

# Radiación Solar

## Energía Solar Fotovoltaica

Oscar Perpiñán Lamigueiro

<http://oscarperpinan.github.io>

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos

## Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Solar en Generadores FV

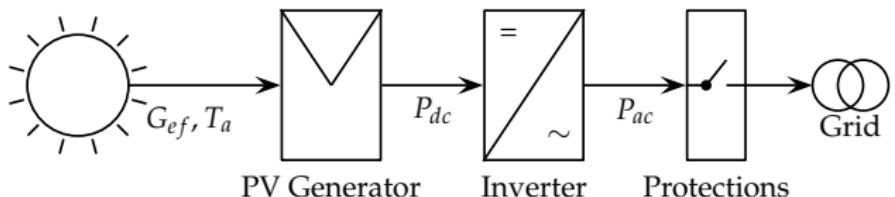
Bases de Datos

# Radiación Solar y Sistemas Fotovoltaicos

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

- ▶ La **energía producida** por un sistema fotovoltaico depende principalmente de la **radiación incidente** en el generador.
- ▶ Consecuentemente, la **estimación del comportamiento** de un sistema FV en un determinado lugar durante un período temporal exige **conocer la radiación solar disponible en el plano del generador**.



Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

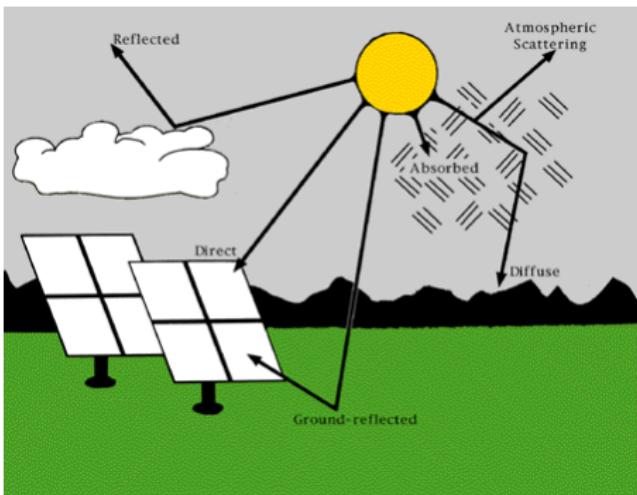
Radiación Solar en Generadores FV

Bases de Datos

[Introducción](#)[Geometría Sol y Tierra](#)[Geometría de los sistemas fotovoltaicos](#)[Radiación Solar en la Superficie Terrestre](#)[Radiación Solar en Generadores FV](#)[Bases de Datos](#)

# La radiación solar no se puede calcular analíticamente

- ▶ La radiación solar que alcanza la superficie terrestre es el resultado de complejas interacciones en la atmósfera.
- ▶ Para estimar la radiación se requiere medidas terrestres o imágenes de satélite.



# Ángulo de Inclinación

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

- ▶ Los generadores FV tienen un **ángulo de inclinación positivo** para maximizar el rendimiento.
- ▶ Este ángulo depende de la **latitud** del lugar y de la **aplicación del sistema**.



Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos

# Bases de Datos de Radiación Solar

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos

- ▶ Por tanto, es inviable mantener una base de datos de radiación solar **incidente**.
- ▶ Las **bases de datos** registran radiación en el **plano horizontal**.
- ▶ La estimación de la radiación incidente en el plano inclinado requiere un **procedimiento de transposición**.

# Del plano horizontal al plano inclinado

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

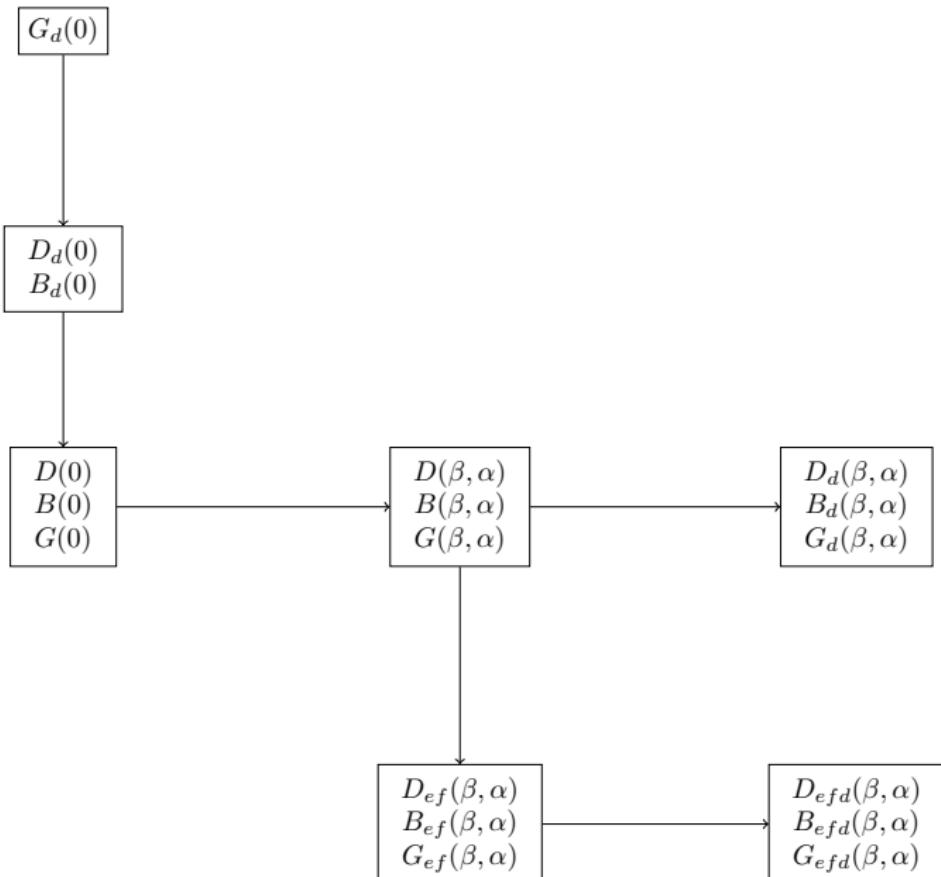
Geometría Sol y  
Tierra

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos



Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Solar en Generadores FV

Bases de Datos

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Movimiento Sol-Tierra

Ángulos Solares

Hora solar y oficial

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Solar en Generadores FV

Bases de Datos

# Movimiento terrestre

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Movimiento Sol-Tierra

Ángulos Solares

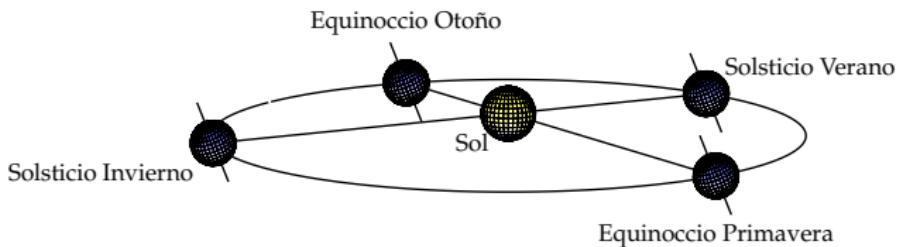
Hora solar y oficial

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos

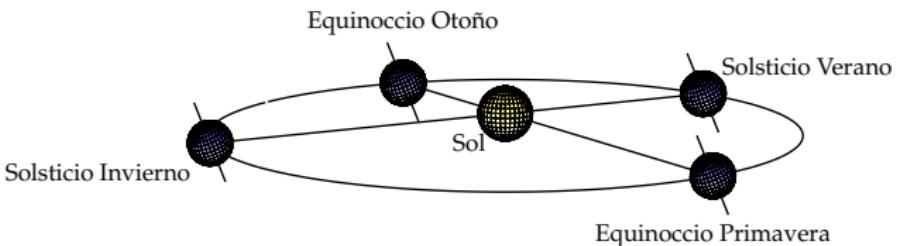


- ▶ La Tierra **gira sobre si misma** alrededor de su eje polar.
  - ▶ Periodo aproximado: 24 horas.

# Movimiento terrestre

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro



- ▶ La Tierra **gira sobre si misma** alrededor de su eje polar.
  - ▶ Periodo aproximado: 24 horas.
- ▶ La Tierra se mueve **alrededor del Sol** siguiendo una elipse de baja excentricidad.
  - ▶ Periodo aproximado: 1 año.
  - ▶ Este movimiento está contenido en el llamado *plano de la eclíptica*

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Movimiento Sol-Tierra

Ángulos Solares

Hora solar y oficial

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Solar en Generadores FV

Bases de Datos

# Movimiento terrestre

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

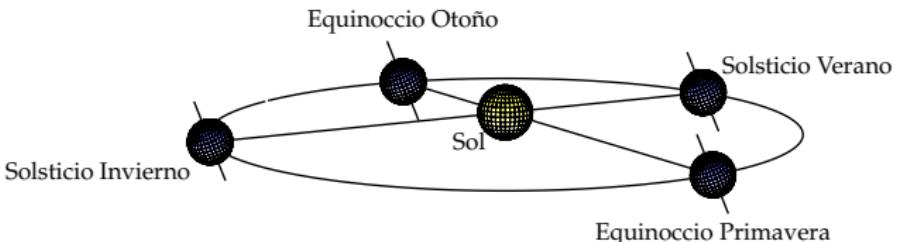
Movimiento Sol-Tierra  
Ángulos Solares  
Hora solar y oficial

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos



- ▶ Entre el eje polar y el plano de la eclíptica hay un ángulo constante de  $23,45^\circ$ .
- ▶ Entre el plano ecuatorial y la linea que une la Tierra y el Sol hay un ángulo variable: *declinación*.

## Introducción

### Geometría Sol y Tierra

Movimiento Sol-Tierra

Ángulos Solares

Hora solar y oficial

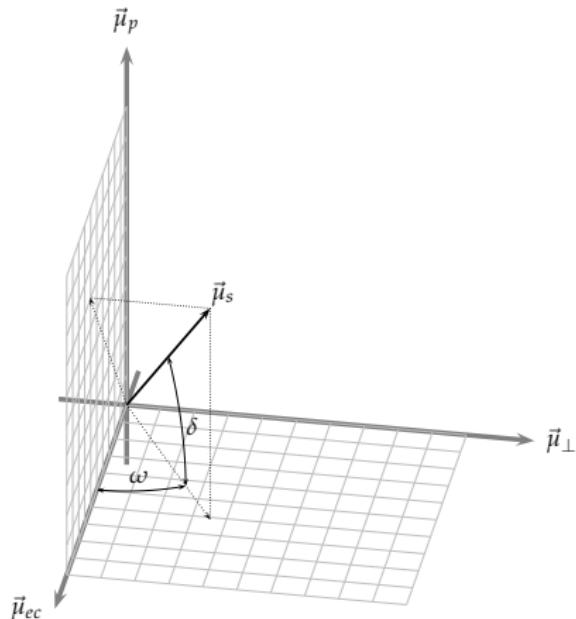
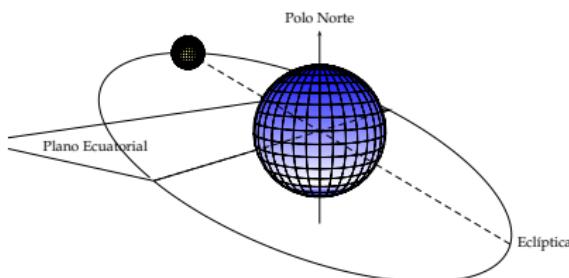
### Geometría de los sistemas fotovoltaicos

### Radiación Solar en la Superficie Terrestre

### Radiación Solar en Generadores FV

### Bases de Datos

# Ejes terrestres



- ▶ **Declinación,  $\delta$ :** ángulo entre el plano ecuatorial y la linea que une la Tierra y el Sol.
- ▶ **Hora Solar,  $w$ :** diferencia entre instante en curso y el mediodía solar ( $w = 0$ ).

# Declinación

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Movimiento Sol-Tierra

Ángulos Solares

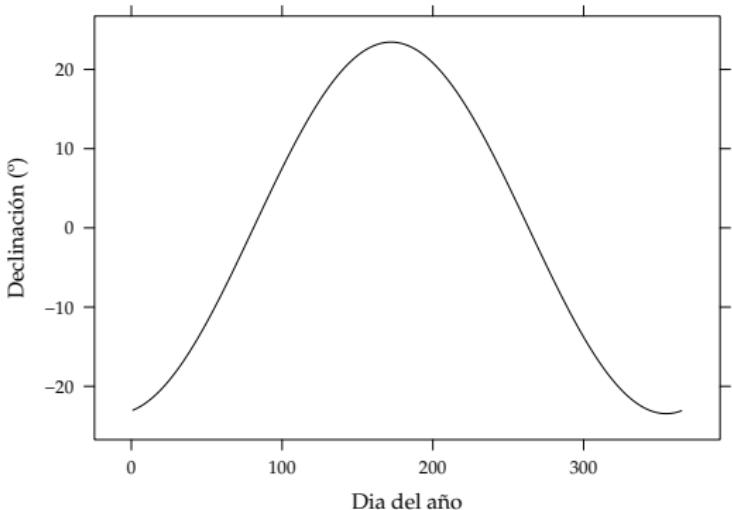
Hora solar y oficial

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos



## Ecuación de Cooper

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot (d_n + 284)}{365}\right)$$

# Estaciones

## ► Solsticio de junio

- ▶ 21-22 Junio,  $d_n = 172 - 173$
- ▶ Declinación máxima.
- ▶ Días más largos en hemisferio Norte (verano)
- ▶ El Sol amanece por el Noreste y anocchece por el Noroeste en el hemisferio Norte.

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Movimiento Sol-Tierra  
Ángulos Solares  
Hora solar y oficial

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos

# Estaciones

## ► Solsticio de junio

- ▶ 21-22 Junio,  $d_n = 172 - 173$
- ▶ Declinación máxima.
- ▶ Días más largos en hemisferio Norte (verano)
- ▶ El Sol amanece por el Noreste y anocchece por el Noroeste en el hemisferio Norte.

## ► Solsticio de diciembre

- ▶ 21-22 Diciembre,  $d_n = 355 - 356$
- ▶ Declinación mínima.
- ▶ Días más cortos en hemisferio Norte (invierno)
- ▶ El Sol amanece por el Sureste y anocchece por el Suroeste en el hemisferio Norte.

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Movimiento Sol-Tierra  
Ángulos Solares  
Hora solar y oficial

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos

# Estaciones

## ► Solsticio de junio

- ▶ 21-22 Junio,  $d_n = 172 - 173$
- ▶ Declinación máxima.
- ▶ Días más largos en hemisferio Norte (verano)
- ▶ El Sol amanece por el Noreste y anocchece por el Noroeste en el hemisferio Norte.

## ► Solsticio de diciembre

- ▶ 21-22 Diciembre,  $d_n = 355 - 356$
- ▶ Declinación mínima.
- ▶ Días más cortos en hemisferio Norte (invierno)
- ▶ El Sol amanece por el Sureste y anocchece por el Suroeste en el hemisferio Norte.

## ► Equinoccios

- ▶ 21-22 Marzo ( $d_n = 80 - 81$ )
- ▶ 22-23 Septiembre ( $d_n = 265 - 266$ )
- ▶ Declinación nula
- ▶ La duración de noche y día coinciden.
- ▶ El Sol amanece por el Este y anocchece por el Oeste.

