"El saber de mis hijos hará mi grandeza"

Universidad de Sonora

División de Ingeniería

Posgrado en Ciencias de la Ingeniería: Ingeniería Química

Seminario de posgrado:

Evaluación de distintos modelos para estimar la irradiancia solar directa normal (DNI) para la Plataforma Solar de Hermosillo.

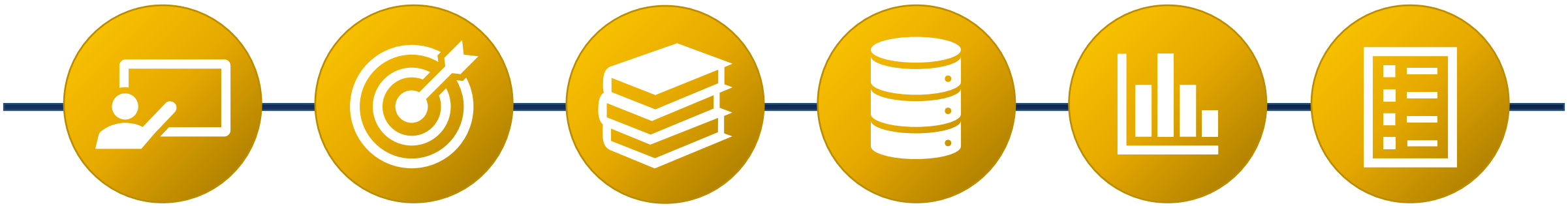
Presenta: I.Q. Mario Alejandro Rendón Ríos

Dr. Rafael E. Cabanillas López
Director de Tesis

Dr. Rodrigo Alonso Suarez
Co-Director de Tesis

Febrero 2025

CONTENIDO



Introducción

Objetivos

Antecedentes

Metodología

Resultados

Conclusiones

INTRODUCCIÓN

RECURSO SOLAR EN MÉXICO

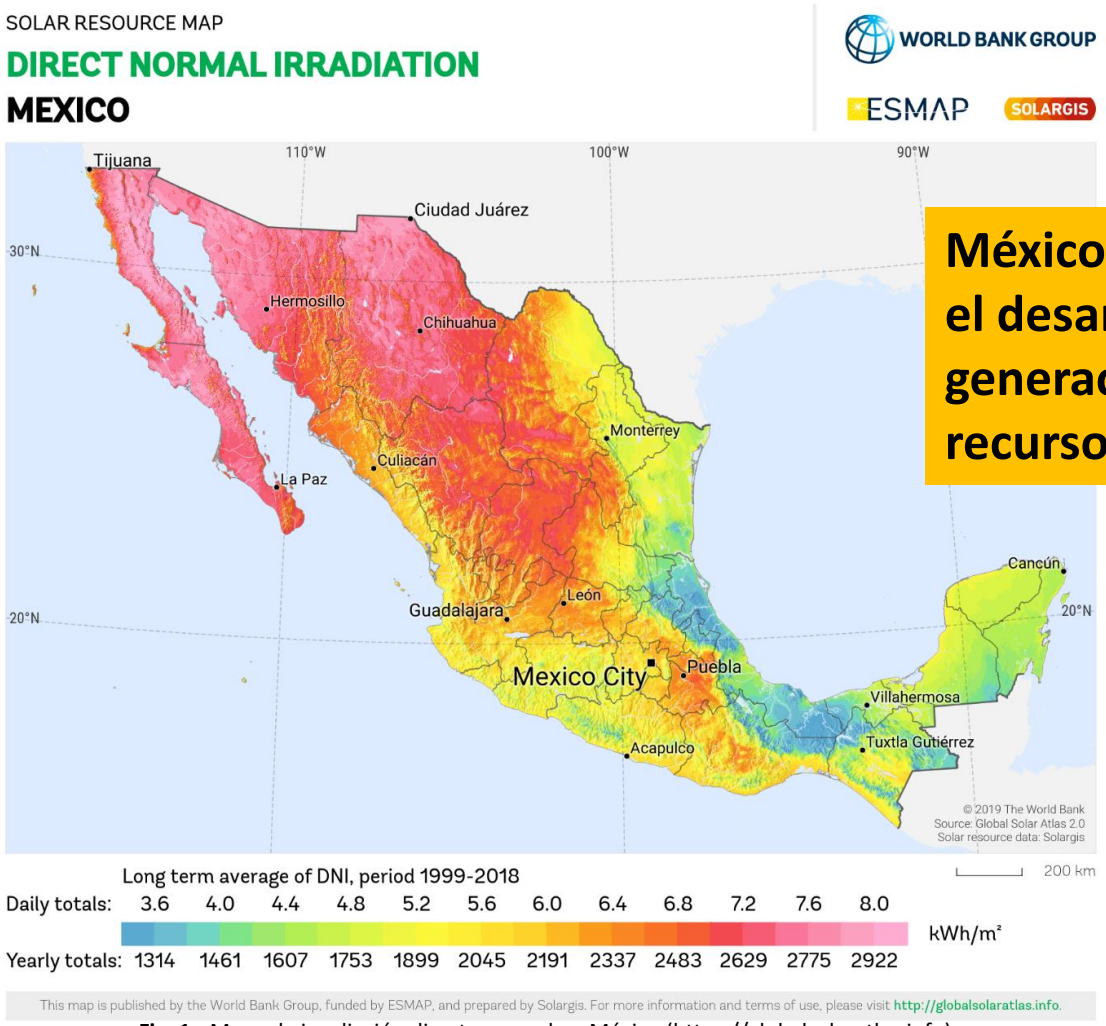
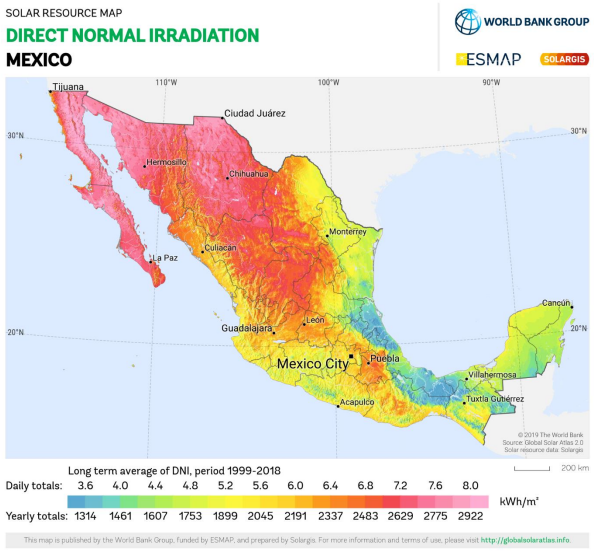


Fig. 1.- Mapa de irradiación directa normal en México (https://globalsolaratlas.info).

México tiene un gran potencial para el desarrollo de tecnologías de generación de energía que utilizan el recurso solar.

RECURSO SOLAR EN MÉXICO



DNI estimada:

Mínima: 6.3 kWh/m^2/día
Máxima: 7.9 kWh/m^2/día

RECURSO SOLAR EN MÉXICO

Conocer el recurso solar disponible es una necesidad básica para el desarrollo de las tecnologías que aprovechan este recurso.

Fig. 2.- Campo de Heliostatos (Tecnología de generación por concentración solar).

Fig. 3.- Discos Parabólicos (Tecnología de generación por concentración solar).

La DNI es la de mayor interés para estas tecnologías.

AÑO METEOROLÓGICO TÍPICO

AÑO METEOROLÓGICO TÍPICO

Año Meteorológico Típico (TMY):

Un TMY (Typical Meteorological Year, por sus siglas en inglés) reúne la información necesaria de datos meteorológicos de buena calidad, de confianza y con criterios representativos locales de largo plazo para cierta región.

Variables meteorológicas principales:

Radiación Solar (GHI, DHI y DNI)

Temperatura del Aire Ambiente

Humedad relativa

Velocidad y Dirección del Viento

AÑO METEOROLÓGICO TÍPICO

Año Meteorológico Típico (TMY):

La serie típica se obtiene en base a una metodología de selección que utiliza los datos históricos registrados en una localidad durante varios años para generar un único año completo.

Metodología de SANDIA (propuesta por los SANDIA National Laboratories)
Fue utilizada para elaborar las series anuales típicas en EEUA en sus versiones **TMY1**, **TMY2** y **TMY3**.

Mundialmente conocida e implementada exitosamente en diferentes lugares y países del mundo.

- AMTUes – LES (Uruguay)
- TMYv1 – PSH (Hermosillo, Son,, México)
- Pusat y Akkoyunlu – (Turquía)
- …

Es indispensable contar con datos de **al menos una década** para cada variable considerada.

La serie típica necesita ser representativa en al menos dos sentidos:

- En valores medios
- En la variabilidad meteorológica típica

PLATAFORMA SOLAR DE HERMOSILLO

Instalación creada para llevar a cabo investigación, desarrollo e innovación sobre tecnologías de concentración solar.

A 21 km de la ciudad de Hermosillo, Sonora.

Fig. 4.- Plataforma Solar de Hermosillo (PSH).

PLATAFORMA SOLAR DE HERMOSILLO

Instalación creada para llevar a cabo investigación, desarrollo e innovación sobre tecnologías de concentración solar.

Fig. 4.- Plataforma Solar de Hermosillo (PSH).

TMY DISPONIBLE

Radiación Solar (GHI)	Temperatura del Aire Ambiente	Humedad relativa	Velocidad y Dirección del Viento

Altamirano S. & Cabanillas R. (2019)

PLATAFORMA SOLAR DE HERMOSILLO

Estación Meteorológica PSH-E1

2008-actualidad

Registros de GHI a escala temporal 10-minutal.

PLATAFORMA SOLAR DE HERMOSILLO

PSH-E2

2018-actualidad

Registros de GHI, DHI y DNI a escala temporal **1-minutal**.

PSH-E1

2008-actualidad

Registros de GHI a escala temporal **10-minutal**.

OBJETIVOS

OBJETIVOS

Objetivo general:

Completar el Año Meteorológico Típico (TMY) de la Plataforma Solar de Hermosillo con la radiación directa normal (DNI) aplicando la metodología de mejor desempeño entre la utilización de modelos de fracción difusa para la estimación directa de DNI.

OBJETIVOS

Objetivo general:

Completar el Año Meteorológico Típico (TMY) de la Plataforma Solar de Hermosillo con la radiación directa normal (DNI) aplicando la metodología de mejor desempeño entre la utilización de modelos de fracción difusa para la estimación directa de DNI.

Objetivos específicos:

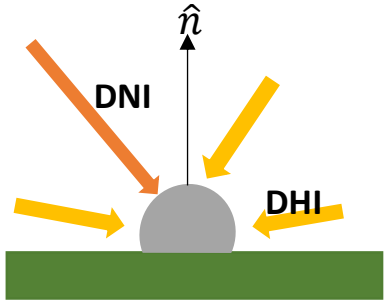
1. Compilar los datos de irradiancia (GHI, DNI y DHI) medidos en tierra de la estación solarimétrica de la PSH.
2. Realizar un control de calidad de los datos de irradiancia medidos en tierra.
3. Ajustar localmente modelos de fracción difusa que usen a la GHI como variable predictora y evaluar la incertidumbre de su uso para estimar la fracción difusa y la DNI.
4. Calcular la DNI a partir de la serie anual típica de la GHI y modelos de fracción difusa para completar el TMY de la PSH con esta variable.

CONCEPTOS BÁSICOS DE LA RADIACIÓN SOLAR

CONCEPTOS BÁSICOS DE LA RADIACIÓN SOLAR

Radiación solar a través de la atmósfera

CONCEPTOS BÁSICOS DE LA RADIACIÓN SOLAR



Radiación solar a través de la atmósfera

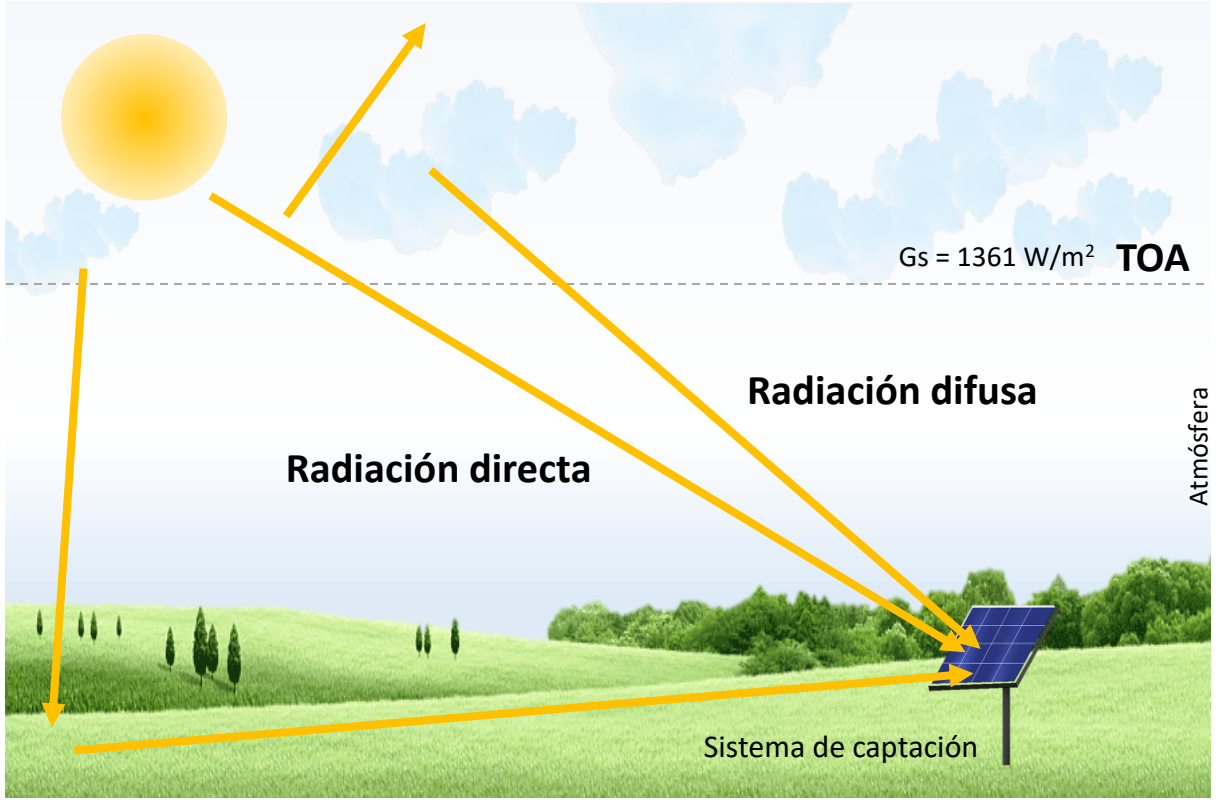


Fig. 5.- Radiación solar a través de la atmosfera.

Ecuación de clausura:

$$GHI = DHI + (DNI \times COS_{\theta})$$

DNI : Irradiancia directa en incidencia normal.
DHI : Irradiancia difusa en plano horizontal.
GHI : Irradiancia global en plano horizontal.

Unidades:
Irradiancia: W/m^2

CONCEPTOS BÁSICOS DE LA RADIACIÓN SOLAR

Variables normalizadas

Índice de claridad:

Indicador adimensionado que da información sobre el estado de la atmósfera.

$$k_t = \frac{GHI}{G_{oh}}$$

Irradiancia extraterrestre en un plano horizontal en TOA

Fracción difusa:

Indicador que indica que fracción de la GHI viene en forma de DHI.

$$f_d \equiv \frac{DHI}{GHI}$$

Cielo nublado

$k_t \to 0 \; y \; f_d \to 1$

Cielo despejado

$k_t \approx 0.80 \; y \; f_d \approx 0.10$

MEDIDAS EN TIERRA DEL RECURSO SOLAR

Resolución temporal de los datos

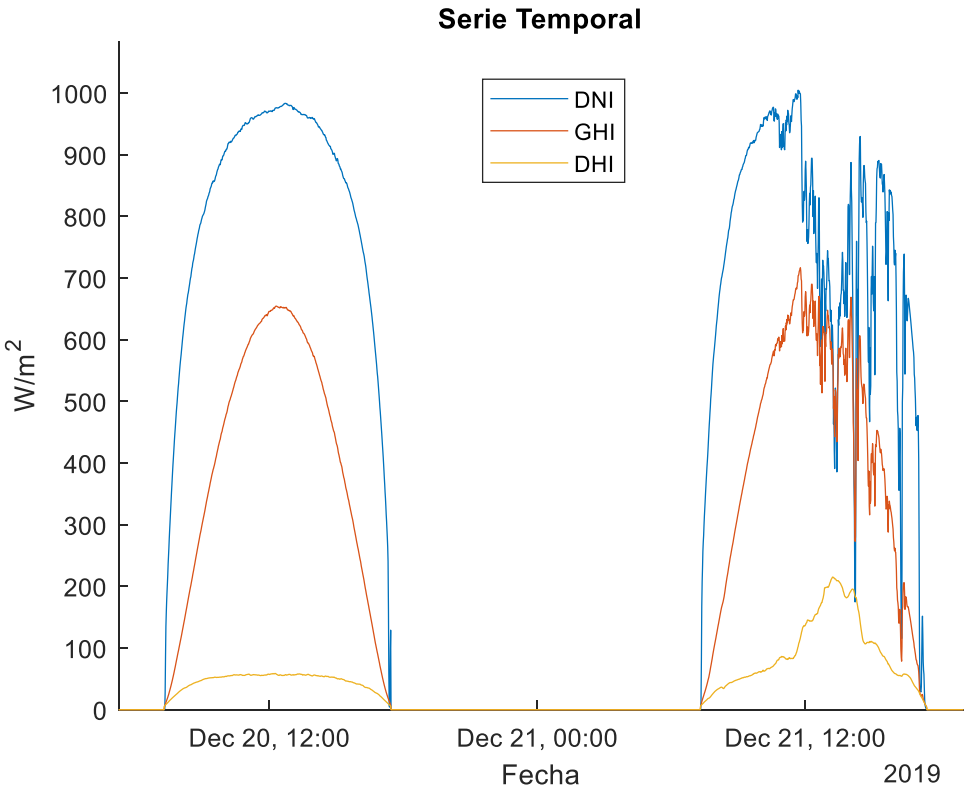


Fig. 6.- Serie temporal 1-minutal de irradiancia solar.

Pirheliómetro (DNI)

Piranómetro (GHI)

Seguimiento solar fino

ANTECEDENTES

INDICADORES DE DESEMPEÑO

Recomendados por varios autores para el análisis y evaluación de datos de radiación solar.

Desviación promedio:

$$\boldsymbol{MBD} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i - y_i), \qquad \boldsymbol{rMBD} = 100\left(\frac{MBD}{\langle y \rangle}\right)$$

Cuantifica el desvío promedio de los datos estimados en comparación a los datos de referencia **(sesgo)**.

