la fachada sur. La fachada sur tiene mejor capacidad de control pasivo, mientras que las otras direcciones tienen una ganancia máxima con el riesgo de sobrecalentamiento".⁴⁷

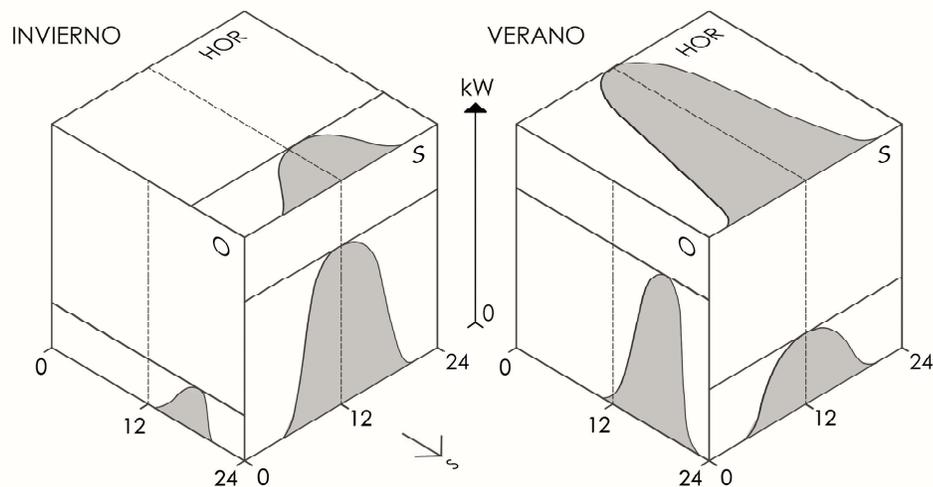


Figura 17. Repartición de las potencias recibidas del sol según las orientaciones de las fachadas de una construcción en invierno y en verano (Reproducido de Izard, 1980).

47 Izard, J. & Guyot, A. (1980). *Arquitectura bioclimática*. Barcelona: Gustavo Gilli.

En 1986, en los Estados Unidos el Instituto de investigación de la energía solar (Solar Energy Research Institute SERI) a petición del departamento de energía de los Estados Unidos, realiza un estudio de los dos meses de datos de Irradiación vertical registrados por su Laboratorio de Investigación de Radiación (Radiation Research Laboratory SRRL).⁴⁸

Por su parte en Europa, las primeras mediciones en superficies verticales fueron para obtener medidas de iluminancia, en respuesta al llamado realizado por la Comisión Internacional de Iluminación (Commission Internationale de l'Éclairage, CIE), declarando el año 1991 como el año internacional de la medición de la luz natural. Las ciudades de Watford, Manchester, Sheffield y Edimburgo fueron las primeras en obtener las mediciones.

A partir de entonces, los investigadores alrededor del mundo instalaron estaciones de medición de radiación solar.

La CIE, fue nombrada después Programa Internacional de Medición de Luz Natural (International Daylight Measurement Programme, IDMP), sus veinte estaciones de medición que desde 1991 hasta la fecha miden Irradiancia Solar, son en su mayoría utilizados para fines de investigación, permitiendo visualizar las mediciones en su página web pero sin la opción de descarga de bases de datos.⁴⁹ (Figura 18)

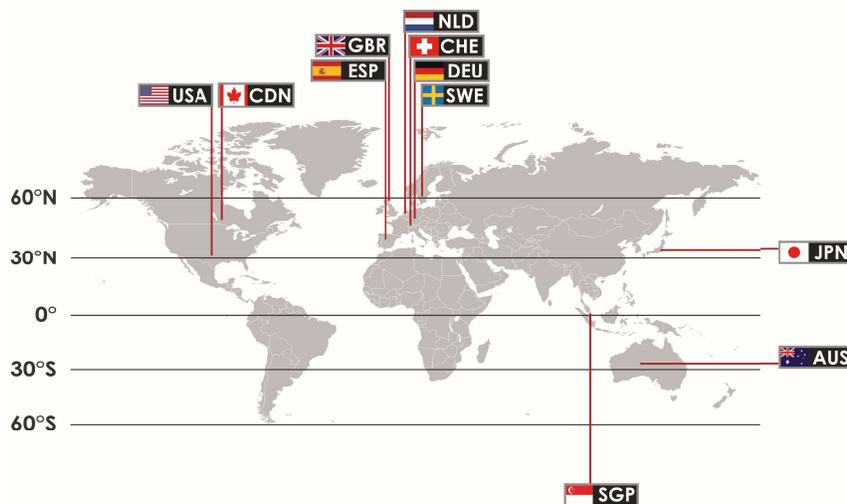


Figura 18. Mapa con la localización de observatorios de mediciones verticales (Adaptado de IDMP, 1997)

48 V., Chester., L., Thomas., R. Michael.(1981) *Proceedings of the International Energy Agency Conference on Pyranometer Measurements: Final Report : 16-20 March 1981, Boulder, Colorado*. Solar Energy Research Institute.

49 IDMP.(Enero 2016). Recuperado de <http://idmp.entpe.fr/>

1.6.1 MODELOS MATEMÁTICOS

Para que la energía solar pueda ser convertida en energía utilizable por el hombre, depende de la disponibilidad de este recurso, que varía sustancialmente en diferentes climas y regiones. Para definir y diseñar envolventes arquitectónicas más adecuadas a una zona en particular, es necesario caracterizar los diferentes aspectos de la radiación solar de la zona.

La falta de una estación u observatorio que registre la radiación solar vertical de forma constante o las dificultades para adquirir equipos de medición, en un principio llevó a realizar estimaciones de los valores basados en datos de radiación solar global horizontal (G_h) así como factores atmosféricos del sitio para obtener la componente vertical.

Este método pudo proporcionar conocimiento sobre la disponibilidad del recurso, pero su confiabilidad es reducida:

Al no poder considerar la variable fundamental que es la radiación solar, utilizar sólo las variables atmosféricas y geométricas nos aleja de la proximidad deseada, es decir, los modelos matemáticos solo pueden ofrecer mayor exactitud basados en mediciones reales del fenómeno de estudio.

Así comienzan a establecer modelos para estimar radiación solar vertical en base a datos reales de radiación solar vertical.

Por otro lado, es preciso tener en cuenta las condiciones que se tienen en nuestro país: Este proyecto abre una línea de investigación en México y al ser la primera, la colocación de futuras estaciones de medición será de manera paulatina. De esta forma, la creación de modelos para estimar la radiación vertical basados en mediciones reales, es la forma más pronta de estimar radiación en otros puntos del país y aplicar el conocimiento del recurso obtenido.

Usualmente, la radiación global es medida en planos horizontales, y la radiación en superficies inclinadas o verticales es calculada por medio de modelos llamados de composición o transposición. La radiación global en plano horizontal es descompuesta por correlaciones en componentes difusa y directa y a partir de estos datos, la radiación global en las superficies implicadas se vuelve a unir como la suma de radiación directa y difusa y la que se refleja desde el suelo y el entorno.

Las aplicaciones más populares de estos modelos en el ramo arquitectónico se encuentran el cálculo térmico de envolventes para usos pasivos y activos., y en la planeación y operación de sistemas de energía solar.

CLASIFICACIÓN DE MODELOS

En cuanto a la clasificación de los diferentes modelos, la parte difusa es la más estudiada, los mayores márgenes de error provienen del cálculo de esta.

De acuerdo a esto hay dos categorías principales de modelos de radiación solar, el isotrópico y el anisotrópico.

El modelo isotrópico asume que el cielo es una fuente isotrópica de la radiación difusa, es decir, la radiación difusa se recibe uniformemente de la bóveda celeste.

En modelos anisotrópicos la radiación difusa es igual a la suma de dos o tres componentes: Difusa circunsolar, resultante de la difusión progresiva de la radiación solar a lo largo de los rayos solares y

concentrada en la parte del cielo alrededor del sol formando un cono llegando a la superficie inclinada con un ángulo de incidencia igual a la radiación directa., una parte isotrópica que emite de manera uniforme desde el resto del cielo y una tercera parte llamada brillantez horizontal, más pronunciada en días claros, que viene de una delgada franja de cielo a lo largo del horizonte⁵⁰.

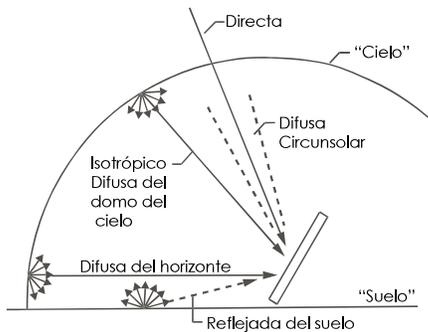


Figura 19. Componentes considerados en modelos anisotrópicos. (Reproducido de Duffie & Beckman, 2006).

Los modelos mencionados también calculan Iluminancia además de Irradiación Solar. Richard Perez en Europa desarrolló modelos para la eficacia luminosa e Irradiancia difusa en superficies inclinadas e iluminancia.

El modelo de Perez es de los modelos anisotrópicos más populares, arroja gran exactitud en cálculos de Irradiación vertical porque considera un rango más amplio de los tipos de cielo (3), lo cual da un mayor número de factores a introducir en el modelo matemático comparado con otros modelos existentes.⁵¹

El modelo se basa en el tratamiento de tres zonas de la componente difusa del cielo.

Las variables que considera son las siguientes: El valor inclinado y difusa horizontal de irradiancia o iluminancia., la pendiente de la superficie considerada, grado de anisotropía del circumsolar y el horizonte / cenit, las condiciones y brillo de cielo, Irradiancia difusa horizontal, la incidencia normal de irradiancia directa, masa de aire óptica relativa e irradiancia extraterrestre.

Basado en los modelos de Perez, Tariq Munner desarrolló un modelo para la Irradiancia e iluminancia global vertical. Estos modelos están basados en datos del clima de Europa y Norte América.

El modelo de Munner trata las superficies sombreadas y con luz solar por separado y distingue entre las condiciones nubladas y no nubladas de la superficie iluminada por el sol.

De forma general, las principales variables de entrada que tienen los modelos son:

La radiación misma	Tiempo
Índice de Claridad	Ángulo de Acimut
Ángulo cenital	Elevación Solar
Ángulo de incidencia	Tiempo Solar
Irradiancia Directa Horizontal	Irradiancia Difusa Horizontal
Masa de aire óptica	Irradiancia extraterrestre

⁵⁰ Cucumo et al., 1994.

⁵¹ Perez,R.,Ineichen,P.,Seals, R., Michalsky, J. & Stewart, R. (1990). Modelling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy*, 44(5), 271-289.

1.6.2 ESTUDIOS RELACIONADOS CON LA MEDICIÓN Y CÁLCULO DE LA RADIACIÓN SOLAR EN PLANOS VERTICALES PARA ESPACIOS ARQUITECTÓNICOS

La literatura disponible sobre el tema de la medición de la radiación solar en planos verticales y sus métodos de cálculo utilizados alrededor del mundo se muestran de manera significativa en la siguiente tabla que comprende un periodo discontinuo de los últimos 24 años.

Las investigaciones se han dado en su mayoría en Instituciones Educativas por cortos periodos de tiempo.

Año de publicación	Lugar de Medición	Tiempo de medición
1991	España	4 meses
1999	Reino Unido	2 meses
2000	Hong Kong	2 años
2000		3 años
2002		3 años
2007	Italia	6.5 años
2007	Reino Unido/ Reino de Bahrén	1 año
2015	República de Corea	2 años

Tabla 6. Mediciones representativas de Irradiación solar en superficies Verticales. Creación propia.

En estas investigaciones mencionadas, la problemática general por la cual se realizaron han sido las siguientes:

- Dimensionamiento incorrecto de la insolación pasiva de los edificios para el diseño arquitectónico.
- Mayor consumo energético de edificios por la cantidad de electricidad utilizada por el aire acondicionado.
- Rápido desarrollo de infraestructura y proyectos de edificios de oficina, problemas de consumo de energía, aumentaron la demanda del conocimiento de la radiación solar e iluminación en áreas verticales de rascacielos con grandes superficies acristaladas.

Para una evaluación óptima se requiere mínimo de un año de mediciones constantes (ciclo climatológico), con el fin de que los datos abarquen la mayor cantidad de condiciones climatológicas.

Muneer T, Alnaser W, Fairouz F. The insolation on vertical surface having different directions in the Kingdom of Bahrain. Desalination. 209 (2007) 269–274.

En el reino de Bahrain su localización geográfica, como la de México, es privilegiada. Se realizó un año de mediciones de Irradiación Global Solar en planos verticales en las cuatro diferentes orientaciones y en plano horizontal teniendo como sede su Aeropuerto Internacional.

Los resultados mostraron patrones normales, excepto en los lados Oeste y Este donde se esperaba tuvieran Irradiaciones simétricas, siendo el lado Oeste ligeramente mayor que el este. Los

promedios anuales en la orientación vertical sur fue de 11.6 MJ/m² recibiendo mayor energía en invierno y menor en el verano., 11.3 MJ/m² en el Oeste, 9.4 MJ/m² en el Este y 4 MJ/m² en el Norte.,

la medición horizontal fue de 22.5 MJ/m².

Estas mediciones se compararon con otras ciudades de latitudes similares para respaldar la veracidad de la medición, tomando en consideración diferencias de longitud, nivel del mar y calidad de cielo.

Li, D., & Lam, J. (2000). Measurements of solar radiation and illuminance on vertical surfaces and daylighting implications. Renewable Energy, 20(4), 389-404.

La investigación está enfocada en obtener un método sencillo que evalúe la eficiencia energética de los sistemas de ventanas en términos de ganancia de calor solar y equilibrio de luz natural en edificios de oficinas con aire acondicionado.

El rápido desarrollo de infraestructura y proyectos de edificios de oficina, problemas de consumo de energía, aumentaron la demanda del conocimiento de la radiación solar e iluminación en áreas verticales de rascacielos con grandes superficies acristaladas.

Los resultados de tres años de mediciones nos dicen que la orientación norte recibe mayormente la componente difusa con bajos valores, mientras que las otras superficies verticales reciben una cierta cantidad de componentes directos resultando en valores más altos.

La distribución de frecuencia acumulativa de la iluminancia exterior puede dar información para predecir ahorro de iluminación eléctrica. En el Hong Kong subtropical, más del 60% de las veces, la iluminancia interior puede ser proporcionada por la luz natural si la iluminancia exterior requerida es de 10 klux.

Las curvas de radiación vertical fueron útiles para evaluar diferentes esquemas de iluminación natural durante la fase de diseño inicial. Ejemplos prácticos en un edificio de oficinas genérica indican que el ahorro energético en el alumbrado eléctrico puede ser de 40-60 kWh / m² por año para las zonas del perímetro si los esquemas de iluminación natural con encendido-apagado y los controles de recarga se incorporan en el diseño arquitectónico y la construcción.

Li, D., Lam, J., & Lau, C. (2002). A new approach for predicting vertical global solar irradiance. Renewable Energy, 25(4), 591-606.

Se estimó la irradiación solar vertical basado en la radiación directa y componentes del albedo. Se realizaron dos años de mediciones para el desarrollo del modelo

El desempeño del modelo propuesto fue comparado con dos modelos anisotrópicos conocidos (Munier y Perez) basados en otro año de mediciones.

Los modelos analizados fueron adaptados a la región de estudio considerando el tipo de cielo predominante (índice de claridad), componente difusa del cielo y ángulo de incidencia. Se han presentado conjuntos de ecuaciones de regresión a diversos intervalos de altura solar y ángulo de incidencia para las superficies iluminadas por el sol y una segunda expresión para las superficies sombreadas.

El Modelo que mejor se adaptó a las cuatro orientaciones fue el modelo de Perez

El análisis estadístico indicó que el modelo propuesto tenía buena concordancia con los datos medidos en los planos verticales, menos efectivo que el modelo de Perez, pero su simplicidad resulta conveniente para arquitectos.

El análisis estadístico de los tres modelos indica que el modelo propuesto tiene el peor desempeño para la superficie sur, aunque su desviación de la raíz del error medio cuadrático (RMSE por sus siglas en inglés) es menor 20%. Para las otras orientaciones el nuevo modelo supera el modelo de Muner y su capacidad de predicción esta a la par que la del modelo de Perez.

En general, el modelo propuesto provee resultados satisfactorios para las cuatro orientaciones principales. Los valores de RMSE para todo el año varía de 18.3-34.6% para el modelo de Muner, 14.8-24.7% para el modelo de Perez y 19.3-27.3% para el modelo propuesto. El modelo de Muner es relativamente simple con solo tres coeficientes (índice de distribución de luminosidad, factor de claridad de cielo y factor de inclinación) contrario a los cuarenta y ocho del modelo de Perez.

Los factores atmosféricos como los aerosoles, ozono y oxido de nitrógeno así como la presión del sitio y el albedo tienen efectos significativos en la irradiancia solar, es decir, un modelo fiable debe incorporar todas estas variables.

Kong, H. J., & Kim, J. T. (2015). Evaluation of global vertical illuminance and irradiance models against data from Yongin, South Korea. Energy & Buildings, 91139-147. doi:10.1016/j.enbuild.2015.01.025

La investigación pretende determinar la energía térmica y su desempeño en un edificio para el análisis y diseño de los sistemas pasivos y activos.

Los edificios de Corea recientes presentan incorrecto diseño de estructuras que no consideran la abundancia de luz natural, dependiendo solo de iluminación artificial.

Se evalúan seis modelos de Irradiancia e Iluminancia usando dos años de mediciones, además de proponer un modelo para obtener la Irradiancia e Iluminancia global vertical.

El desempeño de los modelos fue evaluado por dos parámetros estadísticos: Raíz del error medio cuadrático y desviación media del error (RMSE y MBE, por sus siglas en inglés).

Todos los modelos presentaron altos porcentajes de MBE y RMSE para las superficies norte., las predicciones para la cara sur concordaron con los datos medidos.

Los resultados mostraron que el modelos de Perez es óptimo sólo para la irradiancia vertical, el modelo de Klucher para la Irradiancia Vertical e Iluminancia. Los valores más altos de MBE y RMSE se dieron en el lado vertical norte en todos los modelos. El rango de error en porcentaje del MBE para irradiaciones verticales es de 10.95 a 19.0% mientras que el de RMSE es de 17.12% a 29.82%.

Cucumo, M., De Rosa, A., Ferraro, V., Kaliakatsos, D., & Marinelli, V. (2007). Experimental testing of models for the estimation of hourly solar radiation on vertical surfaces at Arcavacata di Rende. Solar Energy, 81(5), 692-695.

Investigación dirigida a la mejora de calefacción pasiva de edificios, evaluación de plantas de fotovoltaicas.

Se realizó aproximadamente un año de mediciones en superficie horizontal y vertical (Norte,Sur,

Este y Oeste) . Dichas mediciones fueron comparadas por varios modelos de cálculo con modelos isotrópicos y anisotrópicos de cielo: Erbs, Reindl (también demoninado en orden de aumento de complejidad Reindl1, Reindl2,Reindl3), Skartveit, Hay and Davis,HDKR y el modelo de Perez.

En los resultados, el modelo de "Hay and Davies" es mejor para el lado Este y Oeste, el modelo de Perez es mejor para el lado Norte y el más estable para todas las orientaciones, el mejor modelo para el lado sur es el Isotrópico. Los mejores resultados de RMS fueron Perez-Skartveit para el lado Sur y Este, Perez-Reindl3 para el Oeste, Perez-Reindl2 para el Norte. Las precisiones de los modelos no varían mucho teniendo un 10% de rango exceptuando el norte con un 20%.

1.7 NORMATIVIDAD SOBRE EL USO DE LA RADIACIÓN SOLAR

La normatividad relacionada a la aplicación de la radiación solar en la ciudad de México están referidas al calentamiento de agua y sistemas de calentamiento termosolares.⁵²

- **NADF-008-AMBT-2005-** Que establece las especificaciones técnicas para el aprovechamiento de la energía solar en el calentamiento de agua .

Menciona los requerimientos mínimos de calidad, especificaciones técnicas de instalación, funcionamiento y mantenimiento de los sistemas.

Está dirigida a establecimientos medianos (51 a 100 empleados) y grandes (más de 100 empleados) y a establecimientos que realicen la remodelación total de sus instalaciones en la Ciudad de México, que requieran agua caliente para realizar sus actividades.

La capacidad mínima de operación del sistema de calentamiento de agua por medio del aprovechamiento de la energía solar deberá ser tal, que provea al menos 30% del Consumo Energético Anual por utilización de agua caliente (CEA) para cada establecimiento.

- **NMX-ES-001-NORMEX-2005-** Rendimiento térmico y funcionalidad de colectores solares para calentamiento de agua- métodos de prueba y etiquetado.

Su objetivo es establecer métodos de prueba para determinar el rendimiento térmico y las características de funcionalidad de los colectores solares que utilizan como fluido de trabajo agua.

Se enfoca en colectores solares que proporcionen únicamente agua caliente en fase líquida.

- **NMX-ES-002-NORMEX-2007** -Definiciones y terminología.

Establece los vocablos, simbología y definición de los conceptos más usados en la investigación y desarrollo de la tecnología para el mejor uso de la radiación solar como fuente alternativa de la energía.

Su campo de aplicación se encuentra en los campos relacionados con la Energía Solar y sus aplicaciones.

⁵² Comisión Nacional para el uso Eficiente de la Energía (Enero 2016).Recuperado de http://www.conuee.gob.mx/wb/CONAE/normas_y_nmx

- **NMX-ES-003-NORMEX-2008**- Requerimientos Mínimos para la Instalación de Sistemas Solares Térmicos, para Calentamiento de Agua.

Esta norma se extiende a todos los sistemas mecánicos, hidráulicos, eléctricos, electrónicos y demás que forman parte de las instalaciones de sistemas termo-solares de más de 500 litros.

Fija las condiciones técnicas mínimas que deben cumplir las instalaciones de sistemas para calentamiento solar de líquidos, especificando requisitos de durabilidad, confiabilidad y seguridad.

- **REGLAMENTO DE CONSTRUCCIÓN PARA EL DISTRITO FEDERAL**

CAPITULO IV DE LA INTEGRACIÓN AL CONTEXTO E IMAGEN URBANA

Art. 122.- El empleo de vidrios espejo y otros materiales que produzcan reflexión total en superficies exteriores aisladas mayores a 20 m² o que cubran más del 30 % de los paramentos de fachada se permitirá siempre y cuando se demuestre, mediante estudios de asoleamiento y reflexión especular, que el reflejo de los rayos solares no provocará en ninguna época del año ni hora del día deslumbramientos peligrosos o molestos, o incrementos en la carga térmica en edificaciones vecinas o vía pública.

Las descripciones anteriores se limitan a aplicaciones de calentamiento de agua y sistemas de calentamiento termosolares. En el reglamento de construcción da un pequeño señalamiento sobre la radiación solar desde un punto de vista térmico , aunque como tal no existe. Un mal diseño de fachadas, orientación, materiales o ventanas puede ocasionar demasiadas ganancias de calor. Lo anterior permite ver deficiencias de las normas y reglamentos de construcción.

MATERIALES Y MÉTODO

2

2.1 ETAPAS DESARROLLADAS

Las investigaciones referentes a las mediciones de radiación solar vertical descritas anteriormente presentan métodos variados, algunos similares entre sí, para llegar a los mismos puntos:

- La medición, visualización y caracterización del comportamiento de la radiación solar en fachadas a lo largo de un periodo de tiempo.
- Estimación del comportamiento del fenómeno a través de modelos matemáticos.

Dado que esta investigación coincide en estos puntos, fue importante analizar esos métodos para determinar cuál se adaptaba mejor al caso de estudio propio. A continuación se muestran las tres etapas a desarrollarse:

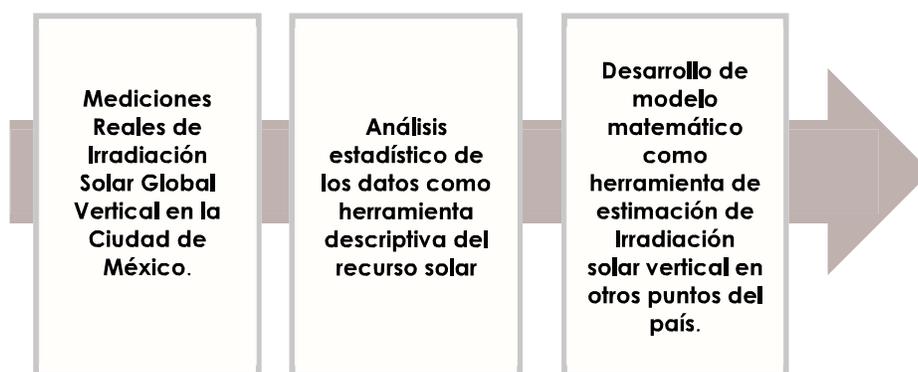


Figura 18. Esquema de procedimiento para el desarrollo experimental. Elaboración propia.

En este capítulo se describen los métodos elegidos a lo largo de estas tres etapas, mencionando también aspectos básicos contemplados como las características que hay que saber sobre los equipos de medición, su estandarización, causas de fallo, el montaje de las estaciones de medición, hasta la adquisición de los datos, controles de calidad, métodos empleados en el análisis y modelado de dichas series, organizándolos de acuerdo a los apartados que se presentan en el capítulo de resultados.

Se es explícito para servir a aquellos que quieran desarrollar estudios similares.

2.2 ASPECTOS BÁSICOS

Para caracterizar el fenómeno solar y obtener un modelo matemático más preciso, necesitamos mediciones y estas mediciones a su vez están basadas en su correcta obtención y validación de las mismas., es decir, todo comienza desde los equipos de medición. La exactitud de sus mediciones depende principalmente de sus características y errores que suceden por procedimientos de operación.

Características generales de piranómetros

Las características más importantes del piranómetro está en su termopar y en sus sensores.

Termopar: Es el elemento fundamental del piranómetro, empleado por la mayoría de las compañías especializadas como Eplab, Kipp & Zonen y EKO. Con estos se construyen termopilas:

La termopila es el conjunto de termopares conectados en serie de tal manera que la fuerza electromotriz total sea la suma de las fuerzas electromotrices de sus elementos. Un termopar consiste en la unión de dos metales de diferente material unidos en un extremo con los que se hace un par de juntas, si las juntas se ponen en contacto con diferentes contenedores de calor con una diferencia de temperatura, este circuito genera una fuerza electromotriz térmica conocido como efecto Seebeck.

El arreglo de los termopares se configura por áreas de juntas frías y áreas de juntas calientes. Las juntas calientes reciben el calor recubriendo esta área con un material negro de gran absorción, lo más aproximado al 100%. Esta área constituye realmente el sensor de radiación, su absorptividad espectral debe ser constante para todas las radiaciones de longitudes de onda del espectro actinométrico (de 0.3 μm a 4.0 μm) y sea lo más aproximado al 100%.

Las juntas frías van a un sumidero de calor que permita que la temperatura de ésta área, en buen contacto térmico con él, no se altere por la radiación incidente.

Sensores: Los sensores tienen las siguientes características físicas:

Característica:	a	b	c	D	e	f	g
		%	%	%	%	%	Seg. (Max)
Pirheliómetro							
Estándar Primario	± 0.2	---	± 0.5	± 0.2	± 1	± 0.2	25
1ra Clase	± 0.4	---	± 1	± 1	± 1	± 1	25
2da Clase	± 0.5	---	± 2	± 2	± 2	± 2	60
Piranómetros							
1ª Clase	± 0.1	± 3	± 1	± 1	± 1	± 1	25
2ª Clase	± 0.5	$\pm 5-7$	± 2	± 2	± 2	± 2	60
3ª Clase	± 1.0	± 10	± 3	± 5	± 5	± 5	240

Tabla 7. Clasificación de sensores por características físicas (Basada en Muhlia, 2006).

a: Constante de calibración o sensibilidad: Es la relación existente entre la radiación recibida por el instrumento y la señal eléctrica producida por el Sensor, se expresa en $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$.

b: Respuesta angular o geométrica: Es la variación de la sensibilidad del instrumento con la dirección de la radiación incidente.

c: Linealidad: Es la constante de la razón de cambio de la señal de salida respecto del cambio en la radiación incidente, lo cual se manifiesta en el hecho de que la sensibilidad sea constante para todo el rango de valores de la radiación incidente.

d: Estabilidad: Es la constancia de alguna de las características instrumentales con respecto a las variaciones de algún otro parámetro. Usualmente esta característica es la sensibilidad y su estabilidad es respecto al tiempo o edad del instrumento.

e: Respuesta espectral: Es la sensibilidad del instrumento a la radiación de diferentes longitudes de onda, o bien es la variación de la constante de calibración en función de la radiación de diferentes longitudes de onda.

f: Estabilidad por cambios en la temperatura: Es la variación de la sensibilidad y otras características del instrumento debidas a los cambios en la temperatura ambiente y del instrumento.

g: Respuesta dinámica o constante de tiempo: Es el tiempo necesario para que la señal de salida sea el $1/e$ de su valor al cambiar bruscamente la radiación incidente.

Estandarización:

Una vez conocidos las partes más importantes que conforman los piranómetros, se debe saber que estos no están aislados y entre ellos también existen jerarquías. Antes de colocarse en el sitio designado para su medición, los sensores deben calibrarse respecto de instrumentos de referencia, son llamados así porque sus características físicas y de diseño son capaces de medir de forma absoluta los flujos solares con un alto grado de exactitud.

Los Centros Radiométricos Mundiales, Regionales y Nacionales de la Organización Meteorológica Mundial (WMO), tienen la responsabilidad de calibrar los instrumentos radiométricos.

El Centro Radiométrico Mundial de Datos está encargado del mantenimiento de la referencia básica, es decir, el Grupo Mundial de Normalización (WSG) de instrumentos, que se utiliza para establecer la Referencia Radiométrica Mundial (WRR).

