

Energía Solar Térmica - 2020

REPASO - II : Radiación solar

Agustín Laguarda

agu.laguarda@gmail.com



LES
LABORATORIO DE
ENERGÍA SOLAR



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Energía Solar Térmica - 2020

Repaso de radiación solar

Repaso basado en las notas del curso Fundamentos del Recurso Solar (G.Abal, R.Alonso-Suárez, A.Laguarda)

Notas del curso accesibles en

https://eva.fing.edu.uy/pluginfile.php/313487/mod_resource/content/1/FRS_notas_v4-0_R2_2020.pdf

Lista de ejercicios de repaso en:

<https://eva.fing.edu.uy/mod/folder/view.php?id=42267>

Por consultas de ejercicios dirigirse a
agu.laguarda@gmail.com

Energía Solar Térmica - 2020

Radiación directa y difusa

Modelos de separación

Trasporte a plano inclinado

fuentes de información disponibles

Irradiancia directa y difusa

Definiciones:

irradiancia solar global o hemisférica: G (W/m^2)
irradiancia incidente en un plano dado,
proveniente de un ángulo sólido de 2π sobre la superficie.

irradiancia solar global horizontal: G_h (W/m^2)
irradiancia solar hemisférica sobre un plano horizontal

irradiancia solar difusa: G_d (W/m^2)
irradiancia hemisférica global menos irradiancia directa.

irradiancia solar directa: G_b (W/m^2)
irradiancia solar recibida en un plano normal a la línea Tierra-Sol
desde un pequeño ángulo sólido en torno a la línea Tierra Sol.

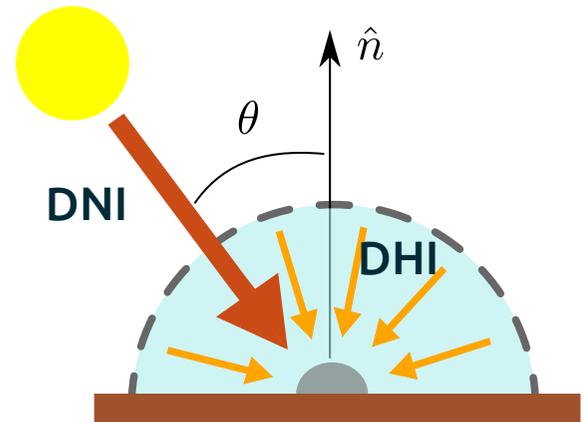
Norma UNIT-ISO: 9488-1999 sobre
el vocabulario sobre energía solar

https://eva.fing.edu.uy/pluginfile.php/200186/mod_resource/content/1/Vocabulario_UNIT-ISO.9488.1999.pdf

Irradiancia solar se descompone en:

- irradiancia **directa** en incidencia normal (G_b , DNI). Proviene de ang. sólido pequeño en la dir. del Sol
- irradiancia **difusa** en el plano horizontal (G_{dh} , DHI). Proviene de todas las demás dirs.

verifican:
$$G_h = G_b \cos \theta_z + G_{dh}$$



Medidas de irradiancia solar

Irradiancia global (GHI)

Piranómetros



- basados en termocupla-efecto Seebeck
- no requiere alimentación
- robusto y de alta estabilidad
- respuesta espectral plana
- alto costo
- respuesta 'lenta' (varios segundos)
- requiere limpieza periódica de la cúpula

Radiómetro fotovoltaico



- basado en efecto fotoeléctrico
- bajo costo
- respuesta instantánea
- respuesta no uniforme en espectro de interés
- error condicionado a distribución espectral (altura solar, nubosidad, etc.)

Medidas de irradiancia solar

Irradiancia difusa (DHI)

piranómetro con banda de sombra



radiómetro con máscara



- temperatura estabilizada
- procesamiento interno
- mide GHI y DHI, estima DNI

Otros métodos: - esfera de sombra (es requiere seguimiento solar de precisión)
-banda rotante (requiere software de control y medidas auxiliares)

Con GHI y DHI se puede **estimar** DNI con la relación de clausura.

Medidas de irradiancia solar

Irradiancia directa (DNI)