Desviación absoluta media:

$$\boldsymbol{MAD} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|\hat{y}_i - y_i|, \qquad \boldsymbol{rMAD} = 100\left(\frac{MAD}{\langle y \rangle}\right)$$

Describe la variación de los valores de un conjunto de datos con respecto a la media.

Desviación cuadrática media:

$$\boldsymbol{RMSD} = \left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i - y_i)^2\right]^{\frac{1}{2}}, \qquad \boldsymbol{rRMSD} = 100\left(\frac{RMSD}{\langle y \rangle}\right)$$

Cuantifica la dispersión de los datos **(incertidumbre)**.

$\hat{\boldsymbol{y}}_{\boldsymbol{i}}$ corresponde a los datos estimados.
$\langle \boldsymbol{y} \rangle$ corresponde a la media de los datos base.

Kolmogorov-Smirnov Integral

$$\boldsymbol{KSI} = \int_0^1 D(Y)dY\,, \qquad \boldsymbol{D(Y)} = \left|\hat{F}(Y) - F(Y)\right|$$

Cuantifica la similitud entre las distribuciones de probabilidad (CDF).

$\hat{F}(Y)$ es para las variables medidas y
$F(Y)$ para las estimadas por el modelo

MODELADO DE LA FRACCIÓN DIFUSA

1960 **Liu & Jordan**

The interrelationship and of direct, diffuse and characteristic distribution total solar radiation.

2010 **Ruiz-Arias et al.**

Proposal of a regressive model for the hourly Diffuse solar Radiation under all sky conditions.

2016 **Gueymard, C. & Ruiz-Arias, J.**

Extensive worldwide validation and climate sensitivity analysis of direct Irradiance predictions from 1-min global Irradiance.

2017 **Abal G. et al.**

Performance of empirical models for Diffuse fraction in Uruguay.

MODELADO DE LA FRACCIÓN DIFUSA

1960

Liu & Jordan

The interrelationship and of direct, diffuse and characteristic distribution total solar radiation.

- **Trabajo pionero**
- Presentaron una correlación basada en **valores diarios** de radiación solar global para calcular la radiación difusa.
- A partir de este trabajo varios autores han continuado con la tendencia de este, proponiendo nuevos modelos empíricos a **diferentes escalas temporales**.
- Después, se han presentado trabajos analizando el desempeño de los modelos propuestos en **diferentes ubicaciones del mundo**.

MODELADO DE LA FRACCIÓN DIFUSA

2010

Ruiz-Arias et al.

Proposal of a regressive model for the hourly Diffuse solar Radiation under all sky conditions.

- Propusieron un modelo regresivo para estimar a la fracción difusa horaria utilizando dos predictores (k_t y m_a).
- Evaluaron a los modelos localmente ajustados a **nivel fracción difusa** y compararon sus desempeños contra otros modelos tomados de la literatura.
- Utilizaron **datos horarios** de GHI y DHI de 21 estaciones localizadas en Estados Unidos y Europa y dividieron las estaciones según su zona climática.
- Encontraron que los modelos presentaron un mejor desempeño en zonas con climas subtropical húmedo y templado en comparación con las zonas con clima árido.
- Reportaron un **RMSD entre 22-28%** para las **estaciones con clima árido** (similar a la PSH) en Estados Unidos.

MODELADO DE LA FRACCIÓN DIFUSA

2016

Gueymard, C. & Ruiz-Arias, J.

Extensive worldwide validation and climate sensitivity analysis of direct Irradiance predictions from 1-min global Irradiance.

- Evaluaron 140 modelos de fracción difusa tomados de la literatura en su forma original en 54 estaciones meteorológicas en todo el mundo.
- Utilizaron datos de irradiancia de GHI, DHI y DNI a **escala 1-minutal**.
- Clasificaron las estaciones meteorológicas según su zona climática.
- Encontraron que para las estaciones con **clima árido**, los mejores modelos presentaron **a nivel DNI** un **rMBD entre -23% y 3.5%,** un **rRMSD entre 15% y 30%** y **un rMAD entre 10% y 27%.** El **modelo SO2** se encuentra dentro de los mejores.
- La mayor aportación del trabajo fue que **no existe un modelo universal** y la importancia de contar con modelos desarrollados a escala 1-minutal. No obstante estos modelos pueden ser utilizados cuidadosamente a escalas intra-horarias.

MODELADO DE LA FRACCIÓN DIFUSA

2017

Abal G. et al.

Performance of empirical models for Diffuse fraction in Uruguay.

- Consideraron diez modelos de fracción difusa horaria y evaluaron el desempeño de cada uno, tanto para su forma **original** como la localmente **ajustada a nivel fracción difusa**.
- Utilizaron datos registrados por cinco sitios de América del Sur (Lat. Entre 30°S y 35°S) en una zona con **clima subtropical húmedo**.
- Ajustaron y evaluaron a los modelos utilizando el metodo de **validación cruzada aleatoria**.
- Encontraron que el ajuste local tiene un **impacto importante**, reduciendo sesgos, dispersiones y similitudes estadísticas.
- Encontraron que los **modelos multivariados** presentaron mejor desempeño en comparación a los univariados.
- Recomendaron al **modelo RBL** como el mejor para estimar la fracción difusa en el lugar.

RECURSO SOLAR EN SONORA

RECURSO SOLAR EN SONORA

2014 **Arancibia-Bulnes et al.**

Beam solar irradiation assessment for Sonora, Mexico.

2019 **Altamirano S. & Cabanillas R.**

Generation of the TMY for the Solar Platform of Hermosillo.

RECURSO SOLAR EN SONORA

2014

Arancibia-Bulnes et al.

Beam solar irradiation assessment for Sonora, Mexico.

- Utilizaron tres correlaciones bien conocidas tomadas de la literatura para estimar la fracción difusa mensual a partir de medidas de GHI en la superficie terrestre.
- Utilizaron datos registrados en estaciones ubicadas en Hermosillo, Nogales y Álamos en el Estado de Sonora.
- Reportaron los valores mensuales promedios de la de DNI medida y estimada para la **ciudad de Hermosillo**.
- Encontraron que las correlaciones sobreestimaron a la DNI medida para Hermosillo.
- Encontraron un valor de **DNI de 7.8 kWh/m^2/día** para Hermosillo.

RECURSO SOLAR EN SONORA

2014

Arancibia-Bulnes et al.

Beam solar irradiation assessment for Sonora, Mexico.

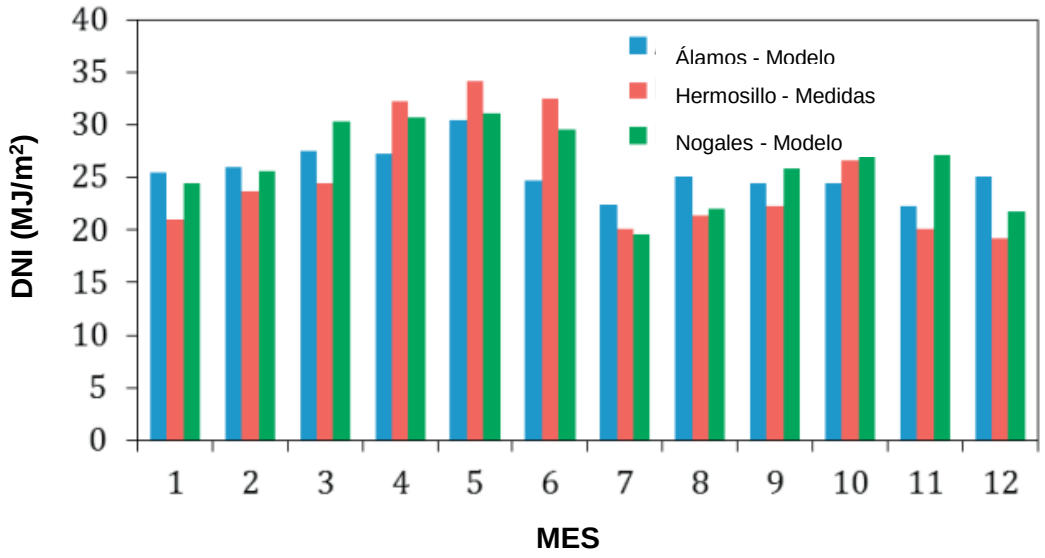


Fig. 7.- Medias mensuales de la DNI para las ubicaciones de Sonora. De Arancibia et al.

RECURSO SOLAR EN SONORA

2019

Altamirano S. & Cabanillas R.

Generation of the TMY for the Solar Platform of Hermosillo.

- **Generaron distintos TMYs** para la ciudad de Hermosillo, Sonora.
- Utilizaron nueve años de datos meteorológicos medidos en la Plataforma Solar de Hermosillo (estación **PSH-E1**).
- Generaron los siguientes TMYs a escala **10-minutal**: **Solar (GHI)**, Temperatura de Bulbo Seco, Humedad Relativa y Velocidad y Dirección del Viento.
- **Primer TMY en Hermosillo (PSH) que consideró a la radiación solar.**
- Obtuvieron una **buena representatividad** de los datos a largo plazo para la radiación global horizontal y la temperatura.
- Recomendaron seguir evaluando e investigando más variables meteorológicas importantes como la **DNI** y cantidad de polvos-aerosoles.

METODOLOGÍA

BASE DE INFORMACIÓN DE LOS DATOS

Compilación de los datos:

Lugar de los datos medidos en tierra: Plataforma Solar de Hermosillo / Estación PSH-E2.

Latitud: 29° 01’ 40” N

Longitud: 111° 08’ 44” O

Zona horaria: UTC-7 (No hay cambio de horario de verano).

Parámetros: GHI, DNI y DHI (W/m^2).

Periodo de tiempo de los datos: 01/01/2019 – 31/12/2020.

Total de datos (crudos): 1,052,640 para cada parámetro.

Escala temporal: 1-minutal

Fig. 8.- Ubicación de la PSH https://goo.gl/maps/fTbyTDGAY6534qJeA

BASE DE INFORMACIÓN DE LOS DATOS

Fig. 12.- Adquisidor de datos Campell CR3000.

Instrumentos:

GHI y DHI

Fig. 9.- Piranómetro Kipp & Zonen CM11.

Fig. 10.- Seguimiento solar Kipp & Zonen Solys2.

Esfera de sombreamiento.

DNI

Fig. 11.- Pirheliómetro Kipp & Zonen CHP 1.

BASE DE INFORMACIÓN DE LOS DATOS

Inspección visual de los datos

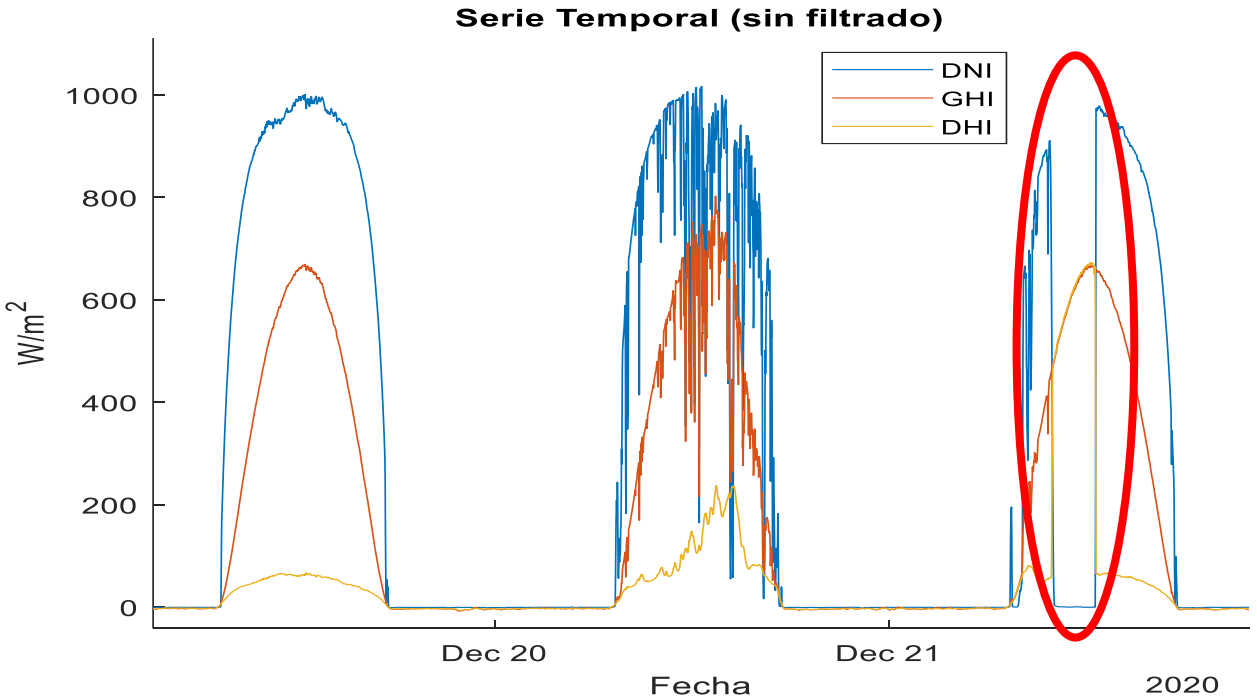


Fig. 13.- Serie temporal de los datos de irradiancia solar. En las abscisas la etiqueta temporal y en las ordenadas el valor de la irradiancia en W/m^2, donde la DNI es la serie en color azul, la GHI en color naranja y DHI en color amarillo.

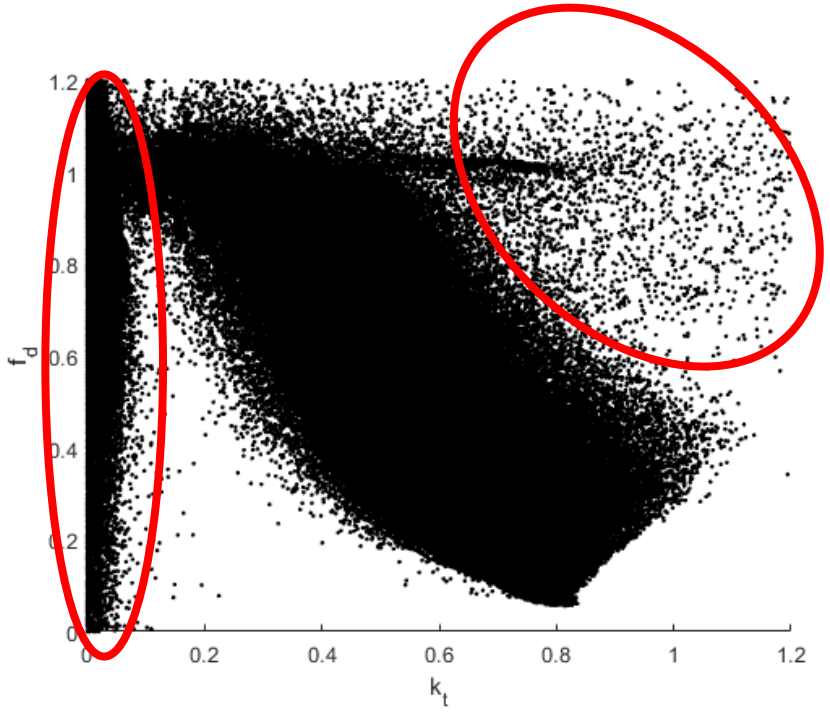


Fig. 14.- Diagrama típico de fracción difusa, f_d vs índice de claridad, k_t de los datos crudos (sin filtrar) a escala 1-minutal.

BASE DE INFORMACIÓN DE LOS DATOS

Resumen de los filtros secuenciales de calidad aplicados

Filtro	Condiciones	Minutos	%
F0	Conjunto inicial diurno de datos validos ($\cos\theta_z \geq 0$ & GHI>0 & DHI>0 & DNI≥0)	512,439	
F1	Filtro Manual	512,000	0.09
F2	**$\alpha_s \geq 7°$ ($\cos\theta_z > 0.12$)**	**469,338**	**8.33**
F3	Limites superiores e inferiores para GHI, DHI y DNI localmente adaptados (**BSRN**)	466,629	0.58
F4	Límite para el cociente de GHI y GHIc, ±8% para $\theta_z<75°$ & ±15% para $\theta_z>75°$ (**BSRN**)	463,718	0.62
F5	Límite para fracción difusa, $f_d<1.05$ para $\theta_z<75$ & $f_d<1.1$ para $\theta_z>75$ (**BSRN**)	463,453	0.06
Todos	**% descartados**		**9.56**

Tabla 1.- Filtros secuenciales aplicados para los datos 1-minutal de irradiancia solar. Para el número de minutos que pasaron cada filtro y el porcentaje de medidas descartadas están indicados.

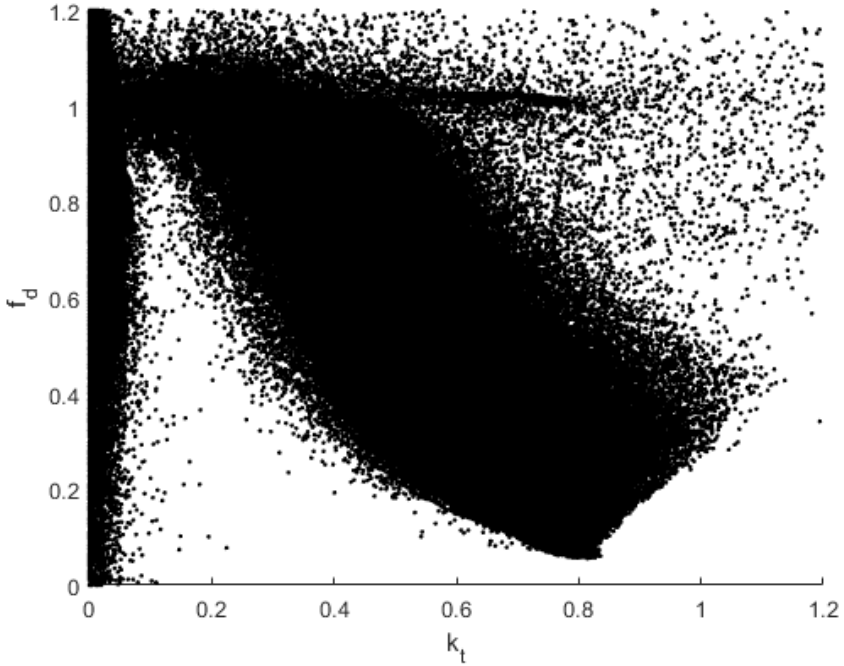


Fig. 25.- Diagrama típico de fracción difusa, f_d vs índice de claridad, k_t de los datos crudos (sin filtrar) a escala 1-minutal.

