

ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA: RADIACIÓN SOLAR

OSCAR PERPIÑÁN LAMIGUEIRO

ÍNDICE

- 1 ESTADÍSTICA
- 2 NATURALEZA DE LA RADIACIÓN SOLAR
- 3 CÁLCULO DE COMPONENTES DE RADIACIÓN SOLAR
- 4 CÁLCULO DE RADIACIÓN SOBRE GENERADORES
 - Irradiancia a partir de irradiación diaria
 - Transformación al plano del generador
 - Incertidumbre
 - Pérdidas angulares y por suciedad
- 5 RADIACIÓN EFECTIVA SEGÚN TIPOLOGÍAS
 - Comparación entre tipologías
- 6 APLICACIÓN A SISTEMAS ESTÁTICOS
 - Ángulo de inclinación óptimo

VARIABLE ALEATORIA Y PROCESO ESTOCÁSTICO

- Una variable aleatoria es una función que asigna un único número real a cada resultado de un espacio muestral en un experimento.
- Un proceso estocástico es una variable aleatoria que evoluciona a lo largo del tiempo (p.ej. la radiación).

FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD

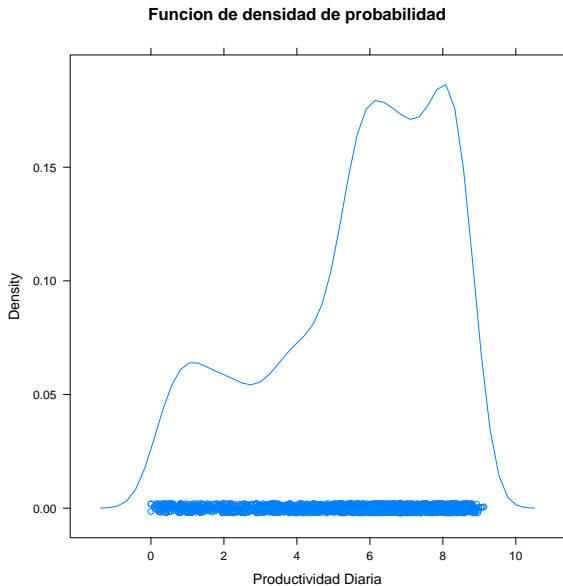
La función de densidad de probabilidad, $f(X)$, de una variable aleatoria asigna probabilidad a un suceso:

$$P(a < X < b) = \int_a^b f(x)dx$$

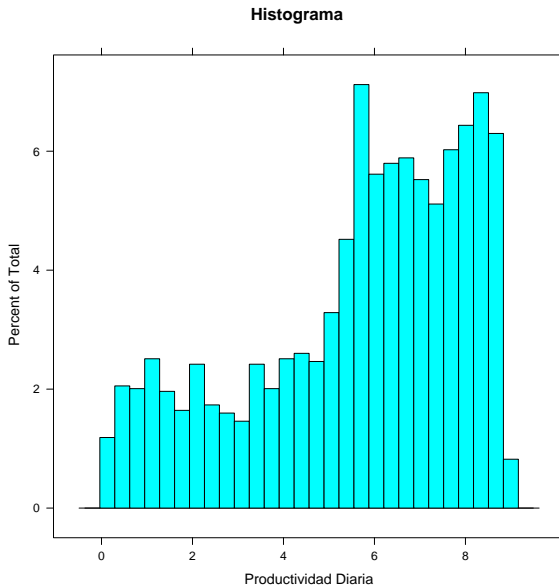
$$P(X < b) = \int_{-\infty}^b f(x)dx$$

$$P(X > a) = \int_a^{\infty} f(x)dx$$

FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD



HISTOGRAMA



MEDIA, VARIANZA Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR

La media de una variable aleatoria es el centro de masas de su función densidad de probabilidad:

$$\mu_X = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot f(x) dx$$

La varianza de una variable aleatoria es la media del cuadrado de las desviaciones respecto a la media:

$$\sigma_X^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu_X)^2 \cdot f(x) dx$$

La desviación estándar es la raíz cuadrada de la varianza:

$$\sigma_X = \sqrt{\sigma_X^2}$$

COMBINACIÓN LINEAL DE VARIABLES ALEATORIAS

La media de la suma de varias variables aleatorias independientes es la suma de las medias:

$$\mu_{X_1+\dots+X_n} = \mu_{X_1} + \dots + \mu_{X_n}$$

La varianza de la *suma o resta* de varias variables aleatorias independientes es la *suma* de las varianzas:

$$\sigma_{X_1\pm\dots\pm X_n}^2 = \sigma_{X_1}^2 + \dots + \sigma_{X_n}^2$$

MEDIA Y VARIANZA DE LA MEDIA MUESTRAL

Una muestra de una población es un conjunto de variables aleatorias independientes ($X_1...X_n$). Si se toma una muestra de una población cuya media es μ y su varianza es σ^2 , entonces la media de la muestra es otra variable aleatoria:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_n X_i$$

que es una suma de variables aleatorias.