pirheliómetro



piranómetro de alta calidad
con tubo colimador

-se monta en seguidor solar
-alta precisión

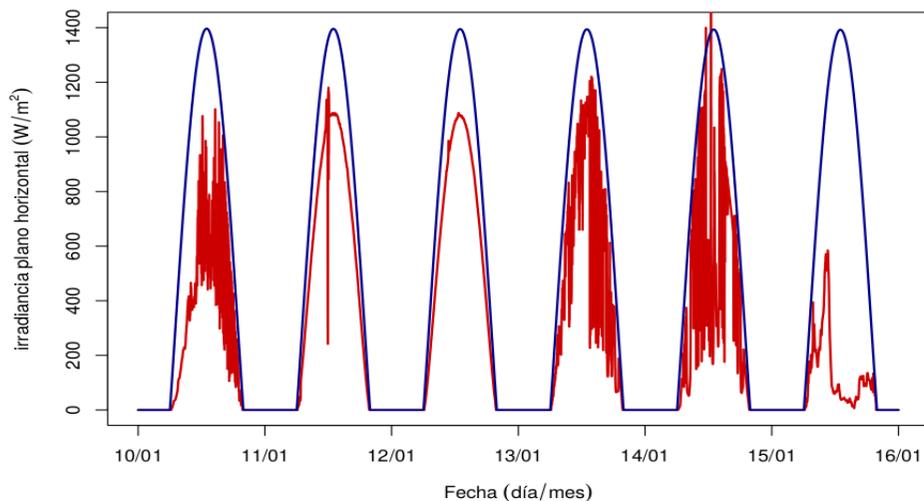
error ~2%



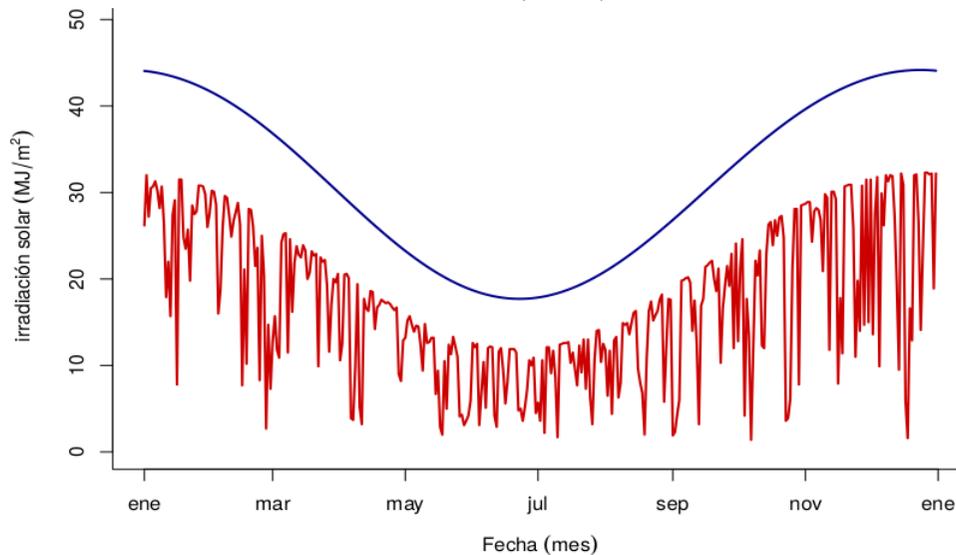
seguidor solar

Medidas de irradiancia solar

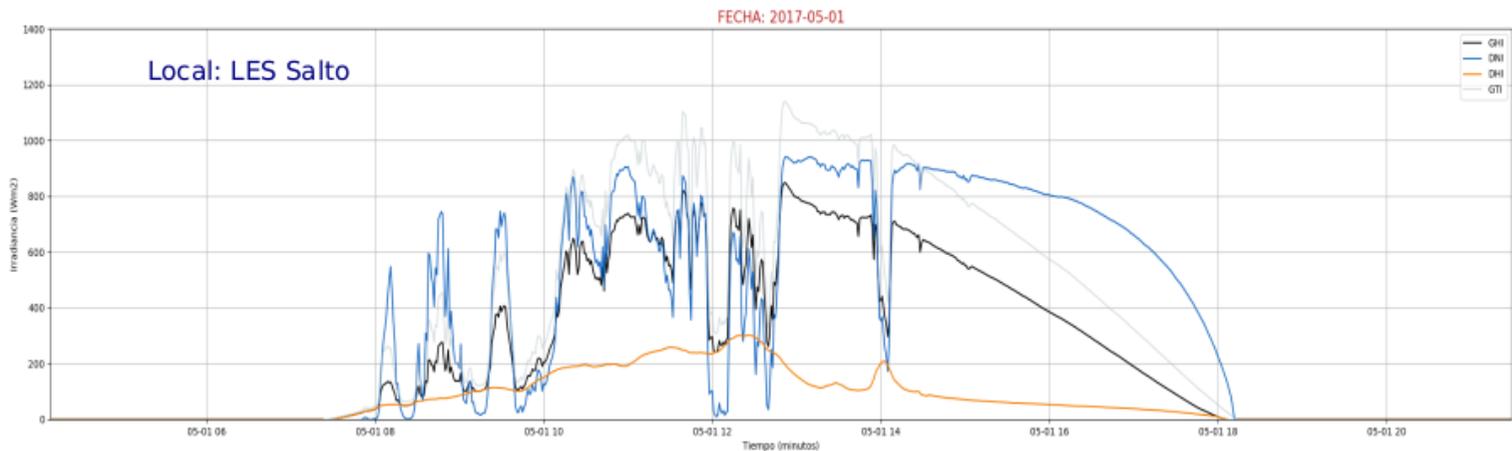
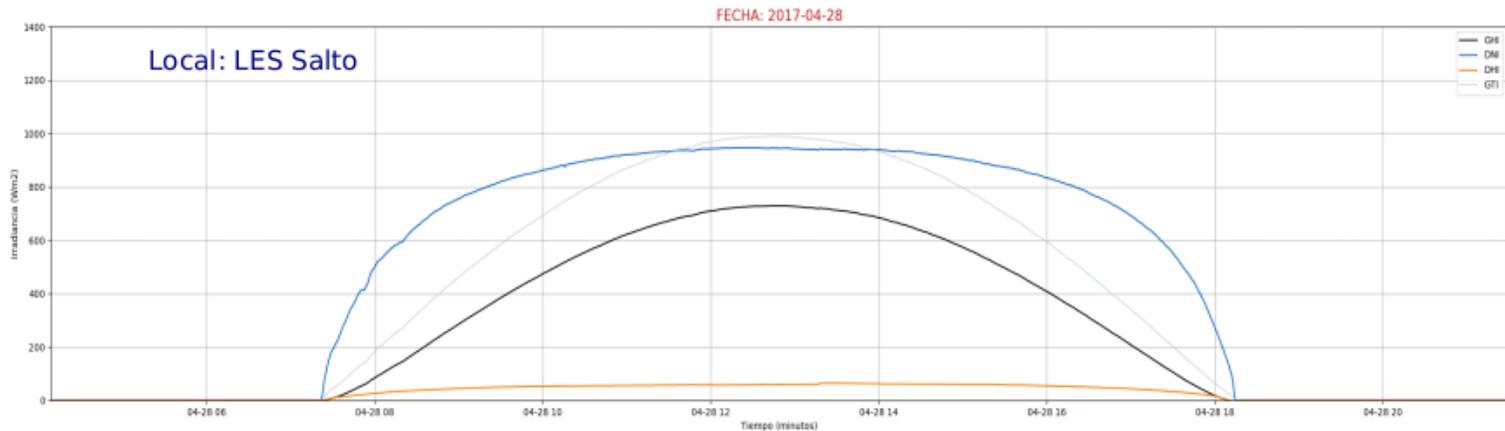
Irradiancia global



Irradiación diaria



Medidas de irradiancia solar



Irradiancia directa y difusa

relación de clausura

$$G_h = G_{bh} + G_{dh} = G_b \cos \theta_z + G_{dh}$$

variables
adimensionadas

$$k_t = \frac{G_h}{G_s F_n \cos \theta_z}$$

índice de claridad

$$\tau_b = \frac{G_b}{G_s F_n}$$

transmitancia
directa

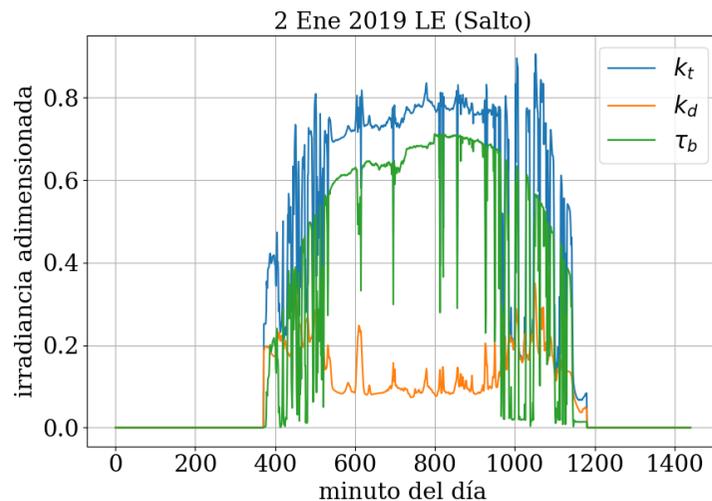
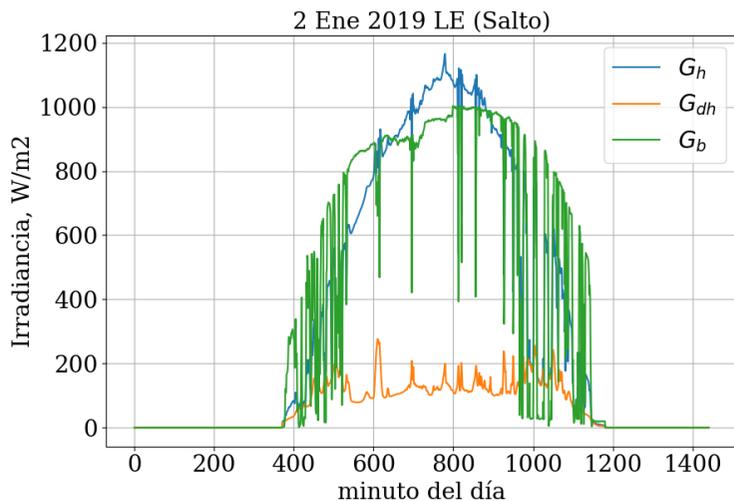
$$k_d = \frac{G_{dh}}{G_s F_n \cos \theta_z}$$

índice de claridad
difuso

Se pueden definir a nivel instantáneo (irradiancia) o en cierto intervalo de tiempo (irradiación) como 10 minutal, horaria, diaria, mensual, etc.

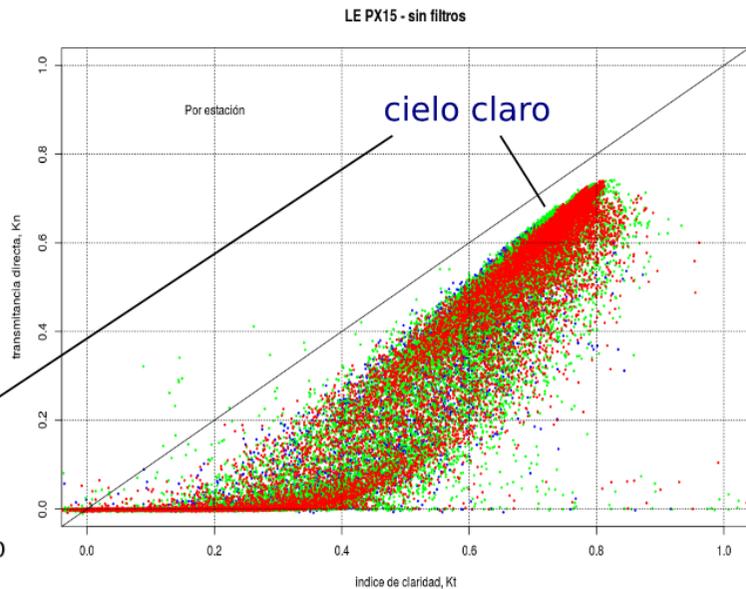
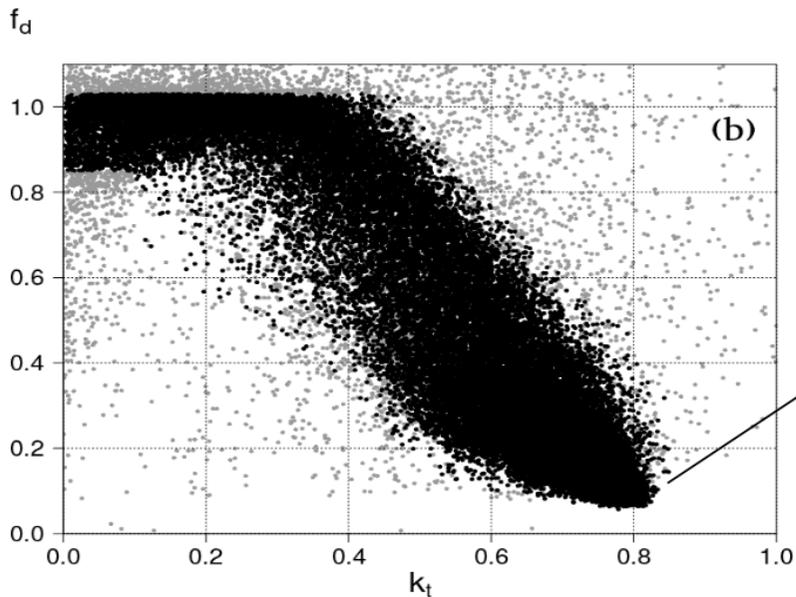
adimensionadas