En el curso de las comparaciones internacionales (IPC), que se organizan cada cinco años, los instrumentos patrón de los centros regionales se comparan con el WSG, y sus factores de calibración se ajustan a la WRR. Éstos, a su vez, se utilizan para transferir la WRR periódicamente a los centros nacionales, que calibran los instrumentos de su red utilizando sus propios instrumentos de referencia.

El método toma en cuenta la existencia de un pirheliómetro de referencia el cual hubo de ser calibrado previamente respecto de un pirheliómetro estándar de referencia primario (escala basada en WRR). La Referencia Radiométrica Mundial representa la medición estándar de una unidad de irradiancia, en el S. I. de unidades, con una incertidumbre del $\pm 0.3\%$.

Esta referencia se establece en base al WSG formado por 7 radiómetros absolutos de cavidad. Estos radiómetros usan una cavidad como sensor cuya absorptividad típica es cercana a la de un cuerpo negro con un valor de aproximadamente 0.999 999 y una incertidumbre de $\pm 0.0003\%$.

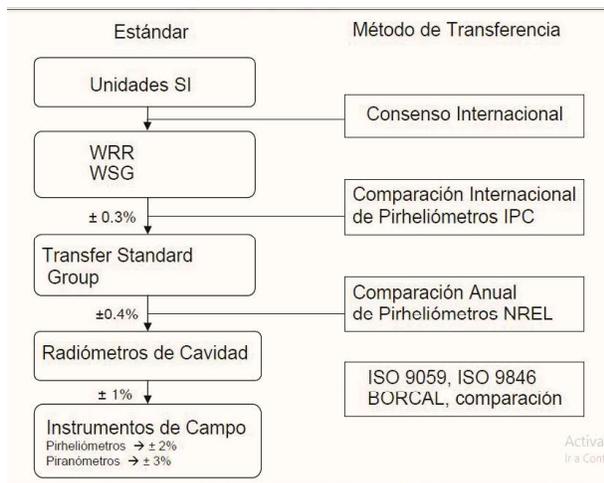


Figura 19. Transferencias de medidas al WRR. (Reproducido de Carrasco,2008)⁵³.

Procedimientos de operación-causas comunes de error en mediciones

Calibrados los piranómetros, se deben considerar los últimos aspectos antes de montar la estación de medición. En este punto, los errores que sucederán son sistemáticos, algunos de ellos podrán evitarse teniendo el debido cuidado, algunos otros no, pues son inherentes al equipo empleado. Se clasifican en dos categorías principales:

- Error de equipo e incertidumbre:
 - Respuesta de coseno
 - Estabilidad
 - Respuesta de azimut
 - No linealidad
 - Respuesta de temperatura
 - Anillo de sombra desalineado
 - Selectividad espectral
 - Error de radiación de onda larga (nocturno)

- Problemas y errores relacionados con la operación, se destacan:
 - Desalineamiento del anillo de sombra parcial o total
 - Campos eléctricos cerca de los cables
 - Polvo, nieve, rocío, gotitas de agua, excrementos de pájaros, etc.
 - Orientación y / o selección inadecuada de los sensores verticales de Radiación reflejada en el suelo
 - Nivelación incorrecta del sensor
 - Que los aparatos que conforman la estación de medición se apaguen
 - Sombras causadas por edificios adyuntos
 - Programación incorrecta en las constantes de calibración.

Definir la adquisición de la información

Debe definirse el flujo que seguirá la información una vez tomada la medición, de esta forma se evitan problemas en cuanto a replicación, alteración y otros problemas que se pueden presentar en el procesamiento de la información, logrando así, minimizar los riesgos de generar información no útil. El datalogger es la unidad central de procesamiento del sistema, es una pequeña computadora cuya función principal es recibir las lecturas realizadas por los sensores y almacenar en memoria

⁵³ World Meteorological Organization. (Noviembre 2015). *ASTM 824 Method for Transfer of Calibration from Reference to Field Pyranometers*. Recuperado de https://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_8_en-2012.pdf

propia la información, para posteriormente realizar el procesamiento de los datos.

2.3 ESTACIONES DE MEDICIÓN

Los diseñadores necesitan mínimo un año para evaluar el potencial de sus aplicaciones, por lo tanto se necesitan bases de datos de radiación solar a largo plazo. En esta sección se describe el montaje de las estaciones con los que cuenta la investigación: Instituto de Geofísica y Unidad de Posgrado, ambas situadas en el campus central (Ciudad Universitaria) de la Universidad Nacional Autónoma de México.



Figura 20. Localización las Estaciones de Medición en la unidad de posgrado e Instituto de Geofísica, Ciudad Universitaria, UNAM. Elaboración Propia.

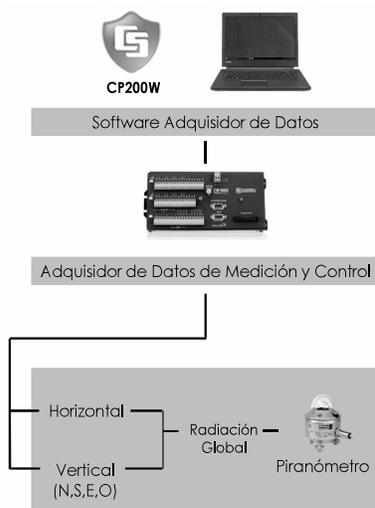


Figura 21. Esquema de Funcionamiento de las estaciones de medición. Elaboración propia.

Funcionamiento general de las estaciones de medición.

Las estaciones están situadas en un área despejada, libres de obstrucciones externas y accesibles para la inspección y limpieza de los equipos de medición.

La recopilación de datos es en intervalos de 1 minuto, comenzando antes del amanecer y finalizando después del atardecer.

Los piranómetros utilizados cuentan con un campo de visión hemisférico. Miden radiación solar en superficies horizontal y verticales (90° en fachadas norte, sur, este y oeste).

Los sensores utilizados fueron debidamente referenciados a la escala radiométrica mundial. Un adquirente de datos (data logger) es instalado para monitorear, calcular y almacenar los registros. Los datos almacenados en milivolts se convierten en W/m^2 mediante la constante de calibración de cada piranómetro.

Observatorio de medición 1

Situada en el Observatorio de Radiación Solar (ORS) del Instituto de Geofísica, ubicada geográficamente a $19^{\circ} 20' 01'' N$, $99^{\circ} 11' 54'' O$ a una altitud de 2268 m sobre el nivel del mar.

Las mediciones brutas de un año de Irradiación Solar Global Vertical y Horizontal (2014) han sido procesadas. Adicionalmente, las radiaciones reales horizontales directa y difusa fueron suministradas para la evaluación de modelos matemáticos descritos más adelante.



Figura 22. Imagen de la colocación de Piranómetros en la Estación de Medición Instituto de Geofísica UNAM. Elaboración propia.

La colocación de los equipos se dispuso de la siguiente manera:

1,2,3,4. Piranómetros midiendo radiación global vertical en fachadas norte, este, sur y oeste respectivamente.

5. Piranómetro de radiación global horizontal.

6. Pirheliómetro de radiación directa horizontal.

7. Piranómetro de radiación difusa horizontal.

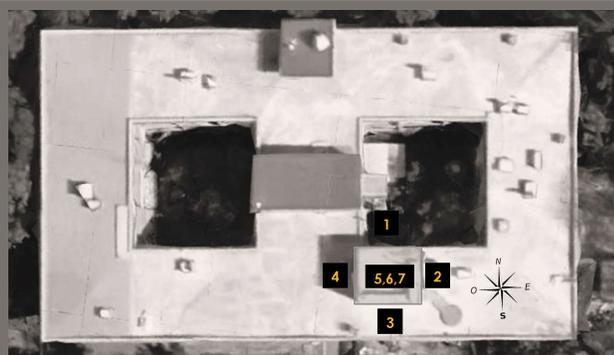


Figura 23. Vista en planta de la colocación de los aparatos de medición. Estación Instituto de Geofísica. Elaborado con base en google maps.



Figura 24. Datalogger y equipo de cómputo para el almacenamiento de los datos. Elaboración propia.

La veracidad de la medición de los piranómetros fue probada calibrándolos con un piranómetro de referencia, dejándolos en estado óptimo para las mediciones.

Se verifica que los sensores manden señal al datalogger para proceder a su colocación final.

La figura 24 muestra el detalle del datalogger utilizado y su conexión con el equipo de cómputo para la visualización y descarga de datos.



Figura 25. Colocación de piranómetros. Elaboración propia.

Los sensores se colocaron a una altura de 3.50 y 4.00 metros.

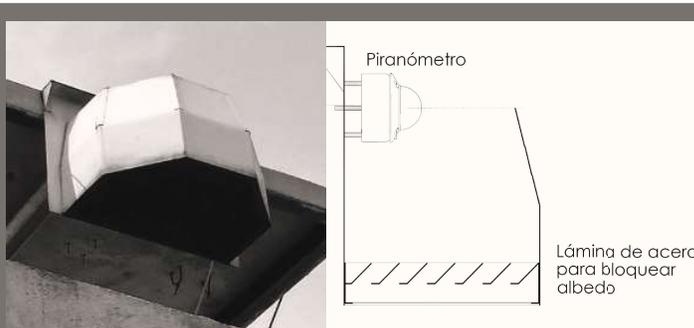


Figura 26. Piranómetro vertical y corte detalle de la estructura laminada. Elaboración propia.

Para esta estación, se diseñaron estructuras de lámina de acero que cubren los piranómetros verticales para evitar que los sensores reciban radiación reflejada del suelo; se han pintado de blanco en el exterior para bloquear el albedo.

Observatorio de medición 2

La estación de medición se localiza en la azotea del edificio "J", en uno de los módulos de pruebas experimentales de la Unidad de Posgrado, cuyas coordenadas geográficas son $19^{\circ}18'33.59''\text{N}$, $99^{\circ}11'5.73''\text{O}$. Las mediciones brutas de un año de radiación solar vertical pertenecientes al año 2016 y parte del 2017 han sido procesados.



Figura 27. Dimensiones de la azotea de Posgrado y módulo. Elaboración propia.

La colocación de los equipos se dispuso de la siguiente manera:

1,2,3,4. Piranómetros radiación global vertical en fachadas este, sur, oeste y norte respectivamente.

5. Piranómetro de radiación global horizontal.



Figura 28. Vista en planta de la colocación de los aparatos de medición. Estación posgrado. Elaboración con base en google maps.



Figura 28. Calibración de piranómetros. Elaboración propia.

Nuevamente, los piranómetros fueron calibrados con un piranómetro de referencia, dejándolos en estado óptimo para las mediciones.

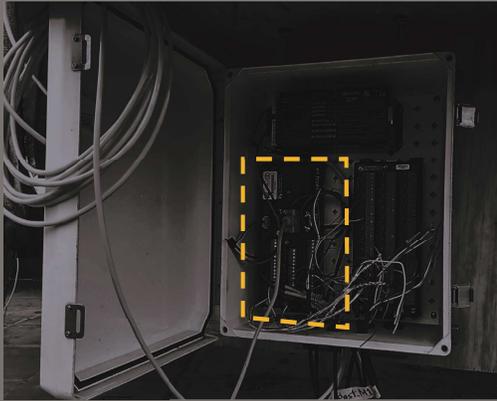


Figura 30. Datalogger y equipo de cómputo para el almacenamiento de los datos. Elaboración propia.

El datalogger fue colocado en la parte inferior del módulo de experimentación. Para la recolección de datos, se visita el módulo cada 15 días y se extraen los datos mediante puerto usb - computadora portátil.

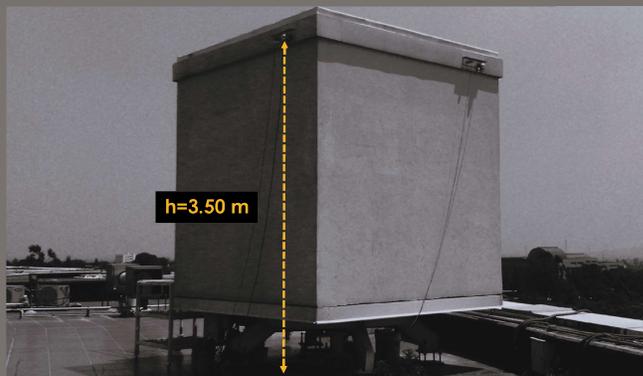


Figura 31. Colocación de piranómetros. Elaboración propia.

Para esta estación, el albedo es considerado en las mediciones, los equipos no tienen alguna estructura adicional. Los sensores se colocaron a una altura de 3.50 metros.

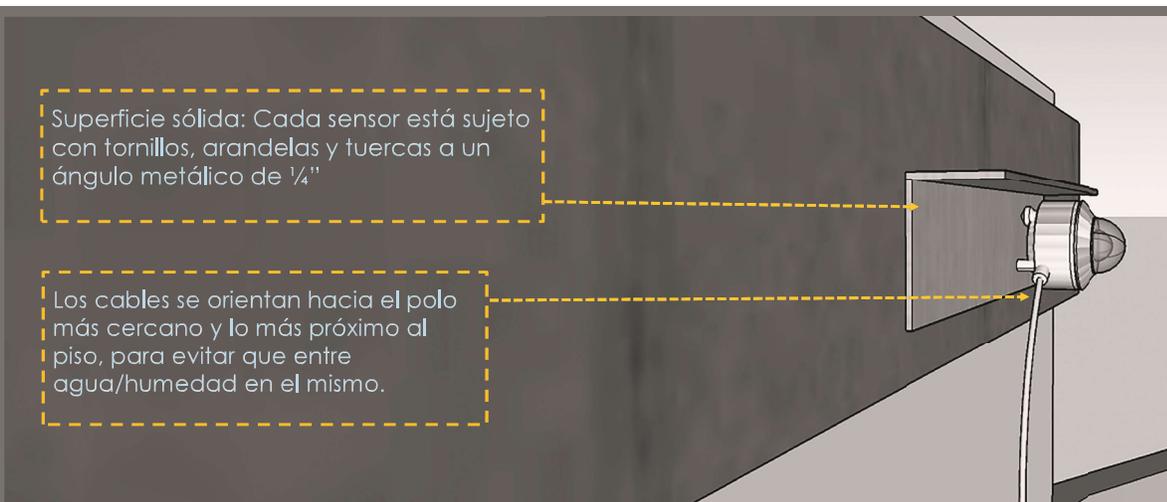


Figura 32. Sujeción de piranómetros al modulo de experimentación. Elaboración propia.

Equipos de estación de medición

Equipo	Marca	Modelo	Parámetro	Unidad de Medida
Estación Instituto de Geofísica				
Piranómetro	Kipp & Zonen	CMP11	Radiación global vertical	Volts
		CMP21	Radiación global horizontal	W/m ²
Pirheliómetro		CHP1	Radiación difusa horizontal	
Adquisidor de Datos	Campbell Scientific	CR-1000	Voltaje	W/m ²
		CR-3000		
Estación Unidad de Posgrado				
Piranómetro	Kipp & Zonen	CMP11	Radiación global vertical	W/m ²
Adquisidor de datos	Campbell Scientific	CR-1000	-	-
Software de Adquisidor de Datos	Campbell Scientific	PC 200W 4.3	Voltaje	W/m ²

Tabla 8. Listado de equipo utilizado en cada estación de medición. Elaboración propia.

2.4 PROCESAMIENTO DE DATOS

Como ya se había mencionado, los datos con los que cuenta esta investigación son minutales, con más de un año de mediciones juntando las dos estaciones, formando una gran cantidad de registros con los que se tienen que trabajar.

Para ello se define una estrategia para tratar los datos y la selección de herramientas de software que permitan flexibilidad en ello:

Dado que las mediciones de la estación Instituto de Geofísica no consideran el albedo (una variable más compleja de determinar y manejar) y las de la estación Unidad de Posgrado sí. Se parte de la lógica de ir de menor a mayor complejidad, y que mientras menos variables se manejen es más sencillo obtener resultados concretos., por lo que aunque la conformación de las bases de datos se lleva de manera continua, para el análisis de estas, primero se analizan los datos de la estación Geofísica.

TECNICAS COMPUTACIONALES

Técnicas computacionales son utilizadas para compilar los datos de Irradiación solar, analizarla y crear la estimación de modelos. El lenguaje de programación es utilizado para facilitar este proceso. La recopilación de datos se lleva en el programa de Excel. Para comparar los datos obtenidos con los modelos de la literatura y obtener un factor de corrección para adaptarlo a la Cd. de México se utiliza el programa Matlab. La razón reside en que es uno de los programas más usados por profesionales dedicados a la energía solar y por su capacidad de manejar grandes cantidades de datos.

GRAFICAS DEL COMPORTAMIENTO DE LA RADIACIÓN

Dentro de las técnicas computacionales, las gráficas no solo sirven como medio de expresión, sino también como medio de análisis y corroboración de los datos. Podemos apoyarnos en la geometría solar para tener una idea del comportamiento de la radiación. Las siguientes gráficas muestran un ejemplo sobre el comportamiento ideal de la radiación global diaria en superficies horizontales y verticales con diferentes orientaciones en lo que sería un día despejado de nubes en la Ciudad de México.⁵⁴

Por la orientación del lugar, la fachada norte recibe más que la fachada sur. En el solsticio de invierno tenemos menor cantidad de radiación por el menor número de horas de insolación. La radiación en la superficie Sur aumenta y la horizontal disminuye, ya que en el solsticio de invierno, el sol se encuentra inclinado hacia la fachada sur del edificio.

54 Zeevaert, Leonardo. *Interacción del Medio Ambiente y la envolvente Arquitectónica*. Apuntes de seminario de Interacción con el Medio. Posgrado de Arquitectura. Universidad Nacional Autónoma de México.

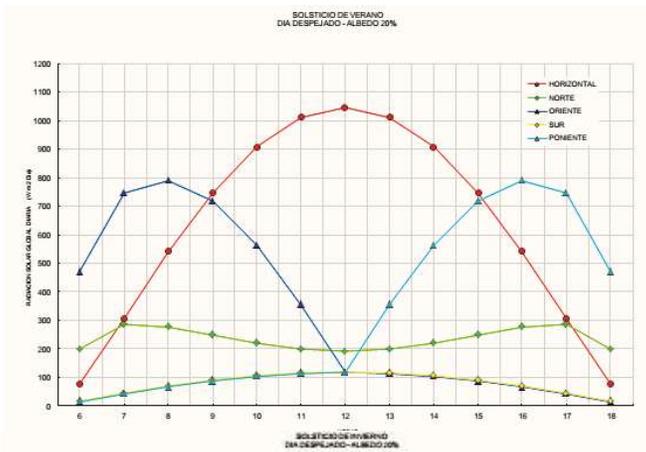


Figura 33. Gráfica de Radiación Solar en Verano (Tomdo de Zeevaert, 2013)

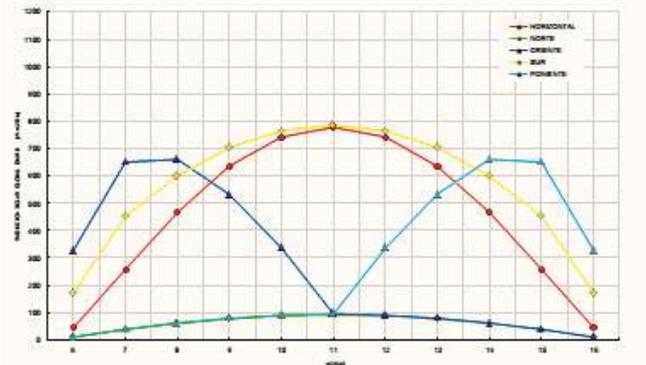


Figura 34. Gráfica de Radiación Solar en Invierno (Tomado de Zeevaert, 2013)

Los equinoccios nos muestra la cantidad de radiación solar que existe entre los dos extremos anteriores. En esta gráfica el plano horizontal recibe más radiación que el plano vertical. También se muestra la simetría existente de la radiación recibida de la fachada este y oeste en todas las épocas del año.

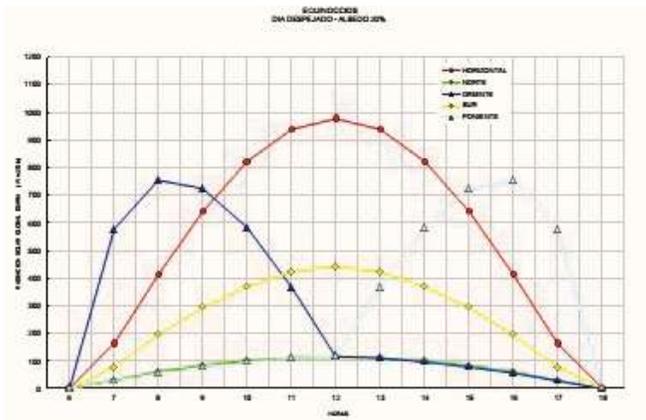


Figura 35. Gráfica de Radiación Solar en Equinoccios.

2.4.1 CONTROL DE CALIDAD DE DATOS

Como se vio anteriormente, hay diversas fuentes de errores en las mediciones de la radiación solar, algunas de ellas inevitables. Por lo tanto, es necesario identificar los datos atípicos.

Varias instituciones e investigadores se han dedicado a estudiar la identificación de datos atípicos; su común denominador es tratar la calidad de los datos obtenidos a través de filtros o niveles de pruebas, variando estos niveles entre cada institución.

Para fines de esta investigación, se ha elegido una combinación de los dos primeros niveles planteados por La Commission Internationale de l'éclairage 'CIE' (1994)⁵⁵, la investigación de Danny H. W. Li, Joseph C. Lam y Chris C.S. Lau,⁵⁶ y el programa de la Comisión Europea Mesor (Management and Exploitation of Solar Resource Knowledge por sus siglas en inglés) a su vez referenciado a la Organización Meteorológica Mundial.⁵⁷

El primer nivel o filtro es utilizado para generar las bases de datos de Irradiación Solar Global y describir el comportamiento del recurso solar en las fachadas.

Para el análisis y desarrollo de modelos de cálculo de transposición se han utilizado los dos niveles, es en el segundo nivel donde se utilizan datos adicionales de radiación solar horizontal directa y difusa del Instituto de Geofísica para evaluar por primera vez cómo se comportan estos modelos con datos reales de la Cd. de México.

- Primer filtro
 - Establece límites físicos individuales para las componentes global, directa y difusa:

Parámetro	Min	Max
Global Sw Downward	$-4 \frac{W}{m^2}$	$G_{sc} \times \epsilon \times 1.5 (\cos\theta_z)^{1.2} + 100 \frac{W}{m^2}$
Diffuse Sw Downward	$-4 \frac{W}{m^2}$	$G_{sc} \times \epsilon \times 0.95 (\cos\theta_z)^{1.2} + 50 \frac{W}{m^2}$
Direct Normal Sw Downward	$-4 \frac{W}{m^2}$	$G_{sc} \times \epsilon$

Tabla 9. Límites físicos individuales para la radiación Global, Directa y Difusa (Reproducido de MESOR,2016).

Donde G_{sc} es la constante solar, ϵ es la corrección de excentricidad y θ_z el ángulo cenital.

El programa de la comisión Europea Mesor establece estos parámetros también basados en lineamientos de la Organización Meteorológica Mundial.

La WMO recomienda un valor para la constante solar, también nombrado radiación extraterrestre, de 1367 w/m². En teoría, la radiación que llega a la tierra no debería sobrepasar este valor.

⁵⁵ CIE.(1994). *Guide to recommended practice of daylight measurement*. CIE. 109.CIE.Vienna.

⁵⁶ Li, D.,Lam, J., & Lau,C. (2002). A new approach for predicting vertical global solar irradiance. *Renewable Energy*, 25 (4), 591-606.

⁵⁷ Mesor Management and Exploitation of Solar Resource Knowledge.(Octubre 2016).Recuperado de <http://www.mesor.org/home.html>.

No obstante, este filtro deja un poco de holgura para las mediciones que presentan un fenómeno llamado "efecto lupa"., esto ocurre cuando la radiación es reflejada nuevamente hacia la superficie terrestre por una cantidad considerable de nubes en el cielo, llegando a registrar mayores valores que la constante solar.

Para corroborar que este efecto ha sucedido y no fue un error inherente en el equipo de medición se utiliza la cámara de cielo (fig34). La cámara toma imágenes cada minuto y entrega reportes de los porcentajes de nubes.



Figura 36. Imagen ejemplo de cámara de cielo. (Imagen perteneciente a la sección de Radiación Solar. Instituto de Geofísica.

- o La CIE recomienda rechazar las medidas resultantes del error de coseno de los piranómetros, descartando los datos con altitud solar(α) menores de 5°.
- De todos los errores, el efecto coseno es el más evidente y ampliamente reconocido., es la respuesta del sensor al ángulo en el que la radiación incide en el área de absorción. Cuanto más agudo sea el ángulo del sol, es decir, al amanecer y el atardecer, mayor será el error.
- Segundo Filtro:
 - o Este nivel trata sobre la redundancia de las mediciones, es decir, a la interrelación entre las componentes global, directa y difusa. Mesor recomienda los siguientes límites:

Parámetro	Condicionante	Límites
$\frac{G_h}{G_d + G_b \cos \theta_z}$	$\theta_z < 75^\circ, G_d + G_b \cos \theta_z > 50 \frac{W}{m^2}$	$1.0 \pm 8\%$
$\frac{G_h}{G_d + G_b \cos \theta_z}$	$93^\circ > \theta_z > 75^\circ, G_d + G_b \cos \theta_z > 50 \frac{W}{m^2}$	$1.0 \pm 15\%$
$\frac{G_d}{G_h}$	$\theta_z < 75^\circ, G_h > 50 \frac{W}{m^2}$	< 1.05
$\frac{G_d}{G_h}$	$93^\circ > \theta_z > 75^\circ, G_h > 50 \frac{W}{m^2}$	< 1.10

Tabla 10. Límites físicos de la relación entre la radiación Global, Difusa y Directa. (Reproducido de MESOR, 2016).

- Se rechazan todos los datos horizontales y verticales cuando la radiación directa computada es mayor que su radiación vertical global medida correspondiente. Lo anterior se refiere a la interrelación de la radiación global horizontal con las radiaciones globales verticales. En la elaboración de modelos de transposición solar, la radiación solar global real horizontal es utilizada para obtener la global vertical., y esta a su vez es comparada con la medición real medida para validarse. Recordemos que la radiación global es la suma de la radiación directa y difusa, si una de las partes es mayor que el todo, autores como Li, D., Lam, J., & Lau, recomiendan descartar estas mediciones
Para quedarnos con los datos que representen el comportamiento general de la radiación.

SISTEMA DE ETIQUETAS

Los filtros descritos se trasladan al lenguaje de programación para evaluar los datos. Dependiendo de las condiciones de cada dato, ya sean valores perdidos, que no cumplan las condiciones de cada filtro o los que si los cumplan, se le asigna una marca numérica.

Parámetro	Condición
-1	Para valores perdidos
1	Para los datos buenos
2	Cuando los datos no superaron los límites de la relación de la radiación global, directa y difusa
3	Cuando los datos no superaron los límites de la relación radiación difusa-global
4	Cuando los datos superaron la constante solar/radiación global extraterrestre

Tabla 11. Sistema de etiquetas utilizado. (Basado en MESOR,2016).

La utilidad de las etiquetas es su flexibilidad, permite manejar los datos sin necesidad de que se modifique o afecte la base de datos original., basta con especificar/condicionar que solo se usen los datos marcados con "1", es decir los valores buenos.

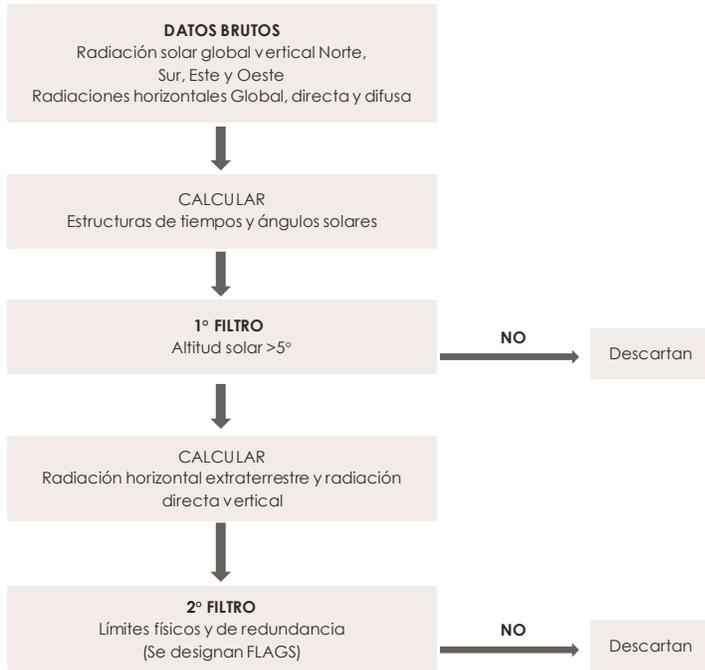


Figura 37. Diagrama para el control de calidad de datos en MATLAB. Elaboración propia.

COMPARACIÓN DE MEDICIONES

Obteniendo promedios mensuales y anuales diarios de la radiación solar global en los planos verticales, se hace una validación de datos utilizada por Muneer, Alnaser y Fairouz⁵⁸: los resultados obtenidos fueron comparados con países listados en la literatura⁵⁹ teniendo latitudes similares a la Ciudad de México, tanto para la irradiación horizontal como para la vertical.

Para la irradiación global horizontal, México (Observatorio 1, 19° 20' 01'' N, 99° 11' 54'' O, 17.98 MJ/m²), se comparó con San Juan, Puerto Rico (18.4°N, 18.61 MJ/m²), Honolulu, Hawaii (21.3°N, 18.60 MJ/m²) y Bahrein (26°N, 22.5 MJ/m²)

Para la irradiación vertical, los resultados se compararon con Bahrein (26°N), siendo los resultados consistentes con los mencionados, considerando la latitud, nivel del mar y diferencias cualitativas en el cielo. (Fig. 38 y 39).