MEDIA Y VARIANZA DE LA MEDIA MUESTRAL

Por tanto, la media de la media muestral es la suma de las medias:

$$\overline{X} = \mu$$

y la varianza de la media muestral es la suma de las varianzas:

$$\sigma_{\overline{X}}^2 = \sigma_{\frac{1}{n}X_1}^2 + \dots + \sigma_{\frac{1}{n}X_n}^2 = \frac{\sigma^2}{N}$$

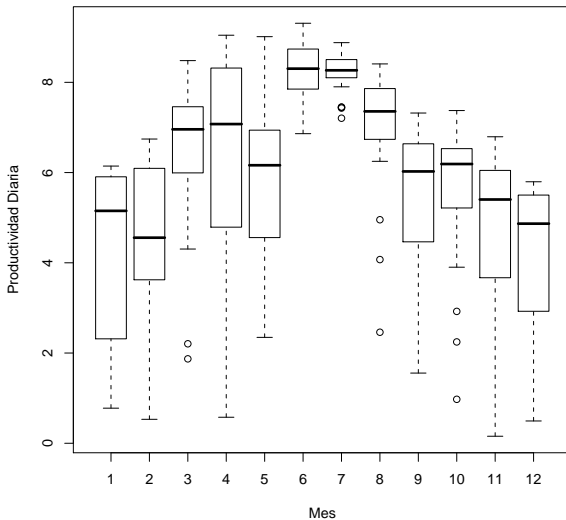
Por tanto, una forma de reducir la incertidumbre es realizar la medida en repetidas ocasiones.

MEDIANA Y CUARTILES

- La mediana divide el conjunto de valores de la variable en dos mitades iguales (divide el área encerrada por la función densidad de probabilidad en dos partes iguales).
- Los cuartiles dividen este área en cuatro partes iguales.
- El área encerrada entre cada par de cuartiles es igual al 25 % del total.
- La mediana es el segundo cuartil.
- La distancia intercuartil (definida entre los cuartiles 1 y 3) es una medida de la dispersión de la variable.

GRÁFICOS BOXPLOT

Variabilidad Mensual de la Productividad diaria



DESVIACIÓN ENTRE MODELO Y OBSERVACIÓN

Si tenemos un modelo que aproxima el comportamiento de una variable aleatoria, definimos el error cuadrático medio como:

$$RMSE^2 = \int_{-\infty}^{\infty} x_D^2 \cdot f_{X_D}(x) dx = \sigma_{X_D}^2 + \mu_{X_D}^2$$

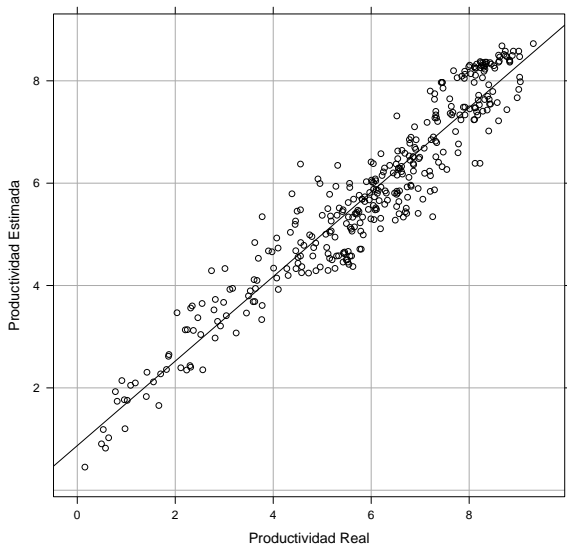
siendo X_D la variable aleatoria que define la desviación entre modelo y observación.

El coeficiente de correlación entre dos conjuntos de datos es una medida numérica de la relación *lineal* entre los dos conjuntos (si la relación no es lineal, este coeficiente no sirve):

$$r = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{\sigma_X} \right) \cdot \left(\frac{y_i - \bar{y}}{\sigma_Y} \right)$$

GRÁFICOS DE DISPERSIÓN

Estimación de Productividad Diaria



ÍNDICE

- 1 ESTADÍSTICA
- 2 NATURALEZA DE LA RADIACIÓN SOLAR
- 3 CÁLCULO DE COMPONENTES DE RADIACIÓN SOLAR
- 4 CÁLCULO DE RADIACIÓN SOBRE GENERADORES
 - Irradiancia a partir de irradiación diaria
 - Transformación al plano del generador
 - Incertidumbre
 - Pérdidas angulares y por suciedad
- 5 RADIACIÓN EFECTIVA SEGÚN TIPOLOGÍAS
 - Comparación entre tipologías
- 6 APLICACIÓN A SISTEMAS ESTÁTICOS
 - Ángulo de inclinación óptimo

IRRADIANCIA E IRRADIACIÓN

IRRADIANCIA es la densidad de *potencia* de radiación solar incidente en una superficie. Unidades $\frac{W}{m^2}$, $\frac{kW}{m^2}$

IRRADIACIÓN es la densidad de *energía* de radiación solar incidente en una superficie. Unidades: $\frac{Wh}{m^2}$, $\frac{kWh}{m^2}$

RADIACIÓN EXTRA-ATMOSFÉRICA

- La radiación que alcanza la superficie de la atmósfera es radiación directa del Sol.
- **Constante solar** $B_0 = 1367 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ (irradiancia solar sobre la superficie normal al vector solar en límite superior de la atmósfera terrestre)
- **Irradiancia extra-atmosférica**
 - $B_0(0) = B_0 \cdot \epsilon_0 \cdot \cos \theta_{zs}$
 - $B_{0d}(0) = -\frac{T}{\pi} B_0 \epsilon_0 \cdot (\omega_s \sin \phi \sin \delta + \cos \delta \cos \phi \sin \omega_s)$
(ω_s en radianes)