se verifica: $k_t = \tau_b + k_d$



Irradiancia directa y difusa

comportamiento típico



Energía Solar Térmica - 2020

Radiación directa y difusa

Modelos de separación

Trasporte a plano inclinado

fuentes de información disponibles

modelos de separación

Sirven para estimar G_{dh} y G_b a partir de información de G_h y otras variables
En general son el paso previo al transporte a plano inclinado.
Contribuyen a la incertidumbre de la estimación del recurso sobre un plano inclinado.

Vinculan en forma fenomenológica a la fracción difusa (f_d) con otras variables disponibles

G_h, f_d
medido o
estimado satelital modelo de
separación

$$\xrightarrow{\begin{aligned} f_d &= \frac{G_{dh}}{G_h} \\ G_h &= G_b \cos \theta_z + G_{dh} \end{aligned}}$$

$$\begin{aligned} G_{dh} &= f_d G_h \\ G_b &= \frac{1 - f_d}{\cos \theta_z} G_h \end{aligned}$$

Son ajustes de carácter local. (no hay modelos universales)

La escala temporal (minutal, horaria, diaria, mensual) es parte relevante del modelo

Hay cientos de modelos para varias zonas climáticas mundiales

(ver: Gueymard-2016 http://les.edu.uy/FRS/extras/Gueymard_RA_Difusa_SE2015.pdf)

Son ajustes de carácter local. (no hay modelos universales)

A nivel local, para Uruguay y la región vecina, hemos caracterizado 10 modelos a nivel horario y dos a nivel diario y mensual

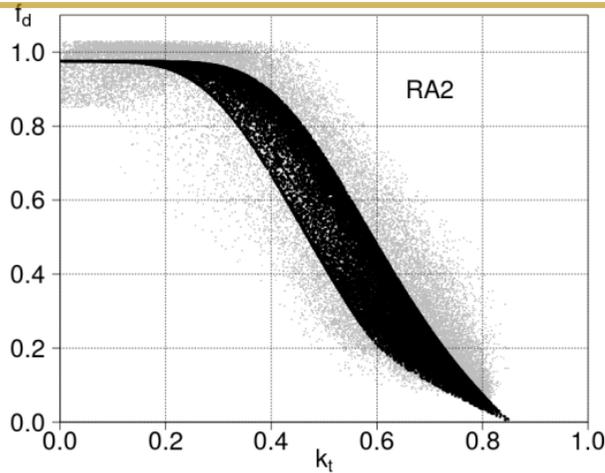
(ver: Abal-2017 http://les.edu.uy/papers/SE2016_diffuse-fraction-models.pdf)

modelos de separación

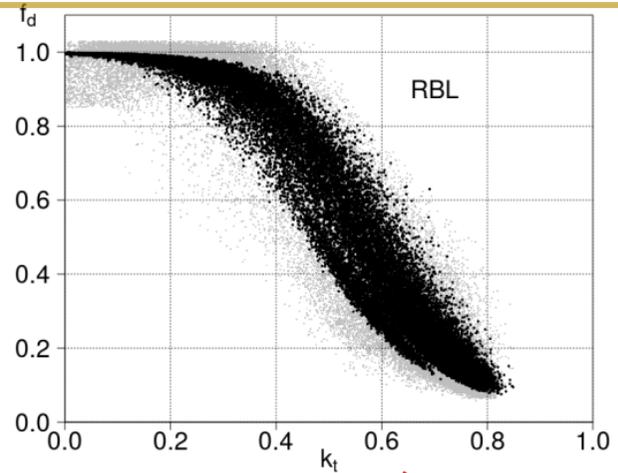
Entre los 10 modelos horarios estudiados y ajustados en la región se destacan:

$$f_d^{RA} = a_0 - a_1 e^{-\exp(a_2 + a_3 k_t + a_4 m + a_5 k_t^2 + a_6 m^2)}$$

$$f_d^{RBL} = [1 + \exp(a_0 + a_1 k_t + a_2 T_s + a_3 \alpha_s + a_4 K_t + a_5 \psi)]^{-1}$$



(a) Ruiz-Arias con 2 variables.



(no es operacional)

(b) Ridley, Boland y Laurent (RBL).

modelo	tipo	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
RA2s	original	0.98	-1.02	2.88	-5.59	-0.11	-	-
RA2s	local	0.97	-1.11	3.38	-5.84	-0.13	-	-

modelo	tipo	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
RBL	original	-5.38	6.63	0.01	-0.01	1.75	1.31
RBL	local	-5.60	7.63	0.01	-0.01	1.12	2.06

modelo	original		localmente ajustado		
	rMBD (%)	rRMSD (%)	rMBD (%)	rRMSD (%)	
RA2s	-3.2	21.0	+0.7	19.5	recomendado
RBL	+7.6	20.7	+1.3	18.1	

Energía Solar Térmica - 2020

Radiación directa y difusa

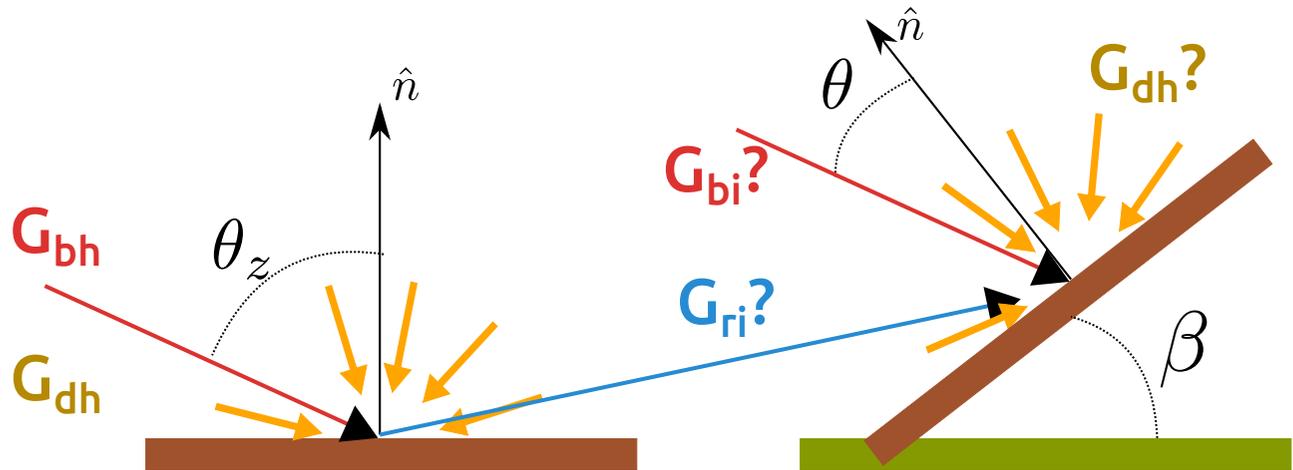
Modelos de separación

Trasporte a plano inclinado

fuentes de información disponibles

Transporte a plano inclinado

¿Cómo se calcula la irradiancia sobre un plano inclinado?