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Movimiento Sol-Tierra  
Ángulos Solares  
Hora solar y oficial

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos

# Hora Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Movimiento Sol-Tierra

Ángulos Solares

Hora solar y oficial

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos

- ▶  $w$ , diferencia entre instante en curso y el mediodía solar ( $w = 0, \psi_s = 0$ ).
- ▶ Criterio de signos:  $w < 0$  antes del mediodía.
- ▶  $1\text{h} = 15^\circ$  ( $24\text{h} = 2\pi$  radians = 360)
- ▶ (Horas)  $-12, -11, -10, \dots, -1, \mathbf{0}, 1, \dots, 10, 11, 12$

## Amanecer ( $\gamma_s = 0$ )

$$\cos(\omega_s) = -\tan(\delta) \tan(\phi)$$

La longitud del día,  $|2 \cdot \omega_s|$ , depende de  $\phi$  y  $d_n$ .

# Duración del día

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

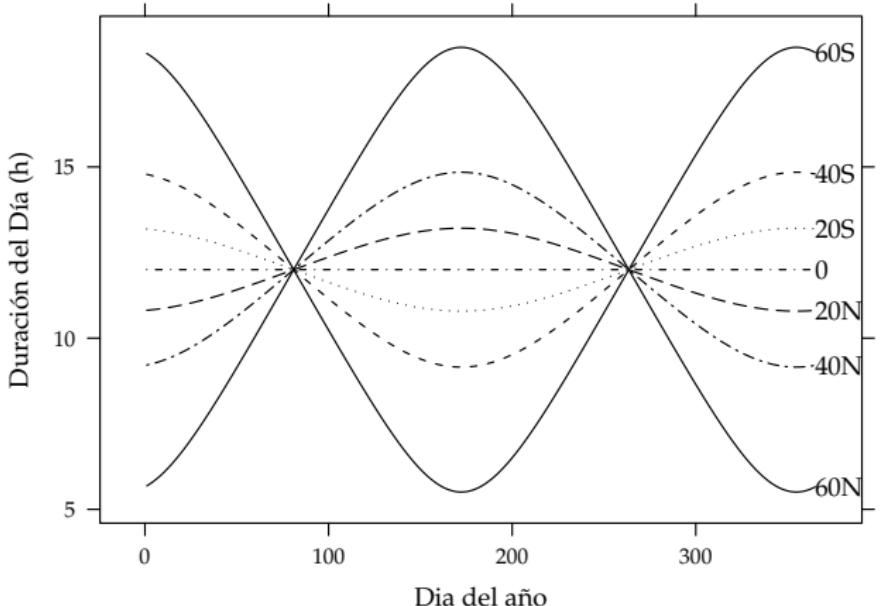
Movimiento Sol-Tierra  
Ángulos Solares  
Hora solar y oficial

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

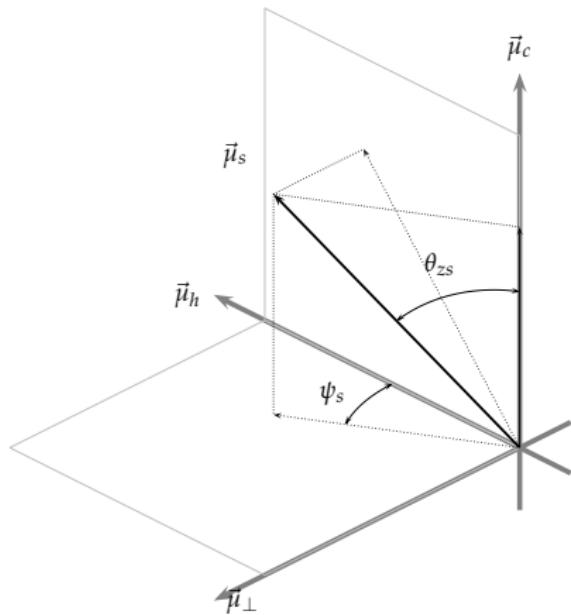
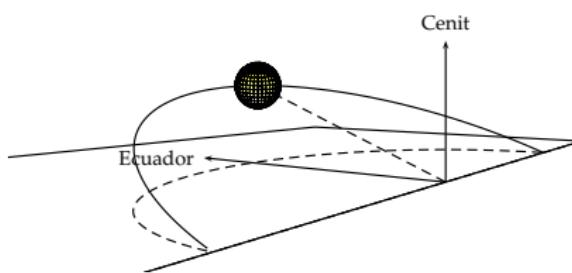
Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos



# Ejes locales



- ▶ **Cenit Solar**,  $\theta_{zs}$ : ángulo entre el Sol y el cenit (vertical en un lugar determinado).
- ▶ **Azimut Solar**,  $\psi_s$ : ángulo entre el mediodía solar y la proyección del sol en el plano horizontal.
- ▶ Dependen de  $d_n$ ,  $\omega$ , y  $\phi$ .

# Relación entre sistemas de coordenadas

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

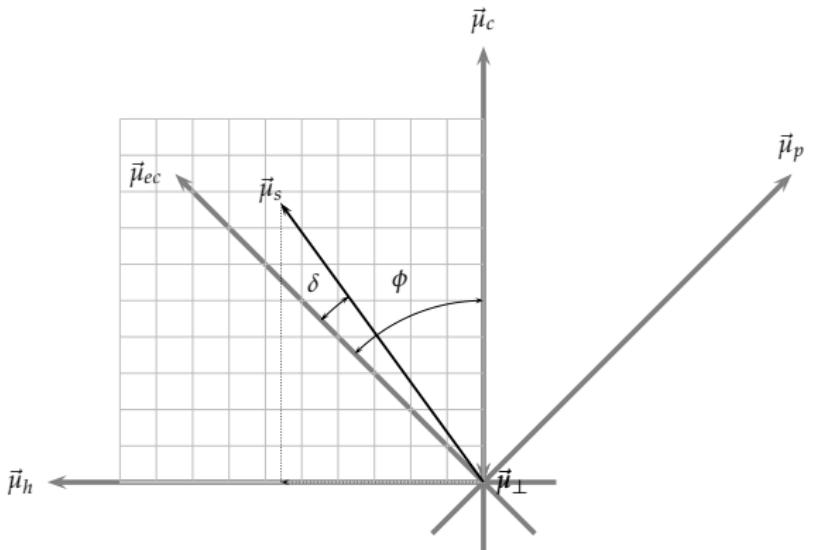
Movimiento Sol-Tierra  
Ángulos Solares  
Hora solar y oficial

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos

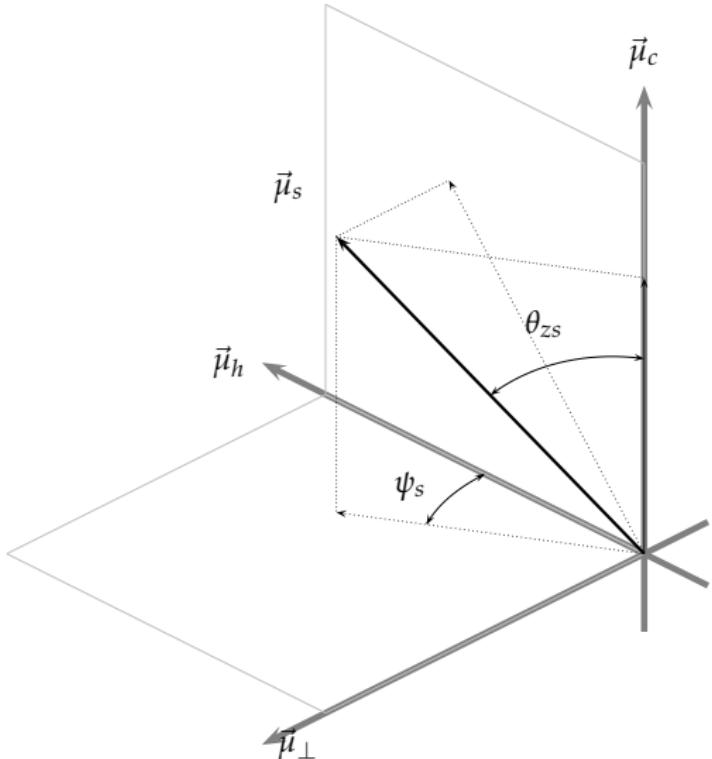


- **Latitud ( $\phi$ ) con signo:** Positivo para Hemisferio Norte, Negativo para Hemisferio Sur.

# Cenit Solar

$$\cos(\theta_{zs}) = \cos(\delta) \cos(\omega) \cos(\phi) + \sin(\delta) \sin(\phi)$$

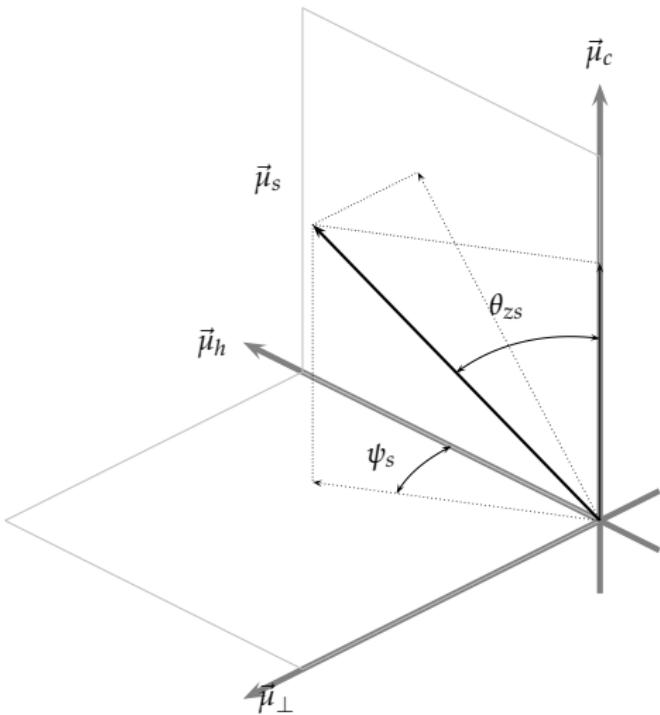
- ▶  $\theta_{zs}$ , ángulo entre el Sol y el cenit (vertical en un lugar determinado).
- ▶  $\gamma_s$ , altura solar, ángulo complementario de  $\theta_{zs}$ .
- ▶ Depende de  $d_n$ ,  $\omega$ , y  $\phi$ .



## Azimut solar

$$\cos(\psi_s) = \text{sign}(\phi) \cdot \frac{\cos(\delta) \cos(\omega) \sin(\phi) - \cos(\phi) \sin(\delta)}{\sin(\theta_z)}$$

- ▶  $\psi_s$ , ángulo entre el mediodía solar y la proyección del sol en el plano horizontal.
- ▶ Depende de  $d_n$ ,  $\omega$ , y  $\phi$ .
- ▶ Criterio de Signos: negativo antes del mediodía.



# Trayectoria Solar ( $60^{\circ}N$ )

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

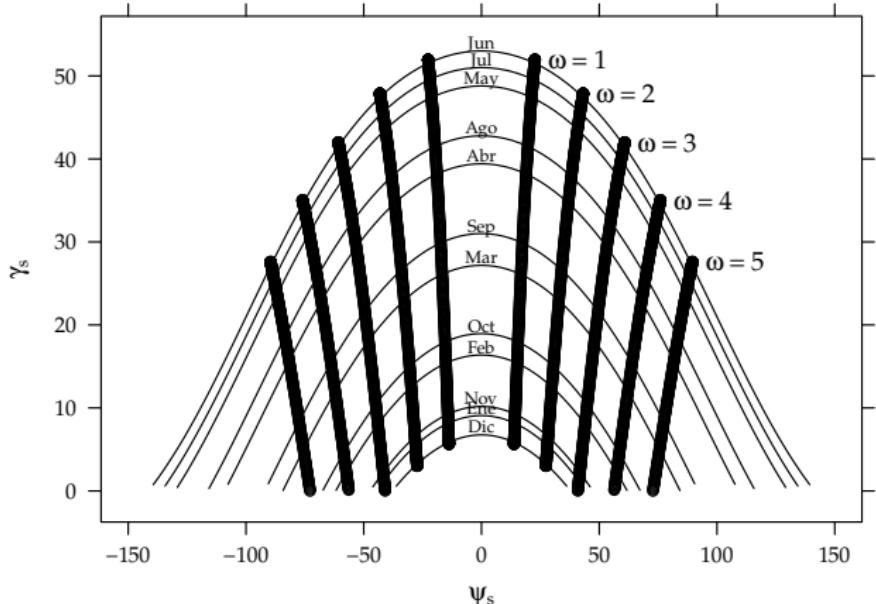
Movimiento Sol-Tierra  
Ángulos Solares  
Hora solar y oficial

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos



# Trayectoria Solar ( $40^{\circ}\text{S}$ )

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

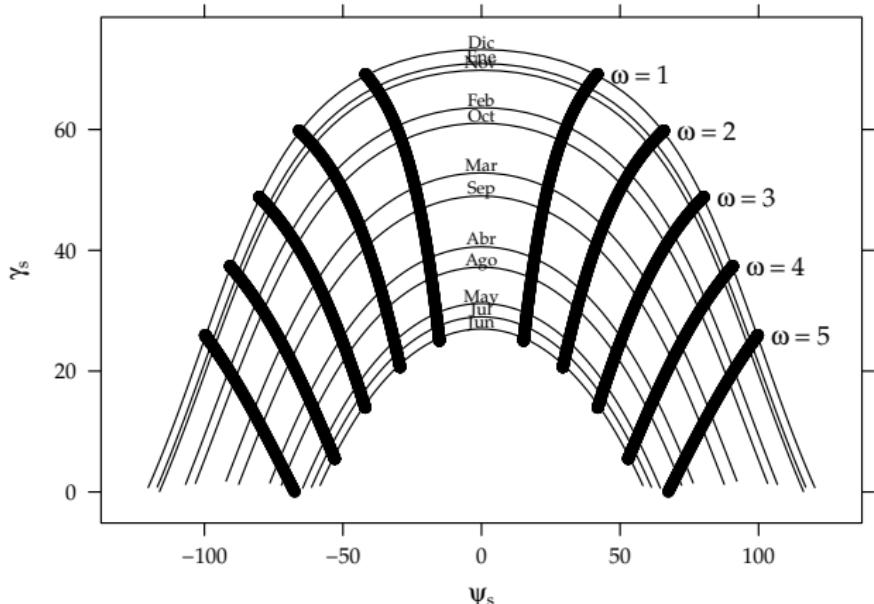
Movimiento Sol-Tierra  
Ángulos Solares  
Hora solar y oficial

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos



# Cálculo Ángulos Solares

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Movimiento Sol-Tierra  
Ángulos Solares  
Hora solar y oficial

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos

- ▶ Azimut, Ángulo Cenital y Altura Solar, Duración del Dia para el:
  - ▶ Día del Año: 120, 2 horas después del mediodía,  
Latitud: 37.2N
  - ▶ Día del Año: 340, 2 horas después del amanecer,  
Latitud: 15S
- ▶ Duración del día 261 del año en las latitudes 10N, 40N, 70N, 10S, 40S, 70S.
- ▶ Altura solar en el mediodía del día 25 del año en las latitudes 10N, 40N, 10S, 40S.