RADIACIÓN EXTRA-ATMOSFÉRICA

- Es posible demostrar que el **promedio mensual** de esta irradiación diaria **coincide numericamente** 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	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
d_n	17	45	74	105	135	161	199	230	261	292	322	347

INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LA ATMÓSFERA

- **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 CO₂)
- **Modificación de la distribución espacial** (dispersión por partículas)
 - Difusión de Rayleigh (longitud de onda mucho mayor que tamaño de partícula) - Capas altas - Color Azul
 - Difusión de Mie (longitud de onda de magnitud similar a tamaño de partícula) - Capas bajas
 - Difusión no selectiva (longitud de onda mucho menor que tamaño de partícula)

COMPONENTES DE LA RADIACIÓN SOLAR

- **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)

CÓMO SE ESCRIBE

FORMA, TIEMPO, LUGAR

*Forma*_{tiempo,promedio}(*lugar*)

$G_{d,m}(0), D_h(\alpha, \beta), B_{0d}(n), B(\beta)$

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 ($AM=1$)
- $AM = 1 / \cos \theta_{zs}$

- **Índice de claridad**

- Relación entre la radiación global en el plano horizontal y la radiación extra-atmosférica 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)

ÍNDICE DE CLARIDAD

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. $K_{Ta} = G_a/B_{0a} = \dots$

ÍNDICE

- 1 ESTADÍSTICA
- 2 NATURALEZA DE LA RADIACIÓN SOLAR
- 3 CÁLCULO DE COMPONENTES DE RADIACIÓN SOLAR
- 4 CÁLCULO DE RADIACIÓN SOBRE GENERADORES
 - Irradiancia a partir de irradiación diaria
 - Transformación al plano del generador
 - Incertidumbre
 - Pérdidas angulares y por suciedad
- 5 RADIACIÓN EFECTIVA SEGÚN TIPOLOGÍAS
 - Comparación entre tipologías
- 6 APLICACIÓN A SISTEMAS ESTÁTICOS
 - Ángulo de inclinación óptimo

RADIACIÓN COMO PROCESO ESTOCÁSTICO

- La **distribución de valores** que presenta la radiación solar durante un periodo está **determinada por el valor promedio de la radiación durante ese periodo**. Por ejemplo, conocer la media mensual de la radiación solar diaria en un determinado lugar permite saber cómo se comportará la radiación diaria durante ese mes
- El índice de claridad para un día concreto **sólo está influido** por el índice de claridad del **día anterior**.

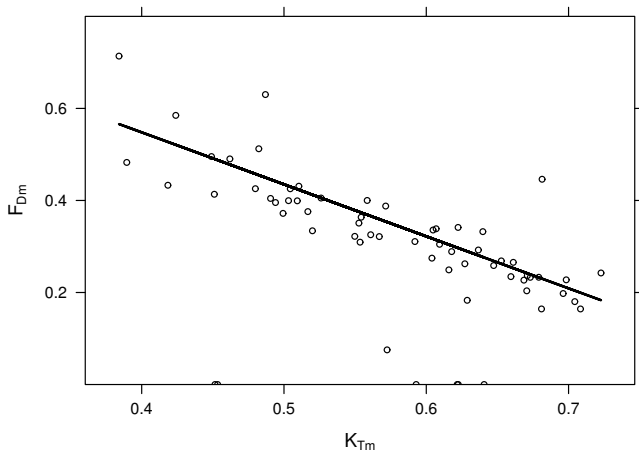
ESTIMACIÓN DE DIRECTA Y DIFUSA

- 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 cuasi-universal)

CORRELACIONES F_D Y K_T

ECUACIÓN DE PAGE (MEDIAS MENSUALES)

$$F_{Dm} = 1 - 1,13 \cdot K_{Tm}$$



CORRELACIONES F_D Y K_T

Por ejemplo, un lugar que recibe en el plano horizontal $3150 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2}$ de media mensual de irradiación global diaria en un mes que corresponde a media mensual de irradiación extraterrestre diaria de $4320 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2}$ tendrá, en ese mes, un índice de claridad mensual $K_{Tm} = \frac{3150}{4320} = 0,73$

Según la correlación de Page, una fracción de difusa $F_{Dm} = 1 - 1,13 \cdot 0,73 = 0,175$.

La media mensual de radiación difusa diaria será

$$D_{d,m}(0) = 0,175 \cdot 3150 = 551,6 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2}.$$

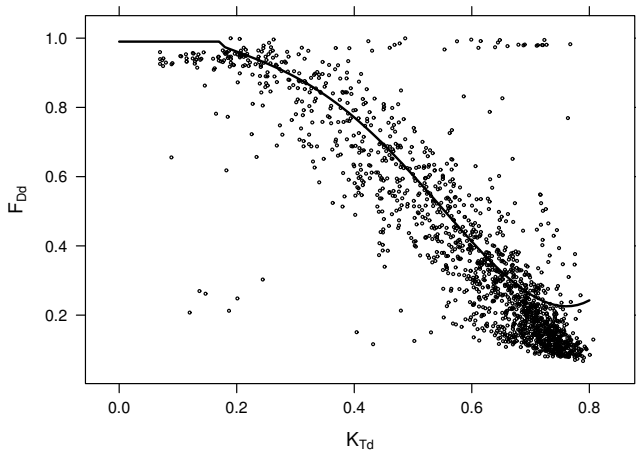
La radiación directa en el plano horizontal será

$$B_{d,m}(0) = 3150 - 551,6 = 2598,4 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2}.$$