BASE DE INFORMACIÓN DE LOS DATOS

Resumen de los filtros secuenciales de calidad aplicados

Filtro	Condiciones	Minutos	%
F0	Conjunto inicial diurno de datos validos ($\cos\theta_z \geq 0$ & GHI>0 & DHI>0 & DNI≥0)	512,439	
F1	Filtro Manual	512,000	0.09
F2	**$\alpha_s \geq 7°$ ($\cos\theta_z > 0.12$)**	**469,338**	**8.33**
F3	Limites superiores e inferiores para GHI, DHI y DNI localmente adaptados (**BSRN**)	466,629	0.58
F4	Límite para el cociente de GHI y GHIc, ±8% para $\theta_z<75°$ & ±15% para $\theta_z>75°$ (**BSRN**)	463,718	0.62
F5	Límite para fracción difusa, $f_d<1.05$ para $\theta_z<75$ & $f_d<1.1$ para $\theta_z>75$ (**BSRN**)	463,453	0.06
Todos	**% descartados**		**9.56**

Tabla 1.- Filtros secuenciales aplicados para los datos 1-minutal de irradiancia solar. Para el número de minutos que pasaron cada filtro y el porcentaje de medidas descartadas están indicados.

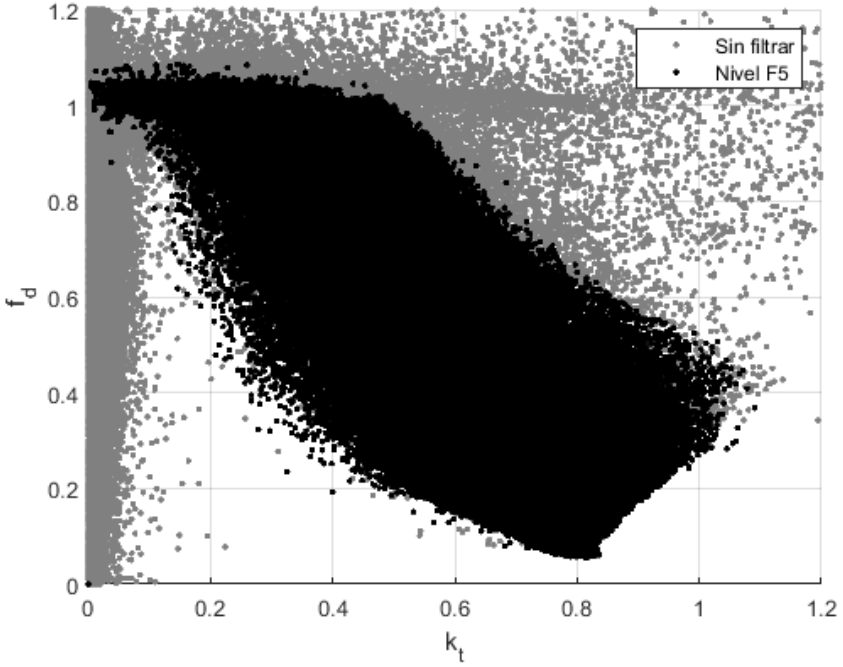


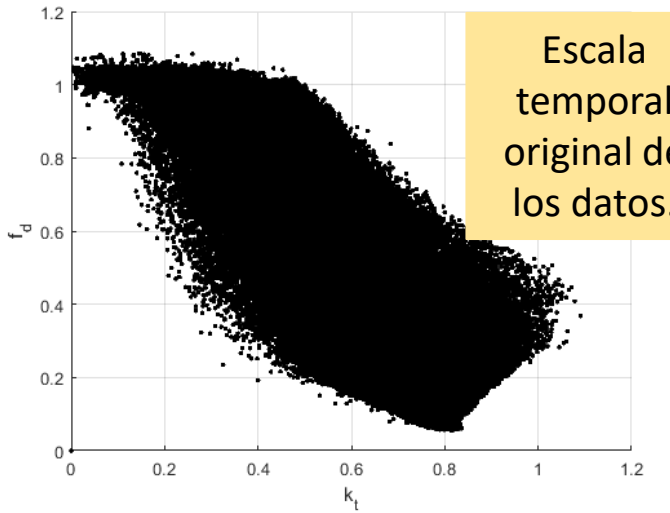
Fig. 14.- Fracción difusa instantánea, f_d vs índice de claridad instantáneo, k_t.

Total de datos diurnos validos a utilizar: 463,453 (1-Minutal) ← **Datos Nivel F5**

ESCALAS TEMPORALES

Escalas temporales:

1-minutal



Escala temporal original de los datos.

a) Escala 1-minutal

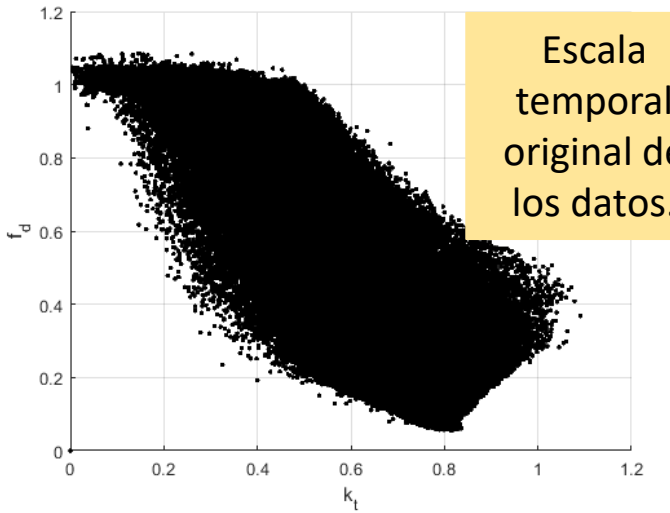
Fig. 15.- Diagrama fracción difusa, f_d vs índice de claridad, k_t de los Datos Base a diferentes escalas temporales.

ESCALAS TEMPORALES

Escalas temporales:

Escalas generadas:

1-minutal



a) Escala 1-minutal

Escala temporal original de los datos.

10-minutal

Escala temporal de interés para el TMY.

$$I_{x,10min} = \frac{1}{10}\sum_{i=1}^{10} G_{xi}\ ,$$

Horaria

Los modelos considerados fueron propuestos a esta escala.

$$I_{x,horaria} = \frac{1}{60}\sum_{i=1}^{60} G_{xi}\ ,$$

Fig. 15.- Diagrama fracción difusa, f_d vs índice de claridad, k_t de los Datos Base a diferentes escalas temporales.

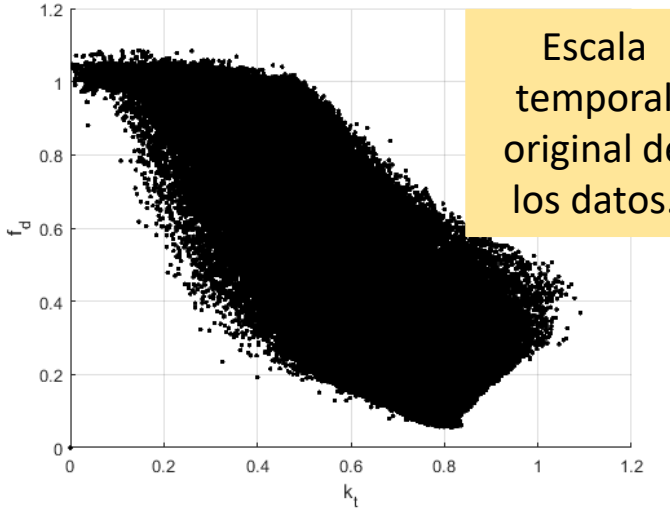
ESCALAS TEMPORALES

Escalas temporales:

Escalas generadas:

1-minutal

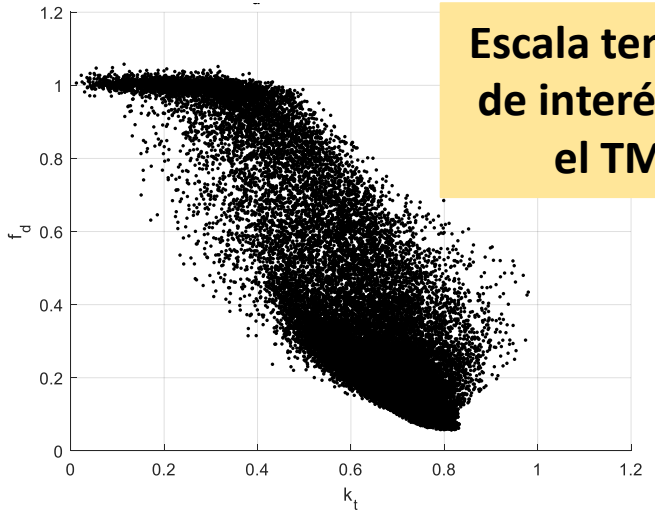
Escala temporal original de los datos.



a) Escala 1-minutal

10-minutal

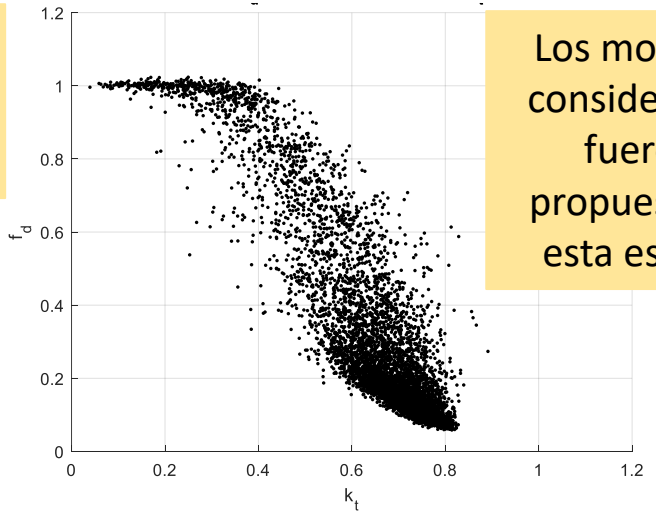
Escala temporal de interés para el TMY.



b) Escala 10-minutal

Horaria

Los modelos considerados fueron propuestos a esta escala.



c) Escala horaria

Fig. 15.- Diagrama fracción difusa, f_d vs índice de claridad, k_t de los Datos Base a diferentes escalas temporales.

ESCALAS TEMPORALES

Escalas temporales:

Escala temporal	Datos Base	Datos diurnos descartados %
1-minutal	463,718	9.56
10-minutal	46,047	12.73
Horaria	7,554	13.74

Tabla 2.- Datos Base a diferentes escalas temporales.

MODELOS DE FRACCIÓN DIFUSA

Modelos de fracción difusa:

- Modelos fenomenológicos.
- Estiman a la fracción difusa a partir de medidas de irradiancia global.
- Relacionan la fracción difusa con el índice de claridad y otras variables.
- Requieren datos de irradiancia medidos en tierra.
- Desarrollados a escala horaria y pueden ser usados razonablemente a escalas sub-horarias.
- Son de carácter local, no son universales.

$$f_d \equiv \frac{DHI}{GHI}$$

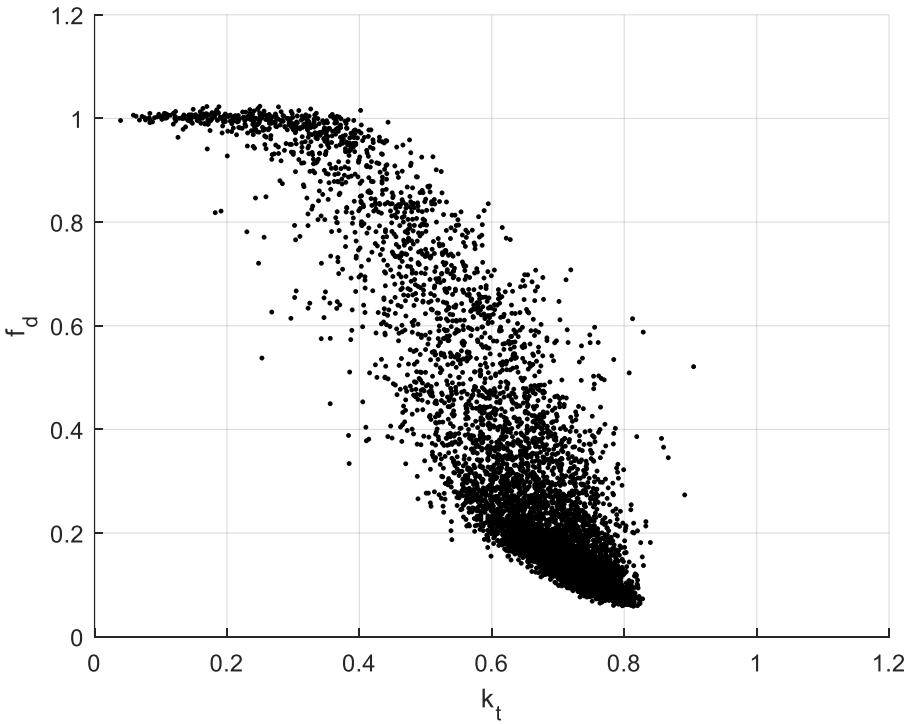
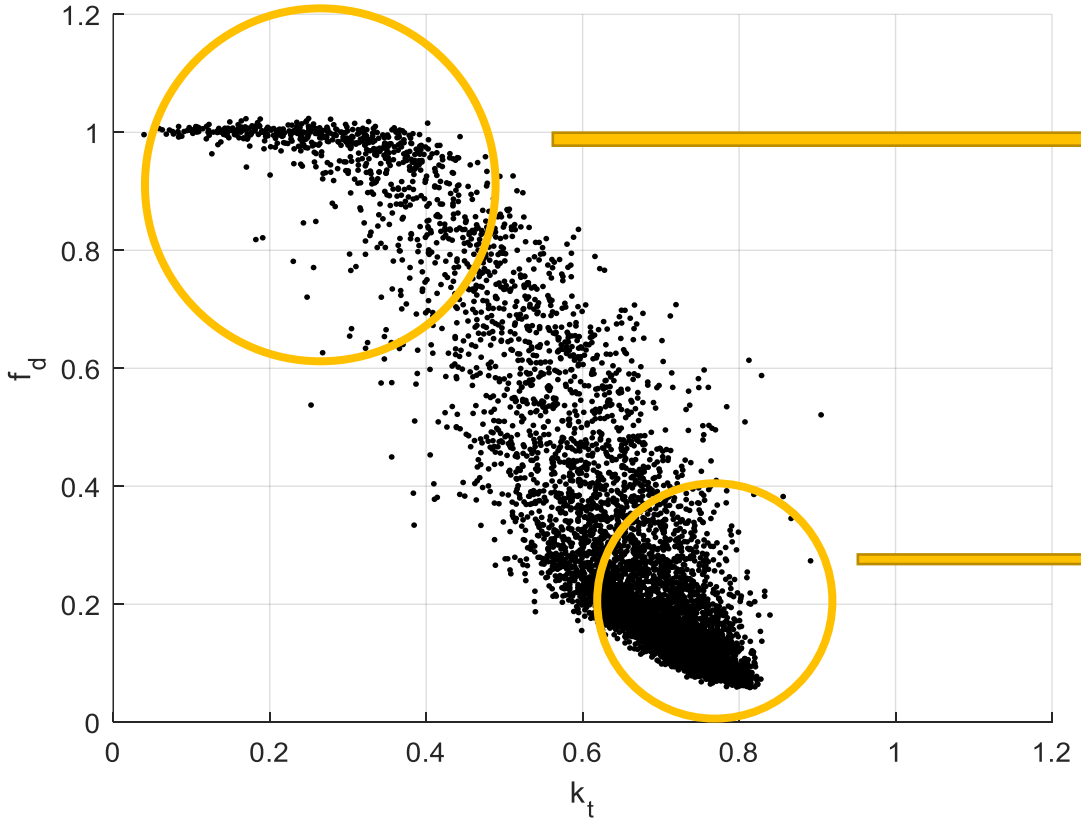


Fig. 16.- Diagrama fd vs kt.

$$k_t = \frac{GHI}{G_{oh}}$$

MODELOS DE FRACCIÓN DIFUSA

Diagrama típico de f_d vs k_t



Cielo nublado

$k_t \rightarrow 0 \; y \; f_d \rightarrow 1$

Cielo despejado

$k_t \approx 0.80 \; y \; f_d \approx 0.10$

Fig. 16.- Diagrama fd vs kt.

MODELOS DE FRACCIÓN DIFUSA

Modelos univariados

- Predictor: kt
- Sencilla implementación
- Buen desempeño

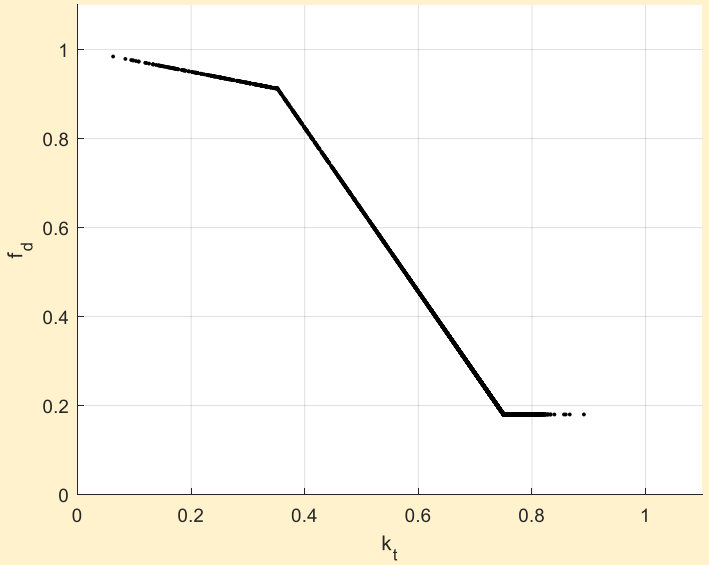


Fig. 17.- Diagrama fd vs kt (modelo univariado).

Modelos multivariados

- Predictores: k_t, m_a, K_t, t_s, α_s
- Compleja implementación
- Mejor desempeño

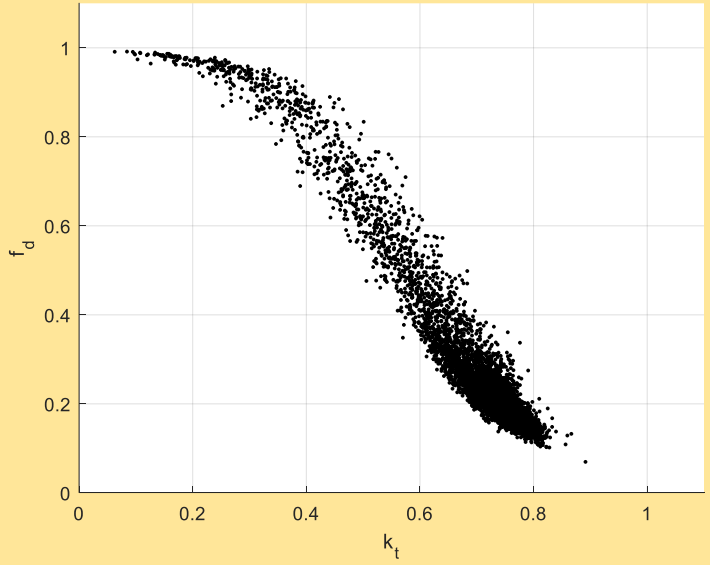


Fig. 18.- Diagrama fd vs kt (modelo multivariado).