$$G_h = G_{bh} + G_{dh}$$

$$G_i = G_{bi} + G_{di} + G_{ri}$$

global sobre
el plano horizontal

directa

difusa

global sobre
el plano inclinado

directa

difusa

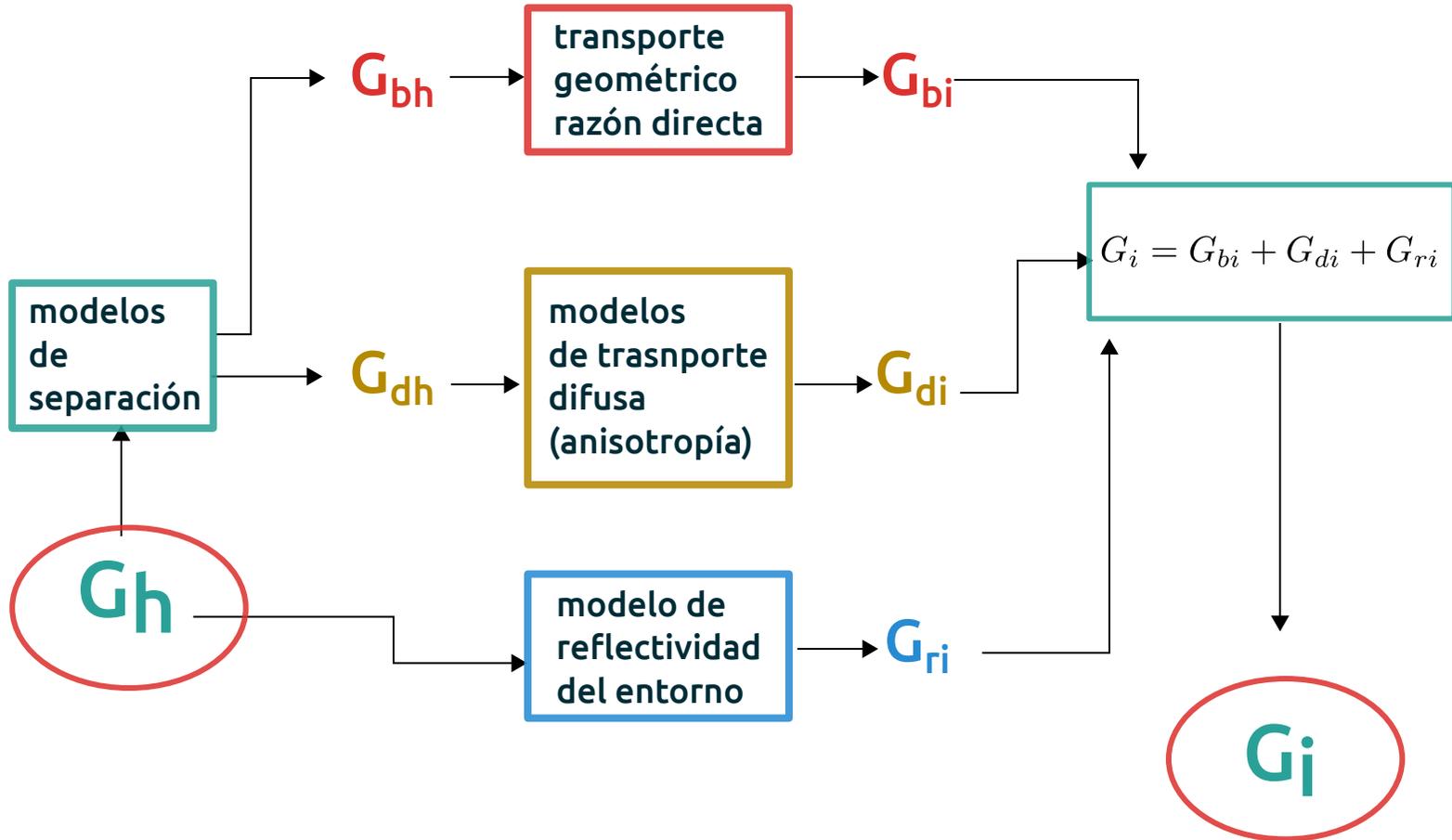
reflejada

La superficie inclinada queda definida por β y γ (orientación acimutal)

En general, en aplicaciones en el HS, la orientación es al Norte ($\gamma=0$)

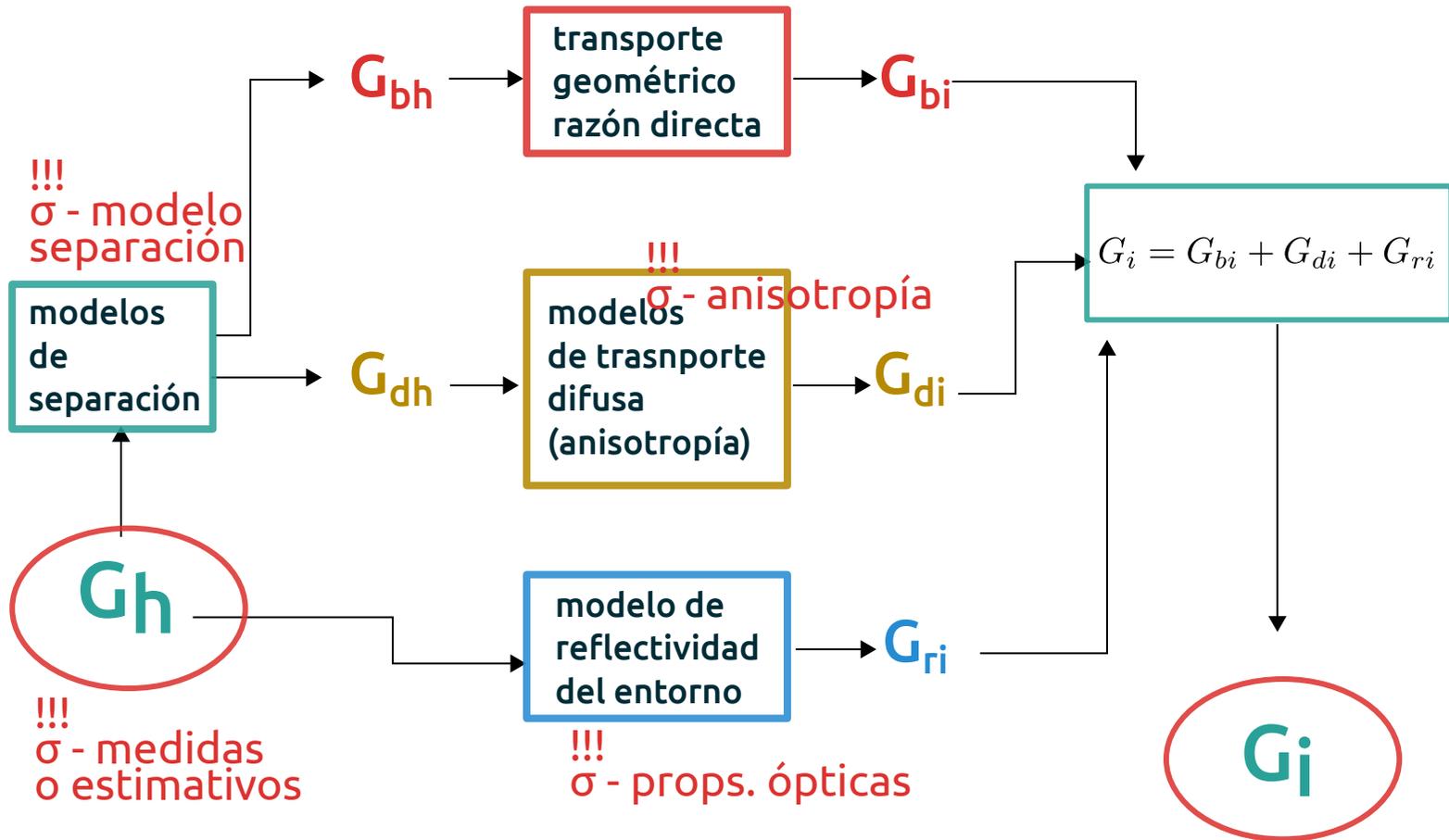
Transporte a plano inclinado

Estrategia



Transporte a plano inclinado

Estrategia



Transporte radiación directa

componente directa en
plano inclinado:

$$G_{bi} = G_b \cos \theta = G_{bh} \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z}$$

se define la razón directa:
(positivo, adimensional)

$$r_b = \frac{G_{bi}}{G_{bh}} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z}$$