CORRELACIONES F_D Y K_T

ECUACIÓN DE COLLARES-PEREIRA Y RABL (VALORES DIARIOS)

$$F_{Dd} = \begin{cases} 0,99 & K_{Td} \leq 0,17 \\ 1,188 - 2,272 \cdot K_{Td} + 9,473 \cdot K_{Td}^2 - 21,856 \cdot K_{Td}^3 + 14,648 \cdot K_{Td}^4 & K_{Td} > 0,17 \end{cases}$$



ESTIMACIÓN DE DIRECTA Y DIFUSA

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

DATOS DE RADIACIÓN

- Medidas procedentes de **estaciones meteorológicas**
 - Piranómetro: Radiación Global
 - Pirheliómetro: Radiación Directa
- Estimaciones basadas en **imágenes de satélite**

DATOS DE RADIACIÓN

ESTACIONES TERRESTRES (SELECCIÓN)

- Red SIAR:
<http://eportal.magrama.gob.es/websiar/Inicio.aspx>
- Xunta de Galicia: <http://www2.meteogalicia.es/galego/observacion/estacions/estacions.asp>
- Castilla - La Mancha:
<http://crea.uclm.es/siar/datmeteo/>
- Navarra: <http://meteo.navarra.es/estaciones/mapadeestaciones.cfm>
- Cataluña: <http://www.meteo.cat/xema/AppJava/SeleccioPerComarca.do>
- NREL-MIDC: <http://www.nrel.gov/midc/>
- HELIOS-IES (Madrid): <http://helios.ies-def.upm.es/>

DATOS DE RADIACIÓN

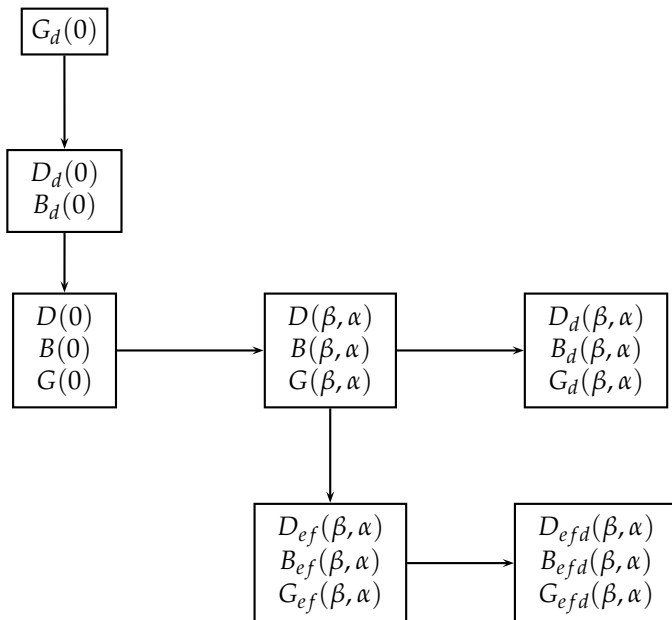
IMÁGENES DE SATÉLITE

- EUMETSAT Satellite Application Facility on Climate Monitoring <http://www.cmsaf.eu>
- NASA: <http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?>
- PVGIS: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>
- SODA-Esra: http://www.soda-is.com/eng/services/services_radiation_free_eng.php

ÍNDICE

- 1 ESTADÍSTICA
- 2 NATURALEZA DE LA RADIACIÓN SOLAR
- 3 CÁLCULO DE COMPONENTES DE RADIACIÓN SOLAR
- 4 CÁLCULO DE RADIACIÓN SOBRE GENERADORES
 - Irradiancia a partir de irradiación diaria
 - Transformación al plano del generador
 - Incertidumbre
 - Pérdidas angulares y por suciedad
- 5 RADIACIÓN EFECTIVA SEGÚN TIPOLOGÍAS
 - Comparación entre tipologías
- 6 APLICACIÓN A SISTEMAS ESTÁTICOS
 - Ángulo de inclinación óptimo

IRRADIANCIA SOBRE SUPERFICIES ARBITRARIAS



ESTIMACIÓN DE IRRADIANCIA A PARTIR DE IRRADIACIÓN DIARIA

- Irradiación durante una hora coincide con el valor medio de la irradiancia durante esa hora.
- Variación solar durante una hora es baja: valor de irradiancia equivalente a valor de irradiación.
- Relación entre irradiancia e irradiación extra-terrestre deducible teóricamente:

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

ESTIMACIÓN DE IRRADIANCIA A PARTIR DE IRRADIACIÓN DIARIA

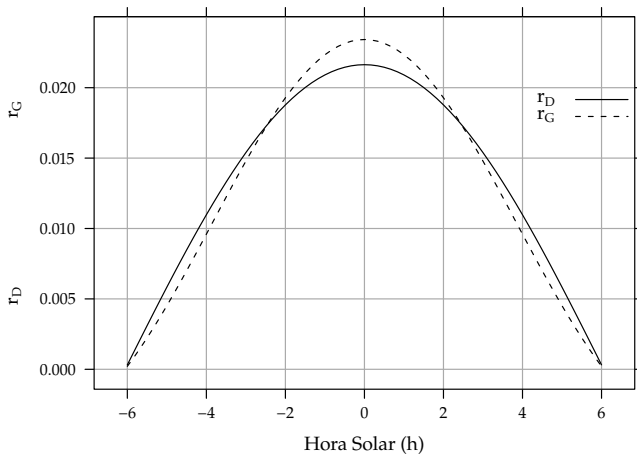
$$r_D = \frac{D(0)}{D_d(0)} = \frac{B_o(0)}{B_{0d}(0)}$$