Figura 38. Cercanía de latitud geográfica de estaciones de medición Del Reino de Bahrein y Cd. de México. Elaboración propia.

⁵⁸ Muneer, T., Alnaser, W. and Fairouz, F. (2007). The insolation on vertical surface having different directions in the Kingdom of Bahrain. *Desalination*, 209(1-3), pp. 269-274.

⁵⁹ Muneer, T., Gueymard, C., Kambezidis, H., & Muneer, T. (2004). *Solar radiation and daylight models: (with software available from companion web site)*. Oxford: Elsevier Butterworth Heinemann.

Lo anterior se confirma en la siguiente gráfica donde las mediciones verticales de ambas ciudades tienen magnitudes y comportamiento de radiación solar similar.

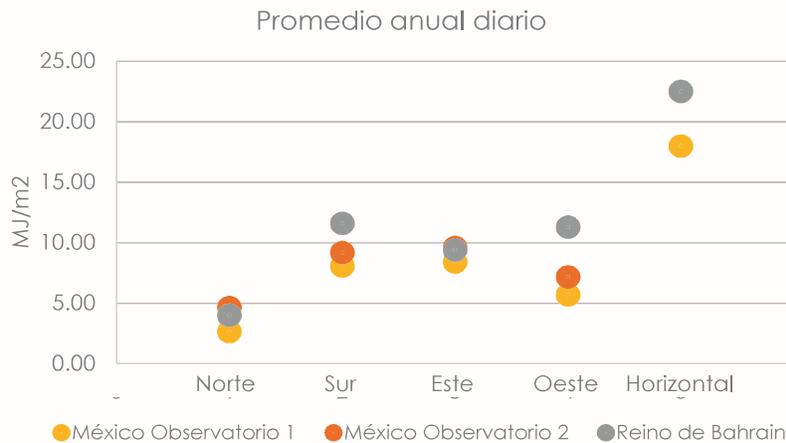


Figura 39. Gráfica de comparación de mediciones delReino de Bahrein y Estaciones de medición en Cd. de México. Ciudad Universitaria. 19° 20' 01''N, 99°11'54'' O, 19°18'33.59''N, 99° 11' 5.73'' O . Elaboración propia.

2.5 CARACTERIZACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR

Cuando las bases de datos han pasado todos los controles de calidad, se puede comenzar a caracterizar el fenómeno de la radiación en las fachadas y la obtención de un modelo matemático adaptado a la ciudad de México.

Para la caracterización de la radiación solar los datos son tratados con estadística básica descriptiva y graficados para obtener un panorama visual del comportamiento de la radiación en las fachadas. Aunque los datos se suministran en formato horario, para los diferentes análisis se agregan en valores diarios, y se calculan promedios por día juliano, mensuales y anuales.

2.6 SELECCIÓN DE MODELOS

“Las matemáticas son el lenguaje
en el que habla la naturaleza”
Galileo.

La representación del fenómeno solar a través de modelos nos permitirá estimar la Irradiancia Solar Vertical en otras partes del país, dada la escasez de ellos, a partir de la radiación horizontal que sí se encuentra disponible en gran parte del territorio Mexicano.

La irradiancia solar global sobre una superficie con ángulo de inclinación (β) se calcula generalmente por la suma de la irradiancia directa (I_b), difusa (I_d) y la reflejada del suelo (I_r).

$$I_{\beta} = I_b + I_d + I_r$$

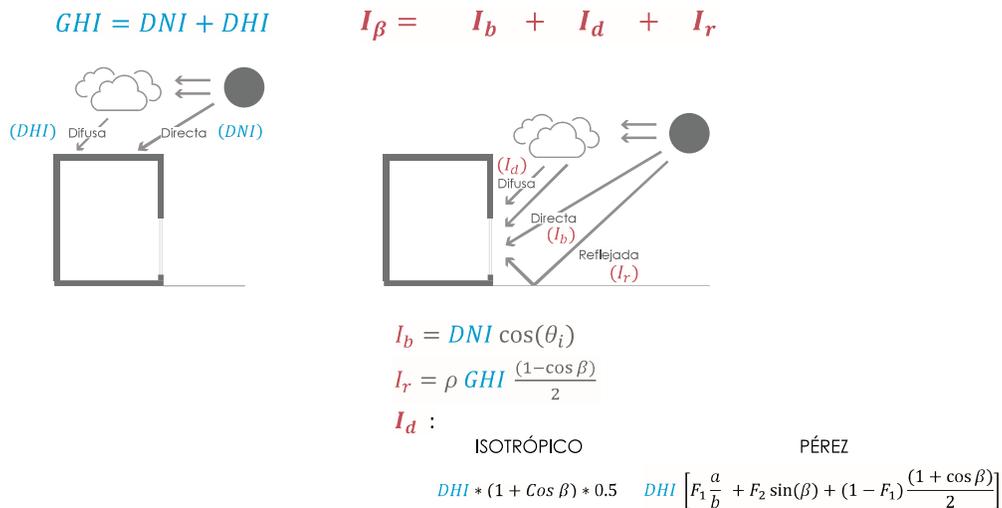


Figura 40. Imagen de la representación matemática de la radiación directa, difusa y global en techo y fachada. Elaboración propia.

La irradiancia directa (I_b) que llega en las fachadas es determinada por la proyección de la irradiancia directa normal horizontal (DNI) en esas superficies.

$$I_b = DNI \cos(\theta_i)$$

Donde (θ_i) es el ángulo de incidencia que puede ser fácilmente computada por relaciones trigonométricas del cenit, azimuth, la superficie vertical y ángulos acimutales.

La radiación que llega a las fachadas reflejada del suelo (I_r) es calculada asumiendo que la radiación global horizontal (GHI) es reflejada de forma uniforme en cada punto del suelo (Liu and Jordan, 1963).

$$I_r = \rho GHI \frac{(1 - \cos \beta)}{2}$$

Siendo ρ el albedo del suelo y β el ángulo de inclinación de las fachadas.

Para el cálculo de radiación difusa (I_d) en superficies verticales, se ha seleccionado dos modelos de transposición clásicos: el Isotrópico de Hotel and Woertz, 1942 como es citado por Duffie y Beckman en 1991⁶⁰., y el modelo de Richard Pérez realizado en 1990.⁶¹.

El modelo isotrópico es más sencillo y requiere de menos variables:

$$DHI * (1 + \cos \beta) * 0.5$$

Donde DHI es la irradiancia difusa horizontal, la superficie de inclinación en este caso es 90 por ser superficie vertical.

El modelo de Pérez es uno de los modelos anisotrópicos más populares. Pérez ha desarrollado varios modelos de este tipo durante años tanto para irradiación como para iluminación.

Su modelo generalmente provee resultados con alta precisión, siendo más complejo que el isotrópico ya que toma en cuenta las tres partes de la radiación difusa (radiación isotrópica difusa, radiación circunsolar y el brillo del horizonte) que son computados usando parámetros derivados de estudios empíricos.

En este modelo la radiación difusa se calcula:

$$I_d = DHI \left[F_1 \frac{a}{b} + F_2 \sin(\beta) + (1 - F_1) \frac{(1 + \cos \beta)}{2} \right]$$

Los términos a y b son los siguientes:

$$a = \max(0^\circ, \cos \theta)$$

$$b = \max(\cos 87^\circ, \cos \theta z)$$

Donde θ es el ángulo de incidencia del sol en la superficie vertical y θ_c el ángulo cenital.

Los coeficientes F_1 y F_2 son funciones de tres variables que describen las condiciones del cielo:

1. Ángulo cenital θ_c (grados)
2. Claridad de cielo, ε , expresado como:

$$\varepsilon = \left[\frac{DHI + DNI}{DHI} + 5.535 \times 10^{-6} Z^3 \right] / (1 + 5.535 \times 10^{-6} Z^3)$$

3. Brillantes de cielo, Δ , dado como:

$$\Delta = DHI * m / I_{on}$$

⁶⁰ Duffie, J.A., Beckman, W.A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Hoboken, N.J.: Wiley.

⁶¹ Stewart, R., Perez, R., Michalsky, J., Ineichen, P., & Seals, R. (1990). Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy*, 44(5), 271.

Donde I_{on} es la Irradiación extraterrestre (W/m²), DHI la radiación directa horizontal y m la masa de aire absoluta.

El modelo de Pérez considera un conjunto de categorías para ε , y cada una de ellas puede ser expresados como funciones lineales de z y de la siguiente manera:

$$F1 = \max[0, f11 + f12\Delta + f13Z]$$

$$F2 = \max[f21 + f22\Delta + f23Z]$$

Los coeficientes para son dados por Pérez en la siguiente tabla:

Categoría	F11	F12	F13	F21	F22	F23
Coeficientes de Irradiación						
1	-0.008	0.588	-0.062	-0.060	0.072	-0.022
2	0.130	0.683	-0.151	-0.019	0.066	-0.029
3	0.330	0.487	-0.221	0.055	-0.064	-0.026
4	0.568	0.187	-0.295	0.109	-0.152	-0.014
5	0.873	-0.392	-0.362	0.226	-0.462	0.001
6	1.132	-1.237	-0.412	0.288	-0.823	0.056
7	1.060	-1.600	-0.359	0.264	-1.127	0.131
8	0.678	-0.327	-0.250	0.156	-1.377	0.251

Tabla 12. Tabla de coeficientes utilizados en modelo Pérez. (Reproducido de Perez, 1990).

2.6.1 EVALUACIÓN DE MODELOS

Después de que los datos pasan por el primer y segundo filtro, las medidas de irradiación solar horizontal y vertical se convierten a medias horarias. Como resultado, se dispone de una base de datos preparada para el entrenamiento de modelos estadísticos y semiempíricos.

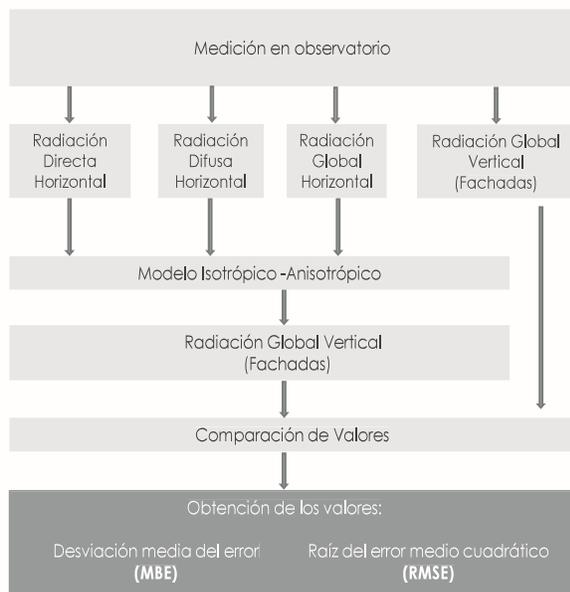


Figura 41. Diagrama de la evaluación de la precisión de los modelos de transposición.

Elaboración propia.

De forma general (fig.41), la evaluación de modelos consiste en la comparación de los valores reales obtenidos por los piranómetros en la estación de medición y los valores obtenidos por modelos matemáticos.

Esta comparación se evalúa con la obtención de los indicadores estadísticos Desviación Media del Error y la Raíz del Error Medio Cuadrático MBE y RMSE (MBE y RMSE, por sus siglas en inglés).

Los valores MBE y RMSE son obtenidos con el programa de cómputo Matlab; que cuenta con librerías estadísticas y códigos de los autores elegidos (librería PV_LIB Tool Box) para probar los modelos con los datos reales medidos.

2.6.2 INDICADORES ESTADÍSTICOS

La Desviación media del error (MBE) es un indicador de la tendencia que tiene el modelo, ya sea que tiende a subestimar o sobreestimar los valores modelados. Este indicador estadístico se puede ser expresado como valor absoluto o en porcentaje. Un MBE cercano a cero es el deseado.

El MBE es dado por la siguiente ecuación:

$$\frac{\Sigma(\text{Valor estimado} - \text{Valor real observado})}{\text{Numero de valores reales observados}}$$

La Raíz del Error Medio Cuadrático (RMSE) da un valor del nivel de dispersión que produce el modelo. La importancia de esta prueba estadística es que destaca la legibilidad y repetibilidad del modelo. Proporciona una comparación de término a término de la desviación real entre los valores predichos y los medidos.

El RMSE es una medida de la desviación absoluta, es decir, siempre es positivo. Valores bajos de RMSE Indica un mejor modelo. Su ecuación es la siguiente:

$$\sqrt{\frac{\Sigma(\text{Valor estimado} - \text{Valor real observado})^2}{\text{Numero de valores reales observados}}}$$

También se considera el coeficiente de determinación (r^2), es el indicador más importante de la bondad del ajuste. Este coeficiente puede tener valores entre 0 y 1, los resultados más cercanos a 1 significan un mejor resultado de regresión.

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 - \sum_{i=1}^n (y_i - \widehat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

2.6.3 PRUEBA DE MODELOS

Los modelos elegidos (Isotrópico y el Pérez) para calcular la irradiancia difusa para su posterior suma con los demás componentes solares y obtener la irradiancia global en fachadas, son probados con los datos medidos en el año 2014, ya que cuenta con el año completo de mediciones de radiación solar global difusa, directa y global horizontal así como las radiaciones globales verticales.

Como se dijo con anterioridad, la componente difusa es la más compleja de modelar, dando los mayores porcentajes de error en los cálculos de irradiancia global. En los modelo de transposición, su cálculo se da a partir de la radiación directa y difusa horizontal.

Debido a la practicidad y popularidad de las radiaciones globales horizontales en México, se realizaron dos pruebas que consideran sólo la irradiancia global horizontal (*GHI*) como único factor de entrada para ambos modelos. En este caso, para calcular la irradiancia directa y difusa horizontal (*DNI* y *DHI*) necesarias para la transposición, se recurre a otros dos modelos (Louche y Dirint), lo que también implica mayor grado de error en el cálculo.

Para evaluar si el desempeño de los modelos con solo la irradiancia global como entrada dista mucho de haber podido utilizar la irradiancia difusa y directa horizontal reales, las dos últimas pruebas evalúan el desempeño de los modelos con estas dos componentes.

Cada prueba arroja como resultado la irradiancia global para las fachadas norte, sur, este y oeste (fig. 42).

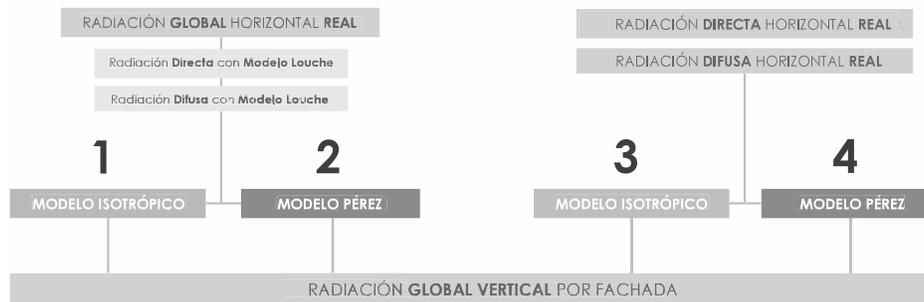


Figura 42. Diagrama de pruebas para la evaluación de la precisión de los modelos de transposición. Elaboración propia.

2.6.4 MODELO NUEVO

Al existir mayor número de estaciones de medición de radiación global horizontal en nuestro país y la nula existencia de estaciones de medición de radiación global vertical, se propone el desarrollo de un modelo matemático que tenga como único factor de entrada la radiación global horizontal. Los resultados de las cuatro pruebas descritas anteriormente esclarecerán si esta propuesta es factible; los resultados también indicarán si es factible el desarrollo de un nuevo modelo o retomar alguno de los dos evaluados y adaptarlo a México mediante un factor de corrección.

RESULTADOS

3

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA RADIACIÓN GLOBAL EN SUPERFICIES VERTICALES.

GENERAL DE LAS MEDICIONES

Basado en las pruebas de control de calidad, se conformaron bases de datos para irradiación global e irradiación total en fachadas orientadas a los cuatro puntos cardinales.

La radiación global en las superficies verticales y horizontal está basada en un año de mediciones pertenecientes al año 2014 medidas en el Instituto de Geofísica, UNAM.

Para la irradiación total, nombrada así porque que las mediciones incluyen la radiación reflejada del suelo (albedo de suelo), comprende los registros obtenidos en el año 2016 (marzo a diciembre) y 2017 (enero y febrero) en la unidad de posgrado, UNAM.

La representación gráfica es simple y directa para analizar e interpretar los datos de radiación solar. Se computa y presenta la radiación solar promedio por hora y día de manera mensual y anual, así como valores máximos y mínimos.

3.1.1 IRRADIACIÓN SOLAR MEDIDA.

La información sobre la disponibilidad de la radiación solar es de gran apoyo para la reducción de ganancia de calor en los edificios y para determinar el rendimiento de tecnologías utilizadas en la envolvente arquitectónica.

Irradiación global en superficies verticales

La superficie vertical Norte, su valor mínimo de día promedio fue 1.68 MJ/m² en diciembre y el máximo de 4.23 MJ/m² en junio. El menor número de horas de luz en invierno, menor intensidad de radiación y bajos valores de declinación solar concuerdan con los resultados obtenidos en el mes de diciembre donde prácticamente solo recibe radiación difusa., aumentando considerablemente en temporada de verano en el mes de junio.

La irradiación en la superficie Este tuvo su menor registro en Octubre (6.52 MJ/m²), mientras que el valor más alto fue en Abril (11.08 MJ/m²).

La Irradiación global para la superficie Oeste, su valor mínimo registrado en día promedio fue 4.59 MJ/m² en Julio y el mayor tuvo un registro de 7.36 MJ/m² en Febrero. A pesar que se esperaba valores similares en las superficies Este y Oeste debido a la simetría geométrica de ambas, los resultados fueron diferentes: en día anual promedio, la fachada este recibe 47% más que la oeste.

En día mensual promedio, para las temporadas de primavera, verano, otoño e invierno, el porcentaje resulta en 72%, 67%, 31 % y 24% respectivamente (Fig.43).

Año	Mes	Global Norte	Global Sur	Global Este	Global Oeste	Global Horizontal
2014	1	1.72	14.16	7.81	6.26	16.12
2014	2	1.75	14.13	10.06	7.36	20.34
2014	3	2.13	7.98	9.85	6.57	20.54
2014	4	2.85	4.95	11.08	5.76	22.00
2014	5	3.85	3.51	9.02	5.05	18.77
2014	6	4.23	3.55	7.07	5.05	17.45
2014	7	3.65	3.17	8.45	4.59	18.88
2014	8	3.30	4.23	9.41	5.30	19.88
2014	9	2.83	5.81	7.13	4.90	16.01
2014	10	2.21	8.71	6.54	5.49	15.74
2014	11	1.85	13.12	7.90	6.13	16.10
2014	12	1.68	13.49	6.52	6.06	14.61
	Promedio	2.67	8.07	8.40	5.71	18.04

Tabla 13. Resultados día mensual y anual promedio de la Irradiación Solar Global incidente (MJ/m²) en las superficies horizontal y vertical. Año 2014. Ciudad Universitaria (19° 20' 01'' N, 99° 11' 54'' O). Elaboración propia.

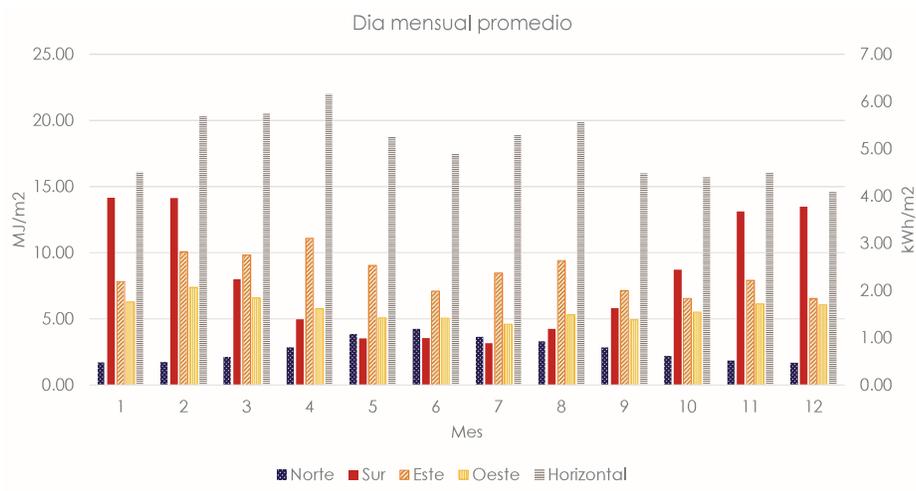


Figura 43. Gráfica de mes promedio de Irradiación Global Vertical en las cuatro orientaciones para todo el año 2014. Ciudad Universitaria (19° 20' 01'' N, 99° 11' 54'' O). Elaboración propia.

Respecto a la superficie vertical sur, presenta un comportamiento normal, durante el solsticio de invierno el sol se encuentra inclinado hacia la fachada sur con una altitud menor aumentando la radiación sobre esta, su mayor radiación fue 14.16 MJ/m² (enero), mientras que la menor insolación fue en temporada de verano 3.17 MJ/m² (Julio) cuando la altitud del sol es alta., aunque se siguen registrando valores altos durante este mes.

La radiación en día anual promedio en esta superficie fue 8.07 MJ/m² ., como se esperaba, siendo más grande que el Oeste (5.71 MJ/m²) y Norte (2.67 MJ/m²) pero definitivamente no superior a la superficie horizontal (18.04 MJ/m²). En el día anual promedio, la superficie sur no recibe más energía que la superficie Este, siendo esta 4.14% superior.

Los datos de radiación solar por hora son esenciales para determinar la carga de enfriamiento y capacidad de equipos de aire acondicionado. También tienen importancia en el diseño de tecnología fotovoltaica integrada en edificios (BIPV por sus siglas en inglés).

Los datos medidos por hora de radiación global para primavera, verano, otoño e invierno son representados por los meses de abril, julio, octubre y enero respectivamente. Las gráficas son útiles para mostrar las grandes diferencias asociadas con las orientaciones (fig.44).

El radiación pico, en hora anual promedio, se produce al medio día horario (12:00, 1.16 MJ/m²) para la superficie vertical sur y al mediodía solar (13:00, 0.31 MJ/m²) para la superficie norte. Para la fachada este ocurre en la mañana (10:00, 1.79 MJ/m²) y en la tarde para la oeste (16:00, 1.04 MJ/m²).

La asimetría mencionada entre la fachada este y oeste, respecto al medio día solar, se ve claramente en las gráficas de la figura 44.

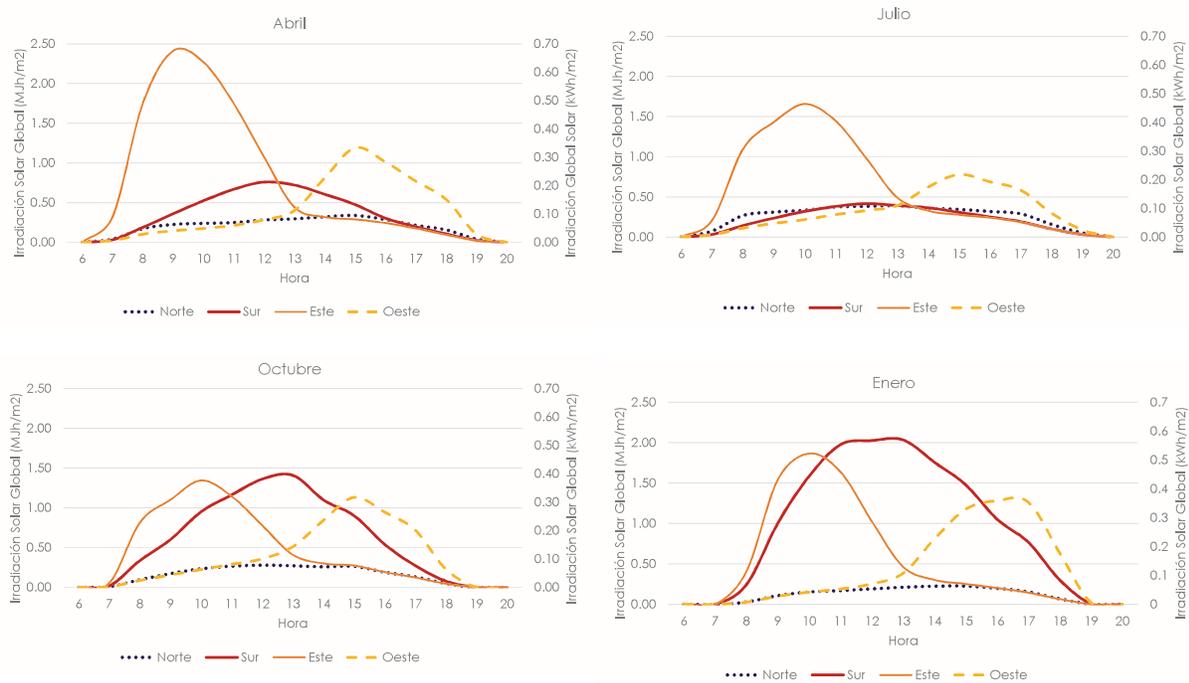


Figura 44. Horario mensual promedio de Irradiación global en fachadas. Enero, Abil, Julio y Octubre, año 2014. Ciudad Universitaria (19° 20' 01'' N, 99° 11' 54'' O). Elaboración propia.

Los valores pico horarios mensuales para la fachada este y oeste se dieron a las 10:00 (2.43 MJh/m²) y 16:00 (1.66 MJh/m²) respectivamente en el mes de febrero. La fachada norte lo registró en junio a las 12:00 (0.47 MJ/m²). Por su parte, la fachada sur lo obtuvo de 12:00 a 13:00 en el mes de enero (2.03 MJ/m²).

La superioridad de la energía solar en la fachada este en día anual promedio y su asimetría con la fachada oeste puede explicarse por factores meteorológicos y geográficos propios de la ciudad de México. Los vientos traen consigo vapor de agua, nubosidad y aerosoles de la atmósfera:

En el periodo de secas (noviembre- abril) los vientos pueden soplar tanto del norte como del este, sur y noreste; durante la tarde predominan los vientos que se dirigen de la planicie a las montañas en el poniente de la ciudad.

Durante la estación lluviosa el recorrido de los vientos es marcadamente del norte o noreste, teniendo implicaciones para el transporte de contaminantes de norte a sur, los que se acumulan en el rincón suroeste de la ciudad.

La dirección prominente de los vendavales es casi siempre con un componente del oeste (soplan del suroeste, oeste o noroeste); las lluvias se dan de mayo a octubre, ocurren generalmente por la tarde después de una mañana soleada. Las lluvias son abundantes en el piemonte (orográficas), aumentando a un máximo en el parteaguas de las montañas al oeste, sur y sureste⁶².

Lluvias, chubascos y aerosoles tienen una gran concentración en la parte oeste y suroeste de la Cuenca de México, principalmente en la segunda parte del día, atenuando las mediciones de radiación en la fachada Oeste.

Mapas de energía

Con el objetivo de conocer una distribución más detallada de la irradiación vertical, se obtienen mapas de energía (conocidos gráficamente como mapas de calor) para cada mes del año en cada una de las fachadas.