## Introducción

### Geometría Sol y Tierra

Movimiento Sol-Tierra

Ángulos Solares

Hora solar y oficial

### Geometría de los sistemas fotovoltaicos

### Radiación Solar en la Superficie Terrestre

### Radiación Solar en Generadores FV

### Bases de Datos

# Hora solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Movimiento Sol-Tierra  
Ángulos Solares  
Hora solar y oficial

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos

$$\omega = 15 \cdot (TO - AO - 12) + \Delta\lambda + \frac{EoT}{4}$$

- ▶  $\omega$ : hora solar real o aparente [°]
- ▶  $TO$ : hora oficial [h]
- ▶  $AO$ : adelanto oficial por horario de verano [h]
- ▶  $\Delta\lambda$  corrección por huso horario [°]
- ▶  $EoT$ : Ecuación del tiempo (dia solar real y dia solar medio) [min]

# Hora oficial

- ▶ **La hora oficial** es una medida del tiempo **ligada a un meridiano** que sirve de referencia para una zona determinada.
- ▶ La hora oficial de la España peninsular se rige por el huso horario de Centroeuropa. Este huso horario está situado en 15°E.
- ▶ **Corrección:**  $\Delta\lambda = \lambda_L - \lambda_H$ , con  $\lambda_L$  la longitud local y  $\lambda_H$  la longitud del huso horario.
- ▶ Longitudes *positivas* al *este* del meridiano de Greenwich.  $\Delta\lambda$  es positiva cuando la localidad está situada al este de su huso horario.

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Movimiento Sol-Tierra  
Ángulos Solares  
Hora solar y oficial

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Solar en Generadores FV

Bases de Datos

# Tiempo solar medio

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Movimiento Sol-Tierra  
Ángulos Solares  
Hora solar y oficial

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

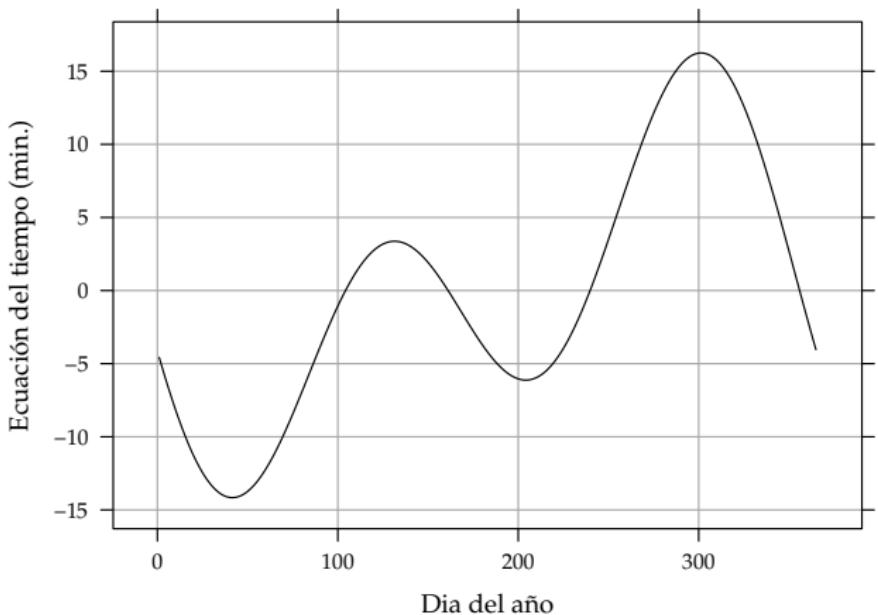
Bases de Datos

- ▶ **La duración del día solar real**, definido como el tiempo que transcurre entre dos pasos consecutivos del Sol por el meridiano local, **varía a lo largo del año**.
- ▶ El promedio anual de esta variación es nulo: *día solar medio*, cuya duración es constante a lo largo del año e igual al valor medio de la duración del día solar real.

# Ecuación del Tiempo

$$\text{EoT} = 229.18 \cdot (-0.0334 \cdot \sin(M) + 0.04184 \cdot \sin(2 \cdot M + 3.5884))$$

$$M = \frac{2\pi}{365.24} \cdot d_n$$



Introducción

Geometría Sol y  
TierraMovimiento Sol-Tierra  
Ángulos Solares  
Hora solar y oficialGeometría de los  
sistemas  
fotovoltaicosRadiación Solar en  
la Superficie  
TerrestreRadiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos

[Introducción](#)[Geometría Sol y Tierra](#)[Movimiento Sol-Tierra](#)  
[Ángulos Solares](#)  
[Hora solar y oficial](#)[Geometría de los sistemas fotovoltaicos](#)[Radiación Solar en la Superficie Terrestre](#)[Radiación Solar en Generadores FV](#)[Bases de Datos](#)

# Ejemplo de cálculo

$$\omega = 15 \cdot (\text{TO} - \text{AO} - 12) + \Delta\lambda + \frac{\text{EoT}}{4}$$

Calcule la hora solar real correspondiente al día 23 de Abril de 2010 ( $\text{EoT} = 1,78 \text{ min}$ ) a las 12 de la mañana, hora oficial de la ciudad de A Coruña, Galicia. Esta localidad está contenida en el meridiano de longitud  $8.38^\circ\text{W}$  y su hora oficial está regida por el huso horario GMT+1.

# Solución

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

$$\omega = 15 \cdot (\text{TO} - \text{AO} - 12) + \Delta\lambda + \frac{\text{EoT}}{4}$$

- ▶  $\lambda_L = -8.38^\circ$ ,  $\lambda_H = 15^\circ$  y  $\Delta\lambda = -23.38^\circ$ .

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Movimiento Sol-Tierra  
Ángulos Solares  
Hora solar y oficial

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos

# Solución

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Movimiento Sol-Tierra  
Ángulos Solares  
Hora solar y oficial

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos

$$\omega = 15 \cdot (\text{TO} - \text{AO} - 12) + \Delta\lambda + \frac{\text{EoT}}{4}$$

- ▶  $\lambda_L = -8.38^\circ$ ,  $\lambda_H = 15^\circ$  y  $\Delta\lambda = -23.38^\circ$ .
- ▶ En España se aplica el horario de verano y este día está incluido en el período afectado,  $\text{AO} = 1$ .

# Solución

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Movimiento Sol-Tierra  
Ángulos Solares  
Hora solar y oficial

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos

$$\omega = 15 \cdot (\text{TO} - \text{AO} - 12) + \Delta\lambda + \frac{\text{EoT}}{4}$$

- ▶  $\lambda_L = -8.38^\circ$ ,  $\lambda_H = 15^\circ$  y  $\Delta\lambda = -23.38^\circ$ .
- ▶ En España se aplica el horario de verano y este día está incluido en el período afectado,  $\text{AO} = 1$ .
- ▶ Por último, para este día  $\text{EoT} = 1,78 \text{ min}$ .

# Solución

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Movimiento Sol-Tierra  
Ángulos Solares  
Hora solar y oficial

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos

$$\omega = 15 \cdot (\text{TO} - \text{AO} - 12) + \Delta\lambda + \frac{\text{EoT}}{4}$$

- ▶  $\lambda_L = -8.38^\circ$ ,  $\lambda_H = 15^\circ$  y  $\Delta\lambda = -23.38^\circ$ .
- ▶ En España se aplica el horario de verano y este día está incluido en el período afectado,  $\text{AO} = 1$ .
- ▶ Por último, para este día  $\text{EoT} = 1,78 \text{ min}$ .
- ▶ Así  $\omega = -37.94^\circ$  (aproximadamente las 9 y media de la mañana). El Sol culminará ( $\omega = 0$ ) cuando sean las 14:31, hora oficial.

Introducción

Geometría Sol y Tierra

**Geometría de los sistemas fotovoltaicos**

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Solar en Generadores FV

Bases de Datos

# Definiciones

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Sistema Estático

Sistemas con seguimiento

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos

- ▶  $\theta_s$ , ángulo de incidencia (AOI), ángulo entre los rayos solares y la perpendicular al plano del generador.
- ▶  $\alpha$ : orientación del generador ( $0^\circ$  cuando está orientado al mediodía solar)
- ▶  $\beta$ : inclinación del generador (respecto de la superficie horizontal)

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Sistema Estático

Sistemas con seguimiento

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Solar en Generadores FV

Bases de Datos

# Sistema Estático

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro



Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Sistema Estático

Sistemas con seguimiento

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

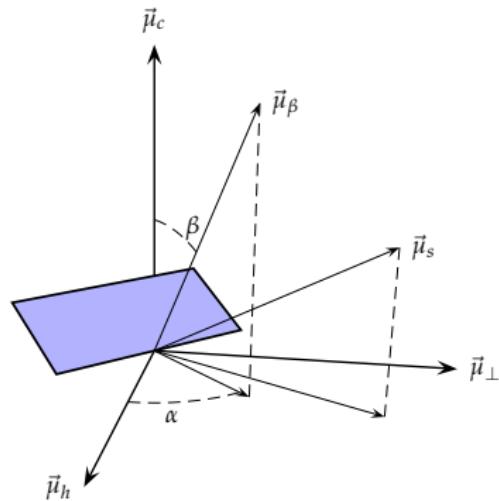
Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos

# Ángulo de Incidencia

- ▶ Si  $\alpha = 0$

$$\cos(\theta_s) = \cos(\delta) \cos(\omega) \cos(\beta - |\phi|) - \text{sign}(\phi) \cdot \sin(\delta) \sin(\beta - |\phi|)$$



- ▶ Inclinación Óptima  $\beta_{opt} \simeq |\phi| - 10.$

# Ángulo de Incidencia

►  $40^{\circ}N$

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

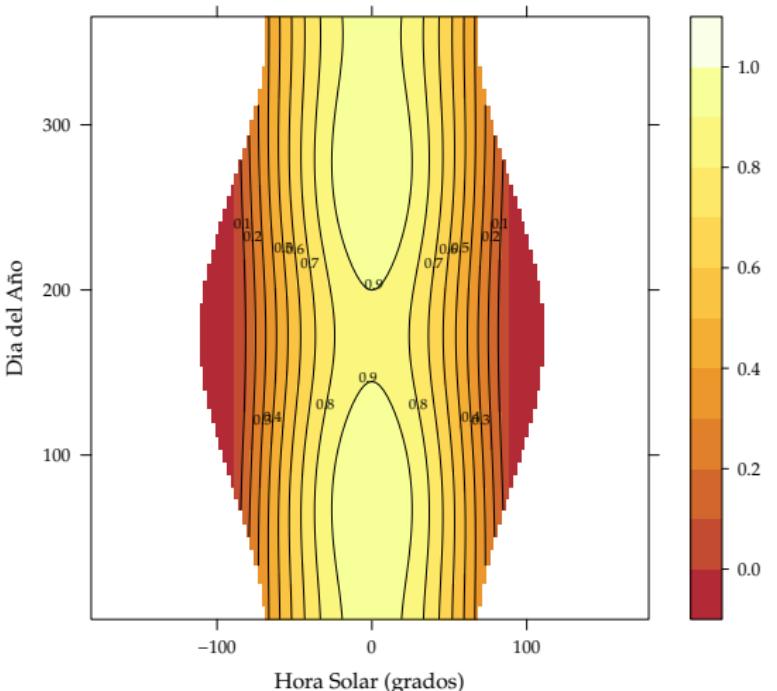
Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Sistema Estático  
Sistemas con seguimiento

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos



Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Sistema Estático

Sistemas con seguimiento

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Solar en Generadores FV

Bases de Datos

## ► Fundamento:

- ▶ Radiación incidente aumenta al seguir al sol
- ▶ Pérdidas por reflexión disminuyen si el apuntamiento al sol mejora

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Sistema Estático

Sistemas con seguimiento

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Solar en Generadores FV

Bases de Datos

# Introducción

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Sistema Estático

Sistemas con seguimiento

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos

## ► Fundamento:

- ▶ Radiación incidente aumenta al seguir al sol
- ▶ Pérdidas por reflexión disminuyen si el apuntamiento al sol mejora
- ▶ Las diferentes técnicas de seguimiento son un **compromiso** entre
  - ▶ un **apuntamiento perfecto**
  - ▶ **sistemas estructurales más económicos**
  - ▶ mejores **aprovechamientos del terreno.**

# Algunos tipos de seguimiento solar

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Sistema Estático

Sistemas con seguimiento

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos

## ► Doble eje

- ▶ Apuntamiento «perfecto»
- ▶ Mejor productividad, peor ocupación de terreno.

# Algunos tipos de seguimiento solar

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Sistema Estático

Sistemas con seguimiento

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos

## ► Doble eje

- Apuntamiento «perfecto»
- Mejor productividad, peor ocupación de terreno.

## ► Seguimiento acimutal

- Sacrifica un movimiento (inclinación del generador) para conseguir sistemas más económicos.

# Algunos tipos de seguimiento solar

## ► Doble eje

- ▶ Apuntamiento «perfecto»
- ▶ Mejor productividad, peor ocupación de terreno.

## ► Seguimiento acimutal

- ▶ Sacrifica un movimiento (inclinación del generador) para conseguir sistemas más económicos.

## ► Seguimiento horizontal con eje Norte-Sur

- ▶ Sencillez y estabilidad estructural (el eje es horizontal y paralelo al terreno, con tantos puntos de apoyo como se consideren necesarios),
- ▶ Facilidad de motorización,
- ▶ Buen aprovechamiento del terreno.