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

$$a = 0,409 - 0,5016 \cdot \sin(\omega_s + \frac{\pi}{3})$$

$$b = 0,6609 + 0,4767 \cdot \sin(\omega_s + \frac{\pi}{3})$$

ESTIMACIÓN DE IRRADIANCIA A PARTIR DE IRRADIACIÓN DIARIA



ESTIMACIÓN DE IRRADIANCIA A PARTIR DE IRRADIACIÓN DIARIA

CALCULAR la irradiancia global y la irradiancia difusa en el plano horizontal

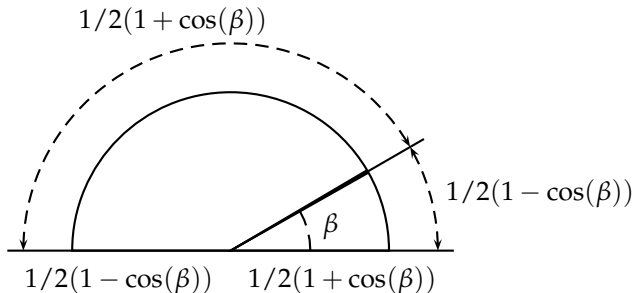
2 horas antes del mediodía del día 261
en un lugar con latitud $\phi = 40^\circ\text{N}$ y
con media mensual de irradiancia
global diaria horizontal

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

IRRADIANCIA DIRECTA

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

FACTOR DE VISIÓN PARA DIFUSA



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

IRRADIANCIA DIFUSA ISOTRÓPICA

$$L(\theta_z, \psi) = \text{cte.}$$

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

IRRADIANCIA DIFUSA ANISOTRÓPICA

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

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

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

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

IRRADIANCIA DE ALBEDO

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

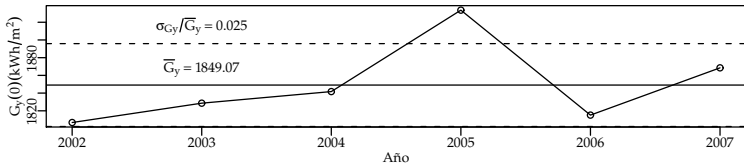
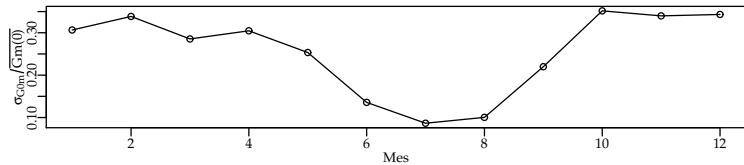
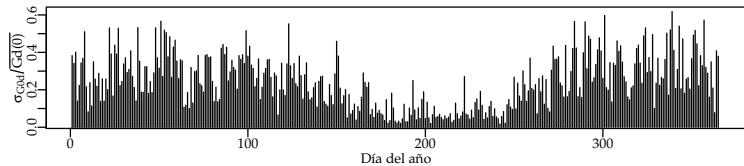
$$\rho = 0,2$$

IRRADIANCIA SOBRE PLANO INCLINADO

CALCULAR la irradiancia difusa, directa, de albedo y global, en

UN generador inclinado 30° 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 $G_{d,m}(0) = 2700 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2}$.

VARIABILIDAD INTERANUAL



INCERTIDUMBRE

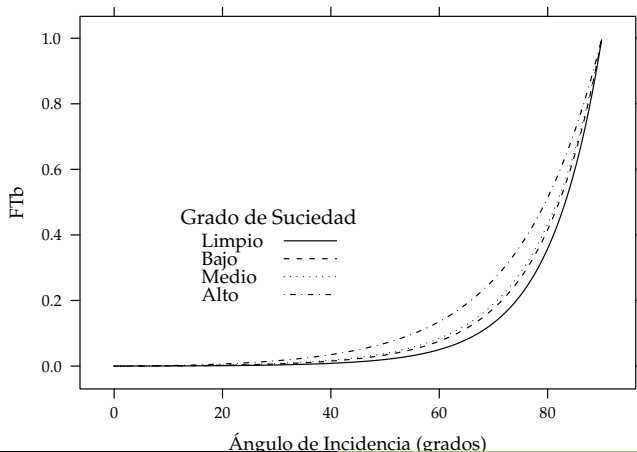
- Predicción para un (día, mes, año) *determinado*:
 - Intervalo de confianza del 95 % acotado por $1,96 \cdot \sigma_G$
- Predicción para un (día, mes, año) *promedio (durante N años)*:
 - Intervalo de confianza del 95 % acotado por $1,96 \cdot \sigma_{\overline{G}}$