FACHADA SUR																	
DÍA	HORA																PROM
	5-6 A.M.	6-7 A.M.	7-8 A.M.	8-9 A.M.	9-10 A.M.	10-11 A.M.	11-12 A.M.	12-1 P.M.	1-2 P.M.	2-3 P.M.	3-4 P.M.	4-5 P.M.	5-6 P.M.	6-7 P.M.	7-8 P.M.		
1	0.00	0.00	0.01	0.04	0.16	0.52	2.06	2.16	0.93	0.66	0.34	0.34	0.07	0.00	0.00	7.22	
2	0.00	0.00	0.36	1.11	1.34	0.81	0.57	0.76	0.53	0.92	0.60	0.10	0.01	0.00	0.00	7.11	
3	0.00	0.00	0.01	0.11	0.60	1.43	2.03	2.50	2.31	1.90	0.93	0.72	0.14	0.00	0.00	12.67	
4	0.00	0.00	0.48	1.53	2.06	2.36	2.48	2.47	2.27	1.95	1.35	1.01	0.16	0.00	0.00	18.12	
5	0.00	0.00	0.49	1.57	1.97	2.27	2.32	2.22	2.07	1.92	1.40	0.67	0.11	0.00	0.00	17.02	
6	0.00	0.00	0.16	0.74	1.88	2.10	2.32	2.17	2.33	1.25	1.02	1.30	0.47	0.00	0.00	18.75	
7	0.00	0.00	0.26	1.16	1.31	1.82	1.45	1.50	1.13	1.09	0.97	0.27	0.04	0.00	0.00	11.00	
8	0.00	0.00	0.25	1.17	1.78	2.21	2.38	2.33	1.12	0.53	0.28	0.22	0.10	0.00	0.00	12.36	
9	0.00	0.00	0.50	1.53	2.08	2.37	2.23	2.30	1.53	1.69	0.40	0.26	0.29	0.00	0.00	15.18	
10	0.00	0.00	0.53	1.21	1.10	2.04	1.01	1.27	0.97	0.95	1.06	1.10	0.31	0.00	0.00	11.55	
11	0.00	0.00	0.11	0.19	1.60	2.30	2.13	1.96	1.43	1.89	0.55	0.75	0.08	0.00	0.00	12.99	
12	0.00	0.00	0.55	1.60	2.09	2.36	2.51	2.52	2.76	1.98	1.70	1.52	0.80	0.00	0.00	20.38	
13	0.00	0.00	0.38	1.35	1.93	2.24	2.36	2.24	1.83	0.69	0.77	0.46	0.07	0.00	0.00	14.32	
14	0.00	0.00	0.05	0.72	1.75	2.17	2.01	1.67	1.71	1.57	0.69	0.39	0.23	0.00	0.00	12.95	
15	0.00	0.00	0.01	0.23	1.77	2.33	0.98	0.71	0.37	0.88	0.39	0.42	0.05	0.00	0.00	8.16	
16	0.00	0.00	0.14	0.73	1.08	1.88	0.74	0.63	0.34	0.33	0.99	0.89	0.12	0.00	0.00	7.86	
17	0.00	0.00	0.05	0.82	1.90	1.75	1.91	2.34	2.14	1.78	1.35	0.91	0.44	0.00	0.00	15.38	
18	0.00	0.00	0.29	1.38	1.91	2.24	2.38	2.30	2.07	1.89	1.27	0.66	0.23	0.00	0.00	16.44	
19	0.00	0.00	0.32	1.31	1.90	2.06	2.30	2.29	2.19	1.66	1.16	0.59	0.21	0.00	0.00	15.99	
20	0.00	0.00	0.42	1.42	1.94	2.24	2.28	2.30	2.18	1.96	1.57	1.08	0.48	0.00	0.00	17.87	
21	0.00	0.00	0.34	1.34	1.89	2.19	2.36	2.39	2.24	2.04	1.79	1.33	0.67	0.01	0.00	18.59	
22	0.00	0.00	0.28	1.23	1.81	2.14	2.33	2.35	2.25	1.94	1.49	0.96	0.38	0.00	0.00	17.15	
23	0.00	0.00	0.21	1.15	1.69	2.06	2.26	2.28	2.20	0.96	0.40	0.81	0.40	0.03	0.00	14.46	
24	0.00	0.00	0.01	0.05	0.23	1.14	2.25	2.32	2.25	1.94	1.37	1.01	0.59	0.02	0.00	13.17	
25	0.00	0.00	0.18	1.11	1.69	2.07	2.21	2.13	2.22	1.82	1.53	0.90	0.24	0.01	0.00	16.10	
26	0.00	0.00	0.21	1.12	1.73	2.11	2.29	2.32	2.17	1.78	0.74	0.43	0.39	0.02	0.00	15.30	
27	0.00	0.00	0.23	1.18	1.73	2.09	2.25	2.22	2.10	1.84	1.57	0.91	0.32	0.01	0.00	16.44	
28	0.00	0.00	0.17	1.05	1.67	2.06	2.21	1.65	1.13	0.98	1.17	0.84	0.41	0.01	0.00	13.36	
29	0.00	0.00	0.05	0.28	0.92	1.63	1.59	2.12	1.49	1.15	0.86	0.99	0.54	0.06	0.00	11.68	
30	0.00	0.00	0.34	1.43	1.92	2.21	2.35	2.36	2.16	2.00	1.69	1.24	0.63	0.04	0.00	18.38	
31	0.00	0.00	0.25	1.24	1.73	2.09	2.28	2.25	2.09	1.83	1.23	0.76	0.32	0.02	0.00	16.08	
PROM	0.00	0.00	0.25	1.00	1.59	1.98	2.03	2.03	1.76	1.48	1.05	0.77	0.30	0.01	0.00	14.23	

Figura 45. Esquema de Mapas de Energía para las Mediciones de Irradiación Solar Vertical. Ciudad Universitaria (19° 20' 01''N, 99°11'54'' O).Elaboración propia.

La distribución muestra la energía solar recibida por hora en cada día del mes, en un horario de 5:00 a.m. a 20:00 hrs., rango horario promedio en que se manifiesta la radiación solar a lo largo del año. El compendio de estos mapas de energía se adjunta en formato excel, facilitan la lectura de las horas con menor y mayor irradiación.

Su uso conviene en el diseño, evaluación o intervención de espacios de oficinas, escuelas o espacios efímeros donde se cuida un rango horario específico en función de cuando está y no habitado el espacio.

⁶² Jáuregui O., Ernesto. (2000). El clima de la Ciudad de México. México, D.F.: UNAM, Instituto de Geografía: Plaza y Valdes.

Es una herramienta que ayuda a no disminuir el confort térmico o en la creación de estrategias para crearlo en caso de que no exista.

Envolvente

Los mapas de energía pueden ser representados de manera tridimensional para observar el comportamiento del fenómeno solar por metro cuadrado en las diferentes orientaciones verticales y horizontal, es decir, en la envolvente.

La fig. 46 muestra como las distintas fachadas reciben diferente cantidad de energía solar. Los cambios de valor a lo largo de las estaciones del año en cada fachada determinan la radiación en función de la orientación.

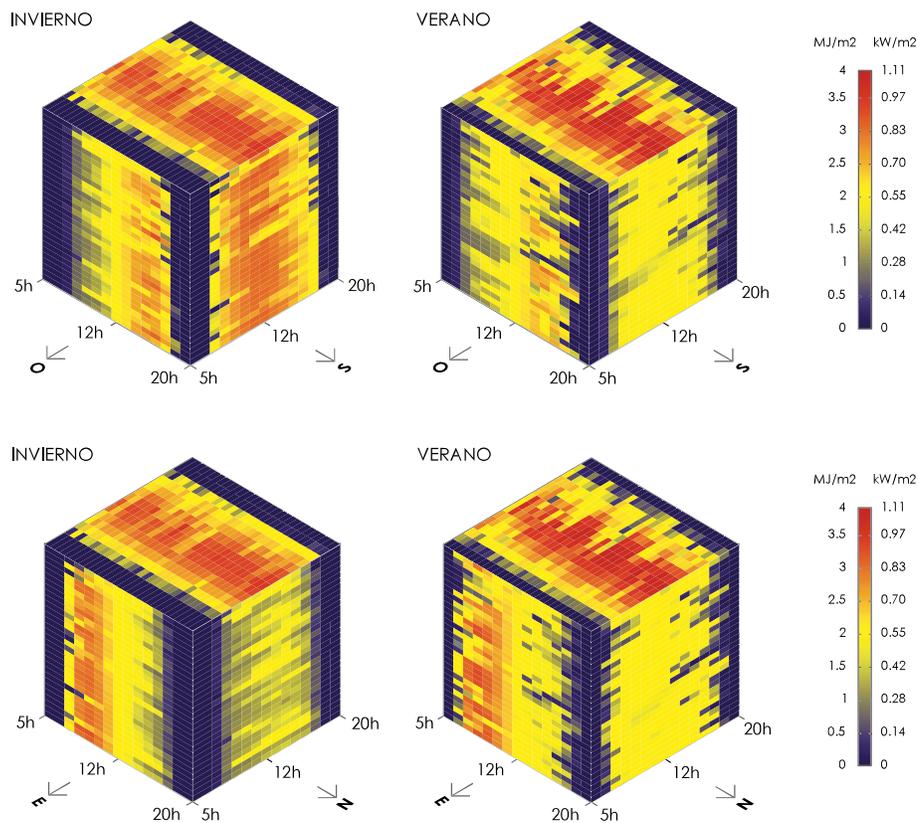


Figura 46. Gráfica de los días promedio con mayor y menor Irradiación Global Vertical respecto a la fachada sur.Ciudad Universitaria (19° 20' 01''N, 99°11'54'' O).Elaboración propia.

El comportamiento solar en el plano horizontal es opuesto a la fachada sur, mientras que en verano el plano horizontal recibe la mayor radiación, la fachada sur lo recibe en invierno.

Se distingue claramente la presencia de la radiación solar en las mañanas para la fachada este (formando una 'franja' naranja del lado izquierdo), y en la tarde para la oeste (formando una 'franja' naranja del lado derecho).

Se percibe como la fachada norte es la que menor radiación recibe, siendo su mejor temporada el verano. En estos días largos, esta superficie recibe altos componentes de radiación solar directa por las mañanas y a últimas horas de la tarde, recibiendo el doble de radiación que en invierno. Por su parte, la fachada sur recibe en invierno aproximadamente el cuádruple de radiación que en verano.

En la relación entre fachadas, en invierno, la superficie sur recibe 71% más energía que la superficie este, el doble que la oeste, y ocho veces más que la superficie norte.

En verano, la radiación que incide en la fachada norte y sur es solamente la mitad de la que incide en la fachada este.

La radiación recibida por la cubierta merece especial atención, es casi equivalente a la suma total de las cuatro superficies medidas. La radiación máxima en día promedio mensual para la radiación horizontal se presentó en el mes de Abril con 22 MJ/m², la mínima en el mes de Octubre con 15.74 MJ/m².

Para mostrar la relación que tiene la radiación global horizontal con las fachadas a lo largo del año, se realiza una comparación en día anual promedio. El resultado, la fachada sur y este reciben la mitad de la irradiación horizontal, la oeste una tercera parte y la norte una séptima.(Fig.47).

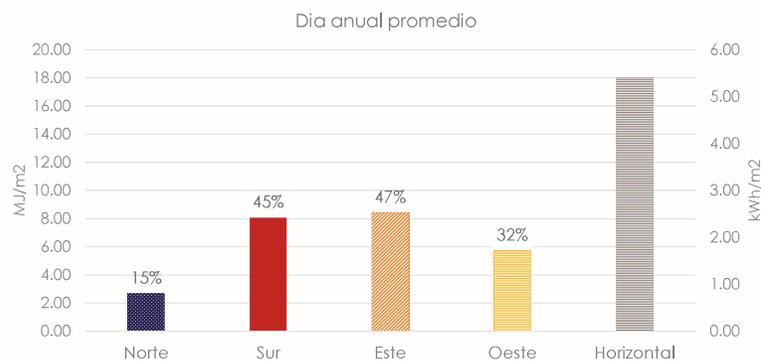


Figura 47. Gráfica de día anual promedio en las fachadas con porcentaje respecto a la radiación en el plano horizontal. Ciudad Universitaria (19° 20' 01'' N, 99° 11' 54'' O).Elaboración propia.

Irradiación Solar total

Como segundo acercamiento sobre el comportamiento de la radiación en las fachadas de la Ciudad de México, se ha considerado toda la visión hemisférica del piranómetro y con ello la radiación reflejada del suelo. Los resultados fueron los siguientes:

El rango de valores en día promedio para la fachada norte es un mínimo de 3.04 MJ/m² en noviembre y un máximo de 6.44 MJ/m² en junio.

La irradiación en la superficie este tuvo su menor registro en noviembre (6.90 MJ/m²), mientras que el valor más alto fue en Febrero (11.99 MJ/m²).

En la fachada oeste, su valor mínimo registrado en día promedio fue 5,84 MJ/m² en septiembre y el mayor tuvo un registro de 9.44 MJ/m² en marzo. Nuevamente, los resultados de la fachada este son mayores a los de la oeste, recibiendo 35.56% más comparado con la oeste, para las estaciones del año, los porcentajes resultan en 35% para primavera, 57% en verano, 24% en otoño y 30% en invierno (Fig49).

Año	Mes	Global Norte	Global Sur	Global Este	Global Oeste
2017	1	3.35	15.99	10.04	7.86
2017	2	3.90	14.94	11.99	9.24
2016	3	4.68	9.55	10.99	9.44
2016	4	5.49	6.12	11.07	8.45
2016	5	6.23	4.94	11.14	6.73
2016	6	6.44	4.73	9.72	6.17
2016	7	6.33	4.84	10.02	6.22
2016	8	5.20	5.55	9.50	6.40
2016	9	4.23	6.91	7.83	5.84
2016	10	3.59	9.86	8.08	6.69
2016	11	3.04	10.94	6.90	5.93
2016	12	3.17	15.73	9.23	6.97
	Promedio	4.64	9.18	9.71	7.16

Tabla 14. Resultados promedio diario y mensual de la Irradiación Solar Total Global incidente(MJ/m²) en las superficies horizontal y vertical. Año 2016/2017. Ciudad Universitaria(19°18'33.59"N, 99° 11' 5.73" O).Elaboración propia.

La radiación en la fachada sur nuevamente recibe mayor radiación en el invierno, sin embargo, su comportamiento en los meses de octubre, noviembre y diciembre tiene más fluctuaciones rompiendo la simetría con la primera parte del año. Su mayor registro en día promedio se dió en enero con 15.99 MJ/m², la menor insolación en junio con 4.73 MJ/m². La radiación media mensual fue 9.18 MJ/m², mayor que la fachada oeste (7.16 MJ/m²) y norte (4.64 MJ/m²).

Nuevamente, en el día promedio anual, la superficie vertical este rebasa la energía recibida por la superficie sur obteniendo 9.71 MJ/m², 5.8 % adicional.

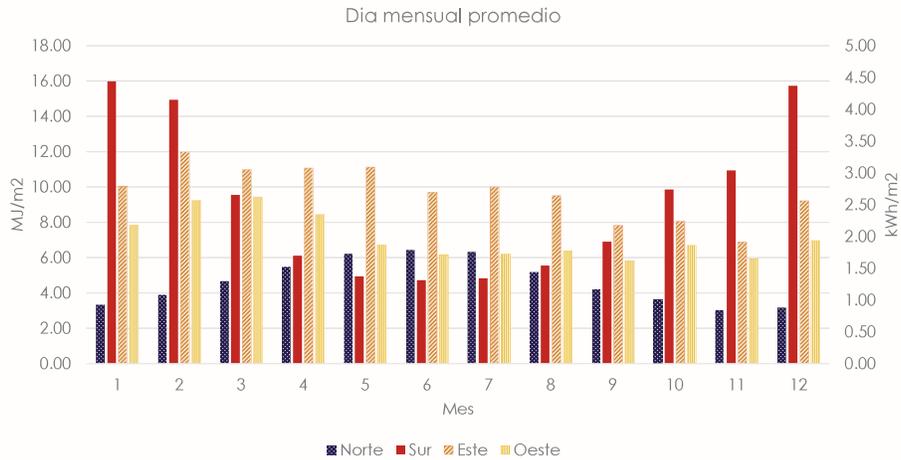


Figura 48. Gráfica de mes promedio de Irradiación Global Vertical en las cuatro orientaciones para todo el año. Año 2016/2017. Ciudad Universitaria(19°18'33.59"N, 99° 11' 5.73" O).

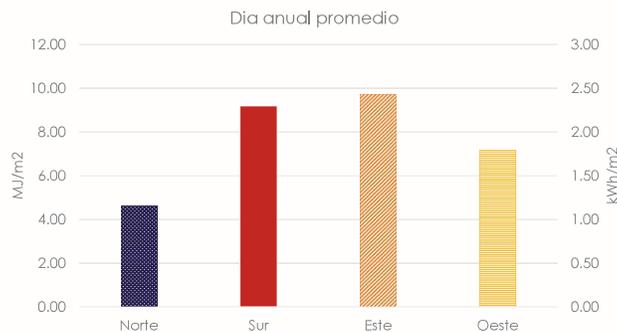


Figura 49. Gráfica de día anual promedio en las fachadas. Año 2016/2017. Ciudad Universitaria(19°18'33.59"N, 99° 11' 5.73" O).Elaboración propia.

En promedio horario anual , la radiación pico en la fachada sur y norte se produce al medio día solar (13:00), 1.29 MJ/m2 y 0.55 MJ/m2 respectivamente. Para la fachada este, ocurre en la mañana (10:00) 1.88 MJ/m2 y en la tarde para la oeste (16:00) 1.21 MJ/m2.

Los valores pico horarios mensuales para la fachada este y oeste se dieron a las 10:00 (2.55 MJh/m2) y 16:00 (1.85 MJh/m2) respectivamente en el mes de febrero. La fachada norte lo registró en julio a las 10:00 (0.82 MJ/m2). Por su parte, la fachada sur lo obtuvo a las 13:00 en el mes de diciembre (2.19 MJ/m2).

En verano, la fachada norte recibió casi el doble de radiación que en invierno. La fachada sur recibe en invierno el triple de radiación que en verano.

En cuanto a la comparación entre fachadas, en invierno, la superficie sur recibe aproximadamente el doble de energía que la superficie oeste, 50% más que la este, y 4.5 veces más que la superficie norte.

En verano, la radiación que incide en la fachada norte rebasa la fachada sur, casi iguala la oeste, y es más de la mitad de la fachada este (62.7%).



Figura 50. Promedio horario mensual de Irradiación global en fachadas para Enero, Abril, Julio y Octubre. Año 2016/2017. Ciudad Universitaria(19°18'33.59"N, 99° 11' 5.73" O). Elaboración propia.

3.1.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para ambas estaciones de medición observamos que la radiación tuvo prácticamente el mismo comportamiento en las fachadas. La fachada sur recibe mayor irradiación comparado con todas las demás fachadas en temporada otoño-invierno (enero, febrero, octubre, noviembre y diciembre); los edificios orientados al sur tienen menos cargas de refrigeración y calefacción en verano e invierno respectivamente.

La fachada norte presenta un comportamiento opuesto a la fachada sur, los meses de invierno es cuando recibe menor energía solar; en primavera-verano presenta sus valores más altos, superando lo recibido en la fachada sur en los meses de mayo, junio y julio. Cuando el sensor de la fachada norte mide con todo el campo hemisférico, es la superficie que más incrementa su porcentaje de energía solar, superando no sólo la fachada sur, también a la fachada oeste en los meses de junio y julio.

La superficie oeste recibe más energía solar entre los meses de febrero-marzo. La superficie este es la más fluctuante, pudiendo recibir su mayor radiación entre los meses de febrero-abril.

La superficie este recibe más irradiación que la oeste debido a los factores climáticos, geográficos y urbanos descritos anteriormente; estos mismos factores hacen que ambas fachadas fluctúen a lo largo del año. En el día anual promedio, la fachada este es la que recibe mayor radiación, seguida de la fachada sur, oeste y norte.

Como se mencionó en el capítulo del método, siendo las primeras mediciones reales de radiación global vertical en México, el primer paso para la caracterización de la radiación solar en planos verticales es bloquearle al sensor de medición el albedo del suelo. Esta radiación adicional tiene valores diferentes dependiendo del material que refleje la radiación hacia la fachada.

Por lo que se puede concluir, que los valores mínimos y máximos registrados en el año 2014 (Observatorio 1) representan el rango mínimo de radiación global que se esperan en las fachadas de la Ciudad de México, pues dependiendo del material del suelo donde se encuentren las edificaciones, esta radiación aumentará en diferentes porcentajes.

Para hacer una aproximación sobre los porcentajes que puede aumentar la radiación solar en las fachadas, se realiza una comparativa en día anual promedio de ambas estaciones de medición (Fig.51). La gráfica muestra el porcentaje adicional de irradiación recibida cuando fué considerado la visión hemisférica del piranómetro.

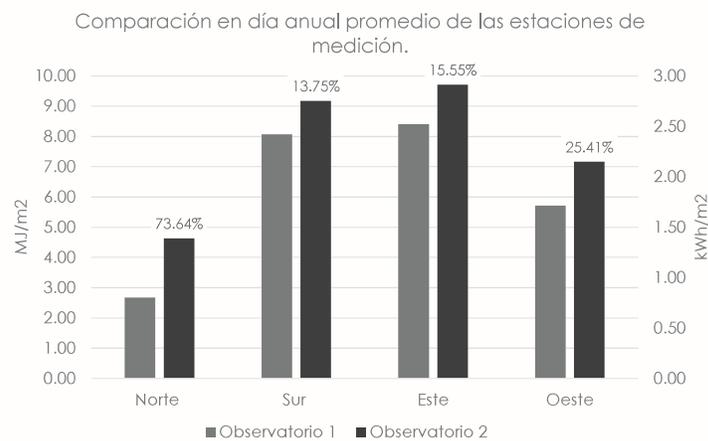


Figura 51. Gráfica de día anual promedio en las fachadas. Ciudad Universitaria. Año 2016/2017. Ciudad Universitaria (19° 20' 01" N, 99° 11' 54" O , 19° 18' 33.59" N, 99° 11' 5.73" O). Elaboración propia.

La fachada norte es la que mayor incrementó su recepción de energía solar (73.64%), seguida del oeste (25.42%), sur (13.75%) y este (15.55%).

La fachada este fue la única que no recibió albedo del suelo por localizarse al margen de la azotea, el sensor registró solo radiación global de toda su vista hemisférica. Las demás fachadas recibieron radiación global y albedo del suelo, por lo que determinar el porcentaje de cada una resulta complejo. No obstante, los porcentajes de aumento entre la fachada sur y este (con y sin albedo de suelo) difieren en 1.8%, por lo que puede intuirse que el piso cerámico no presenta mayor influencia en la radiación total.

De lo anterior se obtienen los rangos mínimos y máximos en día anual promedio:

Rango de valores esperados en las fachadas en día mensual promedio			
Mínimos			
Fachada norte	1.68 MJ/m ² - 3.04 MJ/m ²	Fachada este	6.52 MJ/m ² - 6.90 MJ/m ²
Fachada sur	3.17 MJ/m ² - 4.73 MJ/m ²	Fachada oeste	4.59 MJ/m ² - 5.84 MJ/m ²
Máximos			
Fachada norte	4.23 MJ/m ² - 6.44 MJ/m ²	Fachada este	11.08 MJ/m ² - 11.99 MJ/m ²
Fachada sur	14.16 MJ/m ² - 15.99 MJ/m ²	Fachada oeste	7.36 MJ/m ² - 9.44 MJ/m ²

Rango de valores esperados en las fachadas en día anual promedio			
Fachada norte	2.67 MJ/m ² - 4.64 MJ/m ²	Fachada este	8.40 MJ/m ² - 9.71 MJ/m ²
Fachada sur	8.06 MJ/m ² - 9.18 MJ/m ²	Fachada oeste	5.68 MJ/m ² - 7.16 MJ/m ²

Tabla 15. Tabla de rangos esperados en fachadas en día mensual promedio. Elaboración propia.

A partir de los datos, podemos observar que, la fachada sur de un edificio recibe en invierno aproximadamente el triple de radiación que en verano, este efecto podría ser más pronunciado dando una relación de 1 a 4. La fachada norte recibe en verano el doble que en invierno. Las fachadas este y oeste permanecen prácticamente estables en cada estación del año.

La superficie vertical sur en invierno, recibe 50% más que la superficie este, el doble que la oeste y 4.5 veces más que la norte.

En verano, la superficie norte recibe aproximadamente 19% más radiación que la sur, la misma cantidad que la oeste y 60% más que la este.

Arquitectos involucrados en el campo de la energía solar requieren datos de radiación solar cercanas a su aplicación. Es importante para usos pasivos y activos de la energía solar saber la radiación global y total que está disponible. Los patrones de la disponibilidad del recurso solar, en el tiempo, es significativo ya que dicta el diseño de los sistemas de almacenamiento de energía.

Los resultados presentados pueden ayudar desde las primeras etapas del diseño arquitectónico de envolventes.

Por lo anterior, se recalca la versatilidad que las mediciones y caracterización de la radiación solar puede aportar para el sector arquitectónico en general en nuestro país.

3.2 RESULTADOS EVALUACIÓN DE MODELOS

La mayoría de las aplicaciones solares prácticas están basadas en el cálculo térmico o fotovoltaicos. Los componentes de la radiación solar (global, difusa y directa) generalmente se miden en el plano horizontal y las mediciones de la radiación solar vertical en México no existen.

Por lo tanto, para el diseño de sistemas y tecnologías solares aplicados en arquitectura, la irradiancia global de una superficie vertical debe estimarse generalmente mediante modelos empíricos o semiempíricos, que requieren el conocimiento de los componentes horizontales difusa y directa, conocidos como modelos de transposición.

La lista de modelos de transposición es bastante amplia, variando desde el enfoque isotrópico de la irradiancia difusa del cielo hasta la formulación más compleja de la anisotropía del mismo.

Los apartados siguientes se dedican a plasmar los resultados de la evaluación de modelos de transposición, y la adaptación de un modelo para las condiciones de la Ciudad de México a través de un factor de corrección.

3.2.1 PRUEBA DE MODELOS

Como se mencionó anteriormente, los modelos elegidos para ser evaluados son el Isotrópico y el Pérez cuya finalidad es calcular la radiación difusa en las fachadas a partir de la radiación directa y difusa horizontal.

Las dos primeras pruebas consideran sólo la irradiancia global horizontal como único factor de entrada. En este caso, la radiación directa y difusa horizontal necesarias para la transposición, se calculó con los modelos Louche y Dirint^{63 64}. Louche presentó mejor desempeño contra el modelo Dirint (también desarrollado en parte por Pérez), pese a que este último es más complejo.

El modelo de Louche, usa principalmente el índice de claridad (Kt) como predictor.

$$k_b = \frac{DNI}{I_{0n}} = -10.627 kt^5 + 15.307 kt^4 - 5.205 kt^3 + 0.994 kt^2 - 0.059 kt + 0.002$$

El desempeño del modelo de Louche fue de -33 w/m² (-9.5% de MBE) y 105 w/m² (29.8% de RMSE) para la irradiancia directa; 10 w/m² (6.5 % MSE) y 57W/m² (35.3% RMSE) para la irradiancia difusa.

Las dos últimas pruebas evalúan el desempeño de los modelos con las mediciones reales directa y difusa horizontal como factores de entrada.

63 Pérez, R., P. Ineichen, E. Maxwell, R. Seals and A. Zelenka, (1992). "Dynamic Global-to-Direct Irradiance Conversion Models". *ASHRAE Transactions-Research Series*, pp. 354-369

64 Maxwell, E. L., (1987). "A Quasi-Physical Model for Converting Hourly Global Horizontal to Direct Normal Insolation", Technical Report No. SERI/TR-215-3087, Golden, CO: Solar Energy Research Institute.

Las figuras 52 y 53 muestran los resultados de las dos primeras pruebas observando que tanto el modelo Isotrópico como el de Pérez con sólo la radiación global horizontal como entrada presentaban mejor rendimiento en las estaciones de otoño e invierno en las fachadas sur y oeste. La radiación directa en días de invierno en la fachada sur es menor a la esperada, pudiendo estar influenciado por la presencia de nubes.

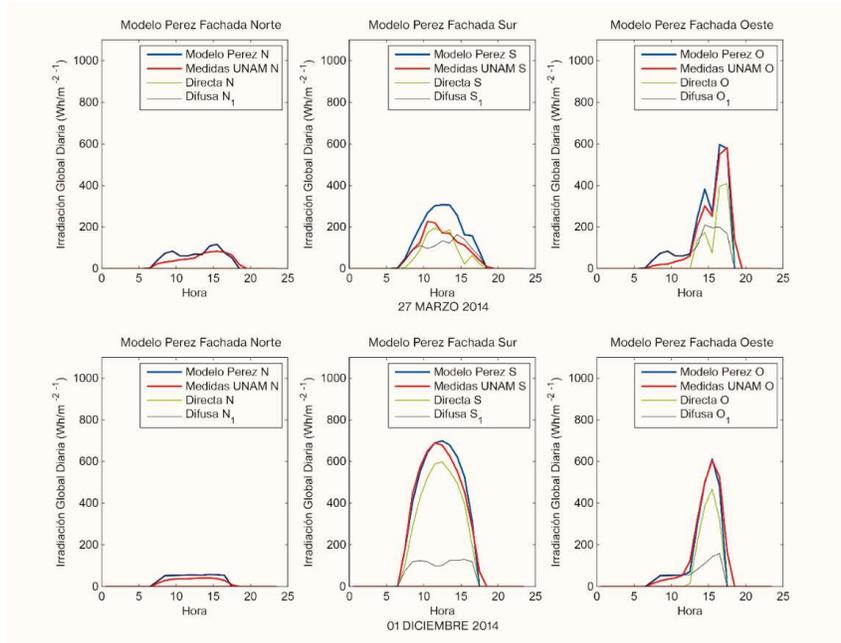


Fig.52 Gráfica comparativa del desempeño del modelo Isotrópico en un día de primavera (27 de marzo de 2014) y uno de invierno (1 diciembre de 2014).Elaboración propia.

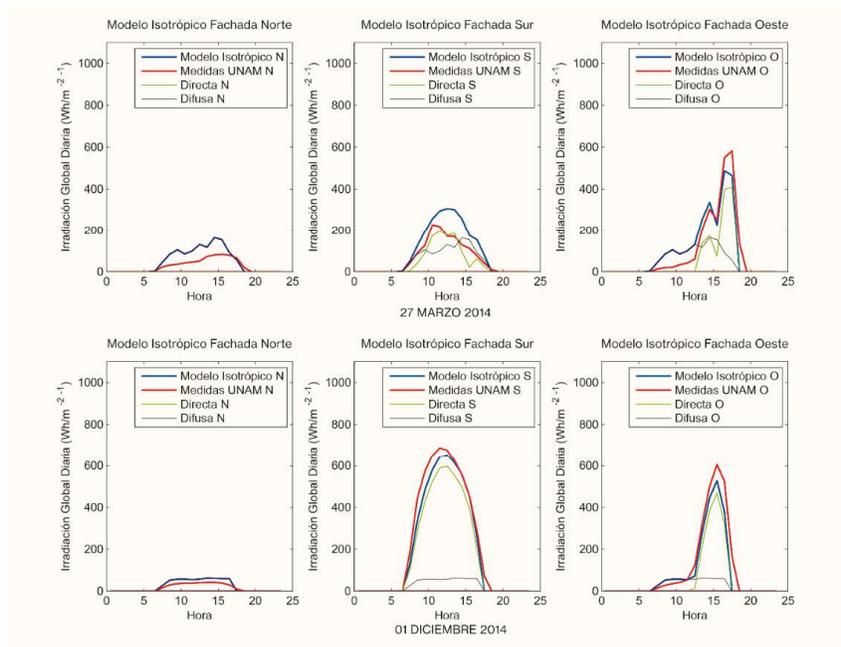


Fig.53 Gráfica comparativa del desempeño del modelo de Pérez en un día de primavera (27 de marzo de 2014) y uno de invierno (1 diciembre de 2014). Elaboración propia.

Se evidencia que la orientación de las fachadas, estaciones del año y condiciones de cielo son los tres aspectos principales para la mejora en el rendimiento de un modelo.

Para análisis más precisos, se recurre al cálculo estadístico de los valores de Error Medio Cuadrático y la Desviación media del error (MBE y RMSE) con sus respectivas gráficas de dispersión.