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Sistema Estático

Sistemas con seguimiento

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Solar en Generadores FV

Bases de Datos

# Sistema de Seguimiento(1 eje, horizontal N-S)

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Sistema Estático

Sistemas con seguimiento

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

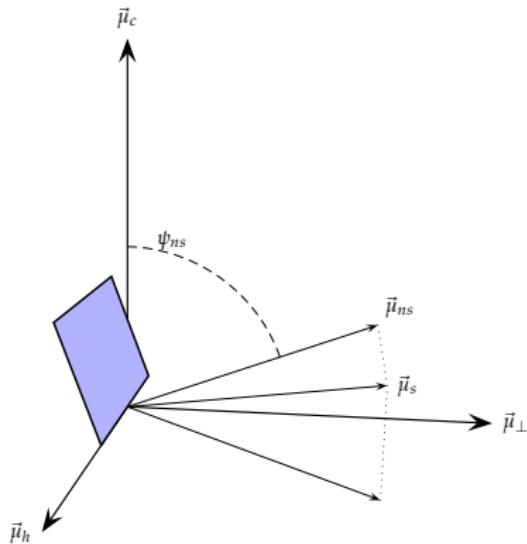
Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos



# Ángulo de Incidencia (1x eje, horizontal N-S)

$$\cos(\theta_s) = \cos(\delta) \sqrt{\sin^2(\omega) + (\cos(\omega) \cos(\phi) + \tan(\delta) \sin(\phi))^2}$$



# Inclinación de Eje Horizontal N-S

►  $40^{\circ}N$

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

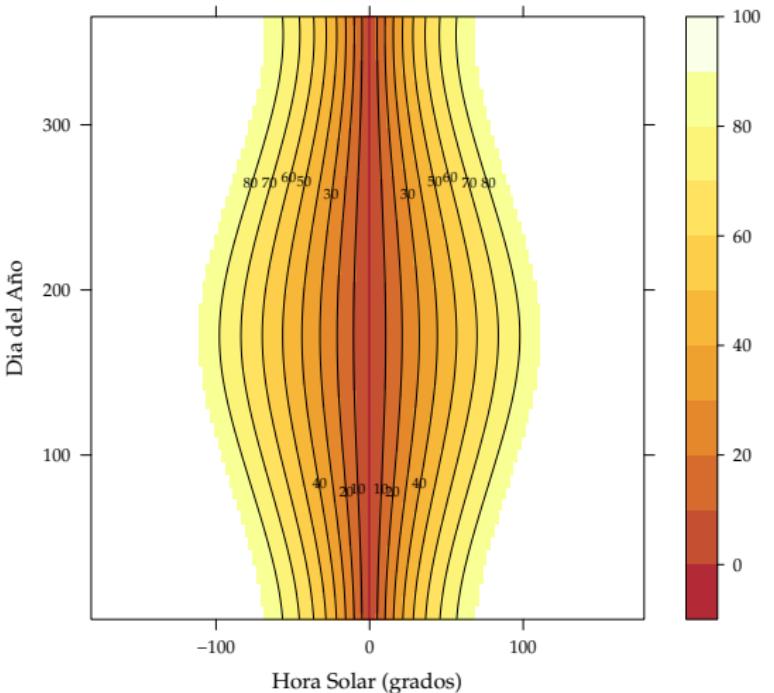
Sistema Estático

Sistemas con seguimiento

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

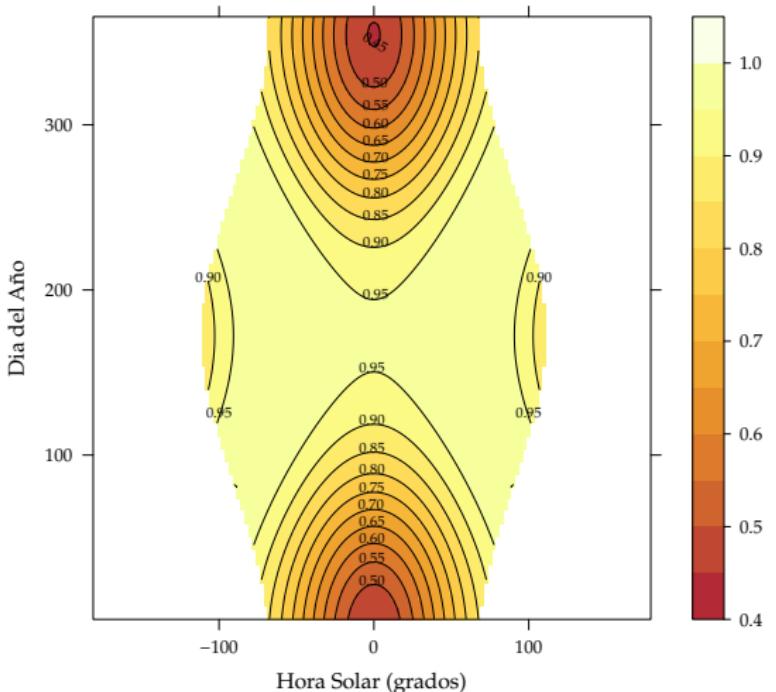
Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos



# Ángulo de Incidencia de Eje Horizontal N-S

►  $40^{\circ}N$



Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Sistema Estático

Sistemas con seguimiento

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos

# Sistema de Seguimiento (2x ejes)

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Sistema Estático

Sistemas con seguimiento

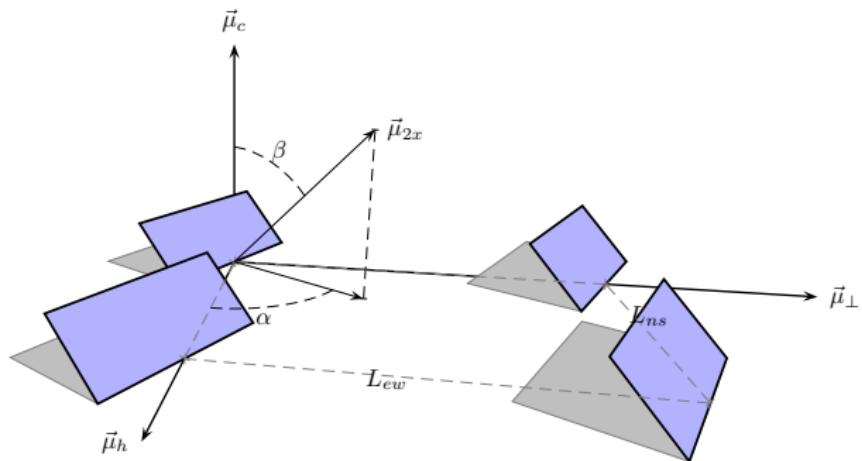
Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos



# Ángulo de Incidencia (seguidor 2x)



$$\beta = \theta_z$$

$$\alpha = \psi_s$$

$$\cos(\theta_s) = 1$$

# Inclinación (seguidor 2x)

►  $40^{\circ}N$

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

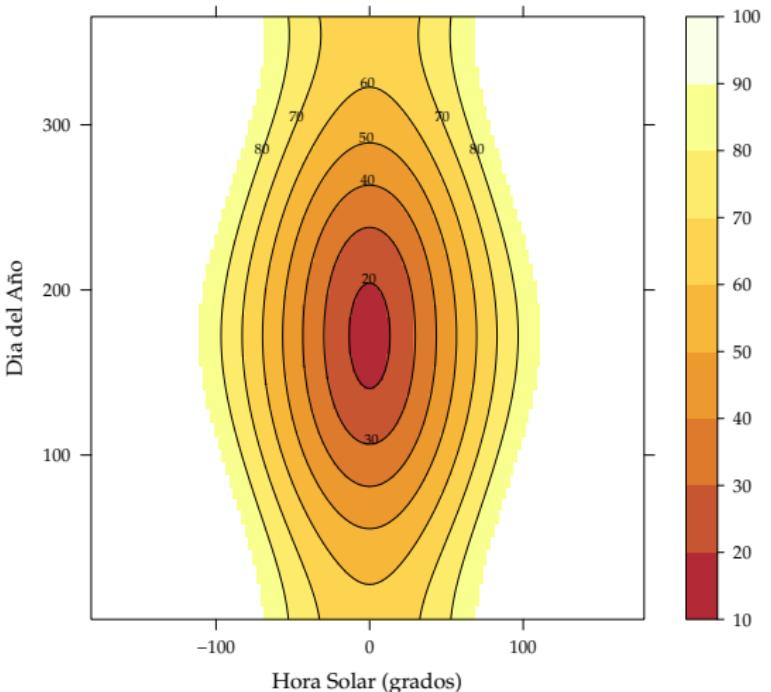
Sistema Estático

Sistemas con seguimiento

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos



# Ejercicio: cálculo de ángulo de incidencia

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

- Para:
- ▶ Un sistema estático orientado al Sur y con inclinación de 30;
  - ▶ Un sistema de seguimiento horizontal N-S;
  - ▶ Un sistema de seguimiento acimutal con inclinación a 35;
  - ▶ Un sistema de seguimiento a doble eje,

Calcular el ángulo de incidencia para el:

- ▶ Día del Año: 120, 2 horas después del mediodía, Latitud: 37.2N;
- ▶ Día del Año: 340, 2 horas después del amanecer, Latitud: 15S;

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Sistema Estático

Sistemas con seguimiento

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Solar en Generadores FV

Bases de Datos

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Solar en Generadores FV

Bases de Datos

# Irradiancia e Irradiación

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Extra-atmosférica  
Radiación solar en la  
superficie terrestre  
Cálculo de componentes de  
radiación solar

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos

**Irradiancia** es la densidad de *potencia* de radiación solar incidente en una superficie.

- Unidades:  $\text{W m}^{-2}$ ,  $\text{kW m}^{-2}$

**Irradiación** es la densidad de *energía* de radiación solar incidente en una superficie.

- Unidades:  $\text{Wh m}^{-2}$ ,  $\text{kWh m}^{-2}$

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Extra-atmosférica

Radiación solar en la superficie terrestre

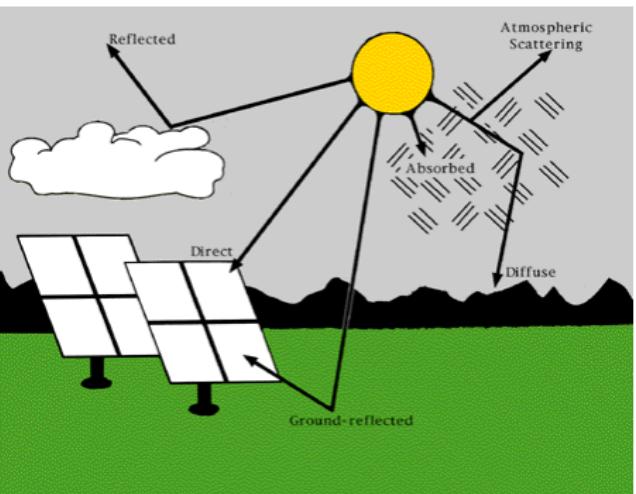
Cálculo de componentes de radiación solar

Radiación Solar en Generadores FV

Bases de Datos

# Definición

- ▶ La radiación que alcanza la superficie de la atmósfera es radiación directa del Sol.



Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Extra-atmosférica

Radiación solar en la superficie terrestre

Cálculo de componentes de radiación solar

Radiación Solar en Generadores FV

Bases de Datos

- ▶ **Constante solar**  $B_0 = 1367 \text{ W m}^{-2}$  (irradiancia solar sobre la superficie normal al vector solar en límite superior de la atmósfera terrestre)
- ▶ **Irradiancia extra-atmosférica**

$$B_0(0) = B_0 \cdot \epsilon_0 \cdot \cos \theta_{zs}$$

- ▶ **Irradiación extra-atmosférica diaria** ( $\omega_s$  en radianes)

$$B_{0d}(0) = -\frac{24}{\pi} B_0 \epsilon_0 \cdot (\omega_s \sin \phi \sin \delta + \cos \delta \cos \phi \sin \omega_s)$$

- ▶ Factor de corrección por excentricidad

$$\epsilon_0 = 1 + 0,033 \cdot \cos(2\pi d_n / 365)$$

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Extra-atmosférica

Radiación solar en la superficie terrestre

Cálculo de componentes de radiación solar

Radiación Solar en Generadores FV

Bases de Datos

Introducción

Geometría Sol y  
TierraGeometría de los  
sistemas  
fotovoltaicosRadiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Extra-atmosférica

Radiación solar en la  
superficie terrestreCálculo de componentes de  
radiación solarRadiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos

# Días promedio

- ▶ Es posible demostrar que el **promedio mensual** de esta irradiación diaria **coincide numéricamente** con el valor de irradiación diaria correspondiente a los denominados **días promedios**, días en los que la declinación correspondiente coincide con el promedio mensual
- ▶ Por tanto, podemos calcular el valor medio mensual de la irradiación diaria extra-atmosférica con el valor de la declinación de uno de los doce días promedio.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
$d_n$	17	45	74	105	135	161

Mes	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
$d_n$	199	230	261	292	322	347

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

**Radiación Solar en la Superficie Terrestre**

Radiación Extra-atmosférica

**Radiación solar en la superficie terrestre**

Cálculo de componentes de radiación solar

Radiación Solar en Generadores FV

Bases de Datos

# Interacción de la radiación con la atmósfera

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Extra-atmosférica

Radiación solar en la  
superficie terrestre

Cálculo de componentes de  
radiación solar

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos

- ▶ **Disminución** de la radiación incidente en la superficie terrestre (reflexión en nubes)
- ▶ **Modificación de las características espectrales** de la radiación (absorción por vapor de agua, ozono y CO<sub>2</sub>)
- ▶ **Modificación de la distribución espacial** (dispersión por partículas)

# Caracterización de la atmósfera

## ► Masa de aire:

- Relación entre camino recorrido por rayos directos del Sol a través de la atmósfera hasta la superficie receptora y el que recorrerían en caso de incidencia vertical ( $AM=1$ )
- $AM \simeq 1 / \cos \theta_{zs}$

## ► Índice de claridad

- Relación entre la radiación en la superficie terrestre y la radiación extra-atmosférica, ambas en el plano horizontal
- El índice de claridad **no depende de las variaciones debidas al movimiento aparente del sol.**
- $K_{Tm} = \frac{G_{d,m}(0)}{B_{0d,m}(0)}$  (mensual)

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Extra-atmosférica

Radiación solar en la superficie terrestre

Cálculo de componentes de radiación solar

Radiación Solar en Generadores FV

Bases de Datos

# Índice de claridad

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Extra-atmosférica

Radiación solar en la  
superficie terrestre

Cálculo de componentes de  
radiación solar

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos

$K_T$ : índice de claridad instantáneo.  $K_T = G/B_0$

$K_{Td}$ : índice de claridad diario.  $K_{Td} = G_d/B_{0d}$

$K_{Tm}$ : índice de claridad mensual.

$$K_{Tm} = G_m/B_{0m} = G_{d,m}/B_{0d,m}$$

$K_{Ta}$ : índice de claridad anual.  $K_{Ta} = G_a/B_{0a} = \dots$

# Componentes de la radiación solar

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Extra-atmosférica

Radiación solar en la  
superficie terrestre

Cálculo de componentes de  
radiación solar

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos

## ► Radiación Directa. (B)

- Línea recta con el Sol.

## ► Radiación Difusa. (D)

- Procedente de todo el cielo salvo el Sol
- Rayos dispersados por la atmósfera.
- Anisotrópica, proceso estocástico.