$$\sigma_{\overline{G}} = \frac{\sigma_G}{\sqrt{N}}$$

RADIACIÓN DIRECTA

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

PÉRDIDAS ANGULARES PARA RADIACIÓN DIRECTA



DIFUSA Y ALBEDO

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

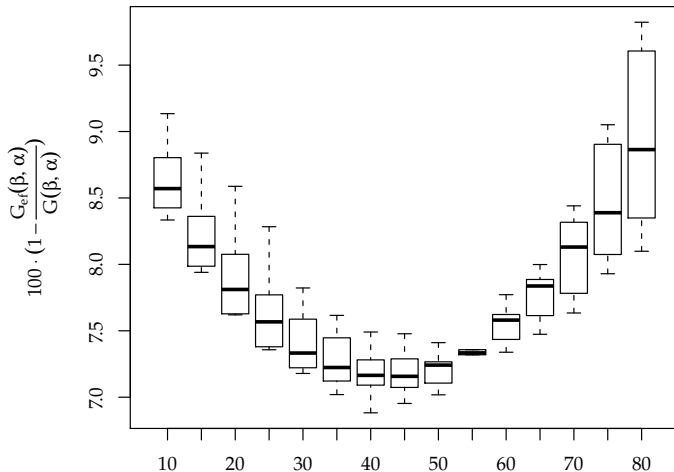
$$D_{ef}^{cir}(\beta, \alpha) = D^{cir}(\beta, \alpha) \cdot \left[\frac{T_{sucio}(0)}{T_{limpio}(0)} \right] \cdot (1 - FT_B(\theta_s))$$

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

COEFICIENTES

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

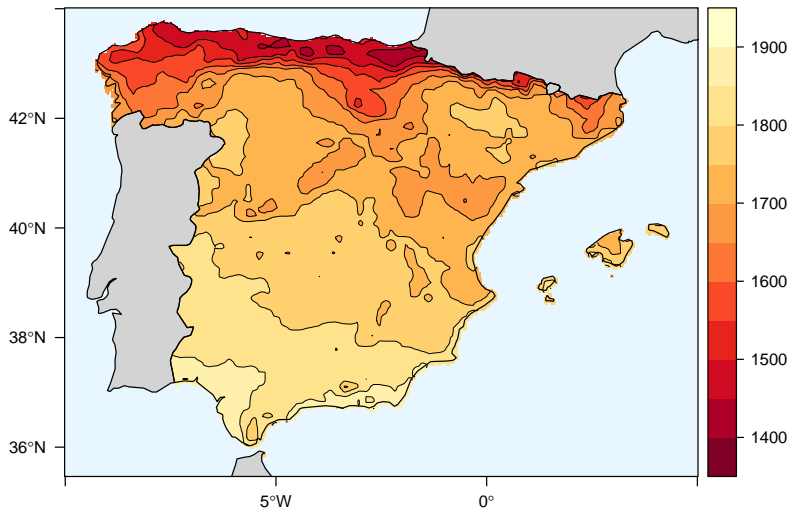
PÉRDIDAS ANUALES



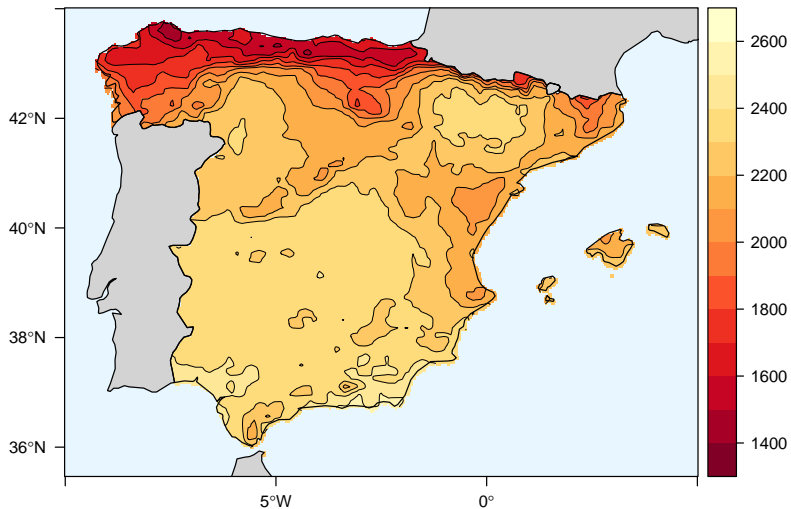
ÍNDICE

- 1 ESTADÍSTICA
- 2 NATURALEZA DE LA RADIACIÓN SOLAR
- 3 CÁLCULO DE COMPONENTES DE RADIACIÓN SOLAR
- 4 CÁLCULO DE RADIACIÓN SOBRE GENERADORES
 - Irradiancia a partir de irradiación diaria
 - Transformación al plano del generador
 - Incertidumbre
 - Pérdidas angulares y por suciedad
- 5 RADIACIÓN EFECTIVA SEGÚN TIPOLOGÍAS
 - Comparación entre tipologías
- 6 APLICACIÓN A SISTEMAS ESTÁTICOS
 - Ángulo de inclinación óptimo