$r_b = 0$ de otro modo

$\cos \theta > 0$ Sol sobre superficie

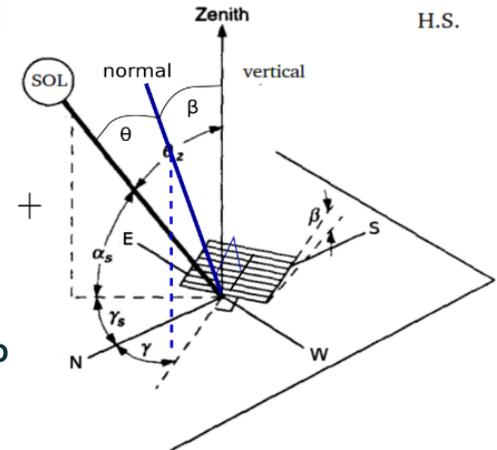
$\cos \theta_z > 0$ Sol sobre horizonte

Comentarios:

- se calcula geoméricamente
- la razón directa de un plano horizontal es 1
- la de un plano arbitrario puede ser mayor o menor que 1
- su valor puede diverger a la salida/puesta del sol
- depende de la orientación de la superficie y
- de la ubicación del observador (lat. lon.) hora del día y día del año

$$\cos \theta = [\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega] \cos \beta +$$
$$[\sin \delta \cos \phi - \cos \delta \sin \phi \cos \omega] \cos \gamma +$$
$$[\cos \delta \sin \omega \sin \gamma] \sin \beta$$

(si $\beta=0$ se tiene θ_z)



Transporte radiación directa

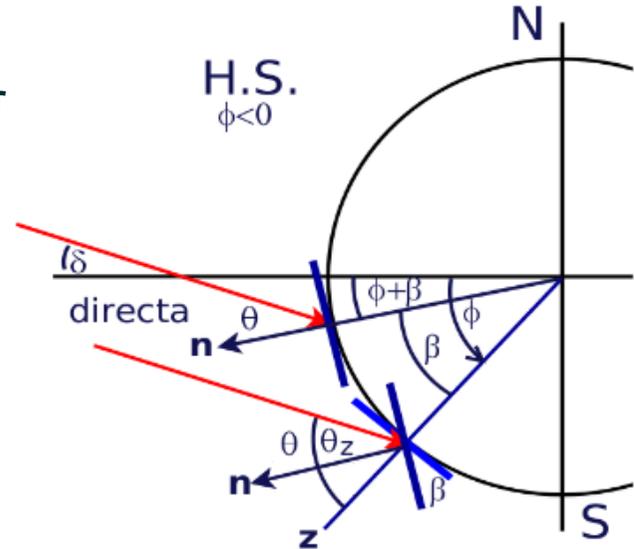
caso usual: superficie orientada al Ecuador

$$\gamma = \pi \quad (\text{HN}) \qquad \gamma = 0 \quad (\text{HS})$$

dos opciones:

- i) hacer el cálculo genérico imponiendo el valor del ángulo acimutal
- ii) utilizar una latitud equivalente

$$\phi' = \phi + s\beta \quad \begin{array}{l} \text{HS: } s=+1 \\ \text{HN: } s=-1 \end{array}$$



opción ii:

$$r_b = \frac{\cos \phi' \cos \delta \cos \omega + \sin \phi' \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta}$$

$$G_{bi} = r_b(\beta) \times G_{bh}$$

Irradiancia reflejada en la superficie

Suposiciones: solo el suelo refleja
el suelo es un plano infinito
es un reflector ideal (isotrópico) de reflectividad ρ_g

Factor de vista reflector-suelo (F_{rs}): Es la porción del campo visual del colector ocupada por el suelo.

Factor de vista reflector-cielo (F_{rc}): Es la porción del campo visual del colector ocupada por el cielo.

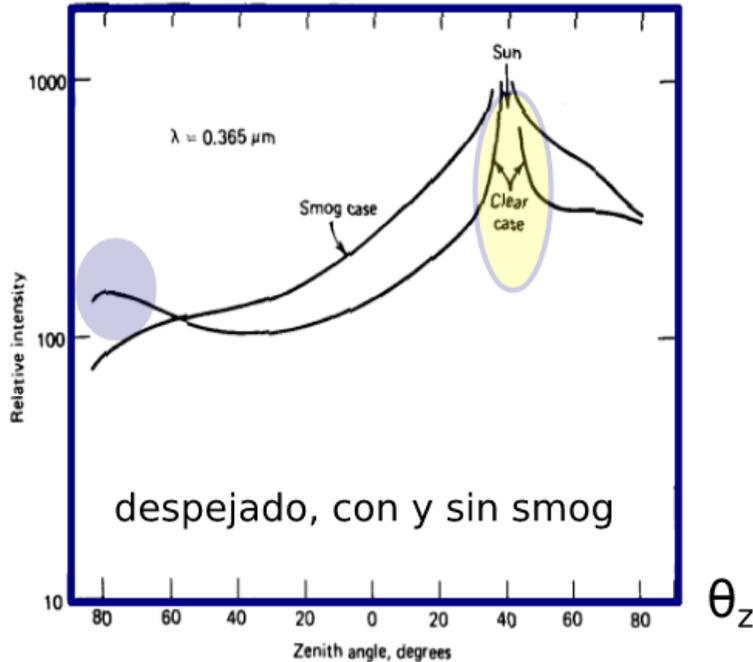
Se puede demostrar que: $F_{rs} = \frac{1}{2}(1 - \cos \beta)$ $F_{rc} = \frac{1}{2}(1 + \cos \beta)$

Superficie	ρ_g
nieve fresca	0,75
arena blanca	0,70
paredes claras (pintura clara, reboque o bloques claros, etc)	0,60
paredes oscuras (ladrillo o pintura oscura)	0,27
pedregullo	0,20
bitumen, asfalto	0,13
pasto verde	0,26
pasto seco	0,20
hojas secas	0,30
cemento armado antiguo	0,22
pintura negra	0,10
plantíos, cultivos maduros	0,26
camino de tierra	0,04
suelo arcilloso	0,14
superficies de agua (ángulo de incidencia grande)	0,07

$$G_{ri} = G_h \rho_g \frac{1 - \cos \beta}{2}$$

Transporte de radiación difusa

Radiancia difusa en caso de ausencia de nubes en dos casos.



En condiciones cubiertas es aproximadamente isotrópica

Transporte de radiación difusa

Si la radiación difusa fuera isotrópica el problema se simplifica:

$$G_{di}^{iso} = G_{dh} \frac{1 + \cos \beta}{2}$$

Si sumamos las tres componentes con las hipótesis mencionadas tenemos el modelo isotrópico:

$$G_i^{iso} = r_b G_{bh} + G_{dh} \frac{1 + \cos \beta}{2} + G_h \rho_g \frac{1 - \cos \beta}{2}$$

Definiendo la razón global, $r_i = G_i/G_h$, tenemos una expresión adimensionada:

$$r_i^{iso} = r_b(1 - f_d) + f_d \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho_g \frac{1 - \cos \beta}{2}$$

El modelo isotrópico es simple y robusto, pero subestima la irradiancia en plano inclinado. La mayor causante es que la radiación difusa no es isotrópica sino que tiene una gran componente en la dirección circumsolar.