En los resultados anuales, el rango de MBE fue $-22,67 \text{ W/m}^2$ para la cara Norte a $9,91 \text{ W/m}^2$ en la cara este. Los resultados para el modelo de Pérez van de una subestimación de $-41,27 \text{ W/m}^2$ en Marzo para la fachada sur a una sobreestimación de $30,27 \text{ W/m}^2$ en Febrero para la fachada este.

Anualmente, el modelo de Pérez tiende a subestimar la irradiancia para a cara norte, sur y oeste con valor no menor a $-6,67 \%$ y a sobreestimar los resultados para la fachada este no más de $2,35\%$. El modelo de Pérez predice con más precisión la fachada norte cuando recibe solo cantidad consistente de radiación difusa o cuando incluye una pequeña cantidad de radiación directa cuando la altitud solar es alta. Para la fachada este y oeste, el modelo Pérez presentó mejores resultados en la mayoría de los meses. En la superficie este, la sobreestimación del modelo de Pérez fue en Septiembre y subestimación en Mayo y Julio. En la fachada oeste, La subestimación se dio entre Octubre y marzo, especialmente Enero, Febrero, Noviembre y Diciembre.

Para la fachada sur, el modelo isotrópico presentó mayor exactitud, presentando menor subestimación que el modelo de Pérez. El promedio anual de RMSE y MBE para todas las fachadas fue $30,08 \%$ y $-7,05\%$ respectivamente.

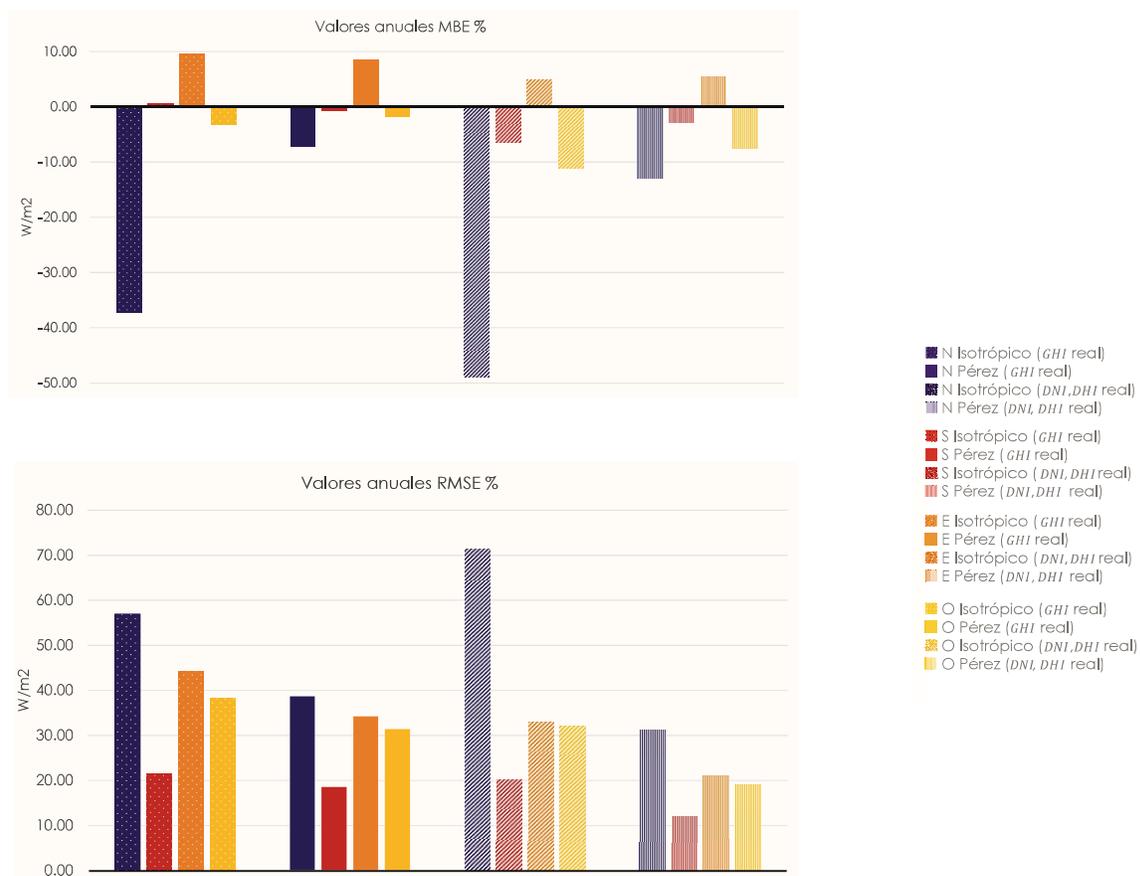


Fig.54 Gráficas con valores anuales de RMSE y MBE para las 4 pruebas con los datos del año 2014.Elaboración propia.

Los resultados de RMSE y MBE para cada modelo en cada mes del año y para el año completo, en las cuatro orientaciones cardinales, se encuentran en el anexo (3).

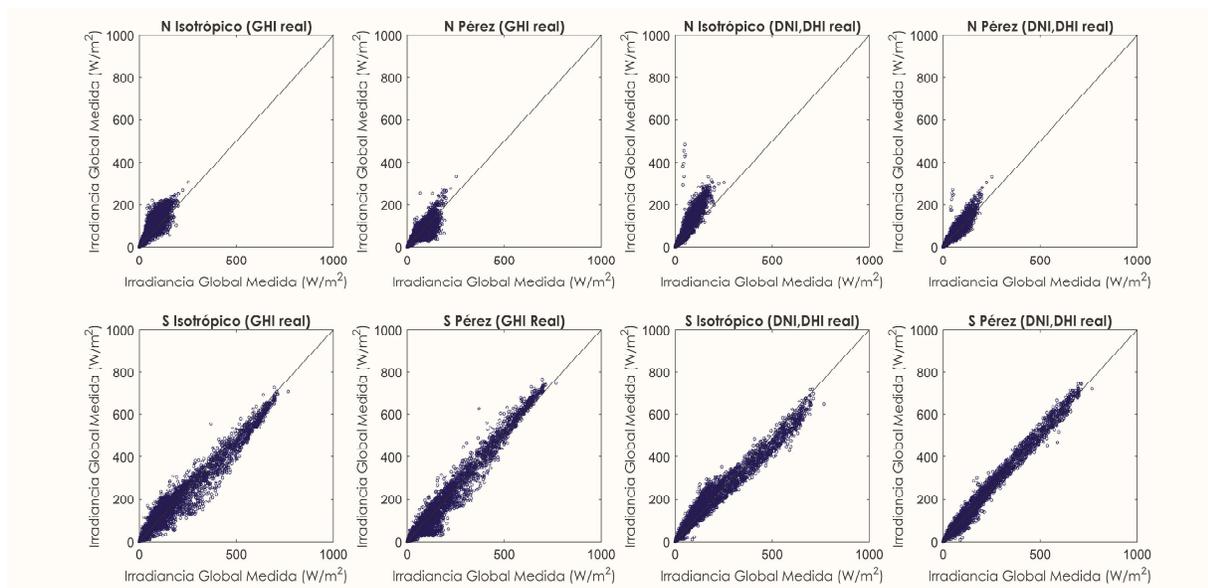
De los resultados mensuales, podemos mencionar:

El valor más bajo de RMSE ocurre en Febrero para ambos modelos Isotrópico y Pérez. El modelo de Pérez tiene un rango de 15.43 W/m² (en Febrero para la cara norte) hasta 60.32 W/m² (en Marzo para la cara sur). El modelo Isotrópico tiene un rango de 21.40 W/m² (en Octubre para la cara Sur) hasta 89.48 W/m² en Febrero para la cara este.

Para cada modelo, los valores de RMSE en W/m² para todas las superficies verticales no difieren en gran medida. No obstante, en términos de porcentaje, la cara Norte presenta mayores valores de RMSE. Esto puede deberse a que esta superficie recibe básicamente componente solar difuso y poca radiación directa. El modelo isotrópico tuvo el menor desempeño, pero no alejado de los resultados del modelo de Pérez.

De los valores subestimados de MBE, el menor resultó para el mes de Marzo para ambos modelos. El valor más alto para los resultados sobreestimados resultó para el mes de Febrero, también para ambos modelos. El rango fue de -41.27 W/m² de subestimación en Marzo para la cara sur a 44.97 W/m² de sobreestimación en Febrero para la cara este.

Los valores obtenidos pueden ubicarse dentro del rango de otras investigaciones ^{65 66 67}. Las gráficas de dispersión anual (fig. 55) muestran el comportamiento esperado, los modelos con sólo la radiación global horizontal real como valor de entrada tienen más dispersión que aquellas con la radiación difusa y directa horizontal real. No obstante, esta diferencia no es muy marcada y muestran un mismo comportamiento/tendencia lineal.



65 Li, D., Lam, J., & Lau, C. (2002). A new approach for predicting vertical global solar irradiance. *Renewable Energy*, 25(4), 591-606.

66 Kong, H. J., & Kim, J. T. (2015). Evaluation of global vertical illuminance and irradiance models against data from Yongin, South Korea. *Energy & Buildings*.

67 Muneer T(1990). Solar radiation model for Europe. *Building Services Engineering Research and Technology*;11(4):153–63.

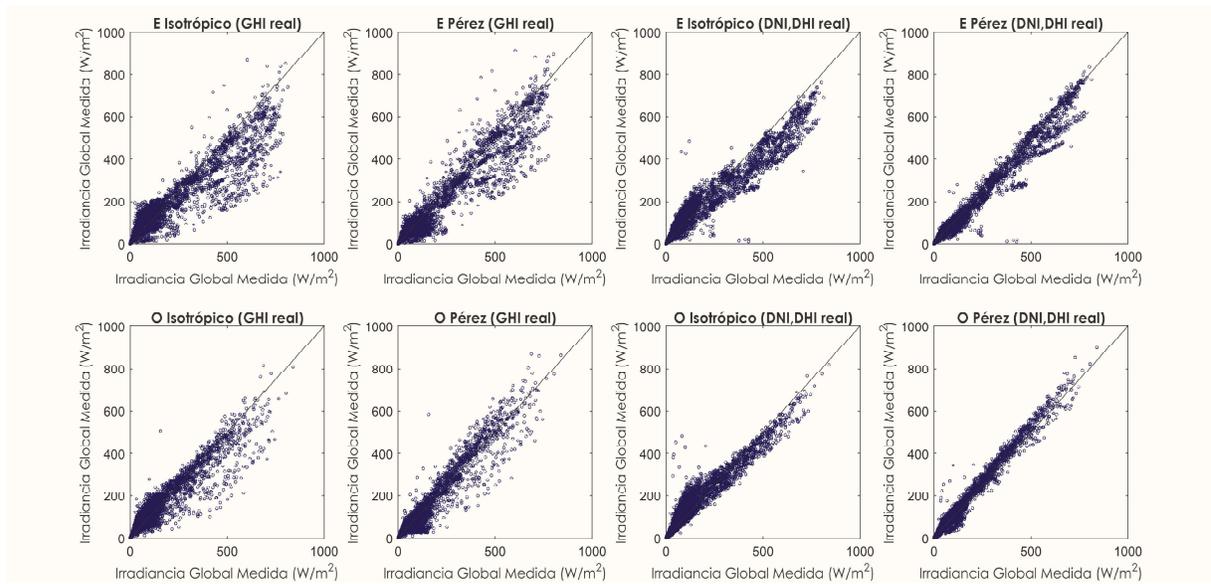


Figura 55. Gráficas de dispersión anual de las 4 pruebas en las 4 fachadas. Año 2014. Ciudad Universitaria (19° 20' 01'' N, 99° 11' 54'' O). Elaboración propia.

3.2.2 DESARROLLO DE MODELO NUEVO

Dada la similitud de los resultados en las pruebas, el desarrollo del nuevo modelo tiende a la practicidad considerando el aprovechamiento de las estaciones de medición de radiación global horizontal que desde hace varios años se realiza en México.

El modelo de Pérez tuvo mejores resultados en la estimación de la radiación en las fachadas exceptuando la norte donde el Isotrópico tuvo mejor desempeño. Sin embargo, la estructura del modelo de Pérez permite más adaptaciones de las condiciones de cielo, por lo que se decide mejorar los resultados obtenidos en las evaluaciones mediante la búsqueda de un factor de corrección basándose en parte en el modelo Pérez, es decir, aprovechar el conocimiento que se ha generado para adaptarlo a las condiciones de México.

A partir de esto, la condición del cielo mantiene las ocho categorías diferentes según los valores del parámetro de claridad del cielo (ϵ). Para cada condición o categoría del cielo, se propone un nuevo modelo lineal específico para calcular la irradiancia difusa del cielo:

$$Y = a + b DHI + c \frac{\cos(\theta_i)}{\cos(\theta_z)}$$

$$Y = I_{90} - DNI \cos(\theta_i)$$

donde I_{90} es la irradiancia del cielo solar en una fachada vertical, que es la irradiancia global en esta superficie sin irradiación reflejada (es decir, la suma del cielo difuso y las irradiaciones directas incidentes), por la configuración experimental diseñada para evitar la irradiancia reflejada en los piranómetros verticales.

Ocho modelos diferentes para la ecuación han sido equipados con los datos experimentales para cada categoría del parámetro de claridad del cielo (ϵ) propuesto por Pérez. La Tabla 16 muestra los parámetros ajustados del nuevo modelo propuesto.

Categoría	a	b	c
Coeficientes de Irradiación			
$1 \leq \epsilon < 1.065$	0.6222	0.3657	0.1386
$1.065 \leq \epsilon < 1.23$	-1.424	0.3749	4.8955
$1.23 \leq \epsilon < 1.5$	-1.575	0.3746	14.7894
$1.5 \leq \epsilon < 1.95$	-0.2146	0.3626	27.5364
$1.95 \leq \epsilon < 2.8$	-2.2538	0.3930	30.5184
$2.8 \leq \epsilon < 4.5$	3.6339	0.3989	34.9595
$4.5 \leq \epsilon < 6.2$	-15.1028	0.6224	21.4816
$6.2 \leq \epsilon$	-7.1918	0.6248	0.8906

Tabla 16. Parámetros del nuevo modelo propuesto de irradiancia solar en fachadas verticales en México. Elaboración propia.

La figura 56 muestra el rendimiento de los modelos lineales ajustados para cada condición del parámetro de claridad del cielo. Para evaluar la bondad del modelo se ha estimado también la irradiancia en paredes verticales con el modelo de Pérez utilizando como entrada los valores DNI y DHI derivados del modelo de Louche.

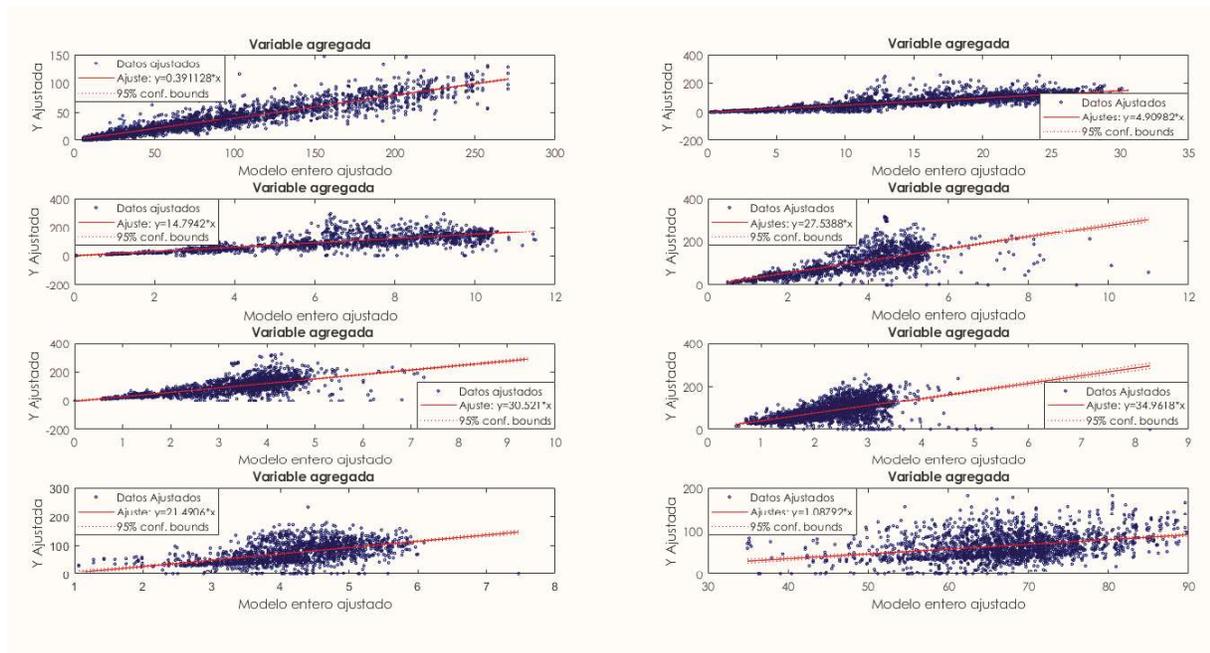


Figura 56. Desempeño de los modelos lineales. Elaboración propia.

3.3 RESULTADO MODELO NUEVO

Al despejar I_{90} de la expresión $Y = I_{90} - DNI \cos(\theta_i)$ se obtiene la ecuación resultante para el cálculo de la irradiación en las superficies verticales:

$$I_{90} = a + b DHI + c \frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_z} + DNI * \cos \theta_i$$

Donde

I_{90} = Irradiación solar en la superficie vertical

a, b, c = coeficientes resultantes del análisis de los coeficientes ϵ de Pérez (Tabla

DHI = Irradiación difusa horizontal, calculada con el modelo de Louche

DNI = Irradiación directa normal horizontal, calculada con el modelo de Louche

θ_i = Ángulo de incidencia en la superficie vertical

$\cos \theta_z$ = ángulo cenital

Evaluación de modelo nuevo

La incertidumbre del modelo de Pérez aplicado a todas las paredes fue de -3.38% (-6-63 W/m²) y 24.11 % (36.32 W/m²) de MBE y RMSE, respectivamente.

El nuevo modelo propuesto con los parámetros enumerados en la tabla 16 dió una incertidumbre de 1.44% (2.83 W/m²) y 22.47% (33.85 W/m²) de MBE y RMSE, respectivamente.

La figura 57 muestra las gráficas de dispersión de los datos del modelo Perez y del nuevo modelo propuesto.

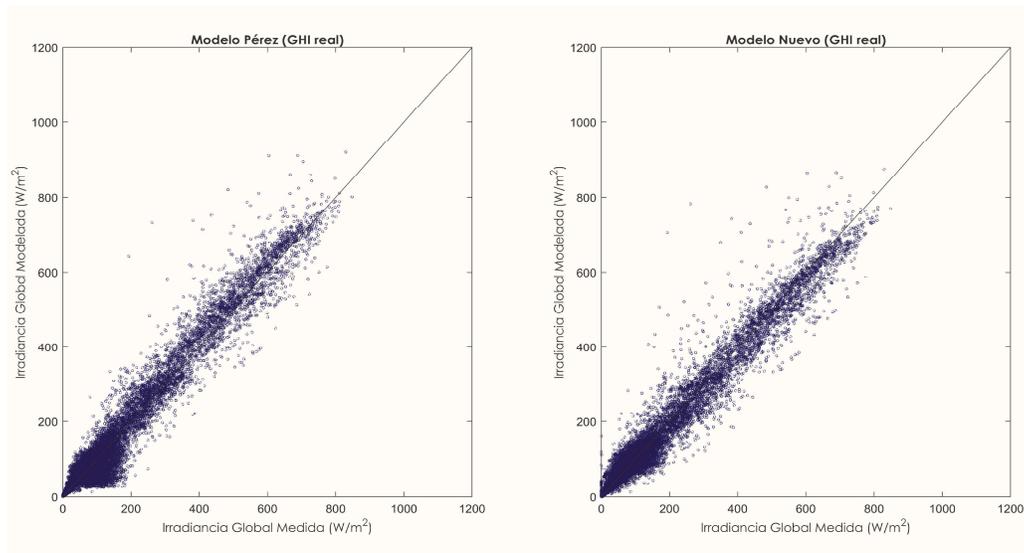


Figura 57. Gráficas de Dispersión del modelo de Perez y el Nuevo modelo para el cálculo de la irradiación en fachadas de México. Elaboración propia.

El modelo propuesto es entonces un estimador imparcial de la irradiación del cielo solar en paredes verticales para México.

Adicional a lo anterior, para lograr mayor exactitud, se realiza el cálculo para cada fachada, la ecuación mantiene la misma estructura, sólo los coeficientes *a, b, c*, obtienen los siguientes valores :

Coeficientes para la fachada Norte			
Categoría	a	b	c
Coeficientes de Irradiación			
$1 \leq \varepsilon < 1.065$	0.9744	0.3425	-0.7565
$1.065 \leq \varepsilon < 1.23$	2.8171	0.3142	0.1946
$1.23 \leq \varepsilon < 1.5$	0.0248	0.3088	6.7346
$1.5 \leq \varepsilon < 1.95$	1.5003	0.2990	4.0889
$1.95 \leq \varepsilon < 2.8$	2.1614	0.3254	-2.1650
$2.8 \leq \varepsilon < 4.5$	3.7252	0.3709	-51.6236
$4.5 \leq \varepsilon < 6.2$	-3.1774	0.4643	-21.8287
$6.2 \leq \varepsilon$	-11.7791	0.6139	-126.225

Coeficientes para la fachada Sur			
Categoría	a	b	c
Coeficientes de Irradiación			
$1 \leq \varepsilon < 1.065$	1.6514	0.3602	-0.5227
$1.065 \leq \varepsilon < 1.23$	-1.1527	0.3873	6.4965
$1.23 \leq \varepsilon < 1.5$	1.1318	0.3985	14.9833
$1.5 \leq \varepsilon < 1.95$	4.7778	0.3889	24.4200
$1.95 \leq \varepsilon < 2.8$	1.7559	0.4203	24.8283
$2.8 \leq \varepsilon < 4.5$	15.4790	0.3807	17.5825
$4.5 \leq \varepsilon < 6.2$	-25.810	0.7448	15.5794
$6.2 \leq \varepsilon$	10.3529	0.5027	-8.9893

Coeficientes para la fachada Este				Coeficientes para la fachada Oeste			
Categoría	a	b	c	Categoría	a	b	c
	Coeficientes de Irradiación				Coeficientes de Irradiación		
$1 \leq \varepsilon < 1.065$	2.6751	0.3562	-0.2221	$1 \leq \varepsilon < 1.065$	-3.1973	0.4047	0.8555
$1.065 \leq \varepsilon < 1.23$	-4.3616	0.3853	4.4166	$1.065 \leq \varepsilon < 1.23$	-1.5194	0.4044	5.9854
$1.23 \leq \varepsilon < 1.5$	-0.2443	0.3677	13.5288	$1.23 \leq \varepsilon < 1.5$	0.2499	0.3988	16.3764
$1.5 \leq \varepsilon < 1.95$	22.0406	0.3050	25.8115	$1.5 \leq \varepsilon < 1.95$	-4.7468	0.3916	24.0004
$1.95 \leq \varepsilon < 2.8$	41.5600	0.2711	27.0469	$1.95 \leq \varepsilon < 2.8$	-14.4742	0.4282	23.5353
$2.8 \leq \varepsilon < 4.5$	41.6831	0.2763	40.1652	$2.8 \leq \varepsilon < 4.5$	-10.4916	0.4508	8.6343
$4.5 \leq \varepsilon < 6.2$	32.0083	0.4469	22.2278	$4.5 \leq \varepsilon < 6.2$	-24.5595	0.6193	-8.4907
$6.2 \leq \varepsilon$	46.7145	0.2791	9.1487	$6.2 \leq \varepsilon$	-32.1738	0.8275	-52.6535

Tabla 17. Parámetros del nuevo modelo propuesto de irradiación solar en fachadas verticales en México. Elaboración propia.

Las siguientes gráficas de dispersión muestran la mejora del modelo nuevo cuando los coeficientes por fachada son utilizados, los valores de MBE y RMSE calculados para las cuatro fachadas resultan en -0.08 % (-0.17 W/m²) y 14.49 % (28.37 W/m²) respectivamente.

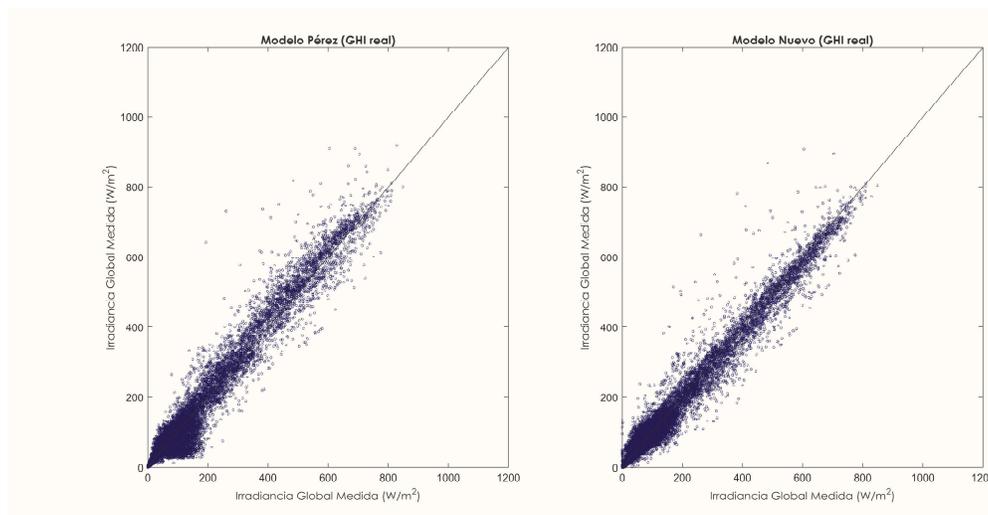


Figura 58. Gráficas de dispersión del modelo de Perez y el Nuevo modelo para el cálculo de Irradiación por fachadas de México. Elaboración propia.

Las gráficas muestran una disminución de 2.63% en MBE y 9.89% en RMSE comparado con el modelo Pérez.

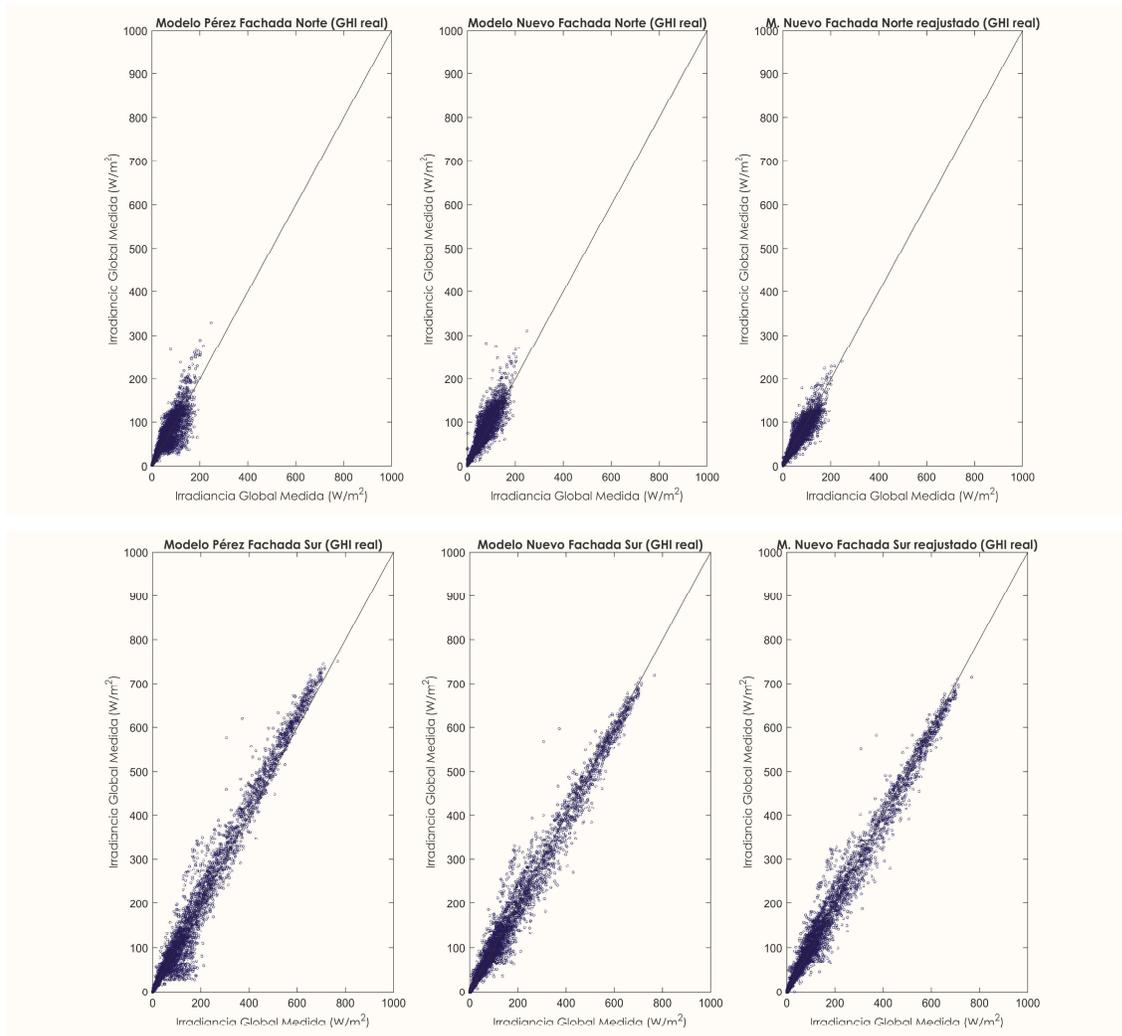
El desglose de los valores de MBE y RMSE para Pérez, el modelo nuevo general y el modelo nuevo por fachada se muestra en la siguiente tabla.