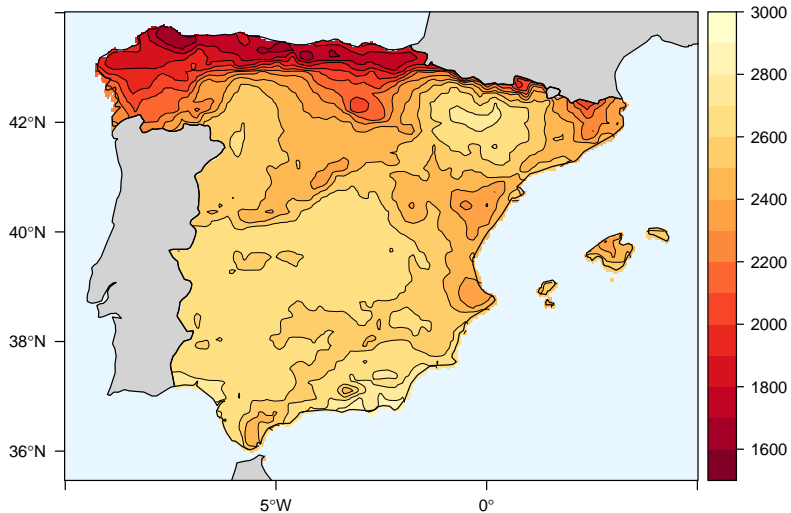
RADIACIÓN EN SISTEMA ESTÁTICO



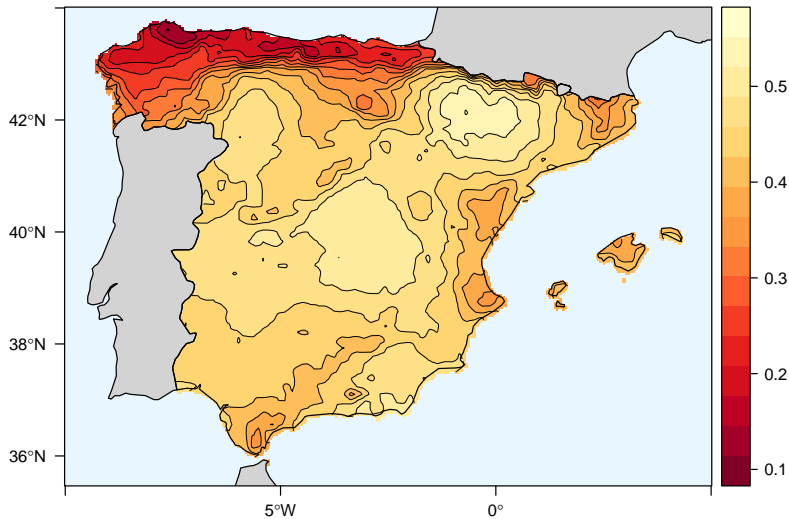
RADIACIÓN EN SEGUIMIENTO EJE HORIZONTAL



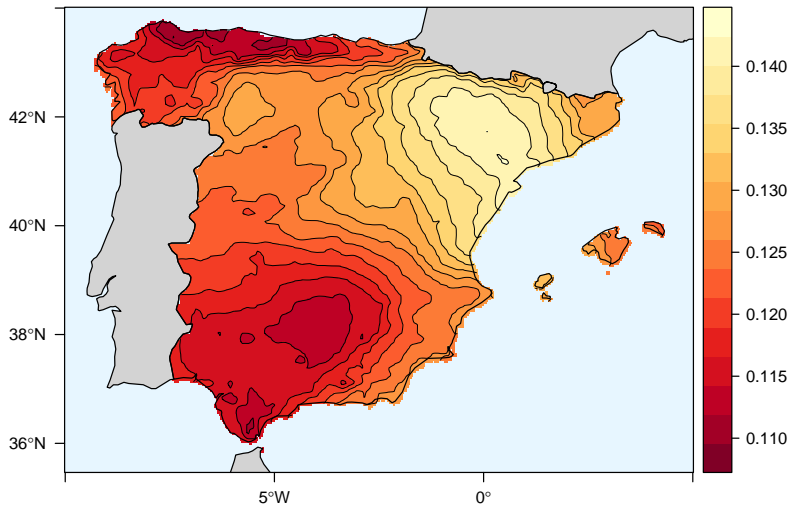
RADIACIÓN EN SEGUIMIENTO DOBLE EJE



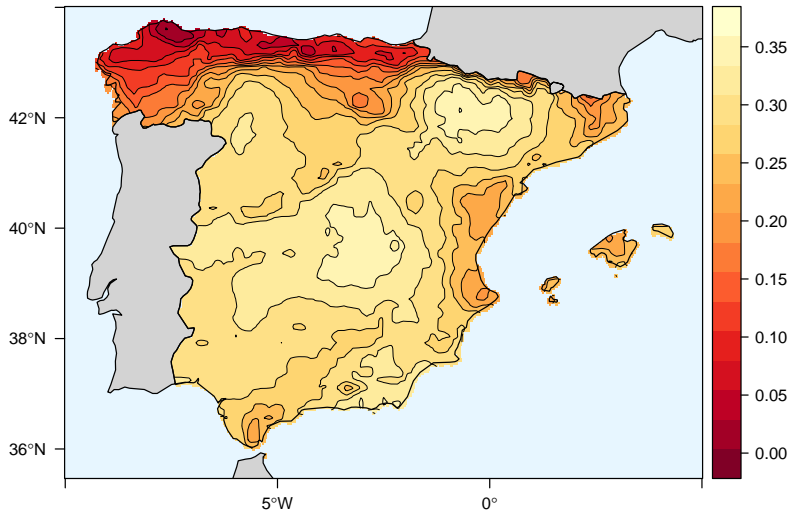
COMPARACIÓN DOBLE EJE-ESTÁTICA



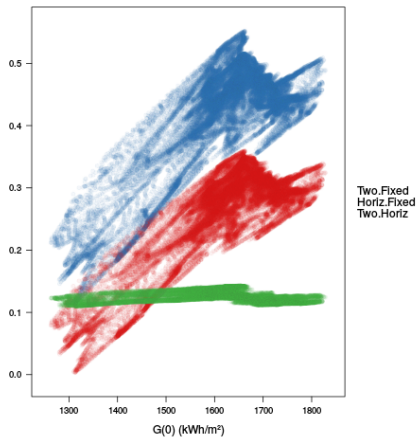
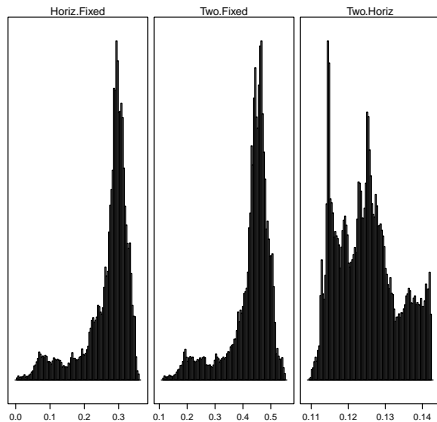
COMPARACIÓN DOBLE EJE - HORIZONTAL



COMPARACIÓN EJE HORIZONTAL - ESTÁTICA



COMPARACIÓN EJE HORIZONTAL - ESTÁTICA



ÍNDICE

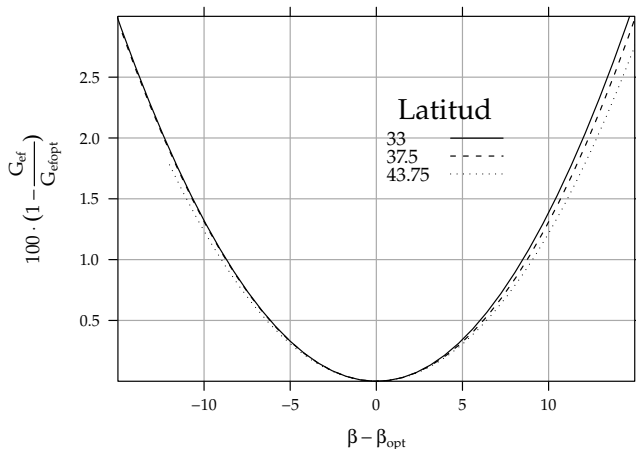
- 1 ESTADÍSTICA
- 2 NATURALEZA DE LA RADIACIÓN SOLAR
- 3 CÁLCULO DE COMPONENTES DE RADIACIÓN SOLAR
- 4 CÁLCULO DE RADIACIÓN SOBRE GENERADORES
 - Irradiancia a partir de irradiación diaria
 - Transformación al plano del generador
 - Incertidumbre
 - Pérdidas angulares y por suciedad
- 5 RADIACIÓN EFECTIVA SEGÚN TIPOLOGÍAS
 - Comparación entre tipologías
- 6 APLICACIÓN A SISTEMAS ESTÁTICOS
 - Ángulo de inclinación óptimo

INCLINACIÓN OPTIMA ESTÁTICA

$$|\phi| - \beta \approx 10^\circ$$

$$\beta_{opt} = 3,7 + 0,69 \cdot |\phi|$$

SENSIBILIDAD AL DESAPUNTAMIENTO



RADIACIÓN PARA INCLINACIÓN ÓPTIMA

$$\frac{G_{d,a}(0)}{G_{d,a}(\beta_{opt})} = 1 - 4,46 \cdot 10^{-4} \cdot \beta_{opt} - 1,19 \cdot 10^{-4} \cdot \beta_{opt}^2$$