MODELOS DE FRACCIÓN DIFUSA

Estimación indirecta de la DNI

Estimada la fracción difusa es posible estimar la DHI y consecuentemente la DNI a través de la **ecuación de clausura**.

$$f_d \equiv \frac{DHI}{GHI}$$

$$DHI_{estimada} = f_d * GHI_{medida}$$

$$\boldsymbol{DNI_{estimada} = \frac{GHI_{medida} - DHI_{estimada}}{cos\theta_z}}$$

MODELOS DE FRACCIÓN DIFUSA

Se tomaron 9 modelos destacados en la literatura y se evaluaron en su forma original y localmente ajustada para las tres diferentes escalas temporales.

Modelos univariados

Acrónimo	Cita principal	Predictores	Notas
OH	Orgill & Hollands (1977)	k_t	Modelo histórico de función lineal a tramos.
EKD	Erbs et al. (1982)	k_t	Modelo histórico que utiliza un polinomio de mayor grado en su función y a tramos. Fue utilizado como universal en diferentes partes del mundo, software de simulación de energía solar y libros de texto.
BSL	Boland et al. (2008), Boland et al. (2001)	k_t	Modelo de función logística de sencilla implementación.
RA1	Ruiz-Arias et al. (2010)	k_t	Modelo de función tipo Gompertz (o doble exponencial).

MODELOS DE FRACCIÓN DIFUSA

Modelos multivariados

Acrónimo	Cita principal	Predictores	Notas
RA2s	Ruiz-Arias et al. (2010)	k_t, m	Extensión del modelo RA1 agregando la masa de aire como otro predictor.
RA2	Ruiz-Arias et al. (2010)	k_t, m	Utiliza la formulación completa del modelo propuesto.
SO2	Skartveit & Olseth (1987)	k_t, α_s	Modelo no lineal de compleja formulación que utiliza la altura solar como otro predictor.
RBD	Reindl et al. (1987)	k_t, α_s	Modelo de función a tramos que utiliza la altura solar como otro predictor.
RBL	Ridley et al. (2010)	$k_t, t_s, \alpha_s, K_t, \psi$	Función logística. Extensión del modelo BSL. Usualmente destacado como uno de los de mejor desempeño a nivel mundial.

AJUSTE Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS

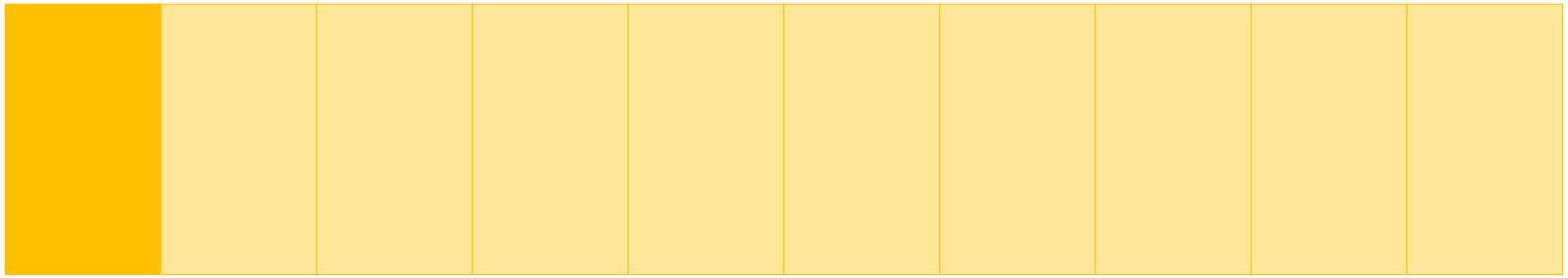
Validación cruzada

Parámetros:

- GHI, DHI, DNI
- k_t, f_d ...

AJUSTE Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS

Validación cruzada 90/10



AJUSTE Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS

Validación cruzada 90/10

AJUSTE Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS

Validación cruzada 90/10

V	Entrenamiento

- **Se ajusta el modelo**
- **Se obtienen nuevos coeficientes**

AJUSTE Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS

Validación cruzada 90/10

V

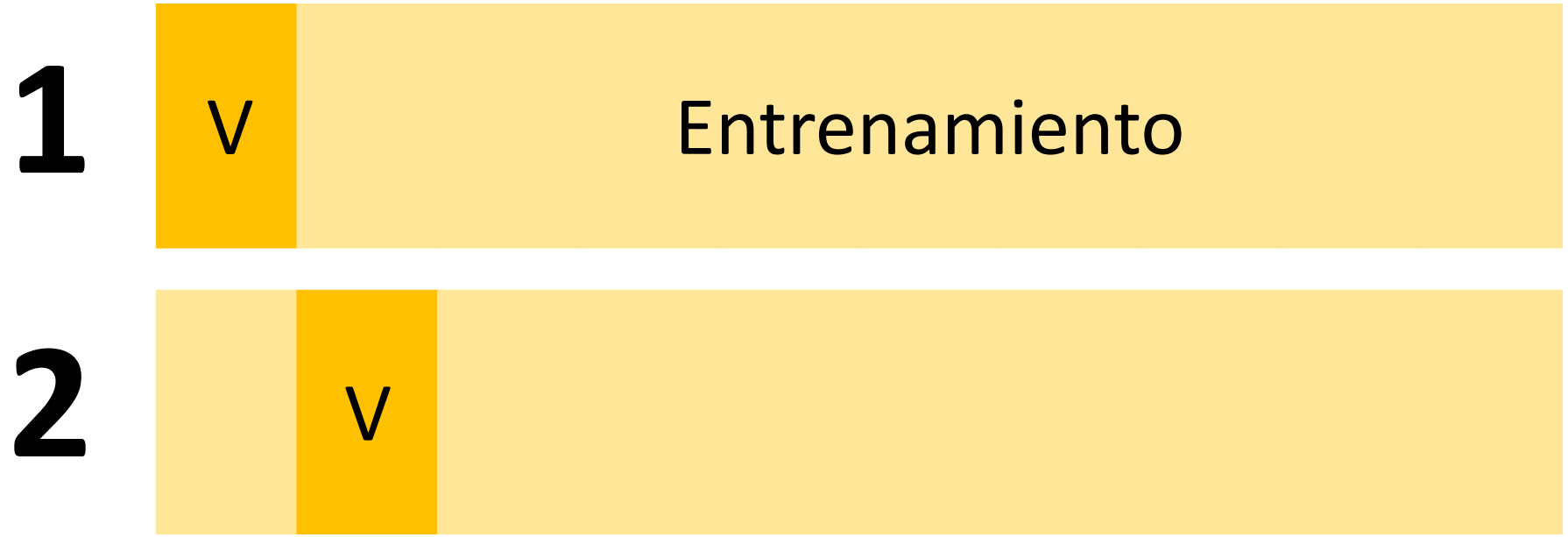
Entrenamiento

- Se ajusta el modelo
- Se obtienen nuevos coeficientes

- Se utiliza el modelo con los nuevos coeficientes
- Se estima la fracción difusa
- Se calcula la DHI y DNI
- Se calculan los indicadores de desempeño

AJUSTE Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS

Validación cruzada 90/10



AJUSTE Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS

Validación cruzada 90/10

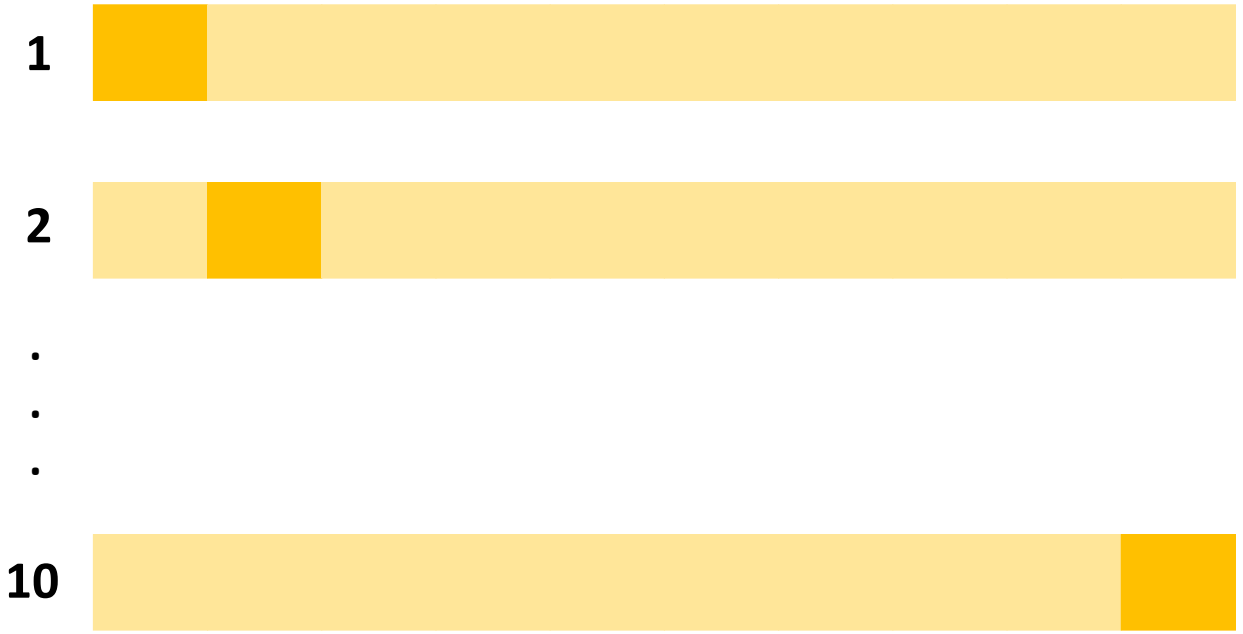
AJUSTE Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS

Validación cruzada 90/10

Promedio de los indicadores de desempeño

AJUSTE Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS

Validación cruzada 90/10



- **500 validaciones cruzadas**
- **Total de iteraciones:** 5,000
- **Resultado final:** Promedio de los indicadores de desempeño de las 500 validaciones.

INCORPORACIÓN DE LA DNI AL TMY

Metodología resumida

- Ajuste y validación de los modelos de fracción difusa.
- Selección del modelo localmente ajustado con mejor desempeño.
- Implementación del modelo a partir de la serie anual típica de la GHI (TMY Solar).
- Cálculo de la serie anual típica de la DHI a partir de la fracción difusa estimada.
- Cálculo de la serie anual típica de la DNI a través de la ecuación de clausura utilizando la GHI (TMY Solar) y la DHI estimada.

RESULTADOS

RESULTADOS

Modelado de la irradiancia
(nivel fracción difusa y DNI)

Año típico meteorológico - DNI

MODELADO DE LA IRRADIANCIA – FRACCIÓN DIFUSA

rMBD
$\langle fd \rangle = 0.3076$

Indicadores de desempeño

MODELOS ORIGINALES

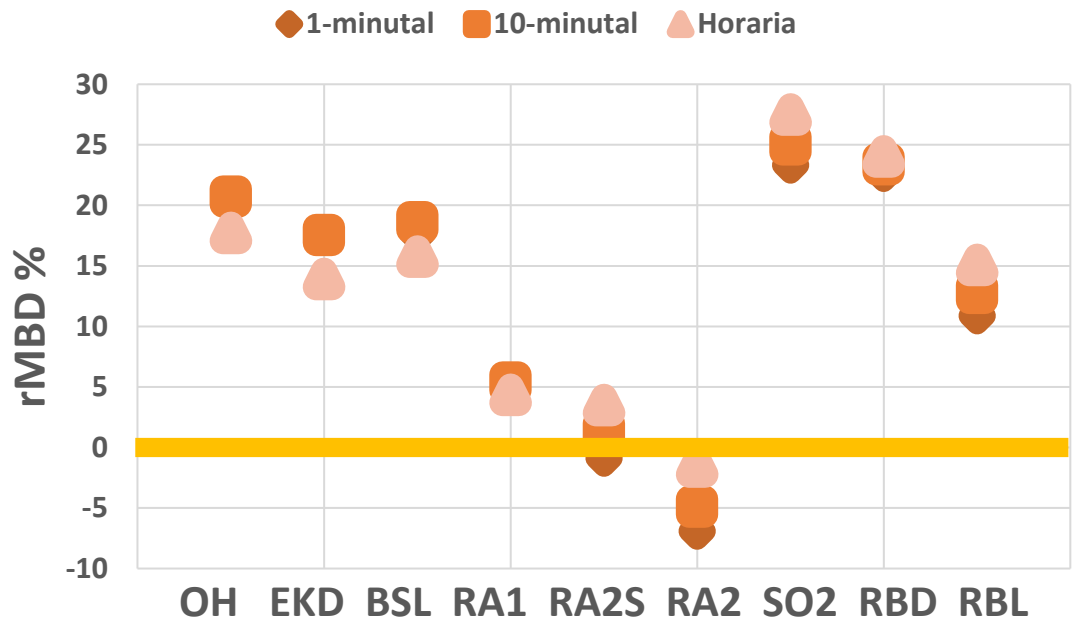


Fig. 19.- Diagrama Indicador de desempeño rMBD para los modelos originales.

MODELOS LOCALMENTE AJUSTADOS

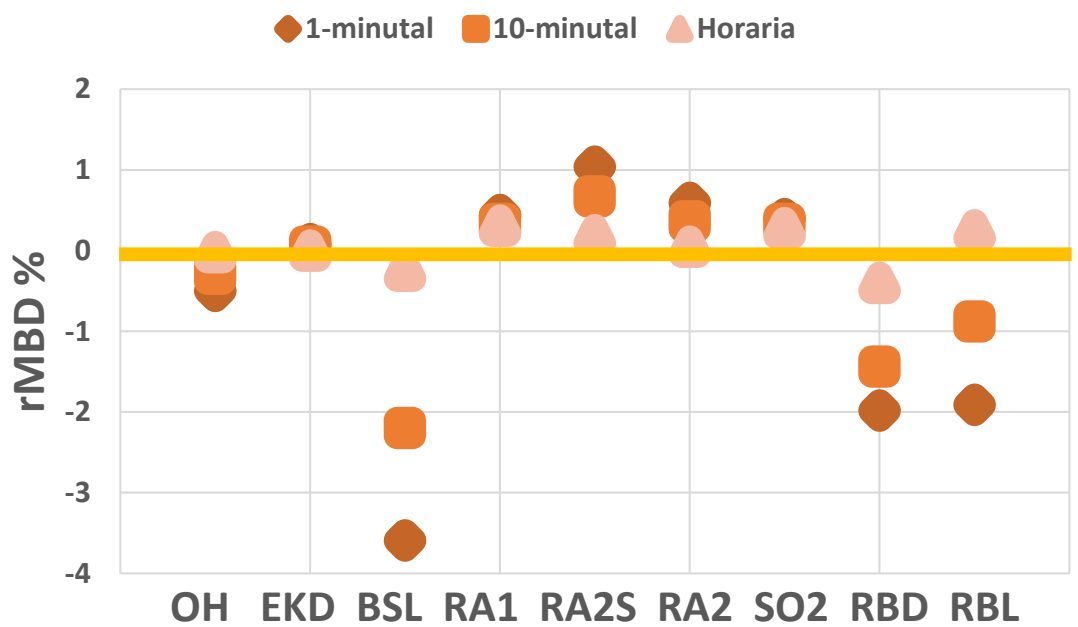


Fig. 20.- Diagrama Indicador de desempeño rMBD para los modelos localmente ajustados.

MODELADO DE LA IRRADIANCIA – FRACCIÓN DIFUSA

rMAD
$\langle fd \rangle = 0.3076$

Indicadores de desempeño

MODELOS ORIGINALES

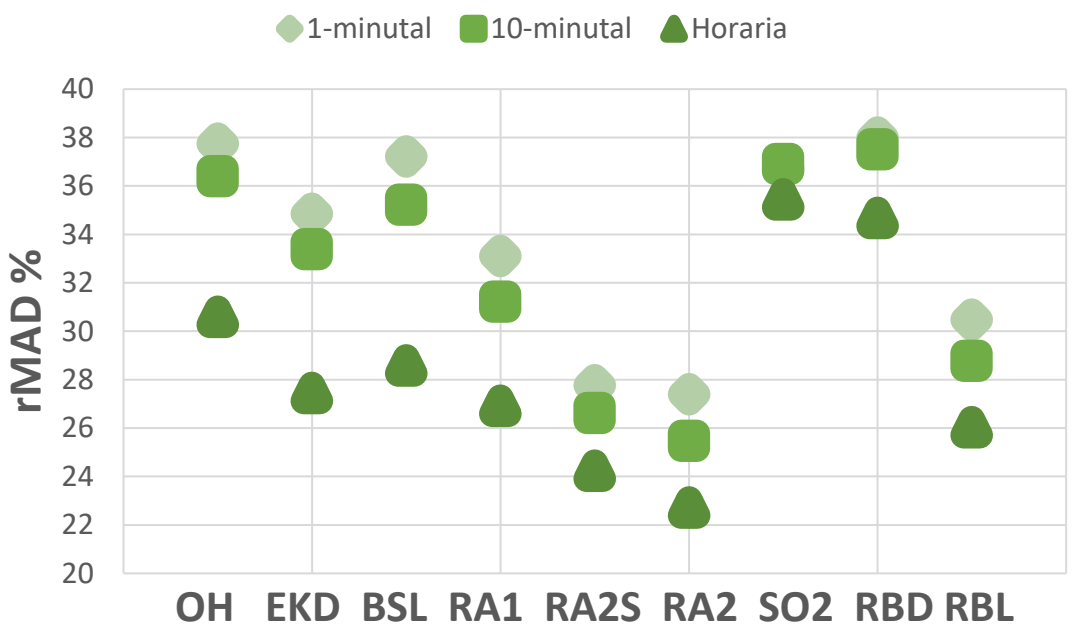


Fig. 21.- Diagrama Indicador de desempeño rMAD para los modelos originales.

MODELOS LOCALMENTE AJUSTADOS

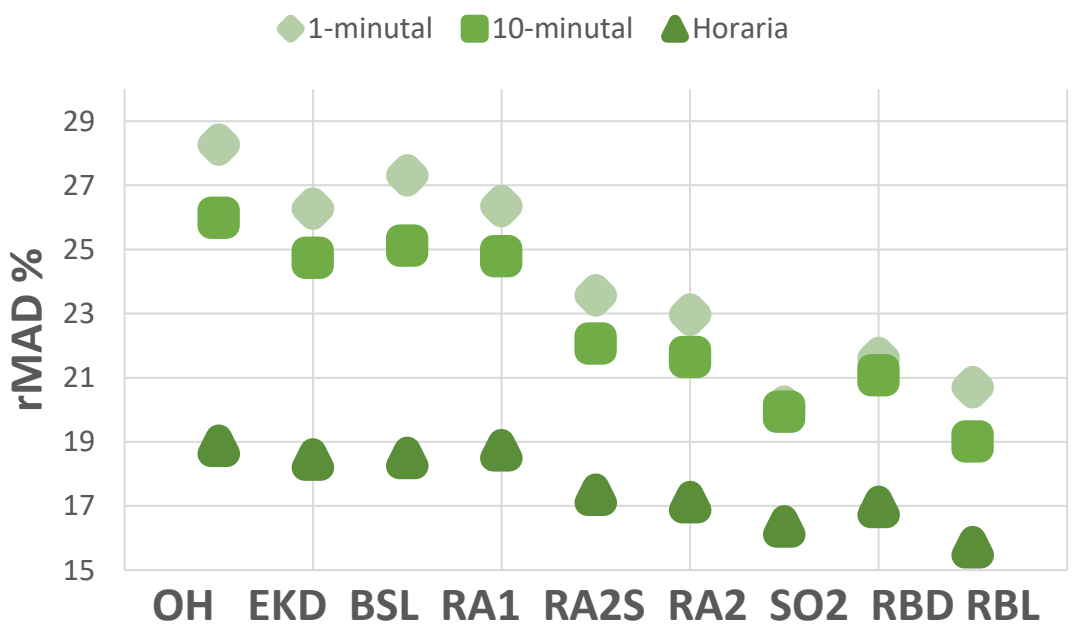


Fig. 22.- Diagrama Indicador de desempeño rMAD para los modelos localmente ajustados.