Comparativa anual de valores estadísticos						
	Modelo Pérez		Modelo nuevo general		Modelo nuevo por fachada	
Fachada	MBE %	RMSE %	MBE %	RMSE %	MBE %	RMSE %
Norte	-6.67	37.41	-13.65	33.04	-0.12	26.96
Sur	-3.38	17.53	1.44	14.90	-0.08	14.49
Este	2.13	20.75	4.52	21.27	-0.18	20.11
Oeste	-7.90	30.05	-3.19	27.05	-0.44	23.73

Tabla 18. Comparativa anual de resultados de valores MBE y RMSE en desarrollo de nuevo modelo. Elaboración propia.

De lo anterior se observa la mejora en la exactitud del nuevo modelo al disminuir considerablemente los valores de MBE, la mejora de la superficie norte fue la más notable (RMSE) mejorando la repetibilidad del modelo.

Las siguientes gráficas muestran la mejora desde el modelo de Pérez pasando por el modelo nuevo hasta el cálculo del modelo nuevo por fachada.



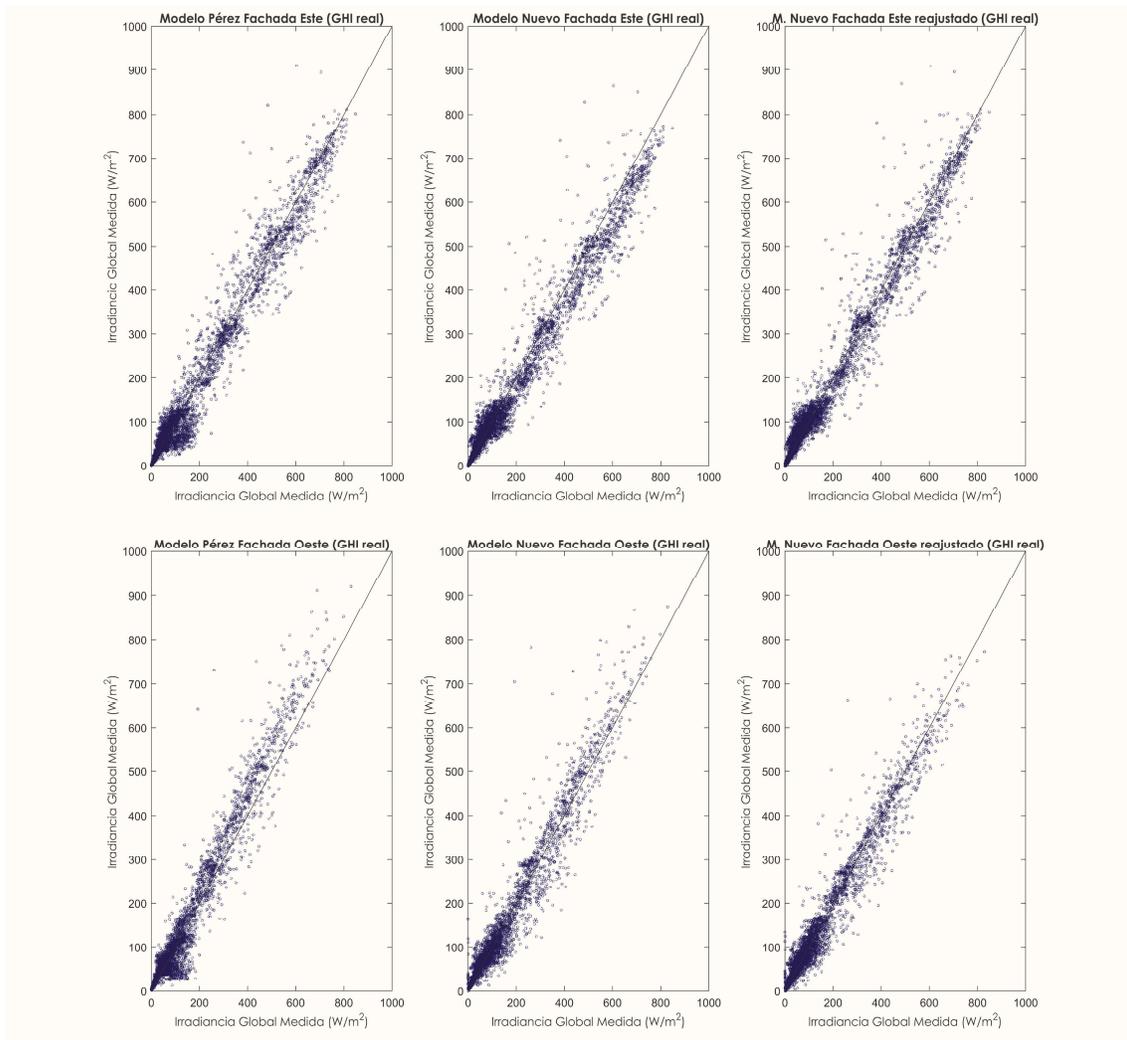


Figura 59. Gráficas de dispersión del proceso de mejora del nuevo modelo en cada una de las cuatro fachadas. Elaboración propia.

A continuación comparativas entre la irradiancia real medida y la irradiancia calculada con el nuevo modelo propuesto. Las gráficas se realizaron para días despejados del año.

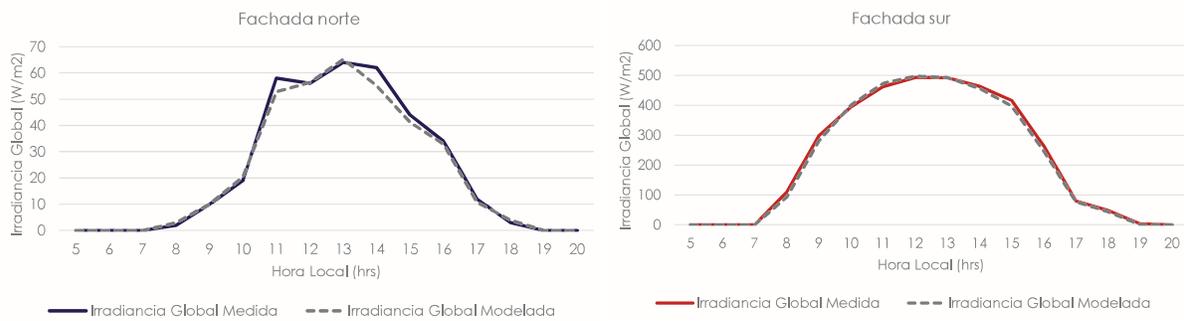


Figura 60. Comparativa de irradiancia global medida y modelada. Día despejado 24-Diciembre. Ciudad Universitaria(19° 20' 01''N, 99°11'54'' O).Elaboración propia.

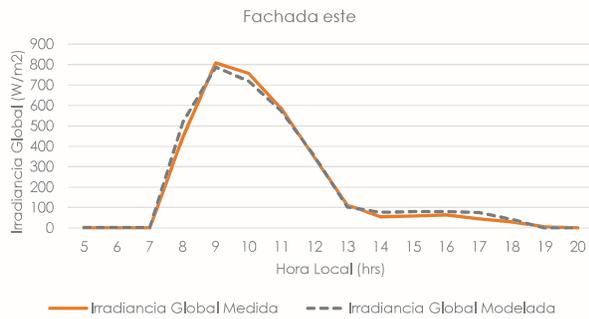


Figura 61. Comparativa de irradiancia global medida y modelada. Día despejado 28- Febrero. Ciudad Universitaria(19° 20' 01''N, 99°11'54'' O). Elaboración propia.



Figura 62. Comparativa de irradiancia global medida y modelada. Día despejado 8-Marzo. Ciudad Universitaria(19° 20' 01''N, 99°11'54'' O). Elaboración propia.

Figura 63. Comparativa de irradiancia global medida y modelada. Día despejado 21-Enero. Ciudad Universitaria(19° 20' 01''N, 99°11'54'' O).Elaboración propia.

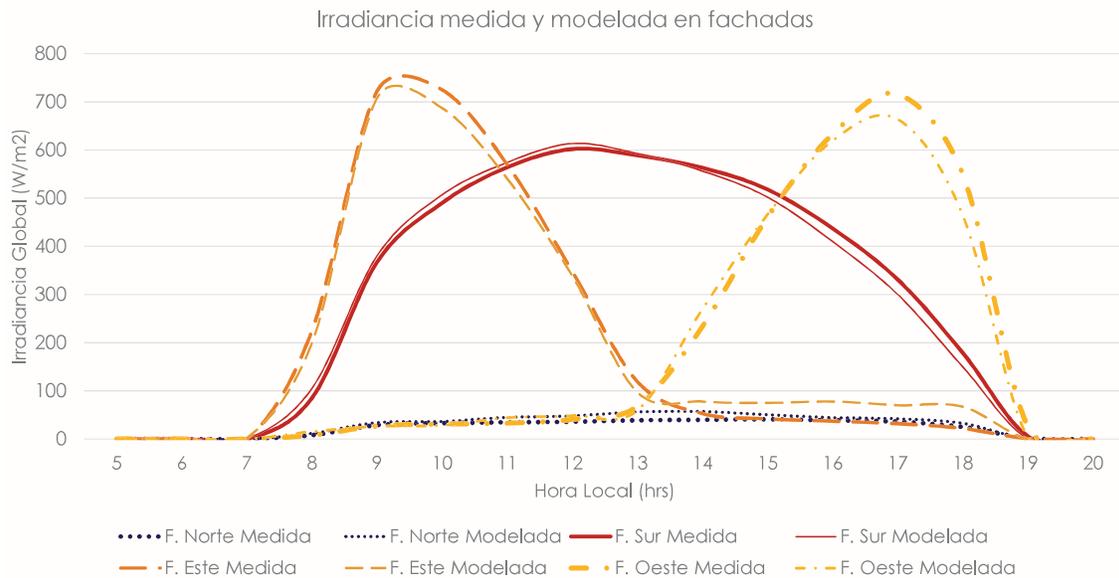


Figura 64. Comparativa de irradiancia global medida y modelada. Día despejado 9-Febrero. Ciudad Universitaria (19° 20' 01''N, 99°11'54'' O).Elaboración propia.

3.3.1 EVALUACIÓN MODELO NUEVO

Gráficas de residuos

A continuación se muestran gráficos de diagnóstico. Los residuos (la diferencia entre los datos reales medidos y los valores calculados por el modelo) se grafican contra los valores calculados por el modelo. En esta gráfica los residuos tienen media 0, y también la correlación entre los residuos y los valores ajustados es 0. Por tanto, la recta de mínimos cuadrados es horizontal, pasando a través del 0 sobre el eje vertical. En el cálculo por fachada se muestran ambos modelos Perez y el nuevo desarrollado.

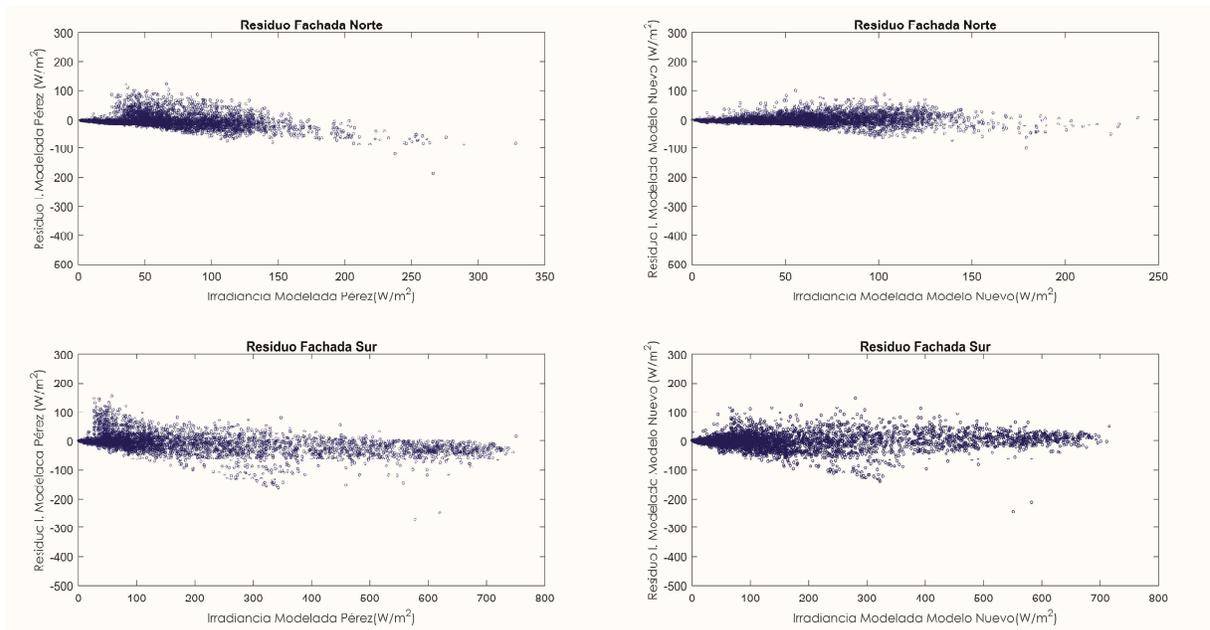


Figura 65. Prueba de residuos para las fachadas norte y sur modelo Pérez. Elaboración propia.

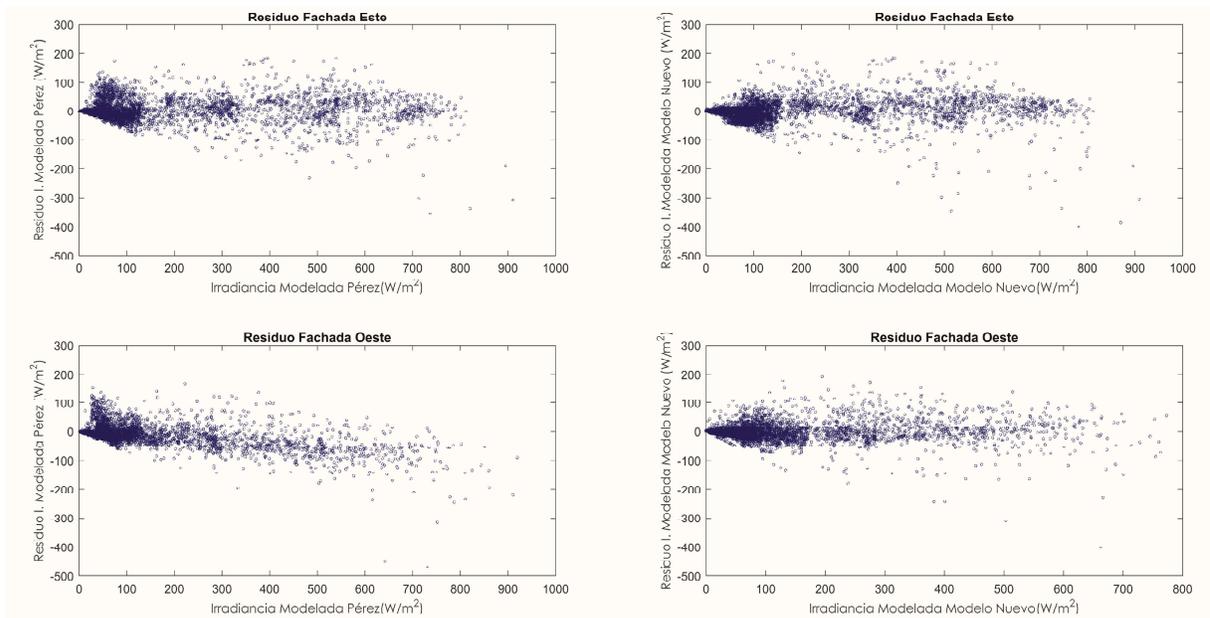


Figura 66. Prueba de residuos para las fachadas este y oeste modelo Nuevo. Elaboración propia.

En este caso, las gráficas cuyos puntos estén más dispersos, son los más óptimos. La dispersión fue mejorada en el modelo nuevo, el cual al estar basado en el modelo Pérez tienen comportamientos similares.

APLICACIÓN ARQUITECTÓNICA

4

La frecuencia de las medidas de radiación solar requerida depende de la aplicación, mientras que en agricultura promedios mensuales o anuales son suficientes, estudios detallados de cálculo y simulación en superficies inclinadas o verticales requieren datos en forma horaria o subhoraria. Para aplicaciones fotovoltaicas, investigadores demandan datos con frecuencia minuta y para análisis breves de sistemas de energía solar, se usan valores diarios.

Existen diversos ejemplos sobre cómo la radiación solar, en sus diversas formas, tiene aplicación en el sector arquitectónico, por mencionar algunos:

- Diseño de pinturas para fachadas que retarden su deterioro ante factores climáticos como lo es principalmente la radiación solar, traduciéndose en ahorros de mantenimiento y mejoras en el aspecto visual arquitectónico y psicológico⁶⁸.
- Verificación del funcionamiento térmico de muros y envolventes. El diseño de un muro con sus diferentes capas, entre ellos aislantes, pueden ser comprobados relacionando la energía que recibe la fachada con la temperatura interior dependiendo de la orientación⁶⁹.
- Diseño de huertos verticales urbanos. Los valores de radiación son utilizados para evaluar los requerimientos diarios para cultivos y crear estrategias de sombreado en caso de alta insolación⁷⁰.
- Envolventes cinéticas de edificios. Para regular la resistencia de calor por medio de la radiación, se diseñan y programan prototipos en las fachadas, estos pueden adoptar diferentes modalidades de protección y aislamiento térmico gracias a los datos de periodicidad y referencia constante de la intensidad de la radiación solar⁷¹.
- Reacondicionamiento de viviendas. La radiación solar global es utilizada para diagnóstico térmico del edificio, cálculos de zona de confort y simulación de estrategias para la mejora de la vivienda⁷².

68 Reyes Martínez, M. G., Flores Sandoval, D. A., Ocampo Ruiz, E., Tavera Dávila, M. L., Verduzco Chirino, G., & Muciño Vélez, A. (2015). *El comportamiento cromático de la pintura sintética como recubrimiento en fachadas arquitectónicas en relación a la radiación solar*.

69 Sánchez Benítez, R., & Zeevaert Alcántara, L. B. (2017). *Diseño y caracterización de espacios experimentales : módulo de experimentación del Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura*.

70 González Mandujano, O., & Zeevaert Alcántara, L. (2017). *Envolvente arquitectónica para horticultura urbana*.

71 Moya González, G. I., Ocampo Ruiz, E., Marambio Castillo, A., Reyna Gómez, F., Rangel Dávalos, J., & Valeriano Flores, A. (2017). *Envolvente cinética : hacia una superficie adaptable al medio ambiente*.

72 Medrano Gómez, L. E., & Escobedo Izquierdo, M. A. (2017). *Reacondicionamiento de vivienda de interés social existente : análisis del mejoramiento térmico y energético para la recuperación del inventario de vivienda : caso Jojutla, Morelos*.

Para ilustrar más a detalle la aplicación de datos de radiación solar, principalmente la utilización real de los mismos en arquitectura, a continuación se muestran ejercicios sencillos que consisten en la obtención de la energía producida por la colocación de paneles fotovoltaicos integrados en las fachadas de un edificio.

Esta energía de los paneles fué calculada con las mediciones reales de irradiación global vertical obtenidas en el observatorio 2 de este proyecto y la irradiancia global simulada por un programa de cómputo. La comparación de ambos resultados muestra la brecha entre simular y utilizar datos reales.

Paneles fotovoltaicos en fachada translúcida.

Se toma el edificio conocido como "Torre el caballito", sede de las oficinas de Servicio de Administración tributaria (SAT), ubicado en Paseo de la Reforma #10, Delegación Cuauhtémoc en la Ciudad de México.

El cálculo de la energía fotovoltaica generada se calcula en un formato sencillo de excel.

En el primer apartado se colocan las características de los módulos fotovoltaicos elegidos: Paneles de silicio amorfo fabricados por la empresa Onyx Solar⁷³. Al ser personalizables, las medidas de los paneles se dimensionan 3.125 m x 1.80 m para mantener la modulación de los cristales actuales del edificio. La potencia dada por el fabricante para estos paneles es 34 W (Pp módulo (w)).



Figura 67. Colocación de las características de paneles fotovoltaicos para calcular la energía generada en las fachadas.Elaboración propia.

La siguiente sección se refiere a la superficie disponible para colocar los paneles. El número de módulos depende de su tamaño (ancho y altura) y de las dimensiones de la superficie disponible en cada fachada. Las medidas de largo y ancho de cada fachada del edificio son las mismas.

73 Onyx Solar. (Noviembre 2017). Recuperado de <https://www.onyxosolar.com/es/vidrio-fotovoltaico/especificaciones-vidrio>



Superficie disponible y potencia instalada											
Fachada Sur											
L (m)	W (m)	S(m²)	nº módulos	Pp generador	Superficie ocupada por el generador (m²)			Irradiación	Rend. sistema	Energía fotovoltaica generada	
mód./columna	módulos/fila				L gener (m)	W gener (m)	S gener (m²)	SFV/Stotal	Yr (sur)	PR	Efv(kWh/año)
103.24	37.50	3871.50									
Mensual											
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	138.41	0.75	2,414.14	
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	116.57	0.75	2,033.30	
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	82.51	0.75	1,439.14	
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	51.21	0.75	893.21	
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	42.60	0.75	743.05	
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	39.45	0.75	688.15	
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	41.65	0.75	726.54	
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	47.80	0.75	833.73	
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	57.62	0.75	1,005.09	
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	85.02	0.75	1,482.85	
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	91.52	0.75	1,596.29	
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	136.23	0.75	2,376.06	
Anual											
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	684.00	930.60	0.75	16,231.55	

Figura 68. Colocación de las características de paneles fotovoltaicos para cálculo de energía generada en las fachadas. Elaboración propia.

Los cálculos siguientes se realizan de forma mensual, de enero a diciembre en forma descendente y finamente anual.

La altura y el ancho del del edificio se divide entre el ancho y alto del módulo fotovoltaico para obtener la distribución de los paneles en las fachadas de forma horizontal.

Superficie disponible y potencia instalada											
Fachada Sur											
L (m)	W (m)	S(m²)	nº módulos	Pp generador	Superficie ocupada por el generador (m²)			Irradiación	Rend. sistema	Energía fotovoltaica generada	
103.24	37.50	3871.50			L gener (m)	W gener (m)	S gener (m²)	SFV/Stotal	Yr (sur)	PR	Efv(kWh/año)
Mensual											
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	138.41	0.75	2,414.14	
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	116.57	0.75	2,033.30	
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	82.51	0.75	1,439.14	
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	51.21	0.75	893.21	
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	42.60	0.75	743.05	
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	39.45	0.75	688.15	
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	41.65	0.75	726.54	
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	47.80	0.75	833.73	
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	57.62	0.75	1,005.09	
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	85.02	0.75	1,482.85	
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	91.52	0.75	1,596.29	
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	136.23	0.75	2,376.06	
Anual											
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	684.00	930.60	0.75	16,231.55	

Figura 69. Cálculo de cantidad de módulos fotovoltaicos por fachada. Elaboración propia.

Para calcular la potencia generada se multiplica el número de módulos por la potencia de cada módulo fotovoltaico y se divide entre mil para obtener el resultado en Kw.

Excel										
Características de los módulos										
Identificación		Dimensiones			Características eléctricas					
Fabricante	Modelo	L(m)	W(m)	S(m²)	Pp módulo(W)	P/m² (W/m²)	Eff	Eff(%)		
Onyx Solar	L-vision	3.125	1.80	5.63	34	6.04	0.01	0.60		
Superficie disponible y potencia instalada										
Fachada Sur										
L (m)	W (m)	S(m²)	n° módulos	Pp generador	Superficie ocupada por el generador (m²)			Irradiación	Rend. sistema	Energía fotovoltaica generada
103.24	37.50	3871.50								
mód./columna	módulos/fila		Pgen(kW)	L gener (m)	W gener (m)	S gener (m²)	SFV/Stotal	Yr (sur)	PR	Efv(kWh/año)
Mensual										
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	138.41	0.75	2,414.14
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	116.57	0.75	2,033.30
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	82.51	0.75	1,439.14
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	51.21	0.75	893.21
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	42.60	0.75	743.05
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	39.45	0.75	688.15
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	41.65	0.75	726.54
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	47.80	0.75	833.73
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	57.62	0.75	1,005.09
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	85.02	0.75	1,482.85
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	91.52	0.75	1,596.29
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	136.23	0.75	2,376.06
Anual										
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	684.00	930.60	0.75	16,231.55

Figura 70. Potencia generada por los paneles seleccionados. Elaboración propia.

El siguiente paso es colocar la Irradiación global mensual y anual (Yr), se utiliza las obtenidas por el observatorio 2 en esta investigación, expresadas en kWh/m2.

Excel										
Características de los módulos										
Identificación		Dimensiones			Características eléctricas					
Fabricante	Modelo	L(m)	W(m)	S(m²)	Pp módulo(W)	P/m² (W/m²)	Eff	Eff(%)		
Onyx Solar	L-vision	3.125	1.80	5.63	34	6.04	0.01	0.60		
Superficie disponible y potencia instalada										
Fachada Sur										
L (m)	W (m)	S(m²)	n° módulos	Pp generador	Superficie ocupada por el generador (m²)			Irradiación	Rend. sistema	Energía fotovoltaica generada
103.24	37.50	3871.50								
mód./columna	módulos/fila		Pgen(kW)	L gener (m)	W gener (m)	S gener (m²)	SFV/Stotal	Yr (sur)	PR	Efv(kWh/año)
Mensual										
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	138.41	0.75	2,414.14
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	116.57	0.75	2,033.30
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	82.51	0.75	1,439.14
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	51.21	0.75	893.21
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	42.60	0.75	743.05
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	39.45	0.75	688.15
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	41.65	0.75	726.54
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	47.80	0.75	833.73
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	57.62	0.75	1,005.09
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	85.02	0.75	1,482.85
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	91.52	0.75	1,596.29
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	136.23	0.75	2,376.06
Anual										
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	684.00	930.60	0.75	16,231.55

Figura 71. Potencia generada por los paneles seleccionados. Elaboración propia.

El valor PR para el rendimiento del sistema tiene en cuenta pérdidas producidas por suciedad y/o deterioro de los paneles fotovoltaicos, PR suele tener un valor de 0.75.

Excel										
Características de los módulos										
Identificación		Dimensiones			Características eléctricas					
Fabricante	Modelo	L(m)	W(m)	S(m²)	Pp módulo(W)	P/m² (W/m²)	Eff	Eff(%)		
Onyx Solar	L-vision	3.125	1.80	5.63	34	6.04	0.01	0.60		
Superficie disponible y potencia instalada										
Fachada Sur										
L (m)	W (m)	S(m²)	n° módulos	Pp generador	Superficie ocupada por el generador (m²)			Irradiación	Rend. sistema	Energía fotovoltaica generada
103.24	37.50	3871.50								
mód./columna	módulos/fila		Pgen(kW)	L gener (m)	W gener (m)	S gener (m²)	SFV/Stotal	Yr (sur)	PR	Efv(kWh/año)
Mensual										
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	138.41	0.75	2,414.14
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	116.57	0.75	2,033.30
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	82.51	0.75	1,439.14
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	51.21	0.75	893.21
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	42.60	0.75	743.05
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	39.45	0.75	688.15
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	41.65	0.75	726.54
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	47.80	0.75	833.73
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	57.62	0.75	1,005.09
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	85.02	0.75	1,482.85
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	91.52	0.75	1,596.29
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	136.23	0.75	2,376.06
Anual										
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	684.00	930.60	0.75	16,231.55

Figura 72. Potencia generada por los paneles seleccionados. Elaboración propia.

Finalmente, para obtener la energía fotovoltaica generada mensualmente y anualmente, se multiplica la potencia del generador por la irradiación global vertical y por el valor PR.

Excel										
Características de los módulos										
Identificación		Dimensiones			Características eléctricas					
Fabricante	Modelo	L(m)	W(m)	S(m²)	Pp módulo(W)	P/m² (W/m²)	Eff	Eff(%)		
Onyx Solar	L-vision	3.125	1.80	5.63	34	6.04	0.01	0.60		
Superficie disponible y potencia instalada										
Fachada Sur										
L (m)	W (m)	S(m²)	n° módulos	Pp generador	Superficie ocupada por el generador (m²)			Irradiación	Rend. sistema	Energía fotovoltaica generada
103.24	37.50	3871.50								
mód./columna	módulos/fila		Pgen(kW)	L gener (m)	W gener (m)	S gener (m²)	SFV/Stotal	Yr (sur)	PR	Efv(kWh/año)
Mensual										
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	138.41	0.75	2,414.14
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	116.57	0.75	2,033.30
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	82.51	0.75	1,439.14
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	51.21	0.75	893.21
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	42.60	0.75	743.05
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	39.45	0.75	688.15
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	41.65	0.75	726.54
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	47.80	0.75	833.73
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	57.62	0.75	1,005.09
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	85.02	0.75	1,482.85
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	91.52	0.75	1,596.29
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	0.99	136.23	0.75	2,376.06
Anual										
57	12	684	23.26	102.60	37.50	3847.50	684.00	930.60	0.75	16,231.55

Figura 73. Cálculo de energía fotovoltaica generada mensualmente y anualmente. Elaboración propia.

Para la segunda parte, los valores de la columna Irradiación (Yr) del formato excel, son sustituidos por los valores de irradiancia global vertical calculados por un programa de simulación.

El programa designado es System Advisor Model (SAM), utiliza modelos informáticos desarrollados por el National Renewable Energy Laboratories (NREL), Sandia National Laboratories, la Universidad de Wisconsin y otras organizaciones.

Al estar diseñado para simulaciones más complejas que lo que se calcula en la tabla excel, el programa pide más datos de los paneles seleccionados e inversores, se colocarán datos promedios acorde con los paneles manejados sólo como requisito para que el programa permita correr la simulación. Los pasos se describen a continuación.

Para describir el recurso de energía y las condiciones climáticas de la ubicación del proyecto, SAM requiere un archivo de datos meteorológicos, este se generó para la Ciudad de México con el programa Meteonorm 7.