Transporte de radiación difusa

Modelo Hay - Davies

Tiene en cuenta la anisotropía circumsolar, cuantificada con un índice A_i (igual a la transmitancia directa). Es decir, asume que una porción A_i de la irradiancia difusa proviene de la dirección del Sol, por lo que puede ser tratada como directa.

$$A_i = \tau_b = \frac{G_b}{G_s F_n} = \frac{G_{bh}}{G_s F_n \cos \theta_z}$$

en condiciones nubladas $A_i = 0$
en condiciones despejadas $A_i \sim 0.85$

La irradiancia difusa en plano inclinada se estima como

$$G_{di} = \underbrace{(1 - A_i) G_{dh} \frac{1 + \cos \beta}{2}}_{\text{isotrópico}} + \underbrace{A_i G_{dh} r_b}_{\text{circumsolar}}$$

Sumando los tres términos, y dividiendo por G_h se puede expresar la razón global para el modelo de Hay-Davies:

$$r_i^{HD} = r_b(1 - \tilde{f}_d) + \tilde{f}_d \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho_g \frac{1 - \cos \beta}{2}$$

Incluyendo la definición de fracción difusa modificada, el modelo HD adquiere la misma forma que el modelo isotrópico

$$\tilde{f}_d = f_d(1 - A_i)$$

Transporte de radiación difusa

Modelo Hay - Davies - Klutcher - Reindl

Se agrega a HD la anisotropía del horizonte con un factor empírico f .

$$f = \sqrt{1 - \tilde{f}_d}$$

en condiciones nubladas $f = 0$

en condiciones despejadas $f \sim 0.9$

La irradiancia difusa en plano inclinada se estima como:

$$G_{di}^{HDKR} = \underbrace{(1 - A_i)G_{dh} \frac{1 + \cos \beta}{2}}_{\text{isotrópico}} \left[\underbrace{1 + f \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right)}_{\text{horizonte}} \right] + \underbrace{A_i G_{dh} r_b}_{\text{circumsolar}}$$

Sumando los tres términos, y dividiendo por G_h se puede expresar la razón global para el modelo HDKR:

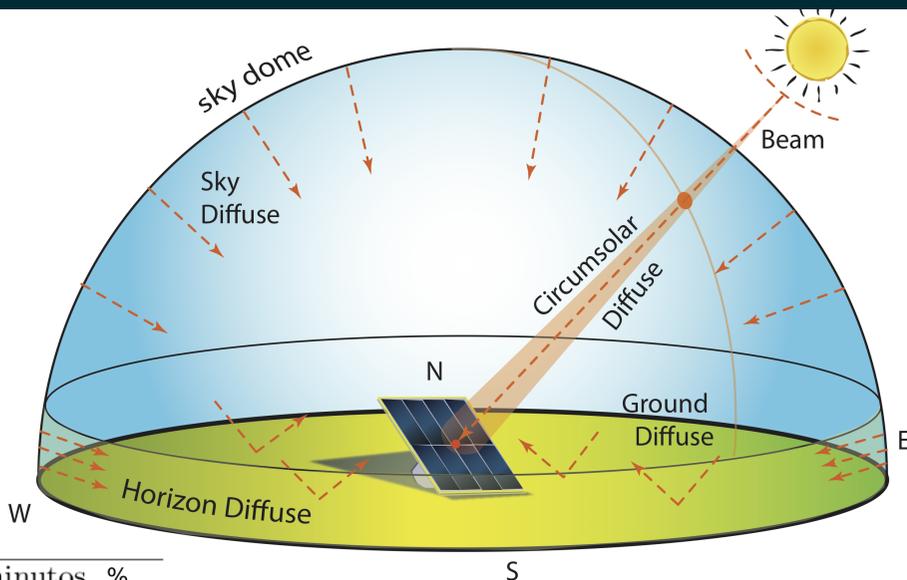
$$r_i^{HDKR} = r_b(1 - \tilde{f}_d) + \frac{1 + \cos \beta}{2} \left[1 + f \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] \tilde{f}_d + \frac{1 - \cos \beta}{2} \rho_g$$

$$G_i = G_h \times r_i$$

Modelos de transporte - desempeño

existen versiones de los modelos a nivel diario o mensual (ver notas FRS por más info.)

a nivel horario o intradiario...



Trabajo local en curso (tesis Inti Piccioli)

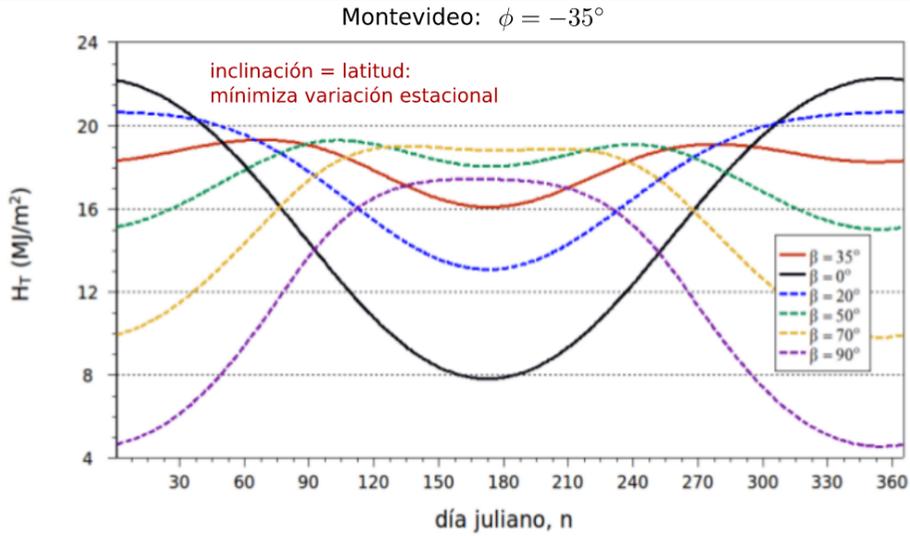
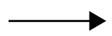
modelo	15 minutos %		60 minutos %	
	rMBD	rRMSD	rMBD	rRMSD
Isotrópico	-3.2	5.0	-2.6	4.5
HD	-1.4	3.3	-1.2	2.9
HDKR	-1.3	3.2	-1.1	2.9
media I_i	535.1 W/m ²		532.4 W/m ²	

- incertidumbre característica entre 3 y 5%. Incertidumbre baja, si se conoce G_b y G_{dh} .
- los modelos considerados subestiman la irradiación en PI
- si se usa un modelo de separación directa-difusa, la incertidumbre introducida afecta poco al modelo isotrópico que es mas robusto.

Modelos de transporte

Algunos resultados en TOA
(sin efectos de nubosidad y clima locales)

Irradiación diaria

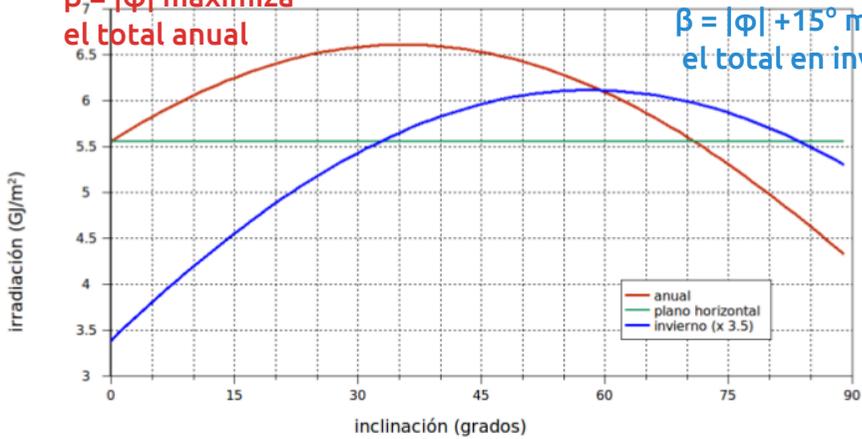


Irradiación total anual en plano inclinado

Suposiciones: $K_T = 0.50$, $F_d = 0.50$, $\rho_g = 0.20$

$\beta = |\phi|$ maximiza el total anual

$\beta = |\phi| + 15^\circ$ maximiza el total en invierno



← acumulado anual

Energía Solar Térmica - 2020

Radiación directa y difusa

Modelos de separación

Trasporte a plano inclinado

fuentes de información disponibles

Fuentes de información disponible

INFORMACIÓN DISPONIBLE PARA URUGUAY

MEDIDAS EN TIERRA

ALGUNAS SERIES HISTÓRICAS (La Estanzuela, Mellilla, ver MSU1)

RED DE MEDIDA DEL LES/UdelaR (desde el año 2010)

RED DE MEDIDA DE UTE (desde el año 2010)

ESTIMATIVOS AD-HOC

ESTIMATIVOS SATELITALES DEL LES/UdelaR (adaptación local)

ESTIMATIVOS SATELITALES GENÉRICOS (online o consultoras)

PRODUCTOS

MAPA SOLAR V1 Y MAPA SOLAR V2
(medidas, satélite, modelos adaptados localmente)

AÑO METEOROLÓGICO TÍPICO (AMTUes)
(medidas, satélite, modelos adaptados localmente)

INFORMACIÓN DISPONIBLE EN LA WEB (NASA/SSE, Global Atlas)
(satélite, modelos genéricos)

INFORMACIÓN DE CONSULTORAS (satélite, modelos genéricos)

Fuentes de información disponible: medidas

RED DE MEDIDA DEL LES/UdelaR

OCHO SITIOS DISTRIBUIDOS EN EL PAÍS (más un sitio de medida de verano en la Antártida uruguaya)

PIRANÓMETROS DE PRIMERA CLASE O SUPERIOR (incerteza de la red 3-5%).