## ► Radiación del albedo. (R, AL)

- Procedente del suelo (reflejada)

## ► Radiación Global: $G = B + D + R$

# Cómo se escribe

## Forma, tiempo, lugar

**Forma+Tiempo+Lugar:** Irradiancia directa (forma) horaria (tiempo) en el plano del generador (lugar)

**Promedios:** Media mensual (periodo) de la irradiación global (forma) diaria (tiempo)

**Lugar:** (Orientación, Inclinación)  
(0=Horizontal)  
(n=Normal)  
(I=Plano del generador)

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Extra-atmosférica

Radiación solar en la superficie terrestre

Cálculo de componentes de radiación solar

Radiación Solar en Generadores FV

Bases de Datos

# Cómo se escribe

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

## Forma, tiempo, lugar

*Forma<sub>tiempo,promedio</sub>(lugar)*

$G_{d,m}(0)$

$D_h(\alpha, \beta)$

$B_{0d}(n)$

$B(\beta)$

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Extra-atmosférica

Radiación solar en la  
superficie terrestre

Cálculo de componentes de  
radiación solar

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

## Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Extra-atmosférica

Radiación solar en la superficie terrestre

Cálculo de componentes de radiación solar

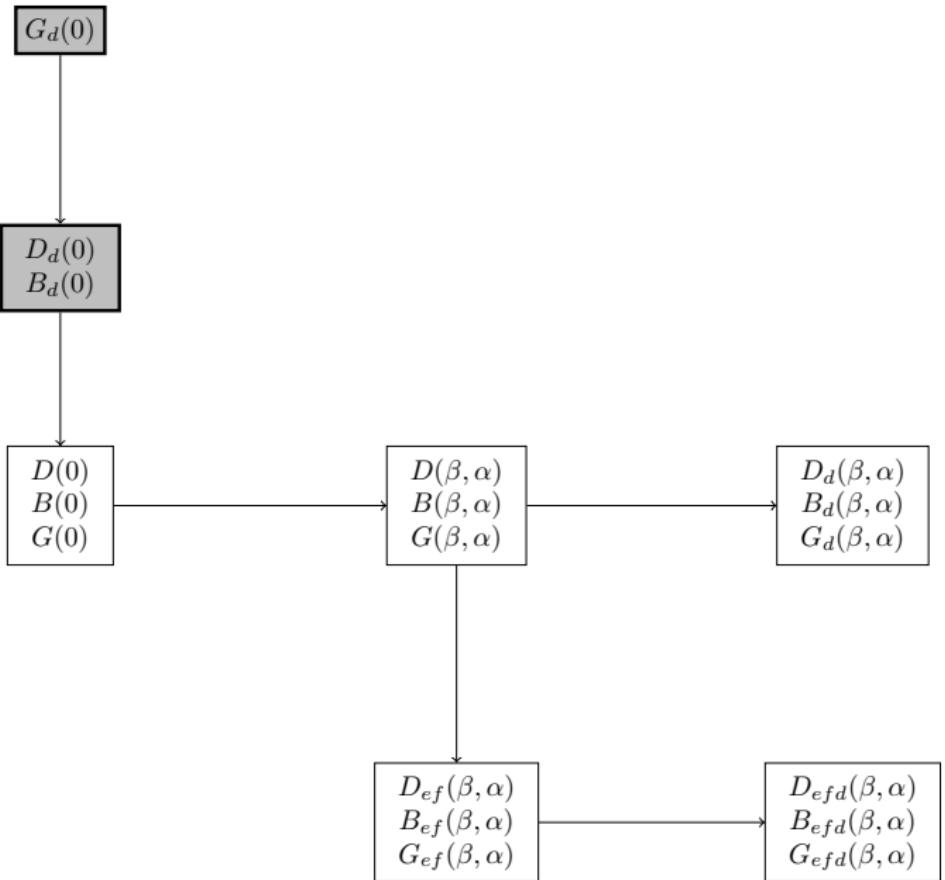
Radiación Solar en Generadores FV

Bases de Datos

Introducción

Geometría Sol y  
TierraGeometría de los  
sistemas  
fotovoltaicosRadiación Solar en  
la Superficie  
TerrestreRadiación Extra-atmosférica  
Radiación solar en la  
superficie terrestre  
Cálculo de componentes de  
radiación solarRadiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos



# Estimación de Directa y Difusa

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Extra-atmosférica  
Radiación solar en la  
superficie terrestre  
Cálculo de componentes de  
radiación solar

Radiación Solar en  
Generadores FV

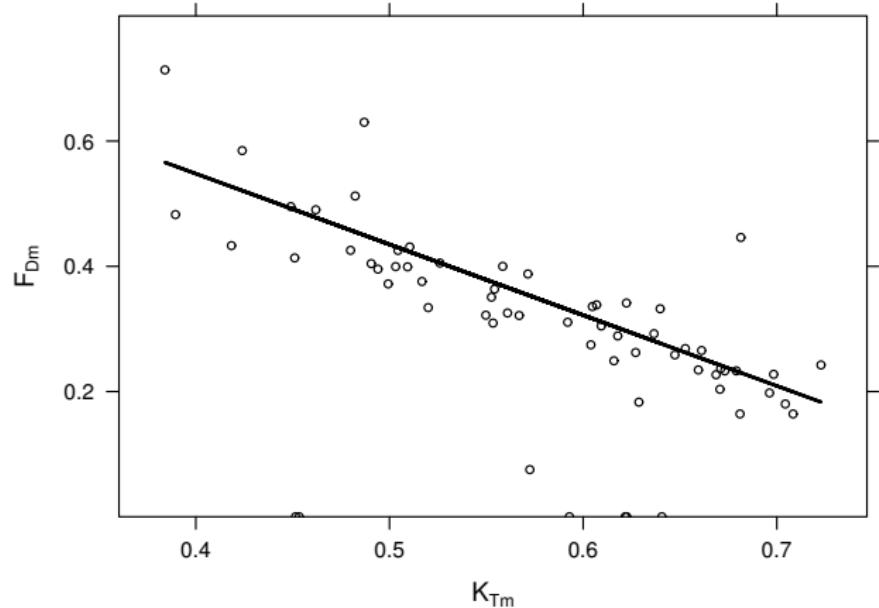
Bases de Datos

- ▶ Objetivo: Establecer una **relación entre la fracción difusa** de la radiación horizontal ( $F_D = \frac{D(0)}{G(0)}$ ) y **el índice de claridad**.
- ▶ **Correlación negativa** (a mayor índice de claridad, menor componente difusa)
- ▶ **Correlación independiente de la latitud** (validez quasi-universal)

# Correlaciones $F_D$ y $K_T$ : Ecuación de Page

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro



$$F_{Dm} = 1 - 1.13 \cdot K_{Tm}$$

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Extra-atmosférica

Radiación solar en la superficie terrestre

Cálculo de componentes de radiación solar

Radiación Solar en Generadores FV

Bases de Datos

# Correlaciones $F_D$ y $K_T$

Ejemplo: en un lugar con  $G_{d,m}(0) = 3150 \text{ Wh m}^{-2}$  en un mes con  $B_{o,dm}(0) = 4320 \text{ Wh m}^{-2}$  será:

- ▶  $K_{Tm} = \frac{3150}{4320} = 0.73$
- ▶ Según la correlación de Page,  
 $F_{Dm} = 1 - 1.13 \cdot 0.73 = 0.175$
- ▶  $D_{d,m}(0) = 0.175 \cdot 3150 = 551,6 \text{ Wh m}^{-2}$
- ▶  $B_{d,m}(0) = 3150 - 551.6 = 2598,4 \text{ Wh m}^{-2}$

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Extra-atmosférica

Radiación solar en la superficie terrestre

Cálculo de componentes de radiación solar

Radiación Solar en Generadores FV

Bases de Datos

# Correlaciones $F_D$ y $K_T$ : Collares-Pereira y Rabl

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

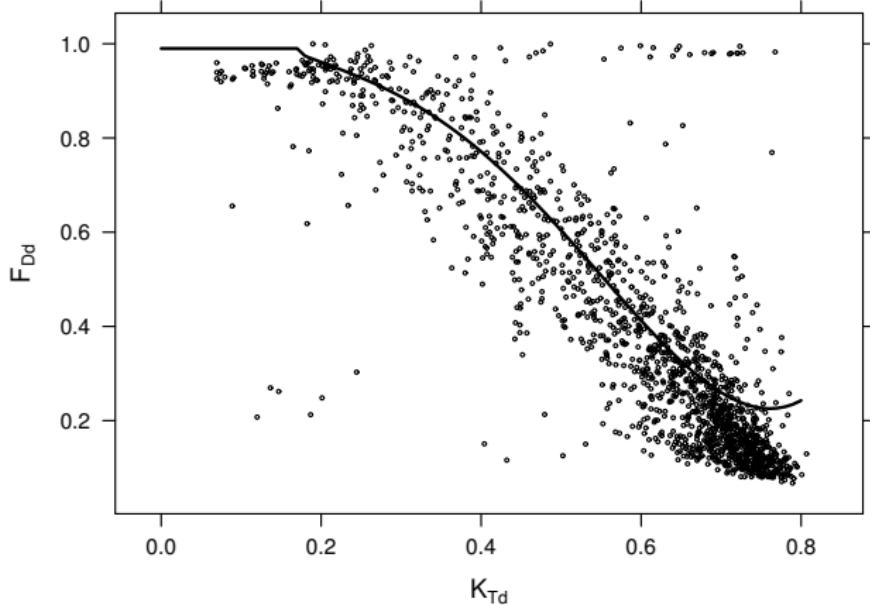
Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Extra-atmosférica  
Radiación solar en la superficie terrestre

Cálculo de componentes de radiación solar

Radiación Solar en Generadores FV

Bases de Datos



$$F_{Dd} = \begin{cases} 0.99 & K_{Td} \leq 0.17 \\ 1.188 - 2.272 \cdot K_{Td} + 9.473 \cdot K_{Td}^2 - 21.856 \cdot K_{Td}^3 + 14.648 \cdot K_{Td}^4 & K_{Td} > 0.17 \end{cases}$$

# Ejemplo

**Calcular** las componentes directa y difusa de la radiación solar del:

- ▶ Mes de Septiembre (día 261) en un lugar con latitud  $\phi = 40^\circ\text{N}$  y con media mensual de irradiación global diaria horizontal  $G_{d,m}(0) = 2700 \text{ Wh m}^{-2}$ .

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Extra-atmosférica

Radiación solar en la superficie terrestre

Cálculo de componentes de radiación solar

Radiación Solar en Generadores FV

Bases de Datos

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

**Radiación Solar en Generadores FV**

Bases de Datos

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Solar en Generadores FV

**Introducción**

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

Bases de Datos

# Ángulo de Inclinación

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

- ▶ Los generadores FV tienen un ángulo de inclinación positivo para maximizar el rendimiento.
- ▶ Este ángulo depende de la latitud del lugar y de la aplicación del sistema.



Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Solar en Generadores FV

## Introducción

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

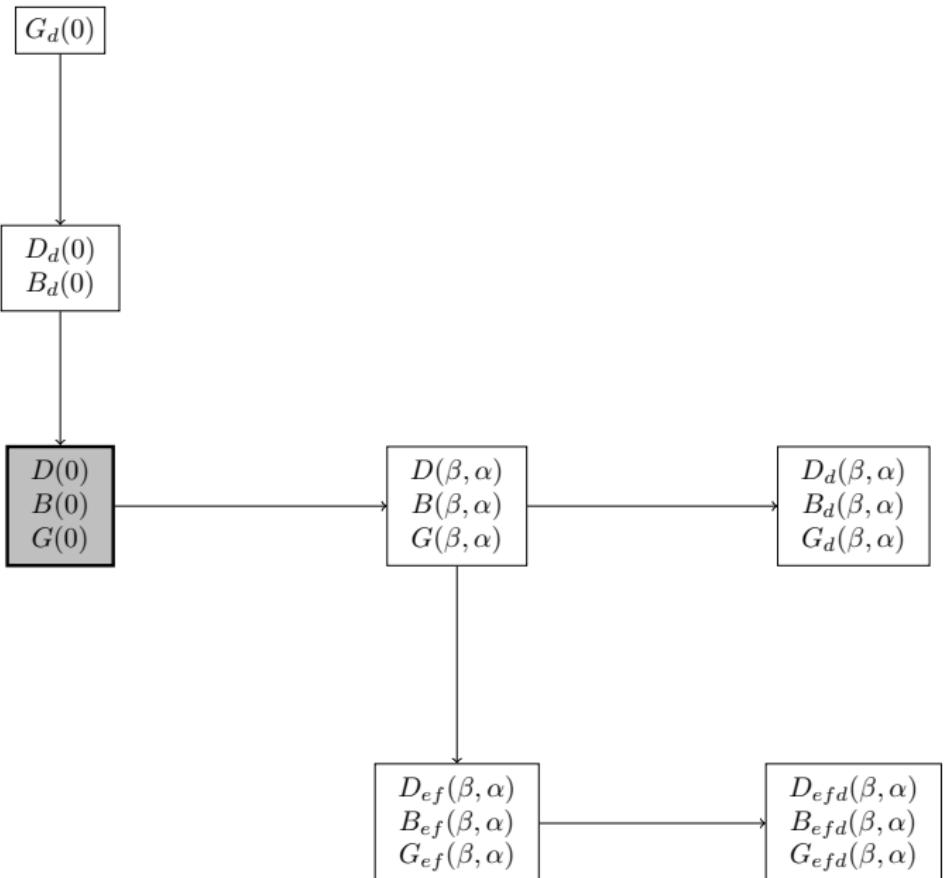
Radiación Efectiva según tipologías

Bases de Datos

Introducción

Geometría Sol y  
TierraGeometría de los  
sistemas  
fotovoltaicosRadiación Solar en  
la Superficie  
TerrestreRadiación Solar en  
Generadores FV**Introducción**Irradiancia a partir de  
irradiación diariaTransformación al plano del  
generadorPérdidas angulares y por  
suciedadRadiación Efectiva según  
tipologías

Bases de Datos



Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

Bases de Datos

# Planteamiento

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

► **Objetivo:** construir un perfil diario promedio de irradiancia global e irradiancia difusa (*cielo claro*)

► **Puntos clave:**

- La variación solar durante una hora es baja: irradiancia horaria equivale al valor medio de la irradiancia durante esa hora.
- Relación entre irradiancia e irradiación extra-terrestre deducible teóricamente:

$$\frac{B_o(0)}{B_{0d}(0)} = \frac{\pi}{24} \cdot \frac{\cos(\omega) - \cos(\omega_s)}{\omega_s \cdot \cos(\omega_s) - \sin(\omega_s)}$$

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

Bases de Datos

# Perfil

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Introducción

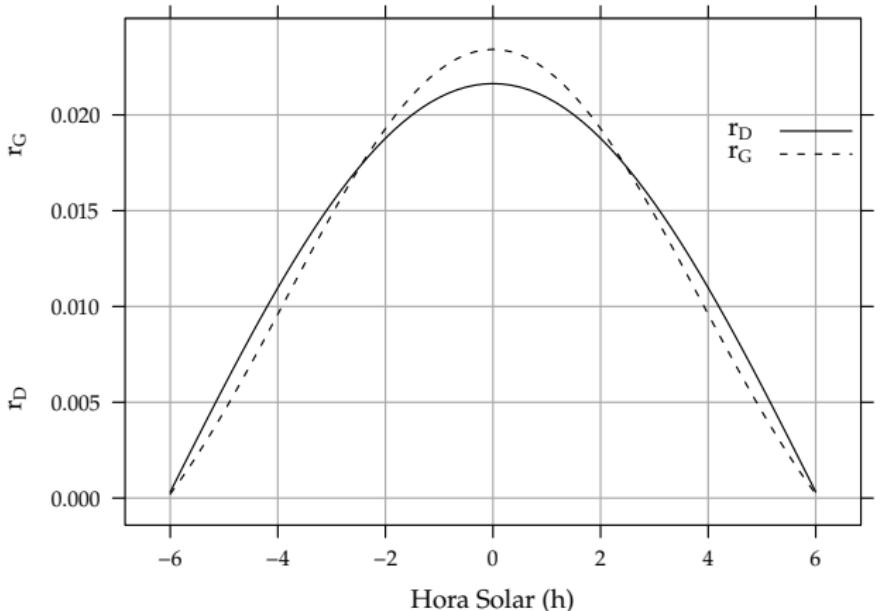
Irradiancia a partir de  
irradiación diaria

Transformación al plano del  
generador

Pérdidas angulares y por  
sucedad

Radiación Efectiva según  
tipologías

Bases de Datos



# Ecuaciones del perfil

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de  
irradiación diaria

Transformación al plano del  
generador

Pérdidas angulares y por  
suciedad

Radiación Efectiva según  
tipologías

Bases de Datos

$$r_D = \frac{D(0)}{D_d(0)} = \frac{B_o(0)}{B_{0d}(0)}$$

$$r_G = \frac{G(0)}{G_d(0)} = r_D \cdot (a + b \cdot \cos(\omega))$$

$$a = 0.409 - 0.5016 \cdot \sin\left(\omega_s + \frac{\pi}{3}\right)$$

$$b = 0.6609 + 0.4767 \cdot \sin\left(\omega_s + \frac{\pi}{3}\right)$$

[Introducción](#)[Geometría Sol y Tierra](#)[Geometría de los sistemas fotovoltaicos](#)[Radiación Solar en la Superficie Terrestre](#)[Radiación Solar en Generadores FV](#)[Introducción](#)[Irradiancia a partir de irradiación diaria](#)[Transformación al plano del generador](#)[Pérdidas angulares y por suciedad](#)[Radiación Efectiva según tipologías](#)[Bases de Datos](#)