El primer apartado esta dedicado a la ubicación del edificio a simular, el archivo de clima creado en Meteonorm se carga en esta sección.

También aquí se selecciona entre los modelos Perez, Isotrópico y HDKR para el cálculo de la irradiancia difusa en las fachadas, el modelo que sea seleccionado toma la radiación global y difusa horizontal contenida en el archivo del clima y calcula la irradiancia en las fachadas del edificio elegido.

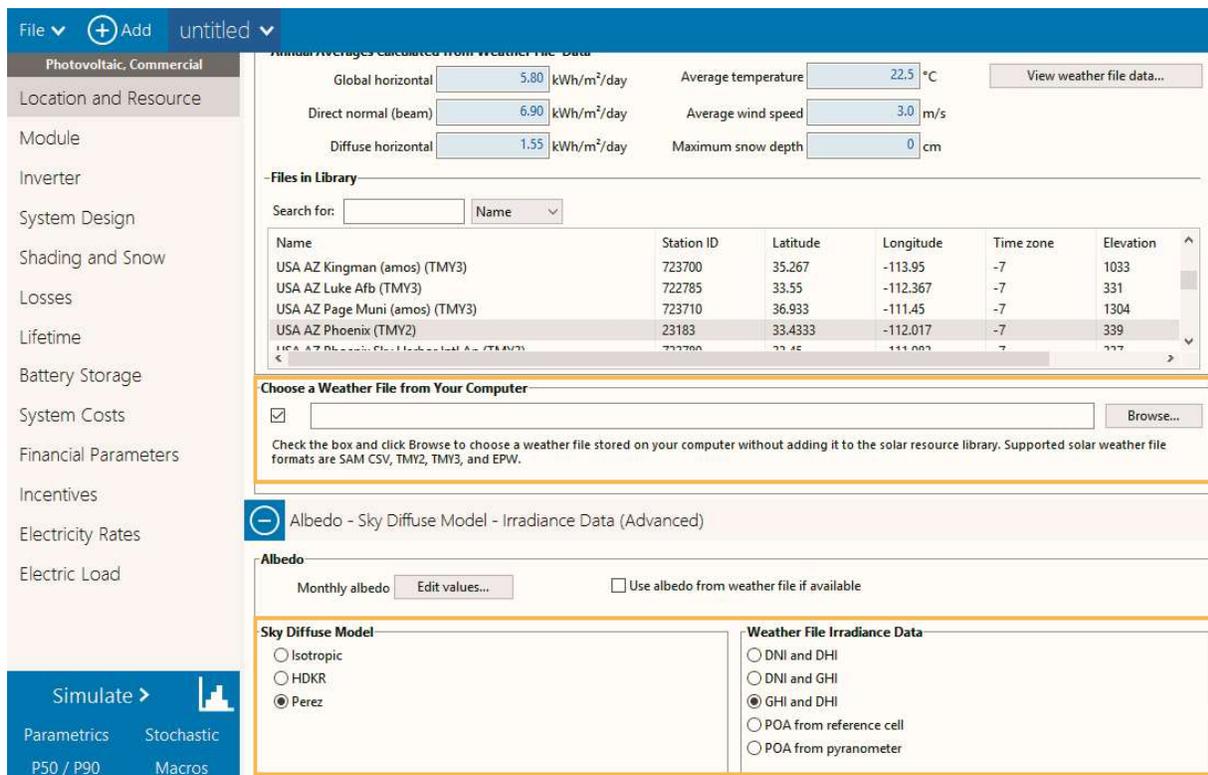


Figura 74. Carga del archivo de clima y modelo de cálculo de irradiancia difusa. Elaboración propia.

En la pestaña segunda y tercera se especifican las características del módulo fotovoltaico y el inversor elegido respectivamente. Las casillas que no están marcadas en el recuadro amarillo, se rellenan con datos promedios de paneles de silicio amorfo.

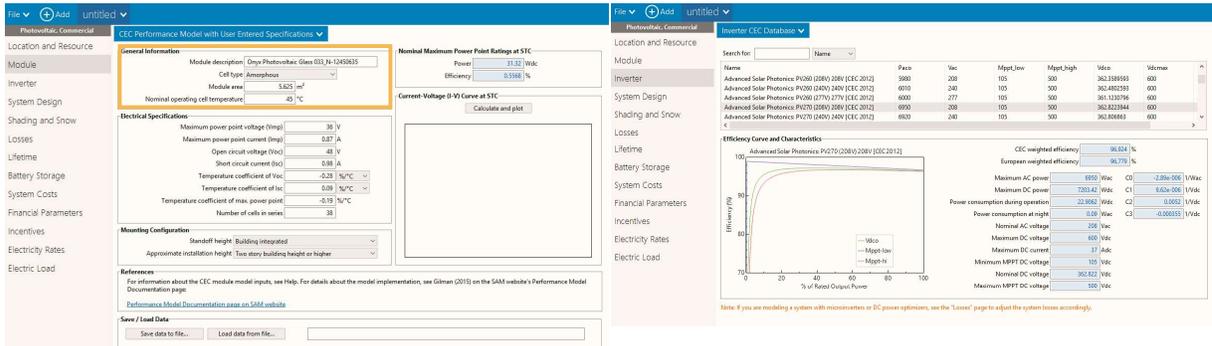


Figura 75. Colocación de características de paneles fotovoltaicos e inversor en programa de cómputo SAM.

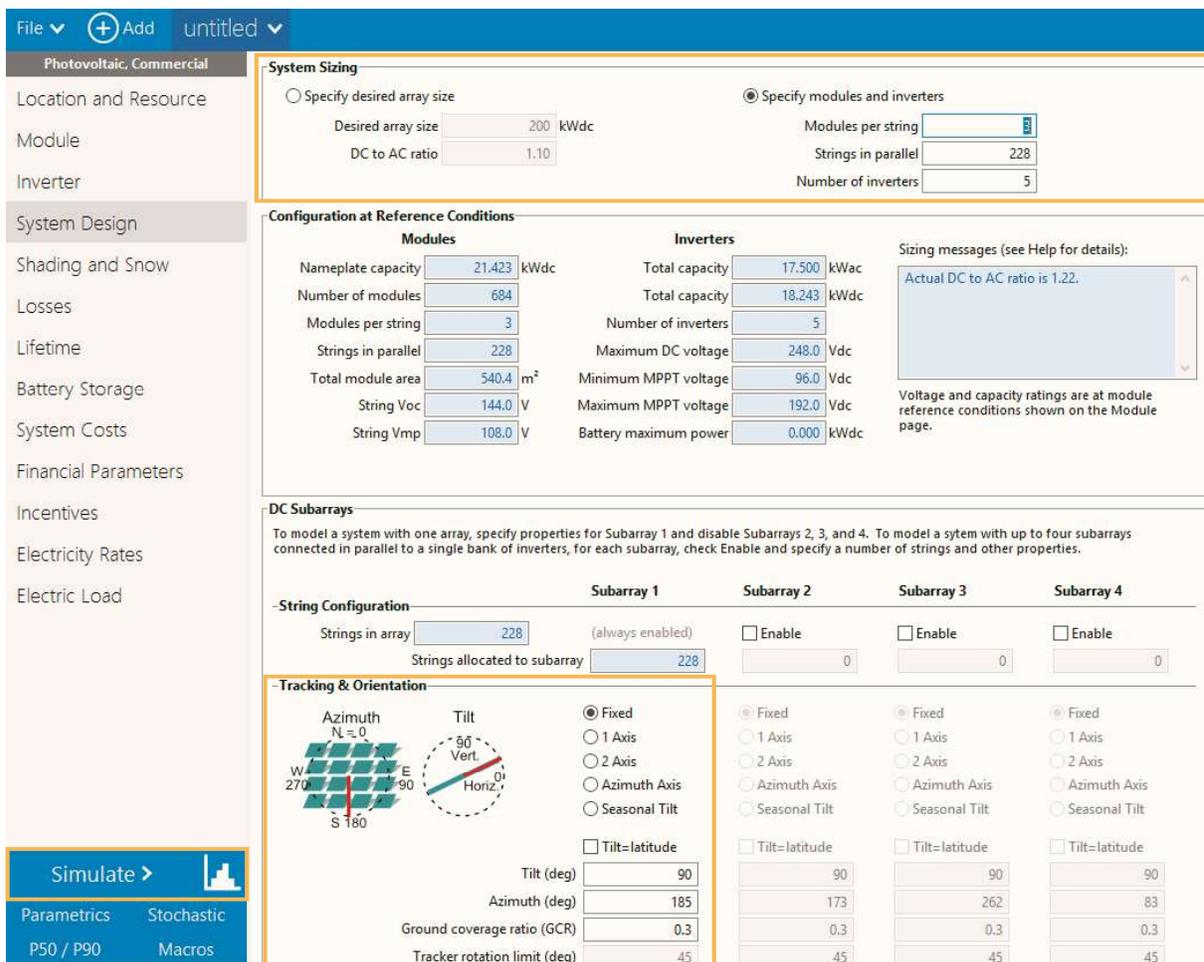


Figura 76. Carga del archivo de clima y modelo de cálculo de irradiancia difusa. Elaboración propia.

En la cuarta pestaña de la interfaz (Fig.70), se especifica el diseño del sistema fotovoltaico, es decir, el número y disposición de paneles propuestos.

En la parte inferior de esta sección, se introducen los grados de inclinación de los paneles fotovoltaicos y la orientación del edificio, fundamentales para el cálculo de la irradiancia en cada una de las fachadas. La inclinación de los paneles, es 90° por estar integrados verticalmente en los muros. El acimut es 185° porque calcula la fachada sur (los acimuts del edificio se consideran los mismos que el observatorio 2 con el fin de hacer una comparación más precisa entre el cálculo del programa de cómputo y las mediciones reales).

Para los fines del ejercicio, en este punto ya se puede correr el programa en "Simulate".

Se recuerda que los resultados mostrados en la primera pestaña se descartan por ser influenciados por más variables que las consideradas en el formato excel, por lo que nos dirigimos a seleccionar sólo la irradiancia global vertical en formato horario calculada por SAM para sustituir este valor en el formato excel.

Dicha información se encuentra en la pestaña de resultados Tablas de datos ("Data tables"), siguiendo la subpestaña de datos horarios ("Hourly Data"), desglosando finalmente la tabla "Subarray 1 POA total irradiance nominal (W/m2)". Se finaliza convirtiendo los datos en valores de irradiación (kWh/m2).

Time	Subarray 1 POA total irradiance nominal (W/m2)
Jan 1, 12:00 am	0
Jan 1, 01:00 am	0
Jan 1, 02:00 am	0
Jan 1, 03:00 am	0
Jan 1, 04:00 am	0
Jan 1, 05:00 am	0
Jan 1, 06:00 am	0
Jan 1, 07:00 am	2.55226
Jan 1, 08:00 am	220.375
Jan 1, 09:00 am	446.997
Jan 1, 10:00 am	730.692
Jan 1, 11:00 am	722.82
Jan 1, 12:00 pm	555.187
Jan 1, 01:00 pm	316.927
Jan 1, 02:00 pm	36.3523
Jan 1, 03:00 pm	27.7251
Jan 1, 04:00 pm	17.1116
Jan 1, 05:00 pm	5.64157
Jan 1, 06:00 pm	0
Jan 1, 07:00 pm	0
Jan 1, 08:00 pm	0
Jan 1, 09:00 pm	0
Jan 1, 10:00 pm	0
Jan 1, 11:00 pm	0
Jan 2, 12:00 am	0
Jan 2, 01:00 am	0
Jan 2, 02:00 am	0
Jan 2, 03:00 am	0
Jan 2, 04:00 am	0
Jan 2, 05:00 am	0
Jan 2, 06:00 am	0
Jan 2, 07:00 am	9.84396
Jan 2, 08:00 am	349.808
Jan 2, 09:00 am	563.947
Jan 2, 10:00 am	671.122

Figura 77. Resultados de la Irradiancia global vertical simulada en el programa SAM. Elaboración propia.

Habiendo realizado los pasos anteriores para cada fachada, los resultados anuales de la energía generada son:

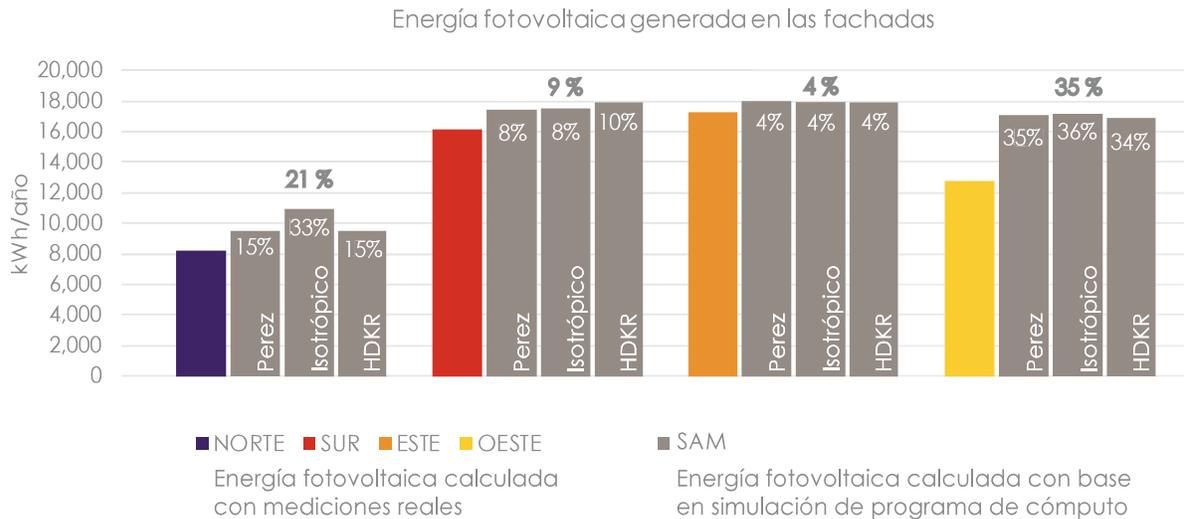


Figura 78. Comparativa anual de la irradiación global vertical calculada en las fachadas de un edificio con datos reales y simulada en programa de cómputo. Elaboración propia.

Cualquiera de los modelos elegidos para el cálculo de irradiancia en el programa SAM da como resultado una sobreestimación de la energía fotovoltaica generada. El cálculo más aproximado a los valores reales fue la fachada este, mientras que el menos aproximado fue la oeste. El rango promedio de sobreestimación anual es del 4 al 35%, mientras que el porcentaje promedio de sobreestimación de las 4 fachadas es 17%.

En la práctica fotovoltaica, la energía anual generada por los paneles para todo el edificio es la suma de la energía de las fachadas excepto la norte: 46,205 kWh con las mediciones reales; en SAM, al tener 3 modelos de cálculo, la suma promedio de los tres es 52,730.48 kWh. Con estos valores obtenidos, la sobreestimación total anual para todo el edificio resulta en un 14%.

Energía fotovoltaica generada en edificio (kWh/m2)				
Fachada	Medición real	SAM (Perez)	SAM (Isotrópico)	SAM (HDKR)
Norte	8,237.00	9,490.21	10,983.64	9,492.72
Sur	16,231.55	17,487.24	17,554.03	17,928.41
Este	17,291.61	18,023.69	17,954.96	18,008.08
Oeste	12,681.83	17,092.62	17,193.33	16,949.08
Suma	46,205.00			
Suma promedio			52,730.48	

Tabla 19. Resultados del cálculo de energía fotovoltaica generada anualmente en edificio "Torre el caballito". Elaboración propia.

Paneles fotovoltaicos en muros

En este ejercicio se calculó la energía generada por paneles fotovoltaicos colocados en los muros opacos del edificio. Adicional al ejercicio anterior, se cuenta con el consumo energético del inmueble, por lo que se puede hablar de la contribución de la energía fotovoltaica al balance energético del mismo.

La obra seleccionada es el edificio de Retoría UNAM, ubicado en ciudad universitaria, Ciudad de México. Las características de los paneles a introducir en el formato excel para este ejercicio fueron: Paneles fotovoltaicos monocristalinos de la empresa Solarsol modelo SSM31⁷⁴, dimensiones de 1.64 x 0.992 m y potencia de 310 W.

Los porcentajes de sobreestimación para cada fachada resultan las mismas que la figura 72, ya que la base de los cálculos es la irradiancia solar.

La energía anual fotovoltaica generada para todo el edificio es 140,599.13 kWh con las mediciones reales y 174,101.21 kWh la suma promedio en SAM, resultando en una sobreestimación total para el sistema fotovoltaico de 24%.

Energía fotovoltaica generada en edificio (kWh/m2)				
Fachada	Medición real	SAM (Perez)	SAM (Isotrópico)	SAM (HDKR)
Sur	26,180.15	28,205.47	28,313.19	28,917.04
Este	27,659.44	28,830.47	28,720.52	28,805.49
Oeste	86,759.54	116,934.80	117,623.81	115,952.84
Suma	140,599.13			
Suma promedio			174,101.21	

Tabla 20. Resultados de cálculo de energía fotovoltaica generada en muros de edificio Rectoría, UNAM. Elaboración propia.

El consumo eléctrico mensual promedio de la Torre de Rectoría⁷⁵ es de 68,916 kWh. Extrapolando este dato a los doce meses del año resultan 826,992 kWh. Con los datos de irradiación real los paneles generarían el 17% de lo que consume eléctricamente el edificio, con los resultados basados en SAM la cifra asciende a 21%.

Los ejercicios descritos permitieron conocer que se da una sobreestimación en el cálculo de energía por parte de un programa de cómputo, en este caso para aplicación fotovoltaica, el rango de esta sobreestimación (al menos para el programa SAM) es del 4% al 35% y que gran parte de este porcentaje se debe a la sobreestimación de la fachada oeste.

74 Solarsol. (Noviembre 2017). Recuperado de http://docs.wixstatic.com/ugd/865f69_29052466a79b4933a119f9078391bb30.pdf

75 Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Programas de ahorro de Energía. (2016). *Informe Medición de parámetros eléctricos Rectoría subestación Torre*.

Los rangos obtenidos pueden variar de otros programas por las características intrínsecas propias de cada uno, no obstante, varios de ellos utilizan modelos de irradiancia descritos en esta investigación, por lo que es de esperarse que otros programas para evaluación fotovoltaica en edificios ,inclusive de otro uso arquitectónico, como el cálculo térmico ,también sobreestimen la irradiancia solar y por consiguiente las cargas térmicas de la envolvente.

En el caso del programa SAM, si una simulación no se realiza con datos reales, esta puede ser ajustada con los porcentajes presentados; en otros obliga a crear estrategias que mejoren aún más los resultados para compensar la sobreestimación del programa de cómputo.

La utilización de la radiación solar con fines arquitectónicos puede ser muy diversa, usar datos reales mejora el desempeño de los productos y servicios ofrecidos al usuario. La evaluación de programas de simulación por medio de mediciones reales, brinda mayor claridad y consciencia del uso de estas herramientas en las primeras etapas del diseño.

CONCLUSIONES Y PROSPECTIVA

4.1 CONCLUSIONES

Esta investigación se realizó con base en tres puntos importantes, el análisis de datos reales de irradiación solar en fachadas en los cuatro puntos cardinales, en modelos matemáticos para el cálculo de la irradiancia solar global en fachadas a partir de la radiación global horizontal y en la utilización de estos modelos en un plano arquitectónico que generalmente se hace por medio de programas de simulación.

Este capítulo menciona los principales hallazgos de este trabajo, describe las limitaciones del estudio y las recomendaciones para futuros trabajos.

Del control y filtro de datos

El control y filtro de datos en grandes cantidades es una tarea que toma tiempo, es importante disponer de herramientas que permitan tener un manejo fluido de los mismos además de estrategias o parámetros que nos lleven de la cantidad a la calidad de los datos. Es recomendable el uso de etiquetas, no solo por su flexibilidad sino también por permitir identificar con más claridad los tipos de datos con los que se cuenta.

Los filtros que se han de utilizar, además de las recomendaciones que da la WMO., deben seleccionarse en función de la radiación que se quiere analizar en cuestión, la cantidad de datos y el tiempo que se dispone para ello. Existen filtros más específicos y complejos que pueden hacer aún más restrictiva la selección de los datos, específicamente para las radiaciones difusa y directa., por lo cual deben ser examinados con más detenimiento si el principal interés de su investigación está en alguna de estas dos radiaciones.

De las mediciones

Las mediciones y el análisis de los datos de radiación global y total, en las superficies verticales Norte, Sur, Este y Oeste registrados en la Cd. de México en los años 2014, 2016 y 2017, reafirman algunos comportamientos descritos anteriormente en la literatura con la geometría solar:

La fachada norte y sur tienen comportamientos opuestos y la fachada sur recibe más radiación en temporada de invierno llegando a los 15.55 MJ/m².

Por otro lado, se esperaba que la fachada este y oeste tuvieran un comportamiento simétrico, sin embargo la fachada este recibió mayor cantidad de radiación que la oeste (9.71 MJ/m² contra 7.16 MJ/m²).

También se esperaba que la fachada sur recibiera mayor irradiación para el día anual promedio, resultando ser nuevamente la fachada este con más valores de incidencia (9.71 MJ/m² contra 9.18 MJ/m²). Esto debido a factores climáticos de la Ciudad de México, principalmente, vientos, lluvias y aerosoles, siendo las condiciones climáticas de un sitio específico un factor determinante para la distribución en tiempo y espacio, de la irradiación en las diferentes fachadas de los edificios.

Aunque la fachada sur y oeste reciben más radiación, hay que recordar que esta relación está dada por metro cuadrado, por lo que en las edificaciones en las que no se puedan aprovechar estas fachadas por sus condiciones de ubicación, la fachada este puede ser aprovechada en altura.

De los modelos

Se remarca que lo óptimo es contar con mediciones reales en las fachadas y que estas mediciones se expandan en nuestro país como ya lo han hecho las mediciones de radiación solar horizontal. Es importante tener en cuenta que las mediciones de radiación solar sólo son válidas para un rango de acción de hasta 50 km de las estaciones de medición, es cierto que tienen una utilidad cuestionable cuando existen micro climas predominantes, pero cuando los datos no están disponibles, otros medios de extrapolación son necesarios, aquí la importancia de la modelización.

La adaptación de modelos adquieren más sentido cuando se cuenta con mediciones reales para su evaluación. Al evaluarlos, no se deben discriminar por su sencillez o complejidad, en ocasiones modelos más simples pueden dar mejores resultados, como fue el caso del modelo Louche para el cálculo de las radiaciones directa y difusa horizontal para la ciudad de México.

En la construcción de modelos o generación de nuevos, no hay modelos que se puedan calificar como buenos o malos, sino modelos más precisos que otros. Esta precisión también está ligada al uso final del modelo, si se desea un modelo más universal, generalmente lleva a sacrificar su exactitud y viceversa. Está en el investigador decidir qué aspecto prefiere abordar en cada caso o seguir experimentando con variables para lograr un punto medio.

Considerar que encontrar un factor de corrección requiere tiempo, y mucho más si lo que se quiere es hacer un modelo nuevo que sea más preciso que los planteados hasta ahora en la literatura.

Específicamente para modelos, asegurar lo más posible el acimut en el que se encuentran colocados cada uno de los aparatos de medición (la orientación exacta para cada fachada), pues las construcciones no son perfectas y algunos muros pueden estar más rotados/desplomados que otros. Esto con el fin de mejorar la precisión en las evaluaciones y desarrollo de nuevos modelos.

Al ser las condiciones del clima un factor determinante para la cantidad de radiación recibida en las fachadas, el uso indiscriminado de modelos de cálculo, sin ser probados con mediciones reales, puede llevar a falsas conclusiones y aplicaciones sobre el conocimiento del recurso solar.

De las aplicaciones en arquitectura

Sirve a arquitectos a retomar aspectos básicos del diseño considerando el entorno climático, es una herramienta para tomar mejores decisiones arquitectónicas.

Las mediciones reales validan los modelos, programas de cálculo y simulación, no a la inversa.

El conocimiento obtenido en la evaluación de los programas de cómputo, permite utilizar mejor estas herramientas en las primeras etapas del diseño.

En nuestro país, apenas se inicia el conocimiento sobre el comportamiento de la radiación en las fachadas y su disponibilidad, a la par, en el mundo siguen mejorando las tecnologías y herramientas que contribuyen al trabajo arquitectónico; sus algoritmos se acercarán más a lo que sucede en la naturaleza.

Lo anterior plantea un desfase/brecha tecnológico, reto que sería menos difícil de asumir al colaborar con otras disciplinas; se manifiesta la importancia de la investigación científica, la visión holística y multidisciplinaria para la resolución de proyectos.

4.2 CONTRIBUCIONES

Las dos principales contribuciones de este trabajo:

1. Validación de las bases de datos reales de irradiación solar global en las fachadas Norte, Sur, Este y Oeste en la Ciudad de México, presentada en archivo Excel:
 - Formato horario que puede ser importado en algunos programas de simulación arquitectónica, obteniendo mayor aproximación en el cálculo térmico de envolventes y el desarrollo-diseño de tecnologías solares.
 - Tablas (mapas de energía) con valores horarios y día promedio para cada mes del año en Watts/m² y MJ/m².
2. Modelo matemático adaptado a las condiciones de México, presentado en fórmula y en formato de programación (software MATLAB): Obtiene la irradiancia vertical en fachadas a partir de la radiación global horizontal real, aprovechando la disponibilidad de este tipo de mediciones en nuestro país.
3. Mejora en la generación de datos que pueden ser aplicados en otros métodos de cálculo como lo es la capacidad fotovoltaica en edificios.

4.3 TRABAJO FUTURO

Futuras líneas de investigación y trabajo incluyen:

Medición de la radiación en orientaciones diferentes a los puntos cardinales. Este estudio presenta el comportamiento de la radiación en fachadas orientadas en los cuatro principales puntos cardinales. Sin embargo, el comportamiento de la radiación solar varía en función de las múltiples orientaciones que pueda tener las fachadas.

Caracterización de la radiación solar para edificios con formas no rectangulares. Aunado al punto anterior, obtención de mediciones reales para edificios con formas circulares y más complejas.

Continuar la exploración y optimización de modelos para el ramo arquitectónico en nuestro país. Considerar medir cómo se comporta la radiación solar en las fachadas en un entorno urbano, considerando sombreado de edificios adyacentes, la cercanía de los edificios en la Ciudad de México, y las obstrucciones externas son muy comunes. Un modelo de cálculo de radiación en

fachadas para México puede desarrollarse para reconocer obstrucciones externas.

Implementación de estos modelos no sólo en el cálculo térmico de envolventes arquitectónicas, sino también en la exploración de la simulación y procesos de optimización en sistemas de energía solar.

Clasificación de tipos de cielo para la Cd. de México. Los modelos matemáticos tienen como variable las condiciones de cielo, la mayoría de los existentes se basan en condiciones de ciudades europeas y americanas, al realizarlo para nuestro país, representa una mejora en el desempeño de los mismos.

Continuar la evaluación de programas de simulación por medio de mediciones reales en otras aplicaciones como lo es el cálculo térmico de edificios.

REFERENCIAS

- Actionbioscience.org.(2015) Islas de Calor en Zonas Urbanas: Ciudades Más Calientes.Recuperado de <http://www.actionbioscience.org/esp/ambiente/voogt.html>.
- Bardou, P., & Arzoumanian, V. (1981). Sol y arquitectura. Barcelona: Gustavo Gili.
- Becerril Naranjo, Sergio (1987). Del sol a la arquitectura. Ed. Gustavo Gili. México.
- Centro de estudios de Energía Solar (2015). Bibliografía y Software. Recuperado de <http://www.censolar.es/menu4.htm.a>
- Chauliaguet, Charles.(1978). La Energia solar en la edificacion . Barcelona : Editores tecnicos asociados.
- Chow, T., Chan, A., Fong, K., & Lin, Z. (2005). Hong Kong solar radiation on building facades evaluated by numerical models.Applied Thermal Engineering, 251908-1921.
- Craggs, C., Conway, E., & Pearsall, N. (1999). Stochastic modelling of solar irradiance on horizontal and vertical planes at a northerly location. Renewable Energy, 18445-463.
- Cucumo, M., De Rosa, A., Ferraro, V., Kaliakatsos, D., & Marinelli, V. (2007). Experimental testing of models for the estimation of hourly solar radiation on vertical surfaces at Arcavacata di Rende. Solar Energy, 692.
- Duffie, J.A. Beckman, W.A. (2013). Solar Engineering of Thermal Processes. Hoboken, N.J.:Wiley.
- Ernst Danz (1967). La arquitectura y el sol, protección solar de los edificios. Ed. Gustavo Gili. Barcelona.
- Galindo I. y Cifuentes G., (1996), Irradiación solar global en la República Mexicana: Valores horarios medios, PUE-UNAM, México.
- Instituto de Geofísica UNAM (2015). Radiación Solar. Recuperado de http://www.geofisica.unam.mx/observatorios/radiacion_solar/index.html.
- Iqbal, Muhammad. (1983). An introduction to solar radiation. Academic press. Toronto.
- Izard, Jean-louis (1980). Arquitectura bioclimática. Barcelona: Gustavo Gili.
- Kalogirou, S. (2014). Solar energy engineering : processes and systems. Amsterdam : Academic Press, 2014.
- Kämpf, J. H., Montavon, M., Bunyesc, J., Bolliger, R., & Robinson, D. (2010). Optimisation of buildings' solar irradiation availability.Solar Energy, 84(International Conference CISBAT 2007), 596-603.
- Kong, H. J., & Kim, J. T. (2015). Evaluation of global vertical illuminance and irradiance models against data from Yongin, South Korea. Energy & Buildings, 91139-147. doi:10.1016/j.enbuild.2015.01.025
- Li, D. H., & Lam, J. C. (2000). Evaluation of slope irradiance and illuminance models against measured

- Hong Kong data. *Building and Environment*, 35501-509. doi:10.1016/S0360-1323(99)00043-8.
- Li, D., & Lam, J. (2000). Measurements of solar radiation and illuminance on vertical surfaces and daylighting implications. *Renewable Energy*, 20(4), 389-404.
- Li, D., Lam, J., & Lau, C. (2002). A new approach for predicting vertical global solar irradiance. *Renewable Energy*, 25(4), 591-606.
- Maxwell, Stoffel & Bird. (1986). *Measuring and Modeling Solar Irradiance on Vertical Surfaces*. Solar Energy Research Institute. Golden, Colorado.
- Mazria Edward. (1985). *El libro de la Energía Solar Pasiva*. México. Gustavo Gili.
- Muhlía V., Agustín. (2006). *Notas del curso: Solarimetría, 30 semana Nacional de Energía Solar*. Asociación Nacional de Energía Solar, Veracruz.
- Muhlía, A. (1990). Algo de Historia de la Solarimetría en México. II Taller de Radiación Solar, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Palmira Morelos, 23 al 25 de mayo de 1990. pp 21-25.
- Muneer T, Alnaser W, Fairouz F. The insolation on vertical surface having different directions in the Kingdom of Bahrain. *Desalination*. 209 (2007) 269–274.
- Muneer, T., & Kambezidis, H. (1997). *Solar radiation & daylight models for energy efficient design of buildings*. Boston: Architectural : Butterworth-Heinemann.
- Muneer, T., Gueymard, C., Kambezidis, H., & Muneer, T. (2004). *Solar radiation and daylight models: (with software available from companion web site)*. Oxford: Elsevier Butterworth Heinemann.
- Observatorio de Radiación Solar UNAM (2015). *Objetivos y antecedentes*. Recuperado de <http://www.geofisica.unam.mx/ors/energiaSolarprueb1.php>.
- Olgay Victor (1963). *Design With Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*. Princeton University Press.
- Riveros Rosas, D., Valdés Barrón, M., Arancibia Bulnes, C. A., & Bonifaz Alfonso, R. (2012). *La radiación solar*. México, D.F. : UNAM : Editorial Terracota.
- Serra Florensa Rafael, Coch Roura Helena. (1995). *Arquitectura y energía natural*. Barcelona. Edicions UPC.
- Spencer, J. W. (1971). Fourier Series Representation of the Position of the sun. *Search*. 2,172.
- Stewart, R., Perez, R., Michalsky, J., Ineichen, P., & Seals, R. (1990). Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy*, 44(5), 271.

Thekaekara M.P., Drummond A.J. (1971). Standard Values for the Solar Constant and Its Spectral Components, Natl. Phys. Sci.

Thekaekara M.P., Drummond A.J. (1971). Standard Values for the Solar Constant and Its Spectral Components, Natl. Phys. Sci., vol. 229, pp. 6

Thomas, Hegzog . Norbert, Kaiser Michael . (1996). Solar Energy in architecture and urban planning. Munich:Prestel.

Vitruvio Polión. (1992). Los Diez libros de arquitectura, Traducción de Joseph Ortiz y Sanz. Ed. Akl, Madrid.

Wachberger, Michael, (1984). Construir con el sol: Utilizacion de la energia solar pasiva = construir com o sol :Utilizacao da energia solar passiv. Barcelona: Gustavo Gili.

GLOSARIO

Constante Solar: Cantidad de energía radiante que incide en una superficie perpendicular a los rayos del sol por unidad de área (1m^2) en una unidad de tiempo (1 seg.) a una distancia media tierra-sol fuera de la atmósfera terrestre.⁷⁶

Radiación Solar extraterrestre: La radiación solar diaria que se recibe en la atmósfera en una superficie horizontal.

Irradiancia: La razón (o tasa) a la cual la energía de radiación es emitida o recibida por un objeto por unidad de tiempo (W/m^2).⁷⁷

Irradiación: La densidad de flujo de energía de radiación que emite o recibe un objeto durante un cierto tiempo, es decir, la integral de la irradiancia a lo largo de un cierto tiempo (J/m^2).⁷⁸

Acimut: Distancia angular medida hacia el este, desde el norte geográfico, hasta el punto definido por la intersección con el horizonte del círculo vertical que pasa por un objeto celeste. También se comùn referirla al Sur geográfico.

Ángulo de incidencia: Ángulo entre la normal a la superficie y la dirección de la luz incidente.

Cenit: Punto de la esfera celeste que se encuentra exactamente encima del observador.

Estaciones: Intervalos del año definidos por el tiempo en que el sol permanece entre aquellos puntos orbitales caracterizados por los solsticios y equinoccios. Llamadas primavera, verano, otoño e invierno. El clima en la Tierra es diferente en cada una de ellas, debido a la inclinación de su eje de rotación respecto del plano de la elíptica.

Horizonte: Plano perpendicular a la línea que va del observador al cenit del lugar. Gran círculo formado por la intersección de la esfera celeste con el plano perpendicular a la línea que une al observador con el cenit del lugar, llamado horizonte astronómico u horizonte astronómico u horizonte del observador.

Puesta de sol: Momento en que el limbo superior del sol desaparece bajo el horizonte del observador.

Salida del sol: Momento en que el limbo superior del sol sale por el horizonte del observador.

Radiación: Energía en forma de ondas electromagnéticas o partículas.⁷⁹

⁷⁶ Zeevaert, L. (1984). *Curso de actualización en arquitectura solar*, facultad de arquitectura de la Universidad Nacional Autónoma de Tamaulipas, Asociación Nacional de Energía Solar, ANES. Tamaulipas, México.

⁷⁷ Muhlia, Agustín. (2006). *Notas del Curso: Solarimetría. Semana Nacional de Energía Solar, del 2 al 6 de Octubre de 2006*, Asociación Nacional de Energía Solar .A.C.. Veracruz. México.

⁷⁸ Idem.

⁷⁹ Ander, Gregg D. (2003). *Daylighting Performance and Design*. John Wiley and Sons. Estados Unidos de Norte America.

Radiación Solar: Radiación electromagnética del sol.

Radiación difusa del cielo: Flujo esparcido en cada volumen elemental de la atmósfera en a dirección del punto del observador.

Radiación solar directa: Flujo proveniente directamente del sol atenuado por la absorción y esparcimiento en las diferentes capas de la atmósfera.

Radiación solar global: Suma de los flujos de radiación directa y difusa que inciden en una superficie sobre la superficie terrestre (W/m^2).

Sensor: Dispositivo que detecta una determinada acción externa, temperatura, presión, etc. transmitiéndola adecuadamente.

Solsticio: Uno de dos puntos en los cuales el sol parece estar en sus puntos norte y sur más extremos. Puntos de la elíptica que están a la máxima distancia del ecuador celeste. En el hemisferio norte, el solsticio de verano ocurre alrededor del 21 de junio y el invierno cerca del 22 de diciembre aproximadamente (el día mas largo y corto del año).⁸⁰

Tipo de Cielo: Clasificación de cielos por la CIE (Commission Internationale de L'Eclairage).

Unidad astronómica (U.A.): Distancia entre al Tierra y el sol; 150 millones de kilómetros aproximadamente.

⁸⁰ Instituto de Astronomía.(2005-2010).Anuario del Observatorio Astronómico Nacional.Universidad Nacional Autónoma de México. México.

ANEXO 1 y 2

Archivo excel de Irradiación global con valores horarios y día promedio para cada mes del año en Watts/m2 y MJ/m2.

ANEXO 3

Sumario de pruebas estadísticas MBE y RMSE en porcentaje y W/m2 para modelos Isotrópico y Pérez. Elaboración propia.

SUMARIO DE MBE Y RMSE PARA IRRADIANCIA GLOBAL VERTICAL																
FACHADA NORTE																
Mes	Prueba 1				Prueba 2				Prueba 3				Prueba 4			
	Isotrópico (GHI Real)				Perez (GHI Real)				Isotrópico (DNI,DHI Real)				Perez (DNI,DHI Real)			
	MBE	MBE%	RMSE	RMSE%	MBE	MBE%	RMSE	RMSE%	MBE	MBE%	RMSE	RMSE%	MBE	MBE%	RMSE	RMSE%
Ene	-36.46	-78.60	42.49	91.59	-19.21	-41.41	24.05	51.84	-30.34	-65.41	39.19	84.48	-14.95	-32.22	18.40	39.66
Feb	-38.70	-92.02	44.15	104.97	-20.86	-49.59	24.45	58.15	-24.73	-58.80	49.19	116.95	-11.27	-26.81	22.87	54.39
Mar	-31.18	-55.43	46.59	82.81	-8.82	-15.67	21.97	39.04	-27.61	-49.08	59.61	105.95	-5.03	-8.95	27.62	49.10
Abr	-16.91	-24.35	32.18	46.33	5.87	8.45	23.82	34.29	-23.00	-33.12	35.80	51.54	3.19	4.59	15.38	22.14
May	-13.82	-16.58	33.54	40.23	5.57	6.68	32.70	39.23	-28.98	-34.76	42.41	50.87	-2.27	-2.72	21.86	26.22
Jun	-22.78	-25.16	35.15	38.83	-6.92	-7.64	27.75	30.65	-37.50	-41.42	49.70	54.90	-14.45	-15.96	24.26	26.80
Jul	-16.14	-20.65	31.80	40.67	1.34	1.71	27.73	35.46	-29.58	-37.83	43.73	55.92	-6.20	-6.20	20.56	26.29
Ago	-15.38	-19.66	34.55	44.18	9.00	11.50	32.16	41.12	-33.18	-42.42	45.77	58.52	-0.48	-0.61	19.27	24.64
Sep	-24.97	-34.66	39.59	54.96	3.15	4.38	23.40	32.48	-42.54	-59.06	54.06	75.05	-6.92	-9.61	12.96	18.00
Oct	-29.15	-51.84	38.76	68.94	-7.87	-14.00	17.92	31.87	-40.70	-72.39	53.23	94.67	-14.32	-25.46	19.35	34.42
Nov	-28.38	-56.62	36.29	72.41	-12.32	-24.57	19.20	38.32	-34.32	-68.47	46.25	92.29	-15.41	-30.75	20.01	39.93
Dic	-28.47	-64.26	35.14	79.32	-14.83	-33.48	19.59	44.22	-31.33	-70.70	40.37	91.12	-16.29	-36.77	19.98	45.10
Anual	-24.43	-37.26	37.36	56.98	-4.76	-7.26	25.36	38.68	-32.12	-49.00	46.81	71.41	-8.51	-12.99	20.50	31.27

SUMARIO DE MBE Y RMSE PARA IRRADIANCIA GLOBAL VERTICAL																
FACHADA SUR																
Mes	Prueba 1				Prueba 2				Prueba 3				Prueba 4			
	Isotrópico (GHI Real)				Perez (GHI Real)				Isotrópico (DNI,DHI Real)				Perez (DNI,DHI Real)			
	MBE	MBE%	RMSE	RMSE%	MBE	MBE%	RMSE	RMSE%	MBE	MBE%	RMSE	RMSE%	MBE	MBE%	RMSE	RMSE%
Ene	46.58	12.59	66.11	17.87	4.14	1.12	44.91	12.14	11.19	41.39	51.83	14.01	-0.32	-0.09	19.59	5.30
Feb	38.87	12.75	51.34	16.84	10.88	3.57	32.28	10.59	10.70	32.64	43.24	14.18	5.90	1.93	22.40	7.34
Mar	-21.90	-11.32	42.70	22.07	-25.04	-12.94	41.91	21.66	-9.13	-17.67	32.59	16.84	-22.98	-11.88	36.51	18.87
Abr	-24.64	-20.43	33.93	28.13	-11.28	-8.16	27.05	22.43	-22.96	-27.69	34.28	28.43	-12.85	-10.66	25.23	20.92
May	-12.60	-16.51	32.73	42.88	11.45	15.00	34.39	45.04	-36.73	-28.04	38.60	50.57	3.29	4.30	18.53	24.27
Jun	-10.95	-14.41	33.23	43.75	14.88	19.59	34.90	45.96	-40.42	-30.69	40.15	52.87	3.74	4.92	17.60	23.18
Jul	-12.05	-17.62	34.12	49.87	11.63	16.99	35.92	52.50	-36.88	-25.23	36.30	53.06	4.74	6.93	19.55	28.58
Ago	-18.13	-17.97	30.90	30.63	1.98	1.96	24.97	24.75	-31.15	-31.43	39.79	39.45	-4.94	-4.89	19.18	19.01
Sep	-15.51	-10.73	24.35	16.85	-10.06	-6.96	22.46	15.54	-14.79	-21.37	27.94	19.33	-11.80	-8.16	20.93	14.48
Oct	-1.76	-0.81	23.71	10.95	-16.15	-7.46	29.73	13.73	-0.06	-0.14	18.80	8.68	-13.47	-6.22	22.48	10.38
Nov	24.34	7.00	44.08	12.67	-13.65	-3.92	40.98	11.78	6.87	23.89	36.18	10.40	-14.27	-4.10	25.69	7.39
Dic	35.52	10.16	55.56	15.89	-5.36	-1.53	42.07	12.03	9.68	33.84	46.30	13.24	-8.71	-2.49	22.45	6.42
Anual	0.89	0.48	40.49	21.62	-1.32	-0.71	34.76	18.56	-3.37	-6.31	37.97	20.27	-5.40	-2.88	22.59	12.06

SUMARIO DE MBE Y RMSE PARA IRRADIANCIA GLOBAL VERTICAL																
FACHADA ESTE																
Mes	Prueba 1				Prueba 2				Prueba 3				Prueba 4			
	Isotrópico (GHI Real)				Perez (GHI Real)				Isotrópico (DNI,DHI Real)				Perez (DNI,DHI Real)			
	MBE	MBE%	RMSE	RMSE%	MBE	MBE%	RMSE	RMSE%	MBE	MBE%	RMSE	RMSE%	MBE	MBE%	RMSE	RMSE%
Ene	46.68	22.38	122.03	58.50	42.57	20.41	95.23	45.65	33.35	15.99	84.96	40.73	30.60	14.67	61.27	29.37
Feb	87.82	32.03	167.48	61.08	77.23	28.17	131.75	48.05	64.96	23.69	126.87	46.27	56.18	20.49	96.36	35.15
Mar	3.99	1.99	99.18	49.52	6.46	3.23	78.80	39.34	10.12	5.05	84.10	41.99	11.51	5.75	66.55	33.23
Abr	27.90	10.72	91.98	35.34	22.20	8.53	63.78	24.50	7.97	3.06	52.26	20.08	4.38	1.68	24.48	9.40
May	6.79	3.52	64.19	33.28	4.59	2.38	49.80	25.81	-2.48	-1.29	47.70	24.73	0.03	0.01	19.98	10.36
Jun	-7.33	-4.85	46.23	30.61	-4.52	-2.99	45.91	30.39	-11.05	-7.31	42.24	27.97	-3.23	-2.14	20.08	13.29
Jul	2.91	1.61	64.14	35.57	1.84	1.02	51.74	28.69	-3.93	-2.18	44.17	24.50	-1.36	-0.75	19.74	10.95
Ago	15.06	6.83	75.58	34.29	12.90	5.85	56.51	25.64	1.91	0.87	51.77	23.49	4.39	1.99	21.50	9.76
Sep	0.60	0.36	47.60	28.74	5.46	3.30	39.76	24.01	-5.04	-3.04	46.72	28.21	4.62	2.79	19.66	11.87
Oct	4.68	2.93	62.22	39.02	5.51	3.45	48.26	30.26	0.92	0.58	51.26	32.14	5.78	3.62	23.79	14.92
Nov	32.65	15.80	87.02	42.11	26.11	12.64	61.66	29.84	20.15	9.75	65.44	31.67	16.31	7.89	35.29	17.08
Dic	27.95	16.49	81.53	48.11	23.14	13.66	59.54	35.13	18.15	10.71	58.12	34.30	14.36	8.47	33.70	19.89
Anual	18.97	9.62	87.18	44.22	16.96	8.60	67.46	34.22	9.52	4.83	64.79	32.86	10.57	5.36	41.31	20.95

SUMARIO DE MBE Y RMSE PARA IRRADIANCIA GLOBAL VERTICAL

FACHADA OESTE

Mes	Prueba 1 Isotrópico (GHI Real)				Prueba 2 Perez (GHI Real)				Prueba 3 Isotrópico (DNI,DHI Real)				Prueba 4 Perez (DNI,DHI Real)			
	MBE	MBE%	RMSE	RMSE%	MBE	MBE%	RMSE	RMSE%	MBE	MBE%	RMSE	RMSE%	MBE	MBE%	RMSE	RMSE%
Ene	9.56	5.73	65.36	39.13	-0.55	-0.33	47.72	28.57	5.20	3.11	36.28	21.72	-6.62	-3.96	16.42	9.83
Feb	20.05	11.30	92.47	52.14	9.69	5.46	64.24	36.22	17.38	9.80	61.09	34.45	4.40	2.48	31.26	17.63
Mar	8.03	4.36	73.43	39.84	4.18	2.27	57.10	30.98	-7.24	-3.93	60.32	32.72	-12.12	-6.57	38.25	20.75
Abr	-7.76	-5.55	40.89	29.24	-3.80	-2.72	38.80	27.74	-12.84	-9.18	32.57	23.29	-7.25	-5.18	26.94	19.26
May	-10.86	-10.02	38.20	35.24	-0.83	-0.76	35.31	32.57	-24.64	-22.73	45.44	41.91	-7.73	-7.13	23.88	22.02
Jun	-14.55	-13.53	35.58	33.09	-3.11	-2.89	36.26	33.72	-28.71	-26.70	46.66	43.39	-10.41	-9.69	24.29	22.59
Jul	-10.21	-10.55	35.42	36.59	1.12	1.16	32.24	33.30	-25.29	-26.13	42.81	44.22	-8.52	-8.80	23.42	24.19
Ago	-13.16	-10.70	39.29	31.95	-4.75	-3.87	44.27	36.00	-25.59	-20.81	44.44	36.14	-10.98	-8.93	28.14	22.89
Sep	-15.26	-12.35	45.60	36.90	-5.52	-4.47	39.71	32.13	-29.25	-23.67	47.69	38.59	-13.83	-11.20	24.91	20.16
Oct	-7.48	-5.40	45.59	32.90	-7.74	-5.59	39.26	28.33	-19.87	-14.34	40.78	29.42	-16.32	-11.78	24.35	17.57
Nov	0.01	0.01	53.01	32.74	-8.88	-5.48	41.46	25.60	-10.51	-6.49	33.22	20.51	-16.47	-10.17	24.49	15.13
Dic	2.74	1.75	54.23	34.67	-7.10	-4.54	40.55	25.92	-7.15	-4.57	30.98	19.81	-16.08	-10.28	23.22	14.84
Anual	-4.25	-3.10	52.40	38.19	-2.42	-1.76	43.05	31.38	-15.31	-11.16	44.17	32.19	-10.23	-7.45	25.98	18.93

ANEXO 4

Script de modelo nuevo para el cálculo de de irradiancia global vertical en fachadas de la Ciudad de México realizado en programa de cómputo MATLAB R2017b.

Color verde: Comentarios explicativos.

Color morado: Ficheros externos que se cargan en el programa.

Color azul: Funciones pertenecientes al programa.

```
clear all
%Carga de datos reales de Irradiancia Global Horizontal
load ('GHI.mat');

%COEFICIENTES DEL MODELO
%Para todas las fachadas
a=[0.6222;-1.424;-1.575;-0.2146;-2.2538;3.6339;-15.1028;-7.1918];
b=[0.3657;0.3749;0.3746;0.3626;0.3930;0.3989;0.6224;0.6248];
c=[0.1386;4.8955;14.7894;27.5364;30.5184;34.9595;21.4816;0.8906];
%Para fachada norte
aN=[0.9744;2.8171;0.0248;1.5003;2.1614;3.7252;-3.1774;-11.7791];
bN=[0.3425;0.3142;0.3088;0.2990;0.3254;0.3709;0.4643;0.6139];
cN=[-0.7565;0.1946;6.7346;4.0889;-2.1650;-51.6236;-
21.8287;-126.225];
%Para fachada sur
aS=[1.6514;-1.1527;1.1318;4.7778;1.7559;15.4790;-25.810;10.3529];
bS=[0.3602;0.3873;0.3985;0.3889;0.4203;0.3807;0.7448;0.5027];
cS=[-0.5227;6.4965;14.9833;24.4200;24.8283;17.5825;15.5794;-8.9893];
%Para fachada neste
aE=[2.6751;-4.3616;-0.2443;22.0406;41.5600;41.6831;32.0083;46.7145];
bE=[0.3562;0.3853;0.3677;0.3050;0.2711;0.2763;0.4469;0.2791];
cE=[0.2221;4.4166;13.5288;25.8115;27.0469;40.1652;22.2278;9.1487];
%Para fachada oeste
aO=[-3.1973;-1.5194;0.2499;-4.7468;-14.4742;-10.4916;
-24.5595;-32.1738];
bO=[0.4047;0.4044;0.3988;0.3916;0.4282;0.4508;0.6193;0.8275];
cO=[0.8555;5.9854;16.3764;24.0004;23.5353;8.6343;-8.4907;-52.6535];

% Geometria solar basica aminutal
TMYData = pvl_readtmy3('UNAM_Posgrado-hour.csv');% Fichero generado
en meteonorm para la ciudad de México.
TimeMatlab = TMYData.DateNumber;
Time = pvl_maketimestruct(TimeMatlab, ones(size(TimeMatlab))*TMYDa-
ta.SiteTimeZone);
dayofyear = pvl_date2doy(Time.year, Time.month, Time.day);
HEExtra = pvl_extraradiation(pvl_date2doy(Time.year,Time.month,-
Time.day));
Location = pvl_makelocationstruct(TMYData.SiteLatitude,TMYData.
SiteLongitude,...
TMYData.SiteElevation); %Altitude is optional
PresPa = TMYData.Pressure*100; %Convert pressure from mbar to Pa
```

```

[~, ~, AppSunEl, ~] = pvl_ephemeris(Time, Location, PresPa, TMYData.DryBulb);
Time.hour = Time.hour-.5; % shift times back 1/2 hour for sun position
calculation because of tmy
Time.hour(Time.hour<0)=23.5;
% timestamps
[SunAz, ~, AppSunEla, ~] = pvl_ephemeris(Time, Location, PresPa,
TMYData.DryBulb);

A=diff(sign(AppSunEl)); %identifies hour before sun straddles
horizon (2,-2)
ind1 = find(A==2)+1; % AM hour where sun straddles horizon
ind2 = find(A==-2)+1; % PM hour where sun straddles horizon
%AM Adjustment
    AppSunEl(ind1) = AppSunEl(ind1)/2; %change sun elevation to mid
way above the horizon
%PM Adjustment
    AppSunEl(ind2) = AppSunEl(ind2)/2; %change sun elevation to mid
way above the horizon
AppSunEla(ind1)= AppSunEl(ind1);
AppSunEla(ind2)= AppSunEl(ind2);

% Colocación de valor acimut
SurfTilt=90;
Albedo=0.2;
SurfAzN=(% Colocar valor de acimut);
SurfAzS=(% Colocar valor de acimut);
SurfAzW=(% Colocar valor de acimut);
SurfAzE=(% Colocar valor de acimut);

SurfTilt=90;
Albedo=0.2;

% Elevación solar
SunZen=90-AppSunEla;
% Ángulo de incidencia en fachada
AOIN = pvl_getaoi(SurfTilt, SurfAzN, SunZen, SunAz);
AOIS = pvl_getaoi(SurfTilt, SurfAzS, SunZen, SunAz);
AOIE = pvl_getaoi(SurfTilt, SurfAzE, SunZen, SunAz);
AOIO = pvl_getaoi(SurfTilt, SurfAzW, SunZen, SunAz);

AM = pvl_relativeairmass(SunZen);
AM(isnan(AM)) = 20;
GHI(~(GHI>0))=0;

% Estimacion de la DNI y DHI por modelo Louche
DNI_L(1:length(GHI))=0;
DHI_L=DNI_L;
%Se unifica un solo flag para todos los lados

```

```

FLAGT=1*ones(8760,1);
FLAGT(isnan(GHI))=-1;
FLAGT(SunZen>85)=-2;
GHI(isnan(GHI))=0;

GHI(isnan(GHI))=0;
FLAGT=GHI>0;
FLAGT=GHI>0 & I90E_v>0 & I90S_v>0 & I90N_v>0 & I90O_v>0;
% Cálculo de irradiancia directa normal e irradiancia difusa horizontal por modelo de Louche
[DNI_L,DHI_L,~] = pvl_louche(GHI,90-AppSunEla, dayofyear);
DNI_L(DNI_L<4)=0; % Para evitar valores pequeños en la DNI de Louche
DHI_L(DHI_L<0)=0; DHI_L(DHI_L>500)=500;

coIN=cosd(AOIN); coIN(coIN<0)=0;
coIS=cosd(AOIS); coIS(coIS<0)=0;
coIE=cosd(AOIE); coIE(coIE<0)=0;
coIO=cosd(AOIW); coIO(coIO<0)=0;

% Parámetro epsilon basado en modelo de Perez
e(1:length(GHI),1)=0;
Dhfilter = DHI_L > 0 ;
ze=deg2rad(SunZen); % Zenith angle in radians
kappa = 1.041; %for SunZen in radians

e(Dhfilter) = ((DHI_L(Dhfilter) + DNI_L(Dhfilter))./DHI_L(Dhfilter)+
kappa.*ze(Dhfilter).^3)./(1+kappa.*ze(Dhfilter).^3);
Delta=DHI_L.*AM./HEXtra;

% parameter F
FS(1:length(GHI),1)=0;
FS(GHI>0)=coIS(GHI>0)./cosd(SunZen(GHI>0));
FN(1:length(GHI),1)=0;
FN(GHI>0)=coIN(GHI>0)./cosd(SunZen(GHI>0));
FE(1:length(GHI),1)=0;
FE(GHI>0)=coIE(GHI>0)./cosd(SunZen(GHI>0));
FO(1:length(GHI),1)=0;
FO(GHI>0)=coIO(GHI>0)./cosd(SunZen(GHI>0));

% Segun modelo perez rangos e
erang=[1;1.065;1.23;1.5;1.95;2.8;4.5;6.2;max(e)];
% Select which bin e falls into
ebine(e==0)=0;
ebine((e>=1) & (e<1.065)) = 1;
ebine((e>=1.065) & (e<1.23)) = 2;
ebine((e>=1.23) & (e<1.5)) = 3;
ebine((e>=1.5) & (e<1.95)) = 4;
ebine((e>=1.95) & (e<2.8)) = 5;
ebine((e>=2.8) & (e<4.5)) = 6;

```

```

ebine((e>=4.5) & (e<6.2)) = 7;
ebine(e>=6.2) = 8;
ebine=ebine';

% Variables totales

FT=[FN;FS;FE;FO];
FLAGTT=[FLAGT;FLAGT;FLAGT;FLAGT];
zeT=[ze;ze;ze;ze];
eT=[e;e;e;e];
coIT=[coIN;coIS;coIE;coIO];
AOI=[AOIN;AOIS;AOIE;AOIO];
GHIT=[GHI;GHI;GHI;GHI];
DNIT=[DNI_L;DNI_L;DNI_L;DNI_L];
DHIT=[DHI_L;DHI_L;DHI_L;DHI_L];
DeltaT=[Delta;Delta;Delta;Delta];

% Segun modelo perez rangos eT
eTrang=[1;1.065;1.23;1.5;1.95;2.8;4.5;6.2;max(eT)];
% Select which bin e falls into
ebin(eT==0)=0;
ebin((eT>=1) & (eT<1.065)) = 1;
ebin((eT>=1.065) & (eT<1.23)) = 2;
ebin((eT>=1.23) & (eT<1.5)) = 3;
ebin((eT>=1.5) & (eT<1.95)) = 4;
ebin((eT>=1.95) & (eT<2.8)) = 5;
ebin((eT>=2.8) & (eT<4.5)) = 6;
ebin((eT>=4.5) & (eT<6.2)) = 7;
ebin(eT>=6.2) = 8;
ebin=ebin';

%Estimación única para todas las fachadas
I90est(1:length(GHIT),1)=0;
for i=1:8
    Yest(ebin==i)=a(i)+b(i).*DHIT(ebin==i)+c(i).*FT(ebin==i)+...
        DNIT(ebin==i).*coIT(ebin==i)+ 0.5*Albedo*GHIT(ebin==i);
end

I90est(I90est<0)=0;
I90estSur=I90est(1:8760);
I90estNorte=I90est(8761:17520);
I90estOeste=I90est(17521:26280);
I90estEste=I90est(26281:end);

%Estimación de la radiación por fachada
%Norte
I90estN(1:length(GHI),1)=0;
for i=1:8
    I90estN(ebine==i)=aN(i)+bN(i).*DHI_L(ebine==i)+cN(i).*FN(e-
ebine==i)+...

```

```

        DNI_L(ebine==i).*coIN(ebine==i);
end
I90estN(I90estN<0)=0;

%Sur
I90estS(1:length(GHI),1)=0;
for i=1:8
    I90estS(ebine==i)=aS(i)+bS(i).*DHI_L(ebine==i)+cS(i).*FS(e-
bine==i)+...
        DNI_L(ebine==i).*coIS(ebine==i);
end
I90estS(I90estS<0)=0;

%Este
I90estE(1:length(GHI),1)=0;
for i=1:8
    I90estE(ebine==i)=aE(i)+bE(i).*DHI_L(ebine==i)+cE(i).*FE(e-
bine==i)+...
        DNI_L(ebine==i).*coIE(ebine==i);
end
I90estE(I90estE<0)=0;

%Oeste
I90estO(1:length(GHI),1)=0;
for i=1:8
    I90estO(ebine==i)=aO(i)+bO(i).*DHI_L(ebine==i)+cO(i).*FO(e-
bine==i)+...
        DNI_L(ebine==i).*coIO(ebine==i);
end
I90estO(I90estO<0)=0;

```