CÁLCULO DE RADIACIÓN EFECTIVA

$$\frac{G_{efd,a}(\beta, \alpha)}{G_{d,a}(\beta_{opt})} = g_1 \cdot (\beta - \beta_{opt})^2 + g_2 \cdot (\beta - \beta_{opt}) + g_3$$
$$g_i = g_{i1}|\alpha|^2 + g_{i2}|\alpha| + g_{i3}$$

CÁLCULO PARA ESTÁTICA

$\frac{T_{sucio}(0)}{T_{limpio}(0)} = 0,97$	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$
g_{1i}	$8 \cdot 10^{-9}$	$3,8 \cdot 10^{-7}$	$-1,218 \cdot 10^{-4}$
g_{2i}	$-4,27 \cdot 10^{-7}$	$8,2 \cdot 10^{-6}$	$2,892 \cdot 10^{-4}$
g_{3i}	$-2,5 \cdot 10^{-5}$	$-1,034 \cdot 10^{-4}$	0,9314

CÁLCULO PARA ESTÁTICA

CALCULAR la irradiación anual efectiva que incide en

UN generador orientado al Sur e inclinado 20° en un lugar con latitud 30°N y una media anual de la irradiación global diaria en el plano horizontal de $5250 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2}$, suponiendo una suciedad media.

CALCULAR la irradiación anual efectiva que incide en

UN generador desorientado 20° del Sur e inclinado 40° en un lugar con latitud 50°N y una media anual de la irradiación global diaria en el plano horizontal de $5250 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2}$, suponiendo una suciedad media.