# Ejercicio

**Calcular** la irradiancia global y la irradiancia difusa en el plano horizontal

- ▶ 2 horas antes del mediodía del día 261 en un lugar con latitud  $\phi = 40^\circ\text{N}$  y con media mensual de irradiación global diaria horizontal

$$G_{d,m}(0) = 2700 \text{ Wh m}^{-2}.$$

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

**Radiación Solar en Generadores FV**

Introducción

Irradiancia a partir de irradiación diaria

**Transformación al plano del generador**

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

Bases de Datos

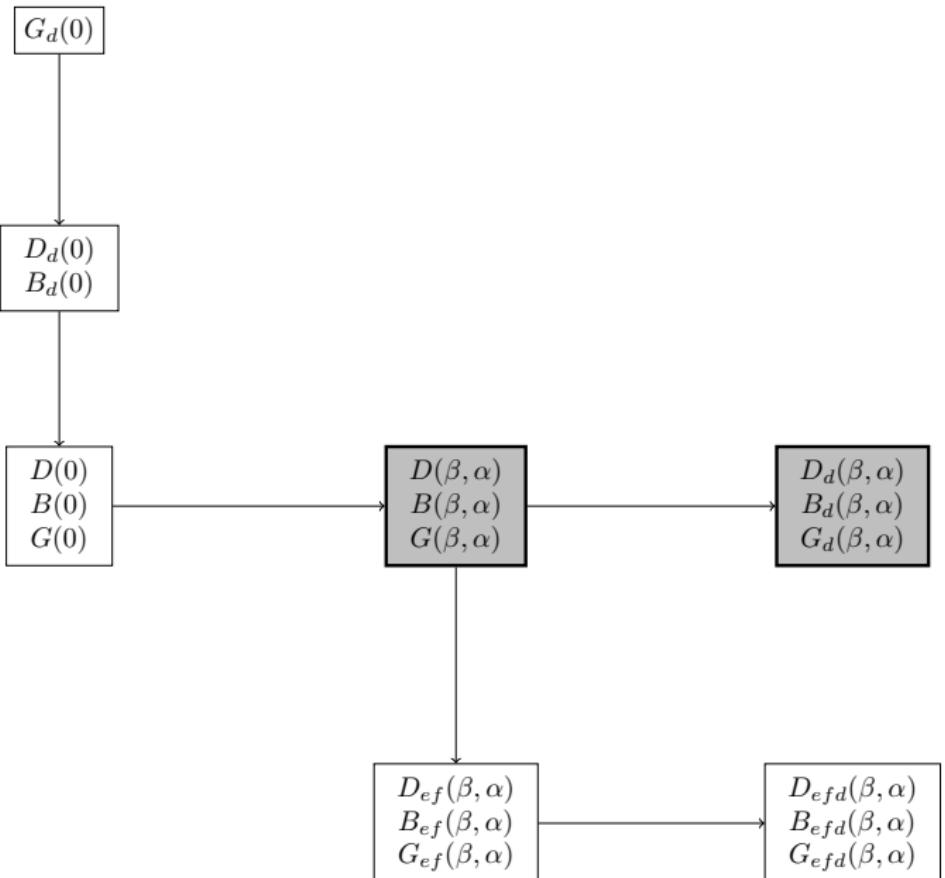
Introducción

Geometría Sol y  
TierraGeometría de los  
sistemas  
fotovoltaicosRadiación Solar en  
la Superficie  
TerrestreRadiación Solar en  
Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de  
irradiación diariaTransformación al plano del  
generadorPérdidas angulares y por  
suciedadRadiación Efectiva según  
tipologías

Bases de Datos



Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de  
irradiación diaria

Transformación al plano del  
generador

Pérdidas angulares y por  
suciedad

Radiación Efectiva según  
tipologías

Bases de Datos

- ▶ **Irradiancia Directa:** ecuación analítica basada en geometría solar (ángulo cenital) y del generador (ángulo de incidencia).
- ▶ **Irradiancia Difusa:** modelos del estado de cielo, modelo isotrópico o anisotrópico.
- ▶ **Irradiancia de Albedo:** modelo isotrópico con coeficiente de reflexión típico.

# Irradiancia Directa

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de  
irradiación diaria

Transformación al plano del  
generador

Pérdidas angulares y por  
suciedad

Radiación Efectiva según  
tipologías

Bases de Datos

**Irradiancia Directa:** ecuación analítica basada en geometría solar (ángulo cenital) y del generador (ángulo de incidencia).

$$B(\beta, \alpha) = B(0) \cdot \frac{\max(0, \cos(\theta_s))}{\cos(\theta_{zs})}$$

# Irradiancia Difusa

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Introducción

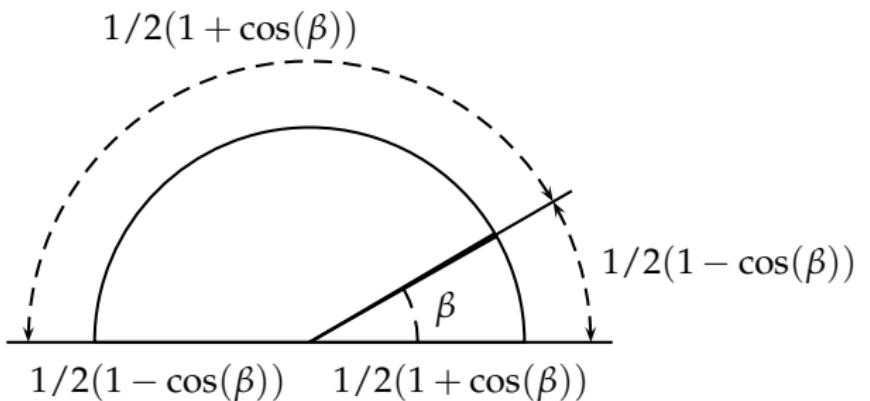
Irradiancia a partir de  
irradiación diaria

Transformación al plano del  
generador

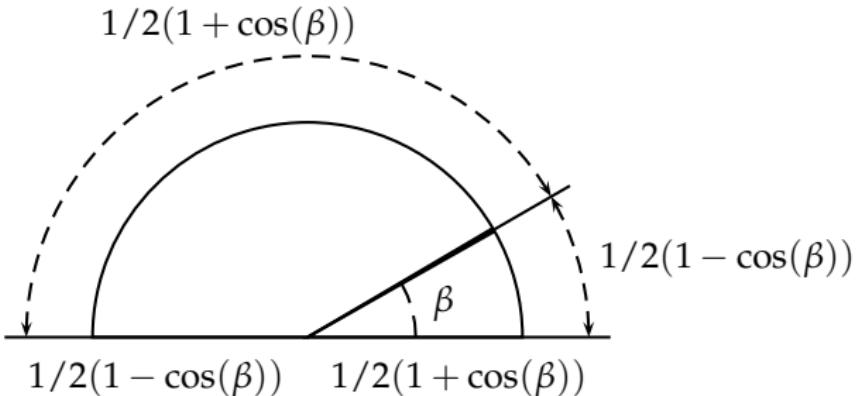
Pérdidas angulares y por  
suciedad

Radiación Efectiva según  
tipologías

Bases de Datos



$$D(\beta, \alpha) = \int_{\Omega} L(\theta_z, \psi) \cdot \cos(\theta'_z) d\Omega$$



$$L(\theta_z, \psi) = cte.$$

$$D(\beta, \alpha) = D(0) \cdot \frac{1 + \cos(\beta)}{2}$$

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

Bases de Datos

# Irradiancia Difusa Anisotrópica

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de  
irradiación diaria

Transformación al plano del  
generador

Pérdidas angulares y por  
suciedad

Radiación Efectiva según  
tipologías

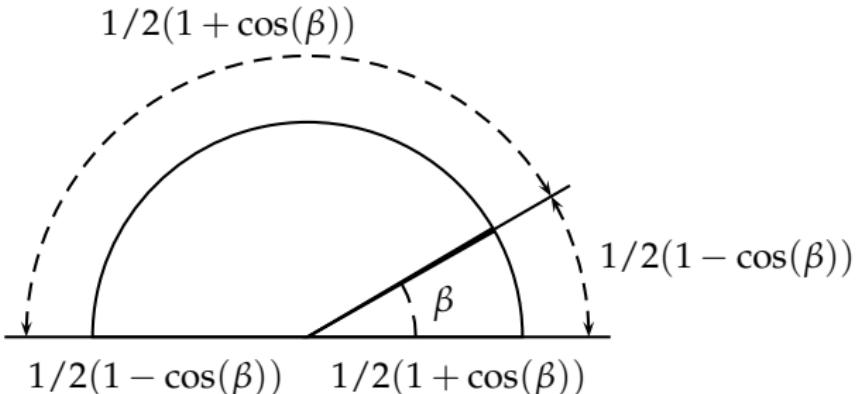
Bases de Datos

$$D(\beta, \alpha) = D^I(\beta, \alpha) + D^C(\beta, \alpha)$$

$$D^I(\beta, \alpha) = D(0) \cdot (1 - k_1) \cdot \frac{1 + \cos(\beta)}{2}$$

$$D^C(\beta, \alpha) = D(0) \cdot k_1 \cdot \frac{\max(0, \cos(\theta_s))}{\cos(\theta_{zs})}$$

$$k_1 = \frac{B(0)}{B_0(0)}$$



$$R(\beta, \alpha) = \rho \cdot G(0) \cdot \frac{1 - \cos(\beta)}{2}$$

$$\rho = 0.2$$

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

Bases de Datos

# Ejercicio

**Calcular** la irradiancia difusa, directa, de albedo y global, en

- ▶ Un generador inclinado  $30^\circ$  y orientado al Sur, 2 horas antes del mediodía del día 261 en un lugar con latitud  $\phi = 40^\circ\text{N}$  y con media mensual de irradiación global diaria horizontal  $G_{d,m}(0) = 2700 \text{ Wh m}^{-2}$ .

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

Bases de Datos

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

**Radiación Solar en Generadores FV**

Introducción

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

**Pérdidas angulares y por suciedad**

Radiación Efectiva según tipologías

Bases de Datos

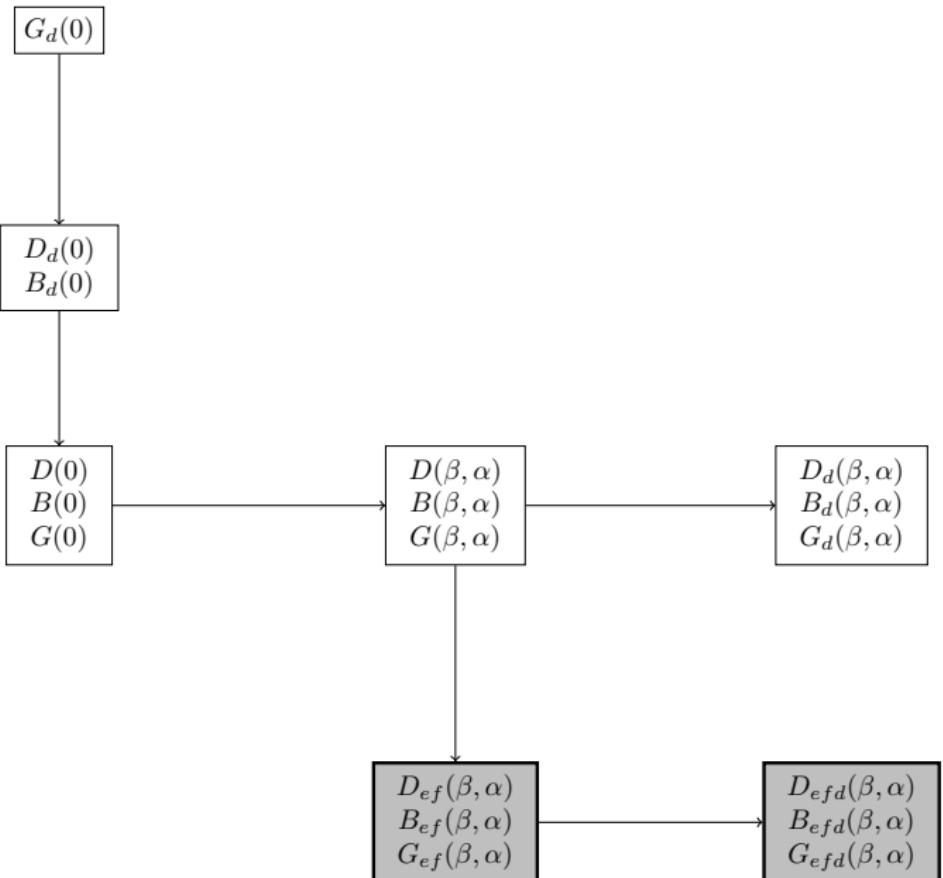
Introducción

Geometría Sol y  
TierraGeometría de los  
sistemas  
fotovoltaicosRadiación Solar en  
la Superficie  
TerrestreRadiación Solar en  
Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de  
irradiación diariaTransformación al plano del  
generadorPérdidas angulares y por  
suciedadRadiación Efectiva según  
tipologías

Bases de Datos



# Radiación directa

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de  
irradiación diaria

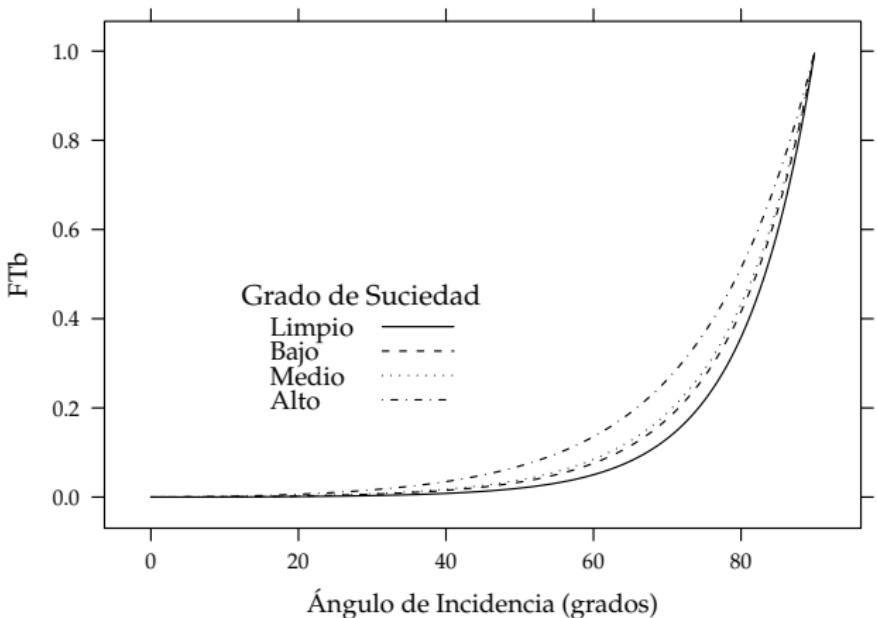
Transformación al plano del  
generador

Pérdidas angulares y por  
suciedad

Radiación Efectiva según  
tipologías

Bases de Datos

$$B_{ef}(\beta, \alpha) = B(\beta, \alpha) \cdot \left[ \frac{T_{sucio}(0)}{T_{limpio}(0)} \right] \cdot (1 - FT_B(\theta_s))$$



# Difusa y Albedo

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de  
irradiación diaria

Transformación al plano del  
generador

Pérdidas angulares y por  
sucedad

Radiación Efectiva según  
tipologías

Bases de Datos

$$D_{ef}^{iso}(\beta, \alpha) = D^{iso}(\beta, \alpha) \cdot \left[ \frac{T_{sucio}(0)}{T_{limpio}(0)} \right] \cdot (1 - FT_D(\beta))$$

$$D_{ef}^{cir}(\beta, \alpha) = D^{cir}(\beta, \alpha) \cdot \left[ \frac{T_{sucio}(0)}{T_{limpio}(0)} \right] \cdot (1 - FT_B(\theta_s))$$

$$R_{ef}(\beta, \alpha) = R(\beta, \alpha) \cdot \left[ \frac{T_{sucio}(0)}{T_{limpio}(0)} \right] \cdot (1 - FT_R(\beta))$$

# Coeficientes

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de  
irradiación diaria

Transformación al plano del  
generador

Pérdidas angulares y por  
suciedad

Radiación Efectiva según  
tipologías

Bases de Datos

Grado de Suciedad	$\frac{T_{sucio}(0)}{T_{limpio}(0)}$	$a_r$	$c_2$
Limpio	1	0.17	-0.069
Bajo	0.98	0.20	-0.054
Medio	0.97	0.21	-0.049
Alto	0.92	0.27	-0.023

Introducción

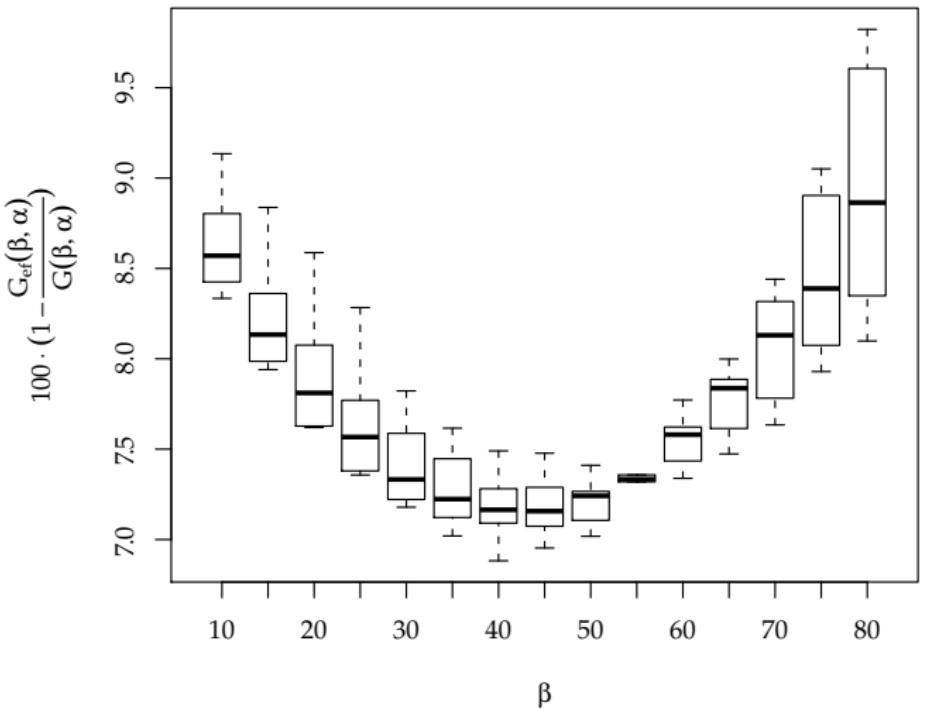
Geometría Sol y  
TierraGeometría de los  
sistemas  
fotovoltaicosRadiación Solar en  
la Superficie  
TerrestreRadiación Solar en  
Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de  
irradiación diariaTransformación al plano del  
generadorPérdidas angulares y por  
sucedadRadiación Efectiva según  
tipologías