MODELADO DE LA IRRADIANCIA – FRACCIÓN DIFUSA

rRMSD

$\langle fd \rangle = 0.3076$

Indicadores de desempeño

MODELOS ORIGINALES

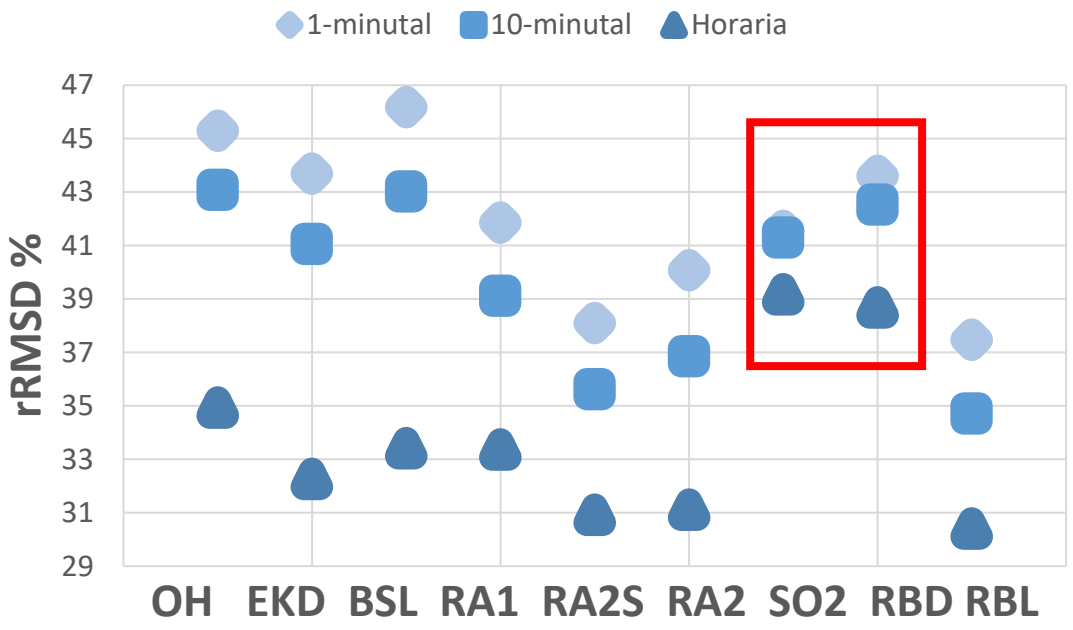


Fig. 23.- Diagrama Indicador de desempeño rRMSD para los modelos originales.

MODELOS LOCALMENTE AJUSTADOS

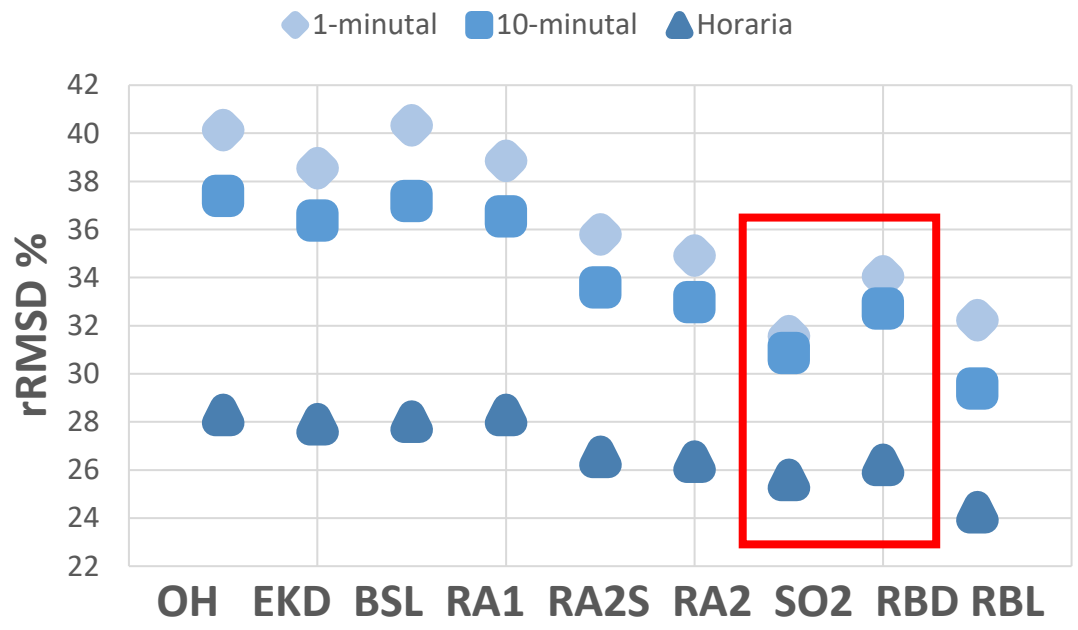


Fig. 24.- Diagrama Indicador de desempeño rRMSD para los modelos originales.

MODELADO DE LA IRRADIANCIA – FRACCIÓN DIFUSA

Diagramas de dispersión: f_d modelo vs f_d datos medidos

Modelo RBL
Escala 10-minutal

Original

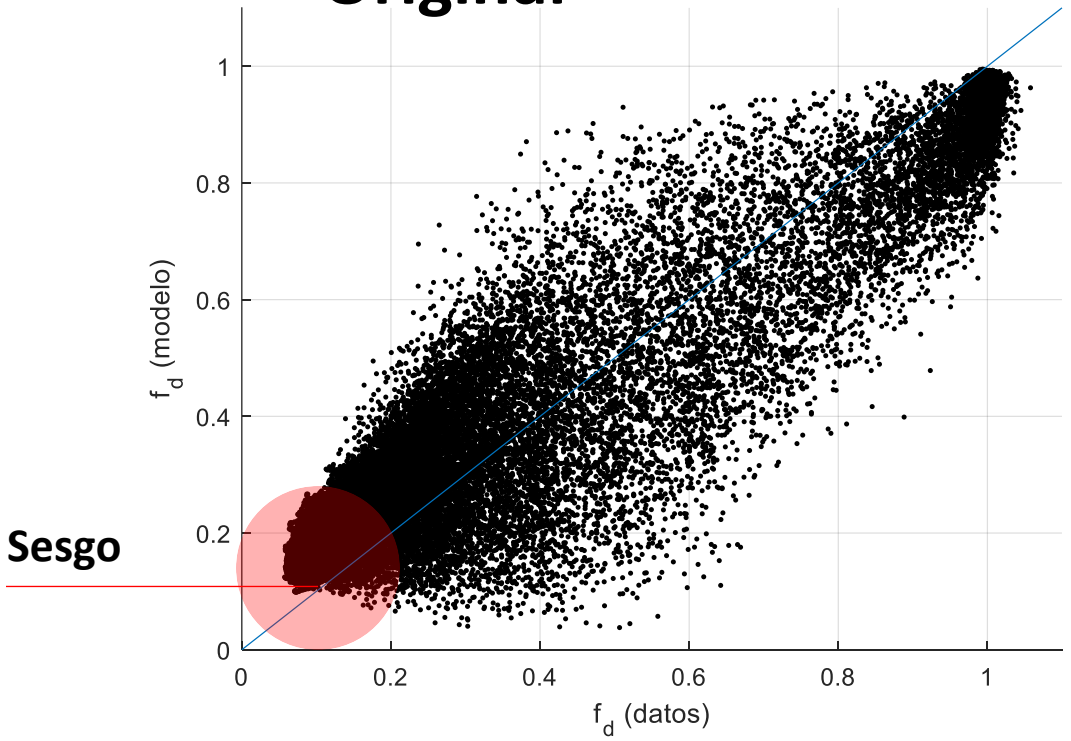


Fig. 25.- Gráfico f_d modelo vs f_d datos para el modelo original RBL a escala 10-Minutal. Línea de 45 grados agregada al gráfico para mejor visualización de los datos..

Ajustado

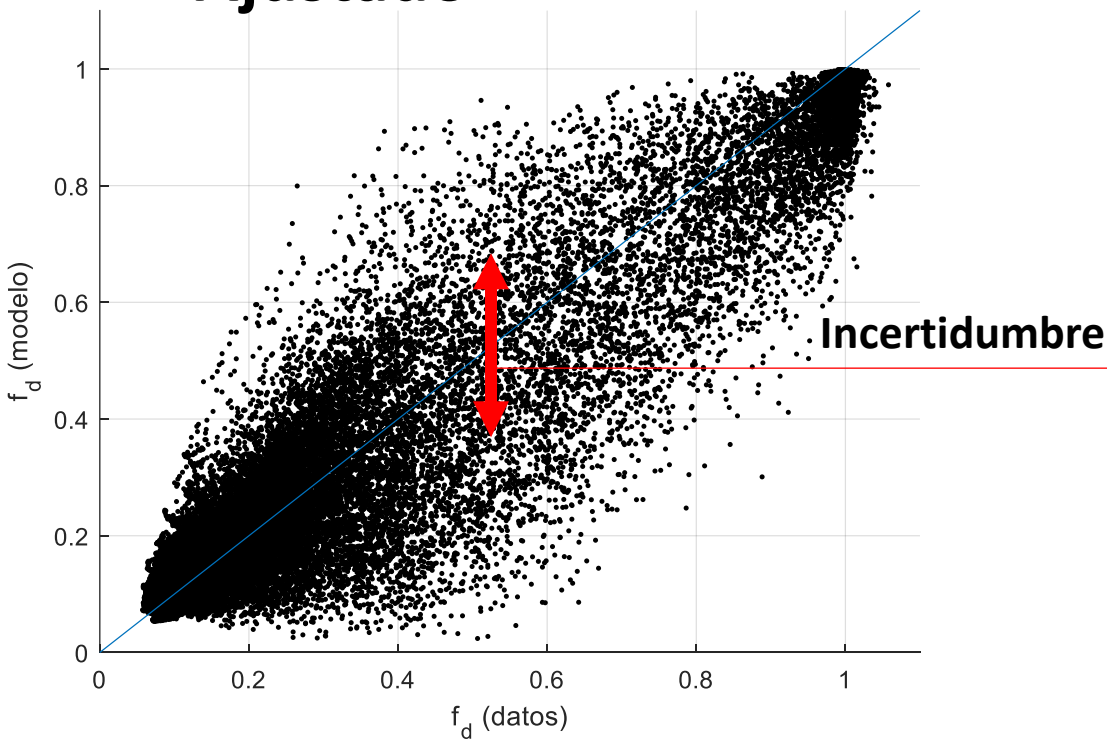


Fig. 26.- Gráfico f_d modelo vs f_d datos para el modelo localmente ajustado RBL a escala 10-Minutal. Línea de 45 grados agregada al gráfico para mejor visualización de los datos..

MODELADO DE LA IRRADIANCIA – FRACCIÓN DIFUSA

rKSI

Indicadores de desempeño

MODELOS ORIGINALES

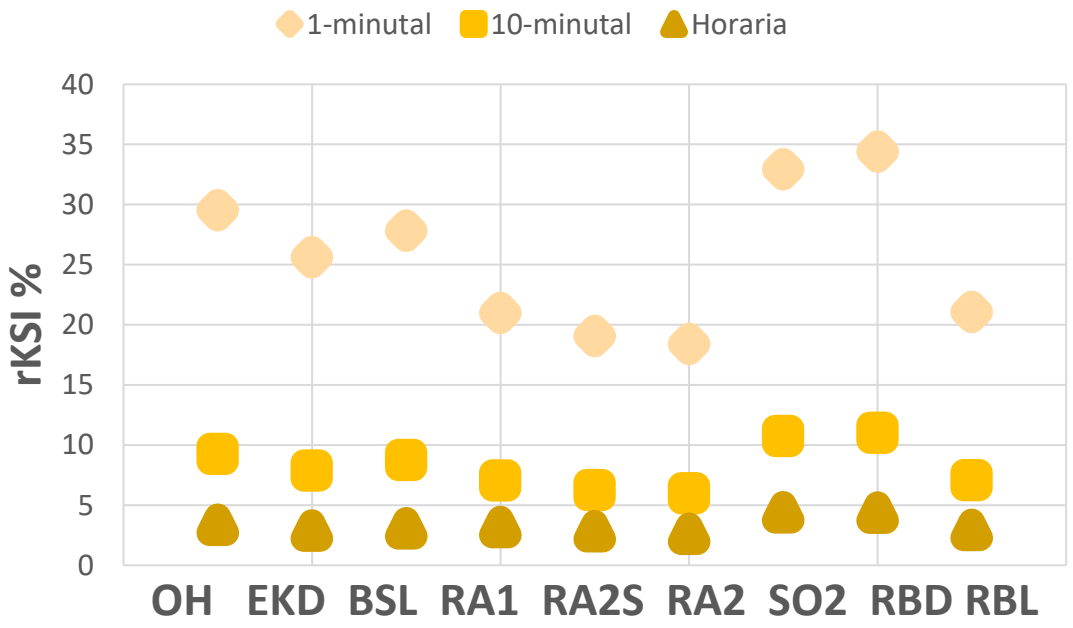


Fig. 27.- Diagrama Indicador de desempeño rRMSD para los modelos originales.

MODELOS LOCALMENTE AJUSTADOS

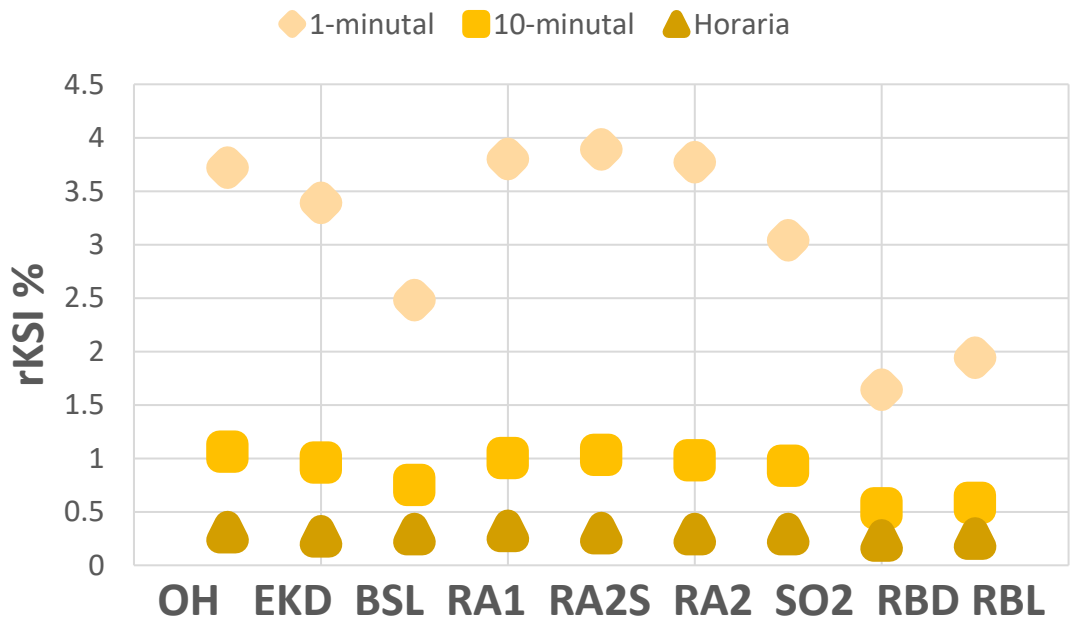


Fig. 28.- Diagrama Indicador de desempeño rRMSD para los modelos originales.

MODELADO DE LA IRRADIANCIA – FRACCIÓN DIFUSA

Modelo RBL
Escala 10-minutal

Diferencias de las CDF

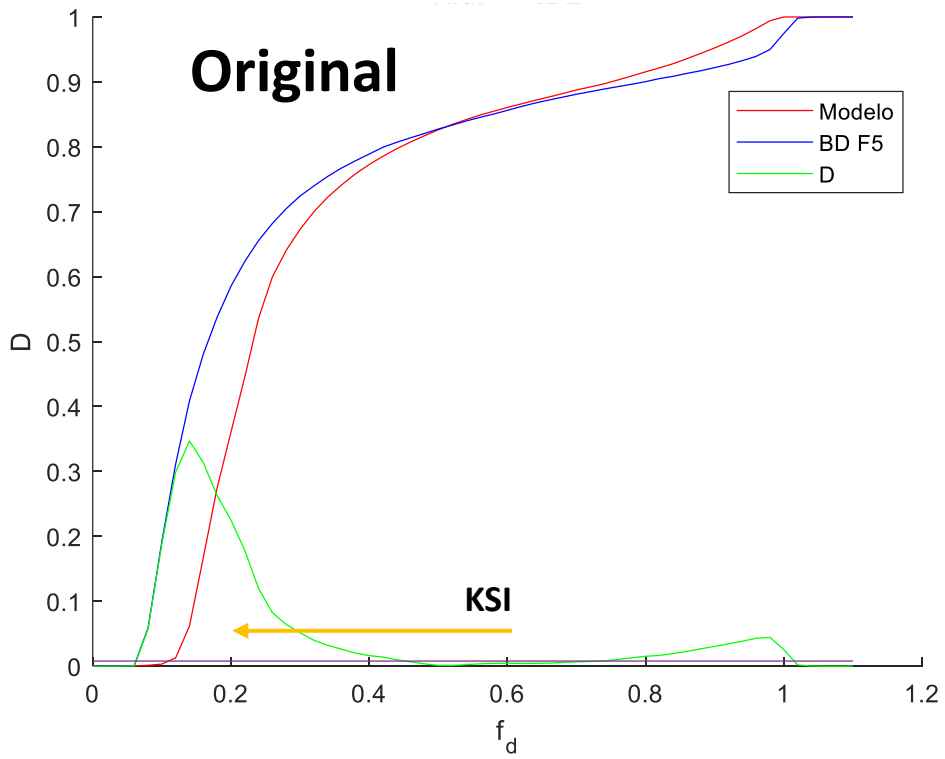


Fig. 29.- Diferencia entre las funciones de distribución acumulativa, D, para el modelo RBL original a escala 10-minutal.