REGISTRO DE DATOS MINUTALES CON ENVÍO DIARIA (capacidad de comunicación remota)

CALIBRACIÓN CADA 2 AÑOS DE LOS PIRANÓMETROS

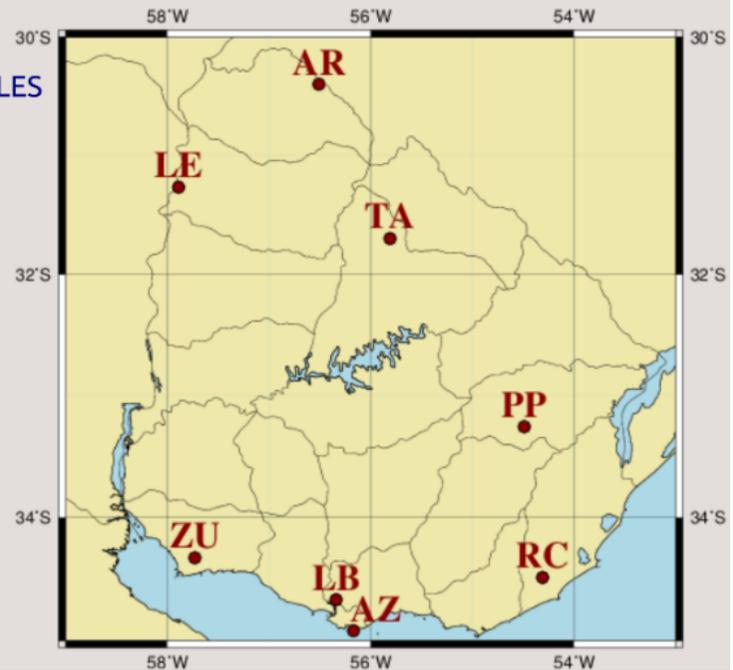
TRAZABILIDAD AL PATRÓN PRIMARIO MUNDIAL

CONTROL DE CALIDAD DE LOS DATOS DE LA RED

DISEÑADA E INSTALADA CON CAPACIDADES LOCALES

INICIO DE MEDIDAS: año 2010

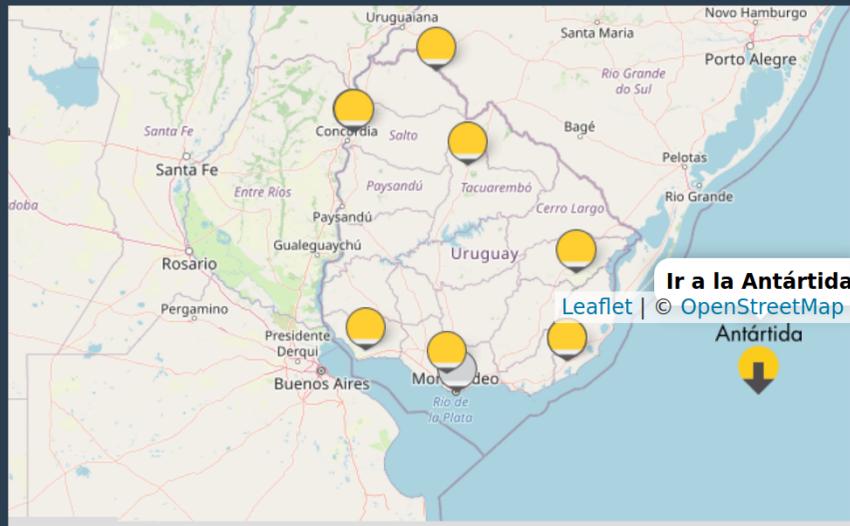
DATOS DIARIOS: <http://les.edu.uy/datos/sgd>



Fuentes de información disponible: medidas

Sistema de gestión de datos de la RMCIS

Estaciones disponibles



Estación del LES ubicada en la estación INUMET (Aeropuerto de Artigas).

Parámetros

Estación

AR - Artigas

Tipo de Medida

GHI

Escala

D01

Fecha de Inicio

2011/12/1

Fecha de Fin

2019/9/19

El rango de datos es: 2011/12/1 hasta 2019/9/19

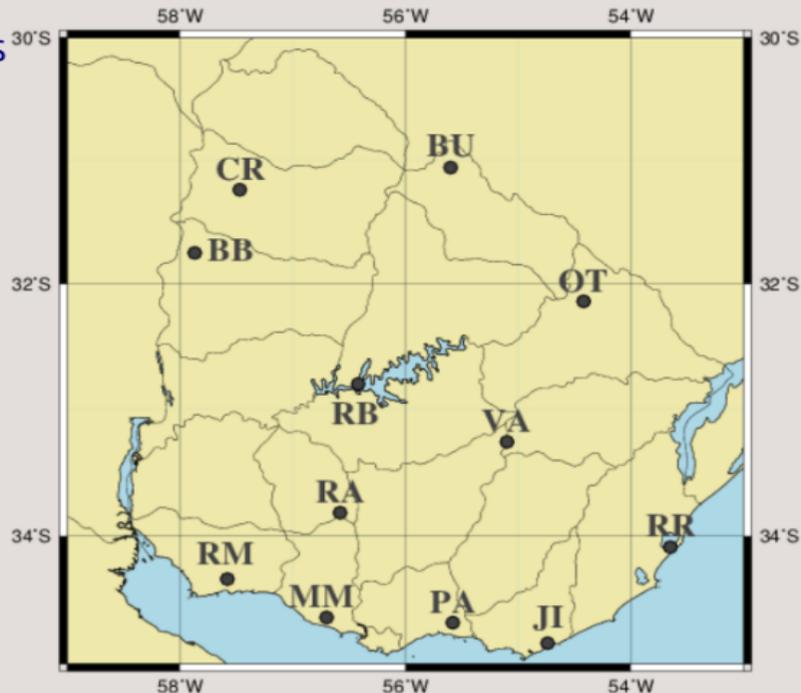
Enviar Consulta

<http://les.edu.uy/datos/sgd>

Fuentes de información disponible: medidas

RED DE MEDIDA DE UTE

DOCE SITIOS DISTRIBUIDOS EN EL PAÍS (parte de la red de medida de viento para energía eólica)
SENSORES FOTOVOLTAICOS LI-COR (incerteza de la red ~7%).
UTE A INICIADO UN PROGRAMA DE CALIBRACIÓN DE LOS SENSORES DE LA RED
CONTROL DE CALIDAD EN COLABORACIÓN CON EL LES/UdelaR
REGISTRO DE DATOS 10-MINUTALES
SE REGISTRAN OTRAS MEDIDAS METEOROLÓGICAS
INICIO DE MEDIDAS: año 2010
LOS DATOS SON PROPIEDAD DE UTE



Estación de Piedras de Afilar (PA)

Ubicada en una mástil de telecomunicaciones de ANTEL

Fuentes de información disponible: estimativos

Modelos LES/UdelaR (JPTv2, CIMs)

Permite estimar la irradiación GHI, GTI y DNI a escala horaria
Modelos específicamente adaptados a la región
Incertidumbre de las estimaciones caracterizada
Son gratuitos para actividades sin fines de lucro (si no, tienen costo)

OTRAS OPCIONES DISPONIBLES

NASA POWER: modelo satelital FLASHFlux de balance radiante (<https://power.larc.nasa.gov/>)

Estimaciones satelitales genéricas de GHI a escala diaria (all-sky insolation incident on a horizontal surface).
Valores mensuales y de largo plazo disponibles (sin evaluación local para Uruguay).

CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service): modelo Heliosat-4 (<http://www.soda-pro.com/>)

Estimaciones satelitales genéricas de GHI y DNI sin validación local: escala intra-horaria, horaria, diaria, mensual.
Utiliza imágenes Meteosat donde Uruguay está en el borde de la ventana de visión.