Bases de Datos

# Pérdidas anuales



Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

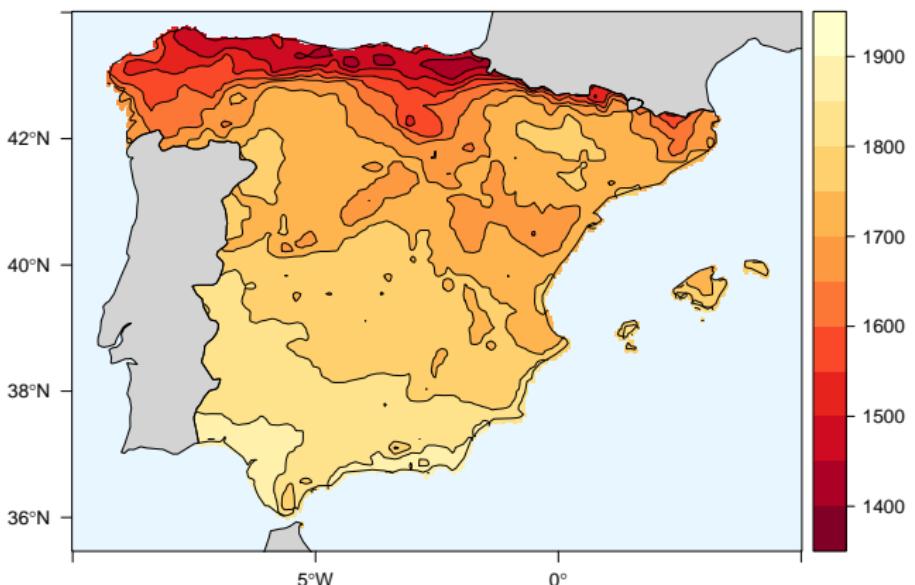
Radiación Efectiva según tipologías

Bases de Datos

# Radiación en Sistema estático

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro



Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

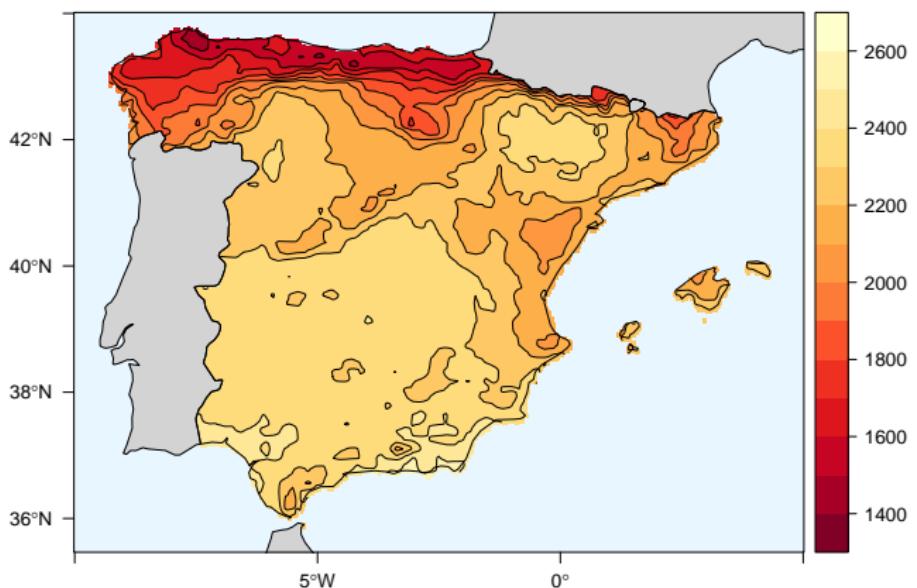
Radiación Efectiva según tipologías

Bases de Datos

# Radiación en Seguimiento Eje Horizontal

Radiación Solar

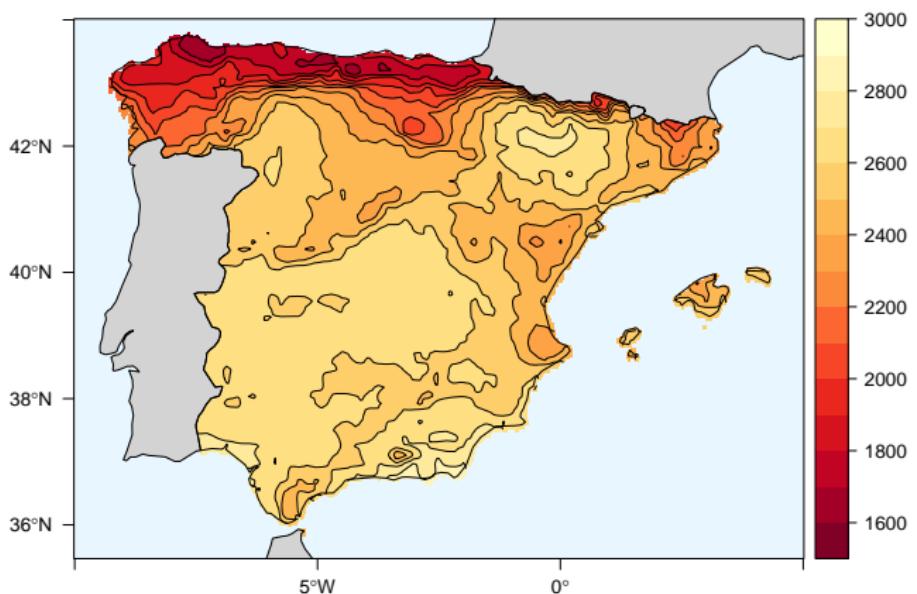
Oscar Perpiñán  
Lamigueiro



# Radiación en Seguimiento Doble Eje

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro



Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

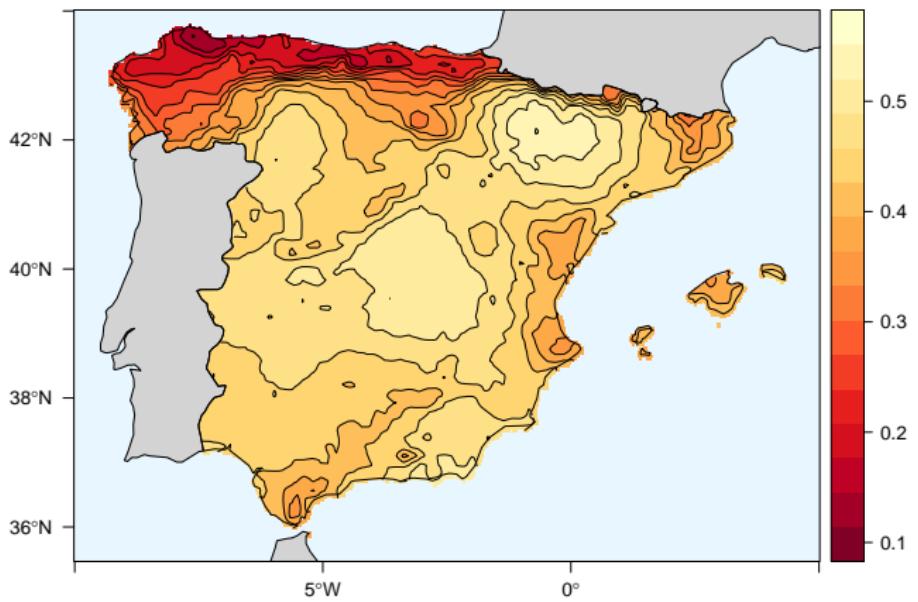
Radiación Efectiva según tipologías

Bases de Datos

# Comparación Doble Eje-Estática

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro



Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

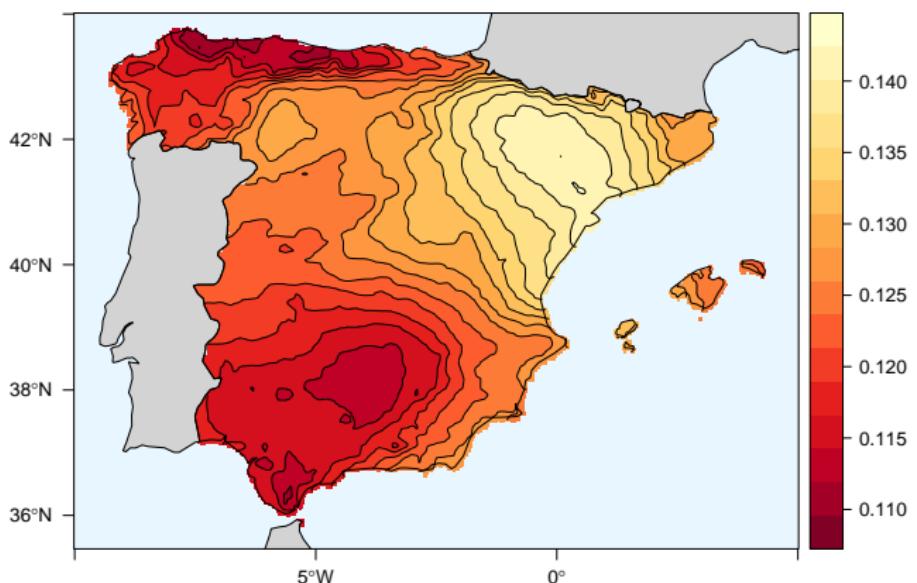
Radiación Efectiva según tipologías

Bases de Datos

# Comparación Doble Eje - Horizontal

Radiación Solar

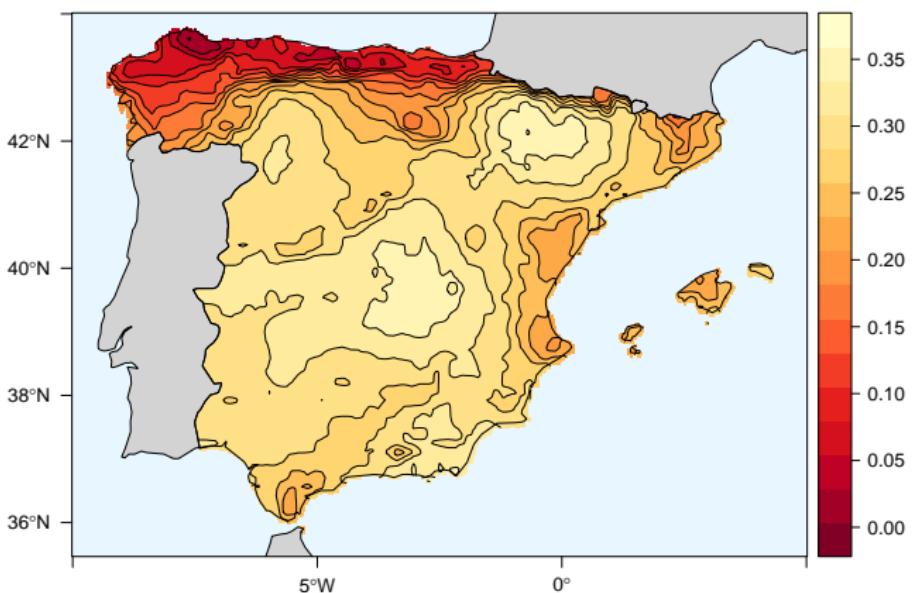
Oscar Perpiñán  
Lamigueiro



# Comparación Eje Horizontal - Estática

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro



Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

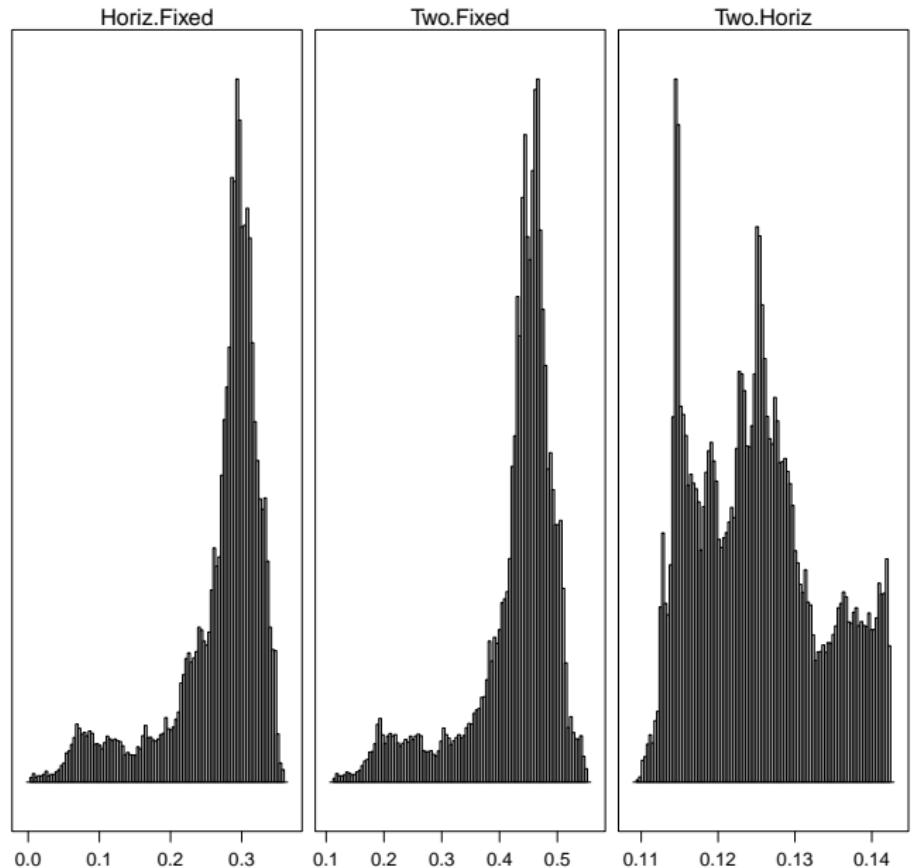
Radiación Efectiva según tipologías

Bases de Datos

# Comparación entre Sistemas

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro



Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Introducción

Irradiancia a partir de  
irradiación diaria

Transformación al plano del  
generador

Pérdidas angulares y por  
suciedad

Radiación Efectiva según  
tipologías

Bases de Datos

# Comparación entre Sistemas

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Introducción

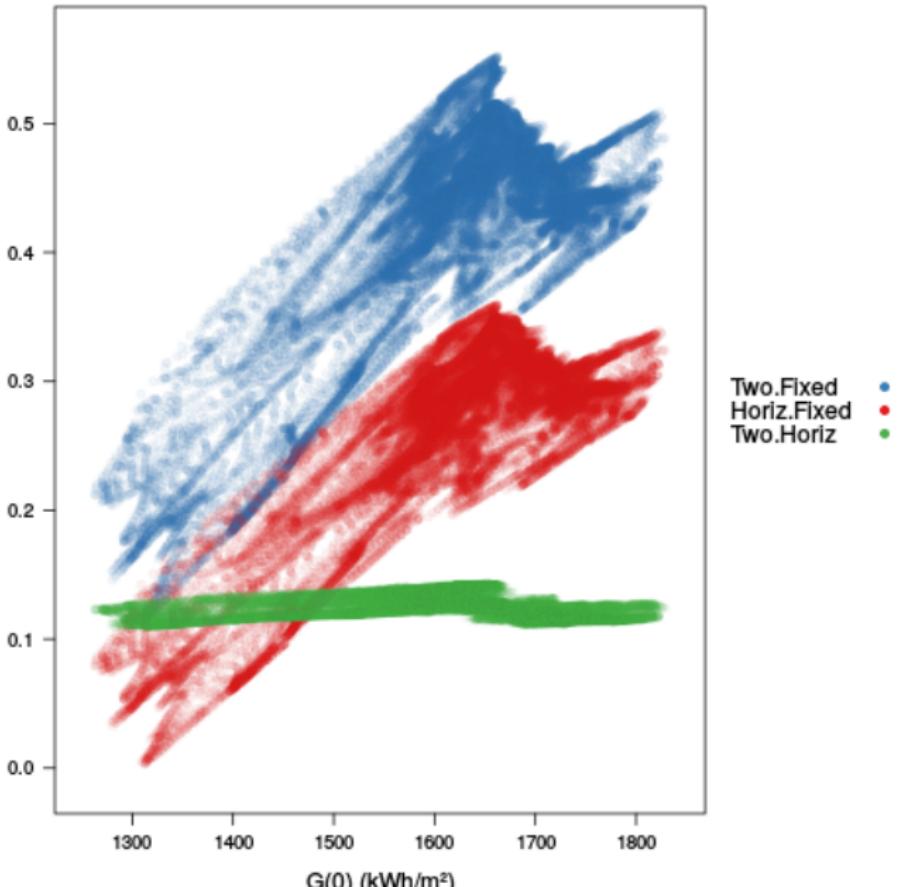
Irradiancia a partir de  
irradiación diaria

Transformación al plano del  
generador

Pérdidas angulares y por  
suciedad

Radiación Efectiva según  
tipologías

Bases de Datos



**Introducción**

**Geometría Sol y Tierra**

**Geometría de los sistemas fotovoltaicos**

**Radiación Solar en la Superficie Terrestre**

**Radiación Solar en Generadores FV**

**Bases de Datos**

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Solar en Generadores FV

**Bases de Datos**

Introducción

Fuentes de Datos

Control de Calidad

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos

Introducción

Fuentes de Datos

Control de Calidad

- ▶ La **radiación extra-atmosférica** se puede expresar de forma **analítica** en función del día, hora y latitud.
- ▶ La **radiación en la superficie terrestre** es un **proceso estocástico** (aleatorio) debido a la interacción con la atmósfera.
  - ▶ Variabilidad Temporal
  - ▶ Variabilidad Espacial

# Estimaciones a Largo Plazo

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos

Introducción  
Fuentes de Datos  
Control de Calidad

- ▶ Nos interesan **estimaciones a largo plazo** del funcionamiento de los sistemas FV en una localización concreta.
- ▶ Las fuentes de datos de radiación solar deben:
  - ▶ **capturar el comportamiento a largo plazo** (variabilidad interanual)
  - ▶ y ser **representativas de la localización** (variabilidad espacial).

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Solar en Generadores FV

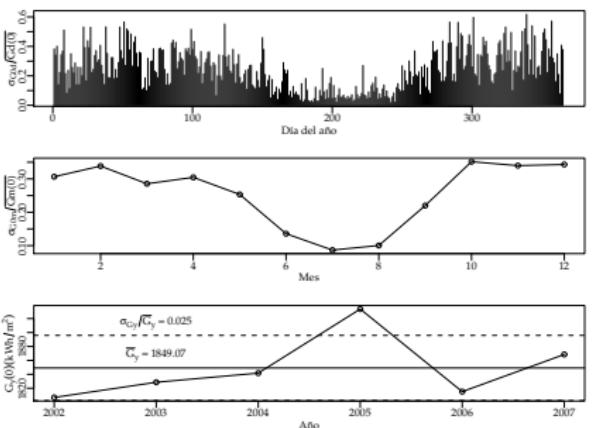
Bases de Datos

Introducción

Fuentes de Datos

Control de Calidad

# Variabilidad Temporal



- ▶ La variabilidad temporal **incrementa con la resolución temporal** (ej. mayor para valores diarios que para medias mensuales).
- ▶ Las fluctuaciones son **más altas en invierno que en verano.**
- ▶ Reproducir **tendencias a largo plazo** requiere **series temporales largas** (recomendado 10 años).

Introducción

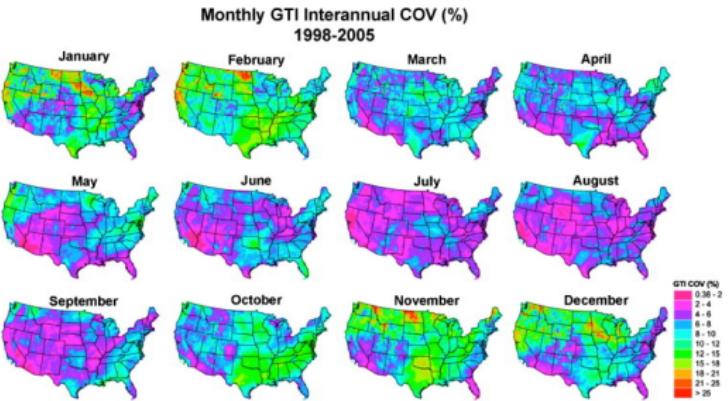
Geometría Sol y  
TierraGeometría de los  
sistemas  
fotovoltaicosRadiación Solar en  
la Superficie  
TerrestreRadiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos

Introducción

Fuentes de Datos

Control de Calidad



- ▶ La variabilidad espacial depende de la **climatología local**.
- ▶ La variabilidad espacial es **mayor en invierno que en verano** para una misma localización.
- ▶ Las medidas son representativas de las localizaciones cercanas en una distancia limitada (aprox. 10 kms.)

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos

Introducción

Fuentes de Datos

Control de Calidad

## Requerimientos

Una estimación de la productividad de un SFV confiable y representativa en el largo plazo requiere:

- ▶ **Medidas Cercanas:**  $\leq 10 \text{ km}$
- ▶ **Series Temporales Largas:**  $\simeq 10 \text{ años}$

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Solar en Generadores FV

## Bases de Datos

Introducción

Fuentes de Datos

Control de Calidad

[Introducción](#)[Geometría Sol y Tierra](#)[Geometría de los sistemas fotovoltaicos](#)[Radiación Solar en la Superficie Terrestre](#)[Radiación Solar en Generadores FV](#)[Bases de Datos](#)[Introducción](#)[Fuentes de Datos](#)[Control de Calidad](#)

# Estaciones Meteorológicas

- ▶ Series temporales largas
- ▶ Alta resolución temporal (1 min)
- ▶ Baja resolución espacial.
- ▶ Los errores se deben al medidor (no se emplean modelos).

## Piranómetro



# Imágenes de Satelite

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos

Introducción

Fuentes de Datos

Control de Calidad

- ▶ Baja resolución temporal (1 hora).
- ▶ Alta resolución espacial (15 km).
- ▶ La radiación global se estima mediante el procesado de las imágenes obtenidas por los radiómetros de los satélites.
- ▶ Los errores se deben a los modelos.

# Métodos Híbridos

- ▶ Las medidas terrestres se mezclan con las estimaciones de satélite para mejorar la resolución espacial.
- ▶ Interpolación Espacial.
  - ▶ **Inverse Distance Weighting (IDW)** ( $d$  es la distancia entre los puntos  $x_0$  y  $x_i$ )

$$\hat{G}_d(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^N w_i G_d(x_i)}{\sum_{i=1}^N w_i}$$

$$w_i = 1/d^2(x_0, x_i)$$

- ▶ **Kriging Ordinario**
- ▶ **Kriging with External Drift (KED)**

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Solar en Generadores FV

Bases de Datos

Introducción

Fuentes de Datos

Control de Calidad

[Introducción](#)[Geometría Sol y Tierra](#)[Geometría de los sistemas fotovoltaicos](#)[Radiación Solar en la Superficie Terrestre](#)[Radiación Solar en Generadores FV](#)[Bases de Datos](#)[Introducción](#)[Fuentes de Datos](#)[Control de Calidad](#)

# Fuentes de Datos

<https://github.com/oscarperpinan/mds/wiki>

- ▶ Estaciones Meteorológicas: <https://github.com/oscarperpinan/mds/wiki/stations>
- ▶ Satélite
  - ▶ NASA: <https://github.com/oscarperpinan/mds/wiki/nasa>
  - ▶ CM SAF: <https://github.com/oscarperpinan/mds/wiki/cmsaf>
  - ▶ LSA SAF: <https://github.com/oscarperpinan/mds/wiki/lsasaf>
- ▶ Métodos Híbridos
  - ▶ PVGIS: <https://github.com/oscarperpinan/mds/wiki/pvgis>
  - ▶ ADRASE: <https://github.com/oscarperpinan/mds/wiki/adrase>

Introducción

Geometría Sol y Tierra

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Solar en Generadores FV

## Bases de Datos

Introducción

Fuentes de Datos

Control de Calidad

# Introducción

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos

Introducción  
Fuentes de Datos  
Control de Calidad

- ▶ Es necesario filtrar y corregir las medidas para eliminar datos erróneos y valores extremos.
  - ▶ Límites Físicos
  - ▶ Coherencia Espacial
  - ▶ Análisis Estadístico de las Desviaciones

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos

Introducción  
Fuentes de Datos  
Control de Calidad

- ▶ El índice de claridad no puede ser mayor que 1 (la irradiación global diaria no puede superar la extra-atmosférica).

$$K_{dT} \leq 1$$

$$G_d(0) \leq B_{0d}(0)$$

- ▶ El índice de claridad debe ser al menos 0.03

$$K_t = \frac{G_d(0)}{B_{0d}(0)} \geq 0.03$$

# Coherencia Espacial

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos

Introducción  
Fuentes de Datos  
Control de Calidad

- ▶ Las medidas de una estación se deben comparar con **estaciones cercanas** (por ejemplo, mediante interpolación espacial).
- ▶ La comparación se debe realizar con **valores agregados** (medias diarias o mensuales).

# Análisis Estadístico de las Desviaciones

Radiación Solar

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro

Introducción

Geometría Sol y  
Tierra

Geometría de los  
sistemas  
fotovoltaicos

Radiación Solar en  
la Superficie  
Terrestre

Radiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos

Introducción  
Fuentes de Datos  
Control de Calidad

- Desviaciones,  $\mathbf{D}$ , entre observaciones,  $\mathbf{O}$ , y un modelo,  $\mathbf{M}$  (u otro conjunto de observaciones):

$$\mathbf{O} = \{o_1 \dots o_n\}$$

$$\mathbf{M} = \{m_1 \dots m_n\}$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{M} - \mathbf{O} = \{(m_1 - o_1) \dots (m_n - o_n)\} = \{d_1 \dots d_n\}$$

Introducción

Geometría Sol y  
TierraGeometría de los  
sistemas  
fotovoltaicosRadiación Solar en  
la Superficie  
TerrestreRadiación Solar en  
Generadores FV

Bases de Datos

Introducción

Fuentes de Datos

Control de Calidad

# Métricas

- ▶ Mean Bias Difference (MBD), diferencia media (indica si el modelo sobreestima o subestima):

$$MBD = \bar{\mathbf{D}} = \bar{\mathbf{M}} - \bar{\mathbf{O}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (m_i - o_i)$$

- ▶ Root Mean Square Error (RMSD), diferencia cuadrático media:

$$RMSD = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2 \right)^{1/2} = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (m_i - o_i)^2 \right)^{1/2}$$

- ▶ Mean Absolute Deviation (MAD) (El RMSD no es robusto, un error puntual puede distorsionar el estimador, y depende del número de muestras)

$$MAD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |d_i| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |m_i - o_i|$$