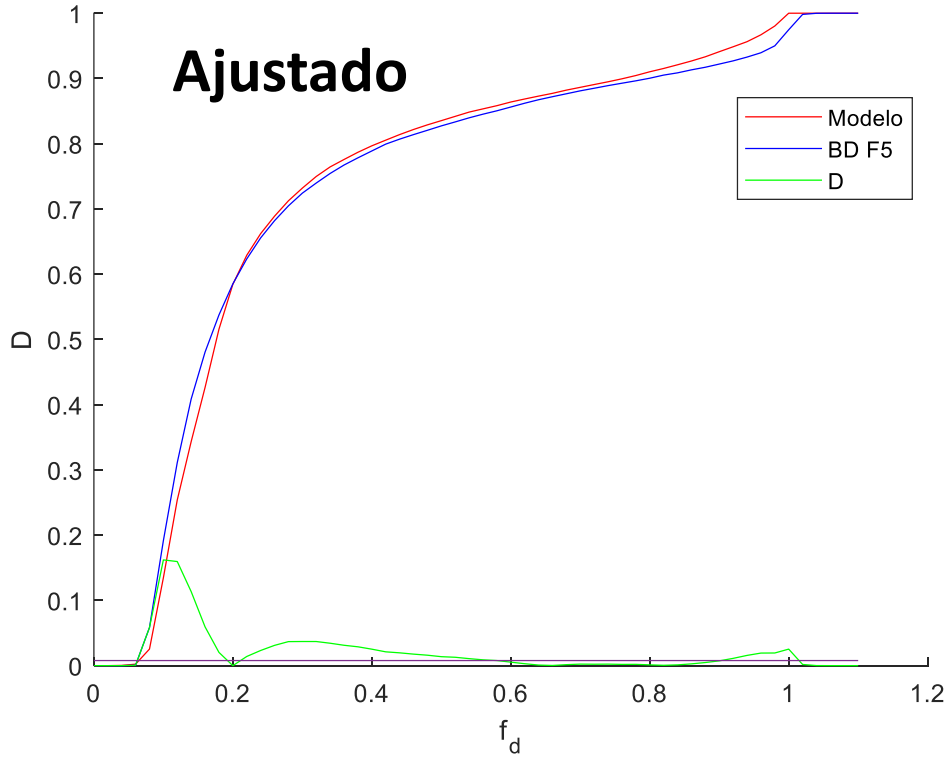


Fig. 30.- Diferencia entre las funciones de distribución acumulativa, D, para el modelo RBL localmente ajustado a escala 10-minutal.

MODELADO DE LA IRRADIANCIA – FRACCIÓN DIFUSA

Modelos localmente ajustados
Escala 10-minutal

Modelos univariados

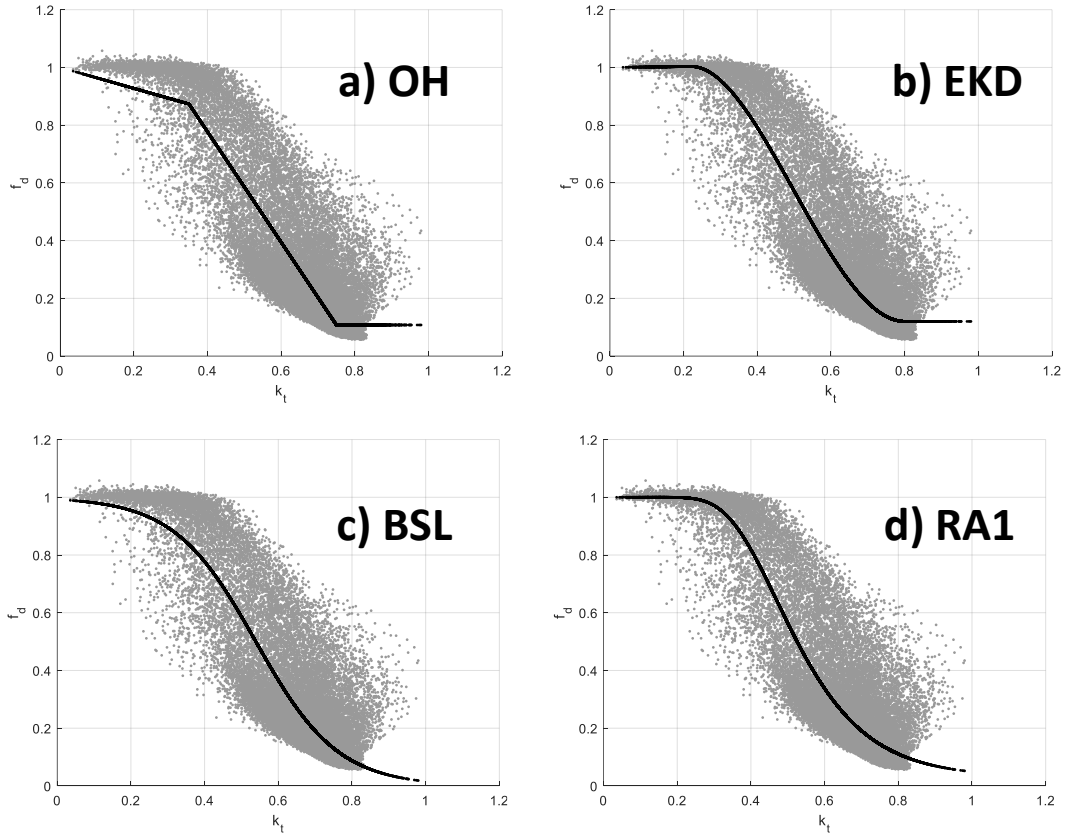


Fig. 31.- Gráficos f_d vs k_t de los modelos univariados para la escala 10-minutal. Donde, la nube gris son los Datos Base y los puntos negros, el modelo localmente ajustado.

Modelos multivariados

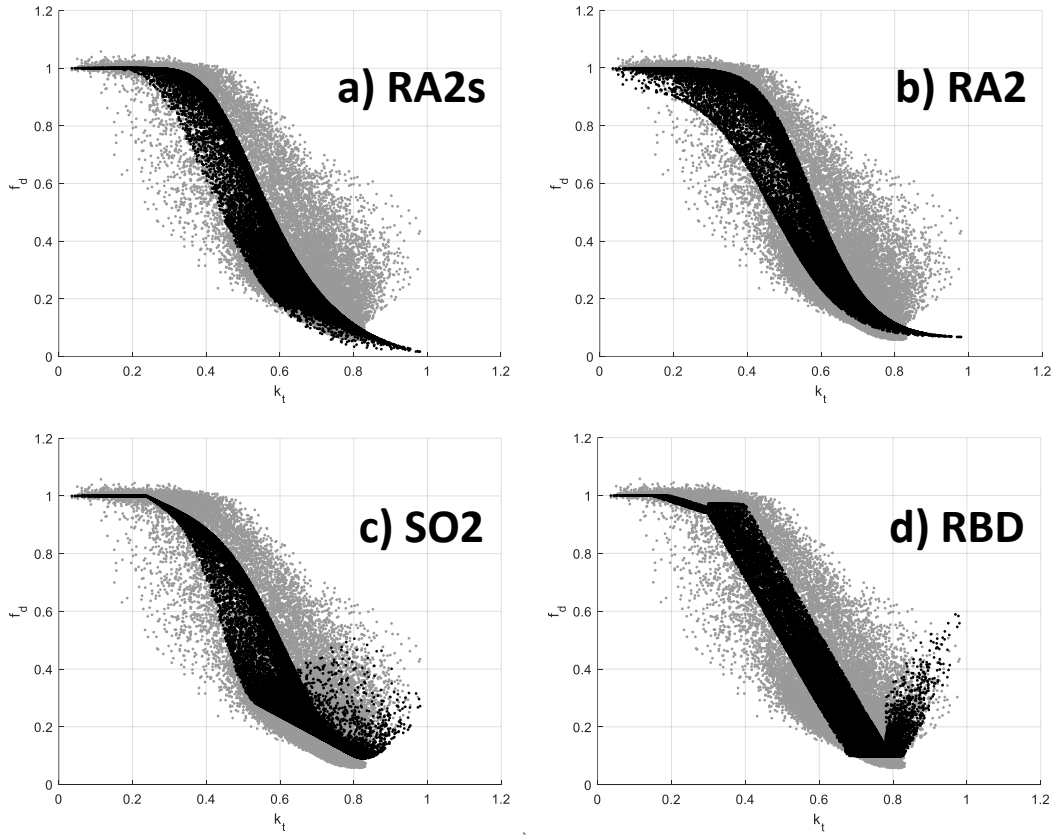
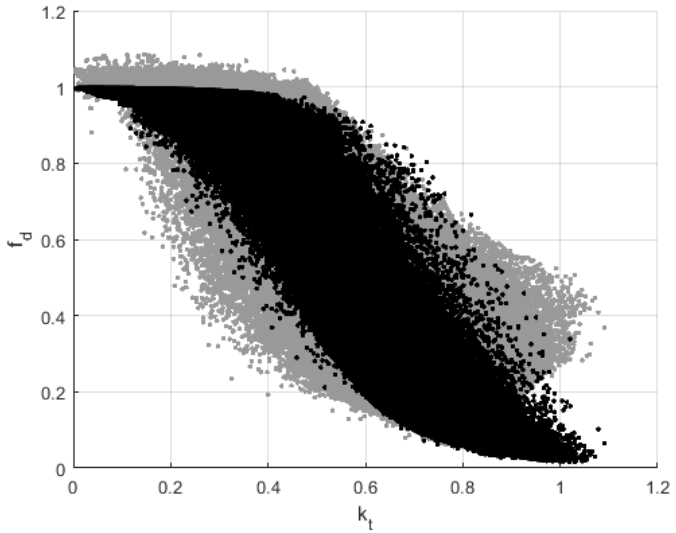


Fig. 32.- Gráficos f_d vs k_t de los modelos multivariados para la escala 10-minutal. Donde, la nube gris son los Datos Base y los puntos negros, el modelo localmente ajustado.

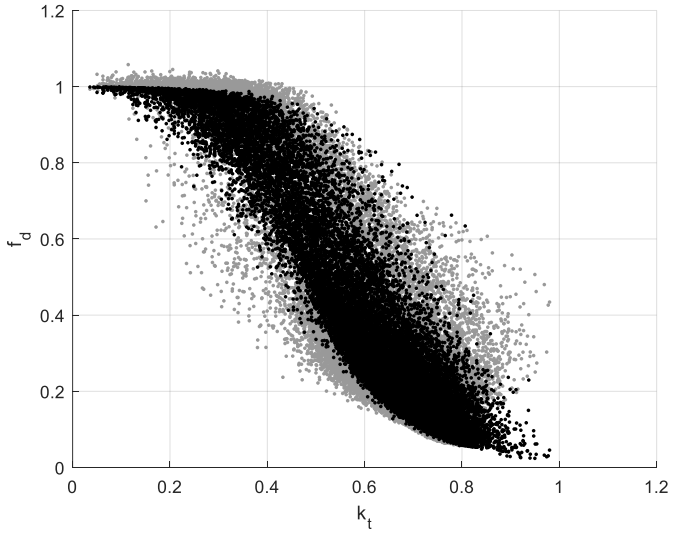
MODELADO DE LA IRRADIANCIA – FRACCIÓN DIFUSA

Modelo RBL

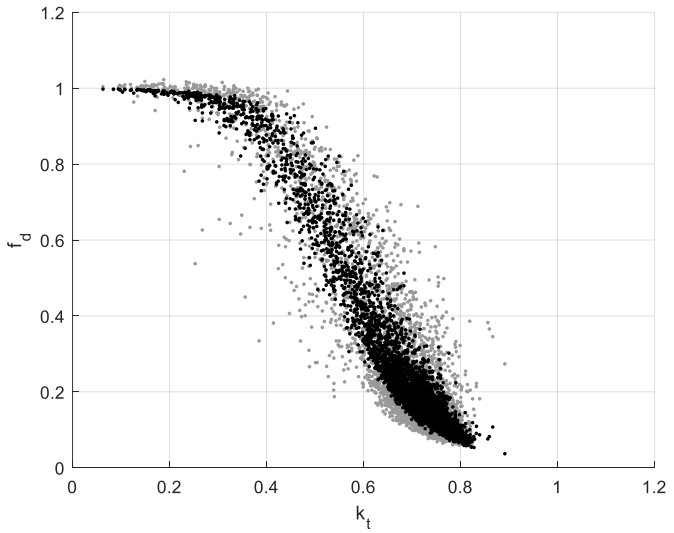
localmente ajustado a diferentes escalas temporales



a) 1-minutal



b) 10-minutal



c) Horaria

Fig. 33.- Gráficos f_d vs k_t para el modelo RBL a diferentes escalas temporales. Donde, la nube gris son los Datos Base y los puntos negros, el modelo localmente ajustado.

MODELADO DE LA IRRADIANCIA – FRACCIÓN DIFUSA

Resumen de los modelos con mejor desempeño

Localmente ajustados

	1-minutal		10-minutal		Horario	
Criterio	**Valor**	**Modelo**	**Valor**	**Modelo**	**Valor**	**Modelo**
rRMSD más bajo (%)	32	SO2	**29**	**RBL**	24	RBL
rMAD más bajo (%)	20	SO2	**19**	**RBL**	16	RBL
rRMSD menor a	34 (%)	SO2, RBL, RBD Y RA2	**33 (%)**	**RBL y SO2**	27 (%)	RBL, SO2, RBD Y RA2

Tabla 3.- Resultados de los modelos localmente ajustados que presentaron mejores indicadores de desempeño para la estimación de la fracción difusa a diferentes escalas temporales.

MODELADO DE LA IRRADIANCIA - DNI

MODELADO DE LA IRRADIANCIA - DNI

rMBD

$\langle DNI \rangle = 663.4\ W/m2$

Indicadores de desempeño

MODELOS ORIGINALES

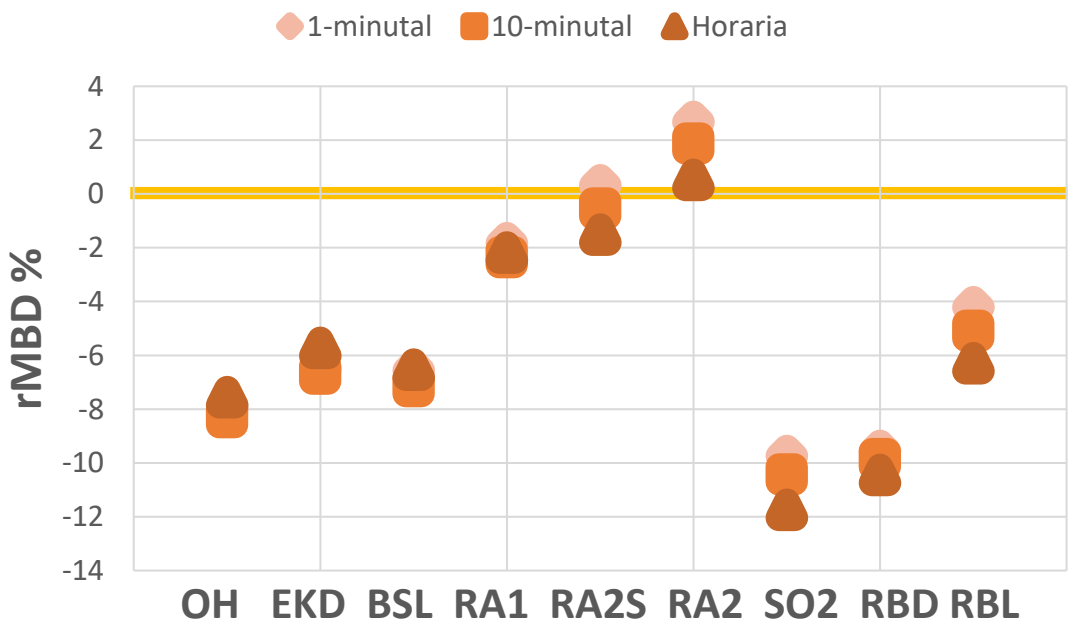


Fig. 34.- Diagrama Indicador de desempeño rMBD para los modelos originales.

MODELOS LOCALMENTE AJUSTADOS

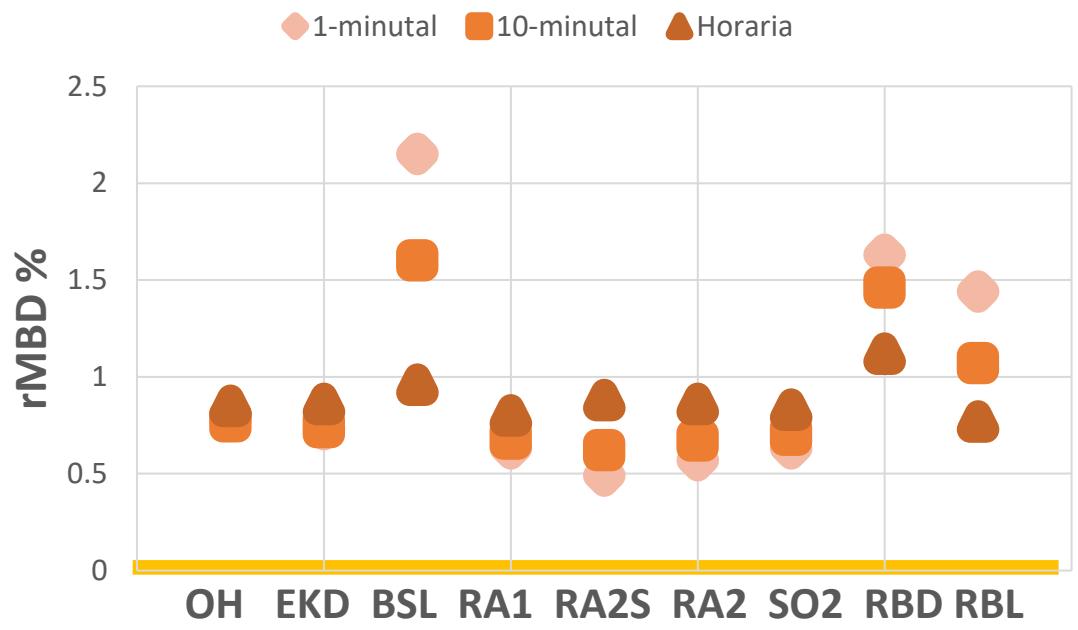


Fig. 35.- Diagrama Indicador de desempeño rMBD para los modelos localmente ajustados.

MODELADO DE LA IRRADIANCIA - DNI

Localmente ajustados

Resumen de los modelos con mejor desempeño

	1-minutal		10-minutal		Horario	
Criterio	**Valor**	**Modelo**	**Valor**	**Modelo**	**Valor**	**Modelo**
rRMSD más bajo (%)	13	SO2	**12**	**RBL**	10	RBL
rMAD más bajo (%)	8	SO2	**8**	**RBL**	7	RBL
rRMSD menor a	14 (%)	RBL, SO2, RA2 y RBD	**13 (%)**	**RBL, SO2, RA2 Y RBD**	11 (%)	RBL, SO2, RA2s, RA2 y RBD

Tabla 4.- Resultados de los modelos localmente ajustados que presentaron mejores indicadores de desempeño para la estimación de la DNI diferentes escalas temporales.

AÑO METEOROLÓGICO TÍPICO - DNI

AÑO METEOROLÓGICO TÍPICO - DNI

Estimación de la serie anual de la DNI

Modelo RBL – escala 10-minutal.

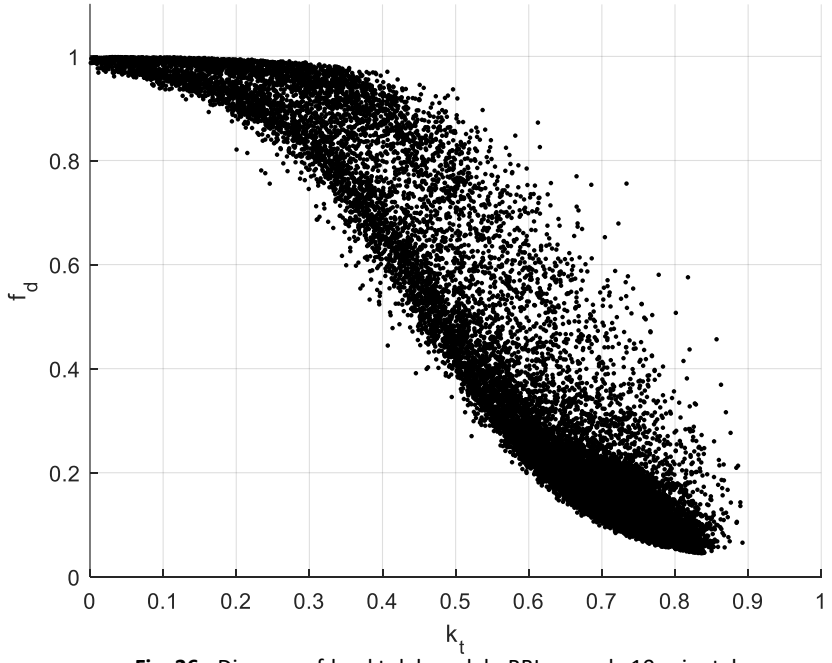


Fig. 36.- Diagrama fd vs kt del modelo RBL a escala 10-minutal.

AÑO METEOROLÓGICO TÍPICO - DNI

Serie anual de DNI Escala 10-minutal

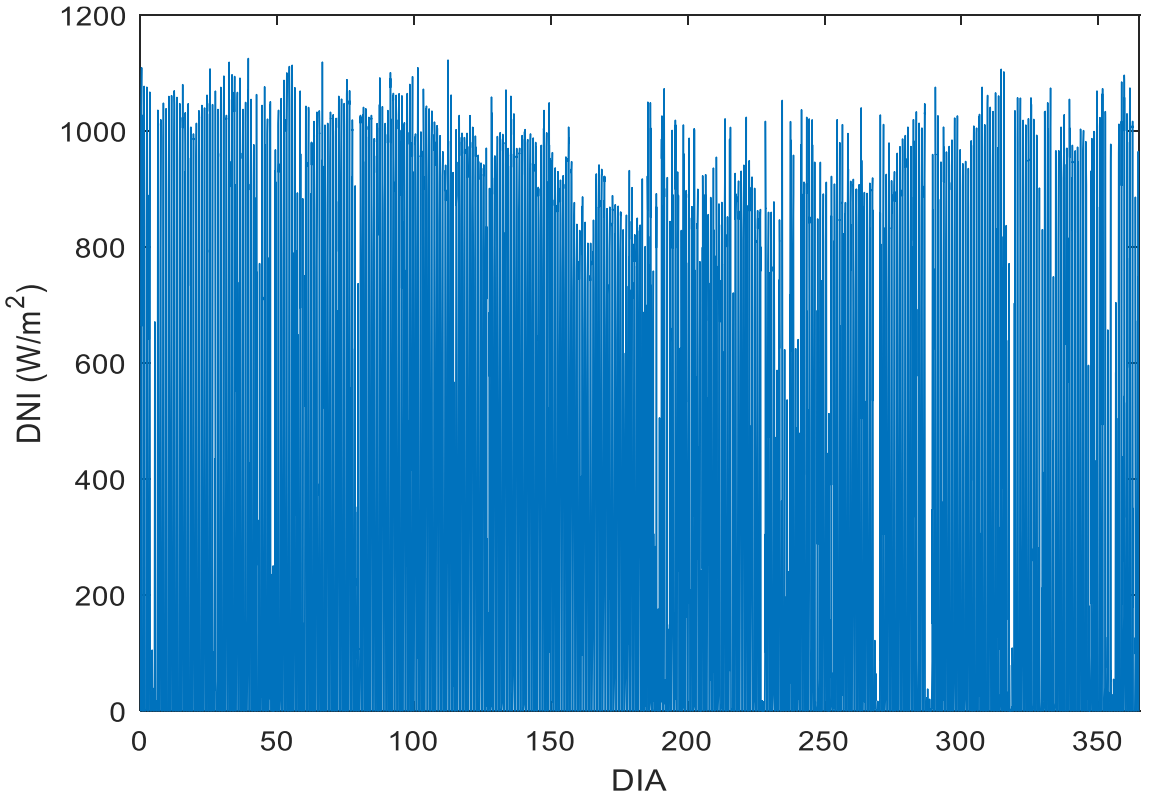


Fig. 37.- Serie anual 10-minutal de DNI de la PSH.

AÑO METEOROLÓGICO TÍPICO - DNI

Serie anual de DNI Escala diaria

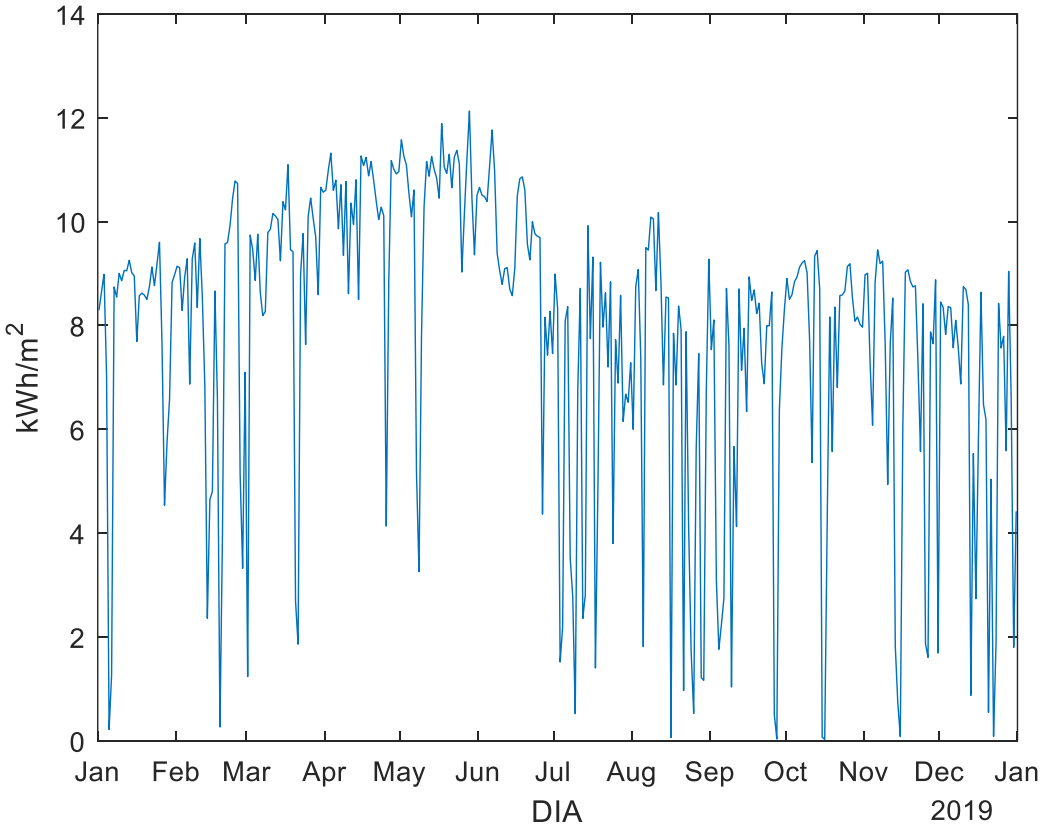


Fig. 38.- Serie anual diaria de DNI de la PSH.

AÑO METEOROLÓGICO TÍPICO - DNI

Serie anual de DNI Escala diaria

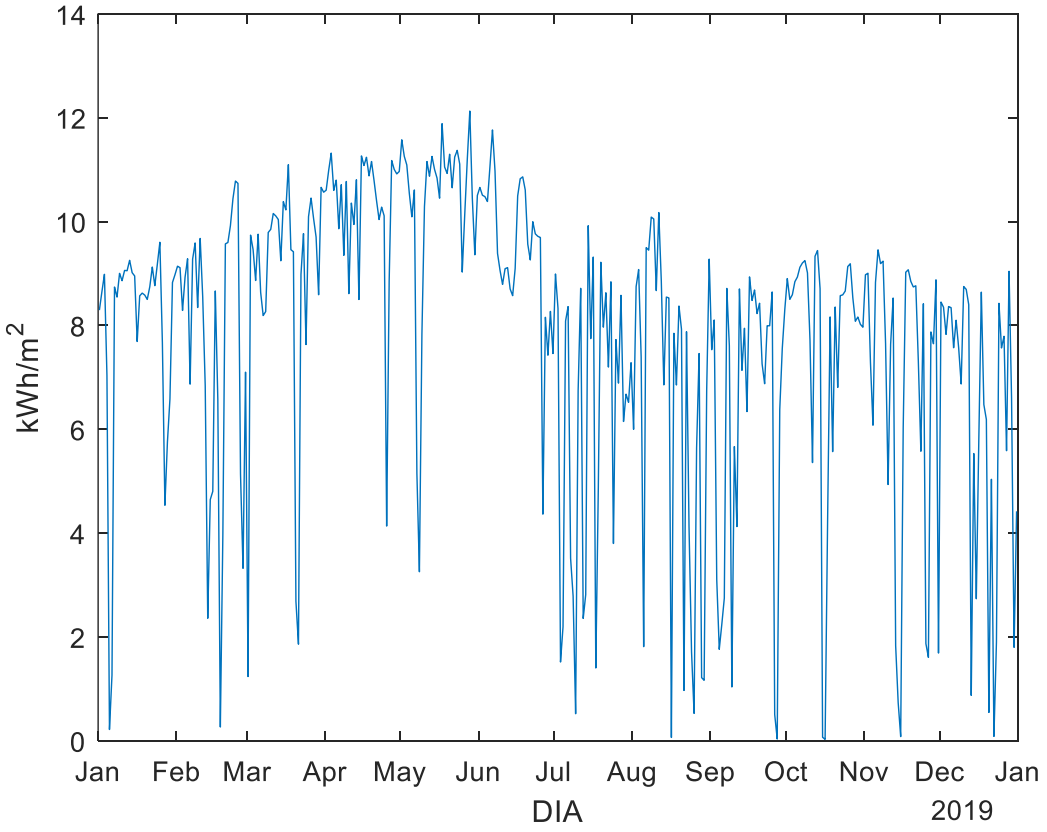


Fig. 38.- Serie anual diaria de DNI de la PSH.

Análisis diarios	TMY DNI (kWh/m²)
Media	7.8
P50	8.6
P75	9.7
P25	6.9
P95	11.1
P05	1.2
Máxima	12.13
Mínima	0.03

Tabla 5.- Análisis diarios del TMY de DNI.

AÑO METEOROLÓGICO TÍPICO - DNI

Medias mensuales

Mes	MJ/m²	kWh/m²
Enero	28.4	7.9
Febrero	27.2	7.6
Marzo	31.9	8.9
Abril	36.9	10.3
Mayo	37.1	10.3
Junio	34.1	9.5
Julio	22.5	6.2
Agosto	23.4	6.5
Septiembre	22.4	6.2
Octubre	27.8	7.7
Noviembre	24.1	6.7
Diciembre	22.3	6.2

Tabla 6.- Valores medios mensuales de la serie típica de DNI.

AÑO METEOROLÓGICO TÍPICO - DNI

Medias mensuales

DNI total anual: 10,286 MJ/m² (2,857 kWh/m²)

Mes	MJ/m²	kWh/m²
Enero	28.4	7.9
Febrero	27.2	7.6
Marzo	31.9	8.9
Abril	36.9	10.3
Mayo	37.1	10.3
Junio	34.1	9.5
Julio	22.5	6.2
Agosto	23.4	6.5
Septiembre	22.4	6.2
Octubre	27.8	7.7
Noviembre	24.1	6.7
Diciembre	22.3	6.2

Tabla 6.- Valores medios mensuales de la serie típica de DNI.

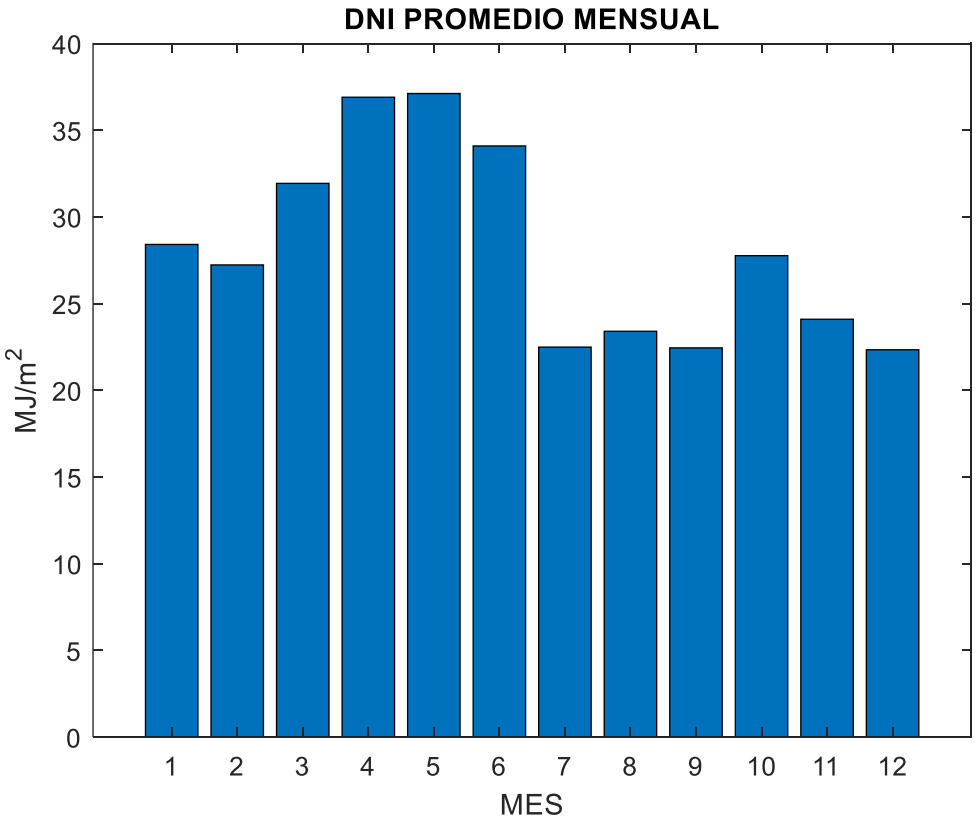
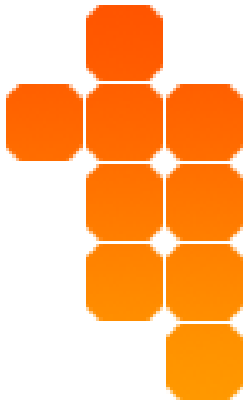


Fig. 39.- DNI promedio mensual en MJ/m².

AÑO METEOROLÓGICO TÍPICO - DNI

Comparaciones medias mensuales TMY PSH vs TMY PVWatts

NREL
NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY



AÑO METEOROLÓGICO TÍPICO - DNI

Comparaciones medias mensuales TMY PSH vs TMY PVWatts

GHI

Mes	GHI (kWh/m²)	
	TMY PSH	TMY PVWatts
Enero	4.3	4.1
Febrero	5.0	5.0
Marzo	6.5	6.3
Abril	7.7	7.6
Mayo	8.2	8.2
Junio	8.2	8.1
Julio	6.8	7.1
Agosto	6.5	6.7
Septiembre	5.8	6.0
Octubre	5.4	5.5
Noviembre	4.2	4.4
Diciembre	3.7	3.8

Tabla 7.- Valores medios mensuales de GHI de los TMY's.

	GHI media diaria (kWh/m²)
TMY PSH	6.03
TMY PVWatts	6.06

AÑO METEOROLÓGICO TÍPICO - DNI

Comparaciones medias mensuales TMY PSH vs TMY PVWatts

GHI

Mes	GHI (kWh/m²) TMY PSH	GHI (kWh/m²) TMY PVWatts
Enero	4.3	4.1
Febrero	5.0	5.0
Marzo	6.5	6.3
Abril	7.7	7.6
Mayo	8.2	8.2
Junio	8.2	8.1
Julio	6.8	7.1
Agosto	6.5	6.7
Septiembre	5.8	6.0
Octubre	5.4	5.5
Noviembre	4.2	4.4
Diciembre	3.7	3.8

Tabla 7.- Valores medios mensuales de GHI de los TMY's.

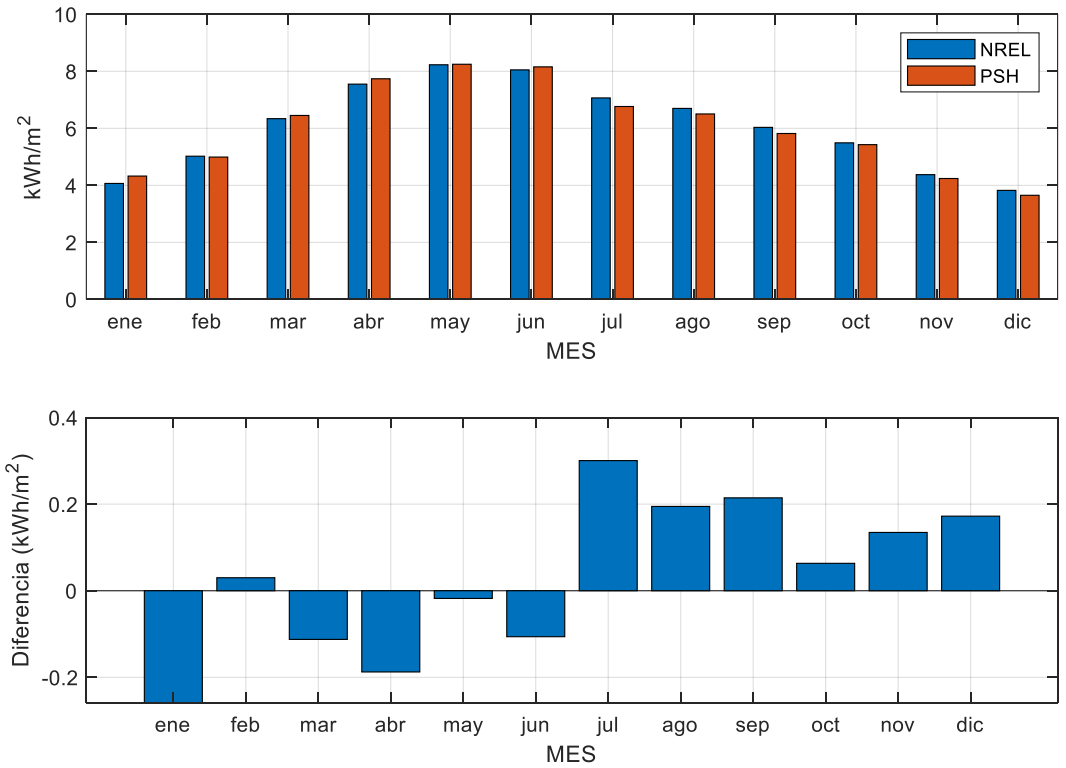


Fig. 40.- Comparaciones de las medias diarias mensuales de GHI por los distintos TMY's.

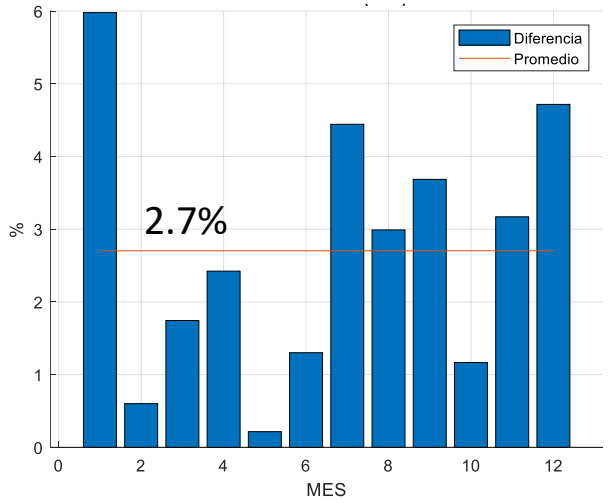


Fig. 41.- Diferencias absolutas porcentuales para GHI.

AÑO METEOROLÓGICO TÍPICO - DNI

Comparaciones medias mensuales TMY PSH vs TMY PVWatts

DNI

Mes	DNI (kWh/m^2)	
	TMY PSH	TMY PVWatts
Enero	7.9	6.7
Febrero	7.6	7.2
Marzo	8.9	8.0
Abril	10.3	8.8
Mayo	10.3	9.4
Junio	9.5	8.7
Julio	6.2	6.6
Agosto	6.5	6.8
Septiembre	6.2	7.1
Octubre	7.7	7.8
Noviembre	6.7	6.7
Diciembre	6.2	6.5

Tabla 8.- Valores medios mensuales de DNI de los TMY's.

	DNI media diaria (kWh/m^2)
TMY PSH	7.83
TMY PVWatts	7.53

AÑO METEOROLÓGICO TÍPICO - DNI

Comparaciones medias mensuales TMY PSH vs TMY PVWatts

DNI

	DNI (kWh/m²)	
Mes	**TMY PSH**	**TMY PVWatts**
Enero	7.9	6.7
Febrero	7.6	7.2
Marzo	8.9	8.0
Abril	10.3	8.8
Mayo	10.3	9.4
Junio	9.5	8.7
Julio	6.2	6.6
Agosto	6.5	6.8
Septiembre	6.2	7.1
Octubre	7.7	7.8
Noviembre	6.7	6.7
Diciembre	6.2	6.5

Tabla 8.- Valores medios mensuales de DNI de los TMY's.

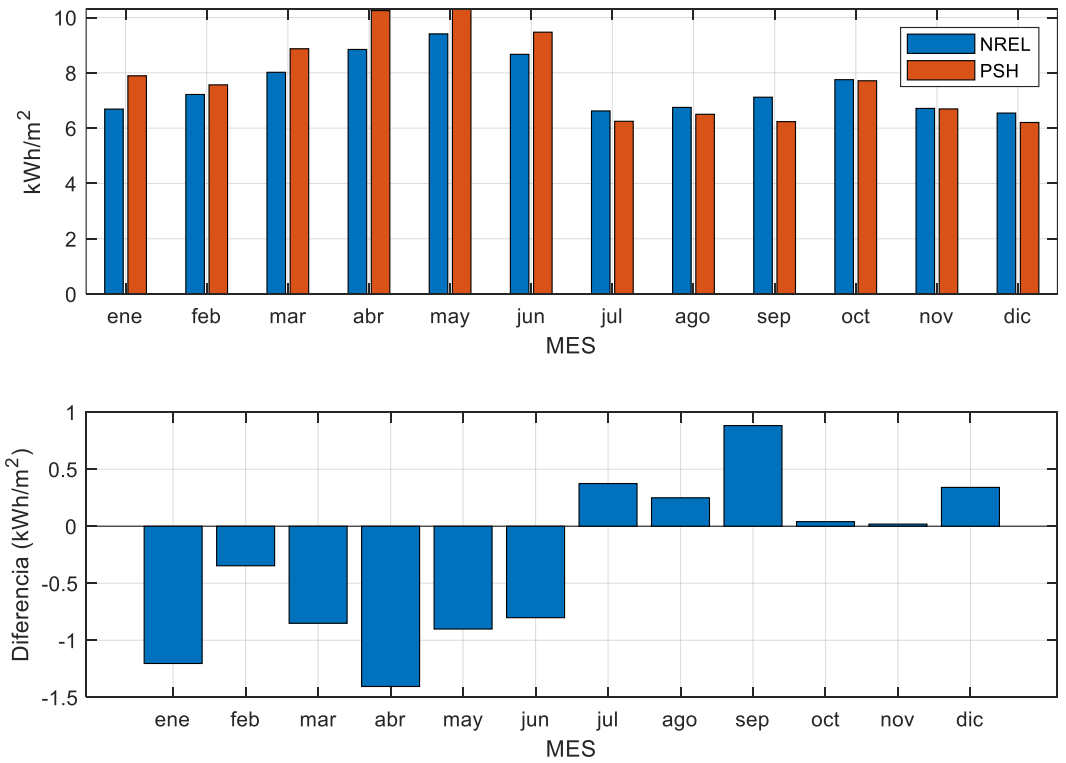


Fig. 42.- Comparaciones de las medias diarias mensuales de DNI por los distintos TMY's.

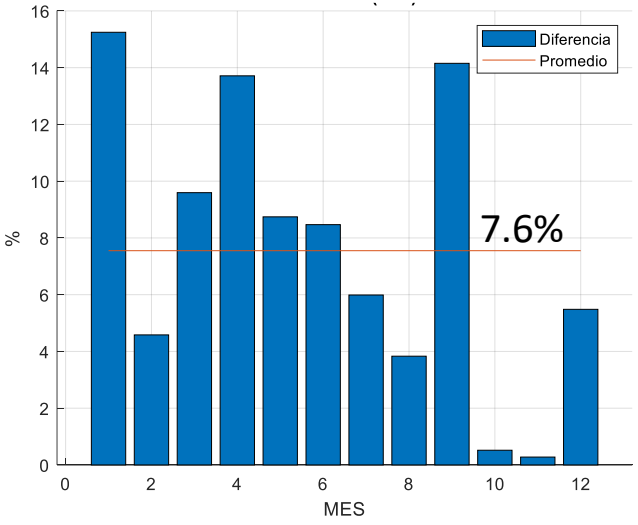


Fig. 43.- Diferencias absolutas porcentuales para DNI.

AÑO METEOROLÓGICO TÍPICO – PSH v2

AÑO METEOROLÓGICO TÍPICO – PSH v2

Disponible en formato electrónico

Conformado con las siguientes variables meteorológicas a **escala 10-minutal**:

Irradiancia Global en Plano Horizontal

Irradiancia Directa en Incidencia Normal

Temperatura del Aire Ambiente

Humedad Relativa

Velocidad y Dirección del Viento

AÑO METEOROLÓGICO TÍPICO
PARA APLICACIONES DE ENERGÍA SOLAR
HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO - PLANTILLA ESCALA TEMPORAL 10-MINUTAL

ESTACIÓN PSH
LAT: 29.0253 (deg).
LON: -111.1434 (deg).
ALT: 154 (m snm).

ZONA HORARIA
UTC-7

VARIABLES METEOROLÓGICAS

GHI	Irradiancia global en plano horizontal (W/m2).
DNI	Irradiancia directa en incidencia normall (W/m2).
TAM	Temperatura de aire ambiente (°C).
HRE	Humedad relativa (%).
VV	Módulo de velocidad de viento (m/s).
DV	Dirección de velocidad de viento (deg).

COLUMNAS DE METADATOS

DOY	Día Juliano (día del año).
MES	Mes del año.
DIA	Día del mes.
HS	Hora del día.
MIN	Minutos de la hora.
IDT	Tiempo desde inicio del año (en días).
CZ	Coseno del ángulo zenital.
GS	Azimut solar (deg).
AS	Altura solar (deg).

DOY	MES	DIA	HS	MIN	IDT	GHI	DNI	TAM	HRE	VV	DV	CZ	AS	GS
1	1	1	0	0	0.000	0.0	0.0	7.5	55.5	3.8	46.5	0.000	0.0	0.0
1	1	1	0	10	0.007	0.0	0.0	7.3	56.5	3.7	43.8	0.000	0.0	0.0
1	1	1	0	20	0.014	0.0	0.0	7.0	58.5	3.4	42.3	0.000	0.0	0.0
1	1	1	0	30	0.021	0.0	0.0	6.7	58.5	3.3	45.0	0.000	0.0	0.0
1	1	1	0	40	0.028	0.0	0.0	6.4	59.7	3.3	44.2	0.000	0.0	0.0
1	1	1	0	50	0.035	0.0	0.0	6.1	59.8	3.2	49.1	0.000	0.0	0.0
1	1	1	1	0	0.042	0.0	0.0	6.0	60.9	3.1	58.0	0.000	0.0	0.0
1	1	1	1	10	0.049	0.0	0.0	6.4	56.8	2.8	58.7	0.000	0.0	0.0
1	1	1	1	20	0.056	0.0	0.0	7.1	56.7	2.4	57.2	0.000	0.0	0.0
1	1	1	1	30	0.063	0.0	0.0	6.8	58.0	2.3	55.2	0.000	0.0	0.0
1	1	1	1	40	0.069	0.0	0.0	6.2	60.4	2.4	57.4	0.000	0.0	0.0
1	1	1	1	50	0.076	0.0	0.0	5.7	63.3	1.4	57.5	0.000	0.0	0.0
1	1	1	2	0	0.083	0.0	0.0	5.3	64.1	0.5	52.2	0.000	0.0	0.0

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES – MODELADO DE LA IRRADIANCIA

- Se recopilaron de la Plataforma Solar de Hermosillo dos años de datos de irradiancia solar y fueron procesados por un control de calidad, garantizando una base de datos confiable y de buena calidad.
- Se obtuvo el desempeño de los modelos originales para estimar la fracción difusa y la DNI en tres escalas temporales. El modelo RBL demostró ser el mejor modelo original en las tres escalas temporales, aunque todos los modelos pueden mejorarse mediante el ajuste local.
- Se realizó el ajuste local de los modelos a través de un procedimiento de validación cruzada aleatoria, ayudando a reducir el sesgo y la incertidumbre en las estimaciones de la fracción difusa y la DNI. Los modelos multivariados mostraron mejores métricas de desempeño que los univariados. Donde el modelo RBL presentó la menor incertidumbre para estimar la DNI con un 12% y 10% para la escala 10-minutal y horaria, respectivamente.
- En general, se encontró un mejor desempeño de los modelos en la escala temporal horaria en comparación con las escalas intra-horarias. Esto se debe a que los modelos se basaron en datos a escala temporal horaria y no consideraron la sobre-irradiancia en su formulación.
- El modelo SO2, que incorpora la capacidad de modelar la sobre-irradiancia, resultó ser el mejor modelo para la escala 1-minutal, pero su implementación es más compleja. Los modelos RA2s y RA2 también mostraron desempeños competitivos y son alternativas más simples de implementar.
- Los coeficientes localmente ajustados para cada modelo en las tres escalas temporales se proporcionan en el Anexo A del escrito, para su uso en futuros proyectos e investigaciones en la zona de Hermosillo, Sonora, México.

CONCLUSIONES – AÑO METEOROLOGICO TIPICO DNI

- Se estimó la serie anual típica de la DNI a escala temporal 10 minutal utilizando el modelo RBL ajustado localmente y la ecuación de clausura para la Plataforma Solar de Hermosillo. Esta variable se incorporó al TMY Solar de la estación, con una incertidumbre del 12% asociada al modelo de fracción difusa seleccionado. Se encontró una media diaria de DNI de 7.83 kWh/m2/día y un total anual de 2,857 kWh/m2.
- Las medias mensuales de la serie anual típica de DNI se compararon con datos medidos en el lugar reportados por otros autores. Se determinó que el TMY de DNI es representativo del lugar, tanto en su valor medio como en su estacionalidad mensual. Es capaz de reflejar el periodo de mayor nubosidad y lluvia típico de la región.
- Se realizó una comparación de las medias mensuales de GHI y DNI entre el TMY de la Plataforma Solar de Hermosillo y el TMY elaborado por el NREL para la región (TMY3). Las diferencias porcentuales absolutas para GHI variaron entre 0.2% y 6%, con una media de 2.7%. En cuanto a DNI, las diferencias porcentuales absolutas fueron más pronunciadas, con un rango entre 0.3% y 15.2%, y una media de 7.6%. Ante estas diferencias, se sugiere utilizar la nueva variable DNI del TMY Solar de la Plataforma Solar de Hermosillo, que se obtuvo a partir de medidas locales disponibles y fue validada con estudios previos de otros autores. La mayor diferencia encontrada para DNI en comparación con GHI indica la mayor complejidad en la estimación de la componente directa.

REFERENCIAS

REFERENCIAS

1. Abal, G., Aicardi, D., Alonso-Suárez, R., & Laguarda, A. (2017). Performance of empirical models for diffuse fraction in Uruguay. Solar Energy, 141, 166-181.
2. Alonso-Suárez, R., Bidegain, M., Abal, G., & Modernell, P. (2019). Año meteorológico típico para aplicaciones de energía solar.
3. Altamirano-Carranza, A. S. (2020). Generación del año meteorológico típico (TMY) para la plataforma Solar de Hermosillo (PSH). Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería: Ingeniería Química, Universidad de Sonora, México.
4. Altamirano-Carranza, A. S., & Cabanillas, R. E. (2019). Generation of the Typical Meteorological Year (TMY) for the Solar Platform of Hermosillo, Sonora, Arizona Student Conference on Renewable Energy Science, Arizona, United States.
5. Arancibia-Bulnes, C. A., Peón-Anaya, R., Riveros-Rosas, D., Quiñones, J. J., Cabanillas, R. E., & Estrada, C. A. (2014). Beam solar irradiation assessment for Sonora, Mexico. Energy Procedia, 49, 2290-2296.
6. Boland, J., Ridley, B., & Brown, B. (2008). Models of diffuse solar radiation. Renewable Energy, 33(4), 575-584.
7. Boland, J., Scott, L., & Luther, M. (2001). Modelling the diffuse fraction of global solar radiation on a horizontal surface. Environmetrics: The official journal of the International Environmetrics Society, 12(2), 103-116.
8. Erbs, D. G., Klein, S. A., & Duffie, J. A. (1982). Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. Solar energy, 28(4), 293-302.
9. GSA. (2018). Global Solar Atlas. World Bank Group. Retrieved 20/November/2022 from https://globalsolaratlas.info/detail?r=MEX:MEX.26_1&c=29.443038,-111.68335,6
10. Gueymard, C. A. (2014). A review of validation methodologies and statistical performance indicators for modeled solar radiation data: Towards a better bankability of solar projects. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 39, 1024-1034.
11. Gueymard, C. A., & Ruiz-Arias, J. A. (2016). Extensive worldwide validation and climate sensitivity analysis of direct irradiance predictions from 1-min global irradiance. Solar Energy, 128, 1-30.
12. Hall, I., Prairie, R., Anderson, H., & Boes, E. (1978). Technical Report SAND78-1601: Generation of typical meteorological years for 26 SOLMET stations. Technical report, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, United States.

REFERENCIAS

13. IEA. (2020). Key energy statistics 2020. IEA, Mexico. https://www.iea.org/countries/mexico
14. ISO-9060. (2018). Solar energy - specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiacion. International Organization for Standardization.
15. Journée, M., & Bertrand, C. (2011). Quality control of solar radiation data within the RMIB solar measurements network. Solar Energy, 85(1), 72-86.
16. Liu, B. Y. H., & Jordan, R. C. (1960). The interrelationship and of direct, diffuse and characteristic distribution total solar radiation. Solar Energy, 4(3), 1-19.
17. Long, C. N., & Dutton, E. G. (2002). BSRN Global Network recommended QC tests, V2.0. Technical Report.
18. Marion, W., & Urban, K. (1995). User's manual for TMY2 data sets. Technical report, National Renewable Energy Laboratory (NREL).
19. Massey Jr, F. J. (1951). The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit. Journal of the American statistical Association, 46(253), 68-78.
20. NREL. (2014). PVWatts Calculator. http://pvwatts.nrel.gov
21. Orgill, J. F., & Hollands, K. G. T. (1977). Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface. Solar energy, 19(4), 357-359.
22. Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. Hydrology and earth system sciences, 11(5), 1633-1644.
23. Pusat, S., Ekmekçi, İ., & Akkoyunlu, M. T. (2015). Generation of typical meteorological year for different climates of Turkey. Renewable Energy, 75, 144-151.
24. Reindl, D. T., Beckman, W. A., & Duffie, J. A. (1990). Diffuse fraction correlations. Solar energy, 45(1), 1-7.
25. Ridley, B., Boland, J., & Lauret, P. (2010). Modelling of diffuse solar fraction with multiple predictors. Renewable Energy, 35(2), 478-483.
26. Ruiz-Arias, J. A., Alsamamra, H., Tovar-Pescador, J., & Pozo-Vázquez, D. (2010). Proposal of a regressive model for the hourly diffuse solar radiation under all sky conditions. Energy Conversion and Management, 51(5), 881-893.
27. Skartveit, A., & Olseth, J. A. (1987). A model for the diffuse fraction of hourly global radiation. Solar energy, 38(4), 271-274.
28. Wilcox, S., & Marion, W. (2008). Users manual for TMY3 data sets. Technical Report TP-581-43156. National Renewable Energy Laboratory (NREL) Golden, CO.
29. Younes, S., Claywell, R., & Muneer, T. (2005). Quality control of solar radiation data: Present status and proposed new approaches. Energy, 30(9), 1533-1549.