IRENA GLOBAL ATLAS (<http://irena.masdar.ac.ae/>)

Varias fuentes de estimativos disponibles (entre ellos, los del LES/UdelaR). La información depende de la fuente.
No sólo de irradiación solar, sino también de otros recursos renovables.

WORLD BANK SOLAR ATLAS (<http://globalsolaratlas.info/>)

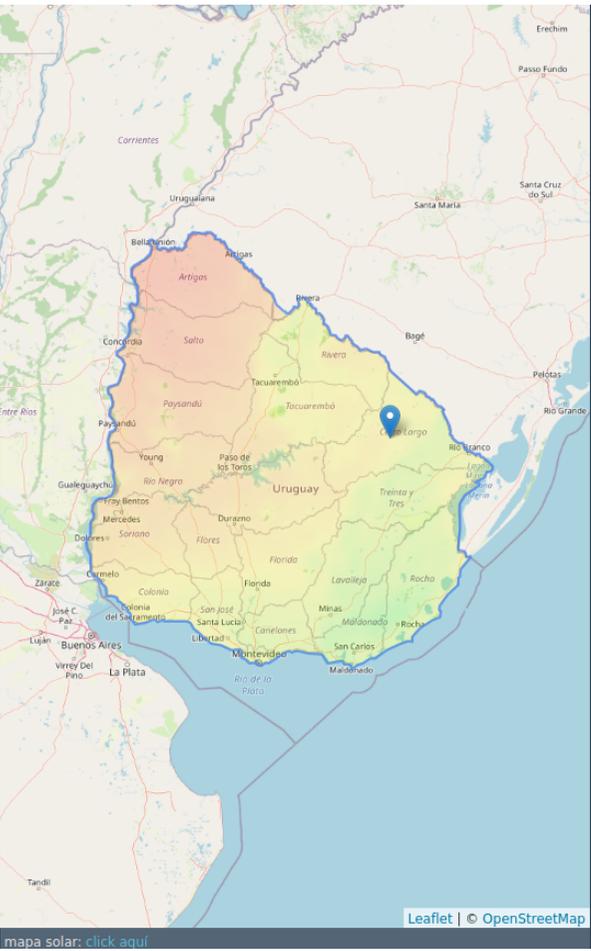
Estimativo satelital de la empresa GeoModel (modelo SolarGIS, <http://solargis.com/>). Valores anuales sin validación.

NSRDB: modelo satelital PSM-FARMS (<https://maps.nrel.gov/nsrdb-viewer/>)

Valores anuales sin validación local. No para Uruguay por el momento.
Modelo tipo CIM de mayor complejidad: GHI_{csk} y GHI_{cl} por modelado físico.

Fuentes de información disponible: productos

Mapa Solar del Uruguay v2 (MSUv2):



Mapa Solar del Uruguay
Segunda versión - Junio de 2017



En caso de utilizar la información de este sitio web, agradecemos sea citada como: Alonso-Suárez, R., Abal, G., Siri, R., Muse, P., (2014). Satellite-derived solar irradiation map for Uruguay. Energy Procedia 57:1237-1246, 10.1016/j.egypro.2014.10.072.

Coordenadas

Latitud, Longitud

-32.426

-54.448

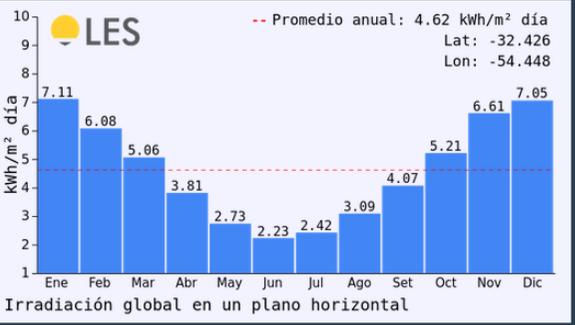
Enviar

Borrar

Departamentos

GHI: Irradiación global en plano horizontal 4.62 kWh/m² día
GTI: Irradiación global en plano inclinado a 35° 4.99 kWh/m² día
DNI: Irradiación directa en incidencia normal 4.73 kWh/m² día

GHI GTI DNI



Descargar PDF Documentación

ANII Elaborado con apoyo parcial de ANII a través de los proyectos CSP FSE 110011, FSE 109937 y FSE 131799.

mapa solar: [click aquí](#)

Leaflet | © OpenStreetMap

<http://les.edu.uy/productos/mapa-solar-del-uruguay-2/>

Fuentes de información disponible: productos

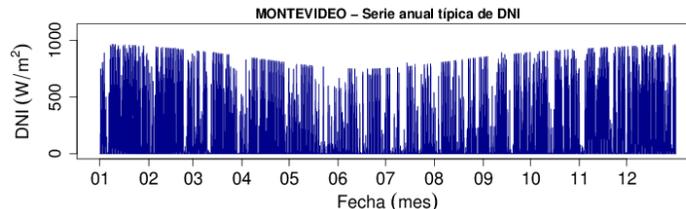
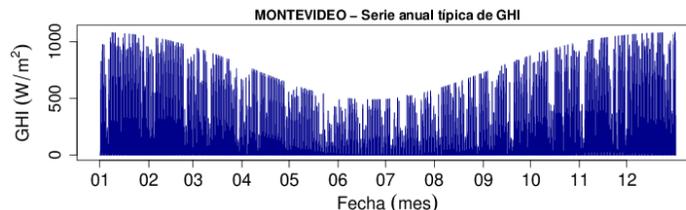
Año Meteorológico Típico -v2

Específico para aplicaciones de energía solar

Basado en 15 años de datos, en 5 ubicaciones. Validado y bien documentado

Variables meteorológicas del AMTues v2.4:

IRRADIACIÓN GLOBAL EN PLANO HORIZONTAL (GHI)	IRRADIACIÓN DIRECTA EN INCIDENCIA NORMAL (DNI)
IRRADIACIÓN GLOBAL EN PLANO INCLINADO A 20° (GTI20)	IRRADIACIÓN GLOBAL EN PLANO INCLINADO A 35° (GTI35)
IRRADIACIÓN GLOBAL EN PLANO INCLINADO A 45° (GTI45)	IRRADIACIÓN GLOBAL EN PLANO INCLINADO A 60° (GTI60)
IRRADIACIÓN GLOBAL EN PLANO INCLINADO A 90° (GTI90)	TEMPERATURA DEL AIRE AMBIENTE
HUMEDAD RELATIVA	PRESIÓN ATMOSFÉRICA
MÓDULO DE VELOCIDAD DE VIENTO	DIRECCIÓN DE VELOCIDAD DE VIENTO



Fuentes de información disponible

Algunas conclusiones

existen datos de recurso solar disponibles cuya incertidumbre depende de su origen

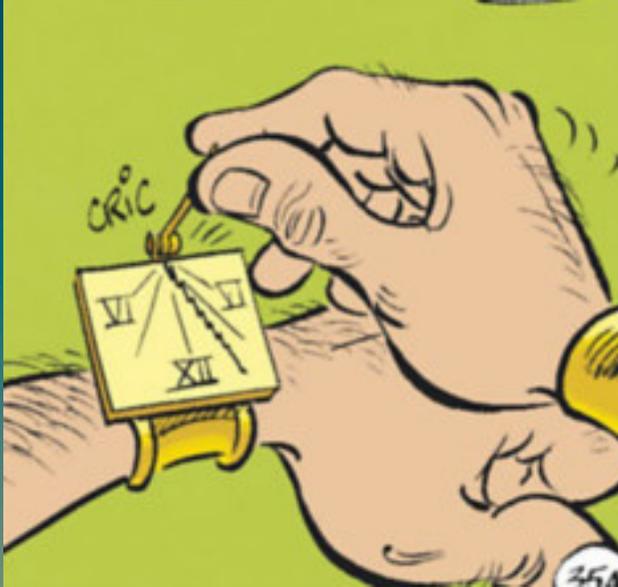
la incertidumbre aceptable depende de cada aplicación y es responsabilidad del usuario la información que utiliza

Uruguay dispone de mediciones, capacidades de estimación ad-hoc y productos sobre el recurso solar

el usuario debe tener formación en recurso solar y en la aplicación específica para hacer buen uso de la información

Energía Solar Térmica - 2020

FIN



hora de preguntas...

Agustín Laguarda

agu.laguarda@gmail.com



LES
LABORATORIO DE
ENERGÍA SOLAR



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY