Unidad 4: Transporte a plano inclinado

A: modelos de transporte - irradiación horaria y sub-horaria

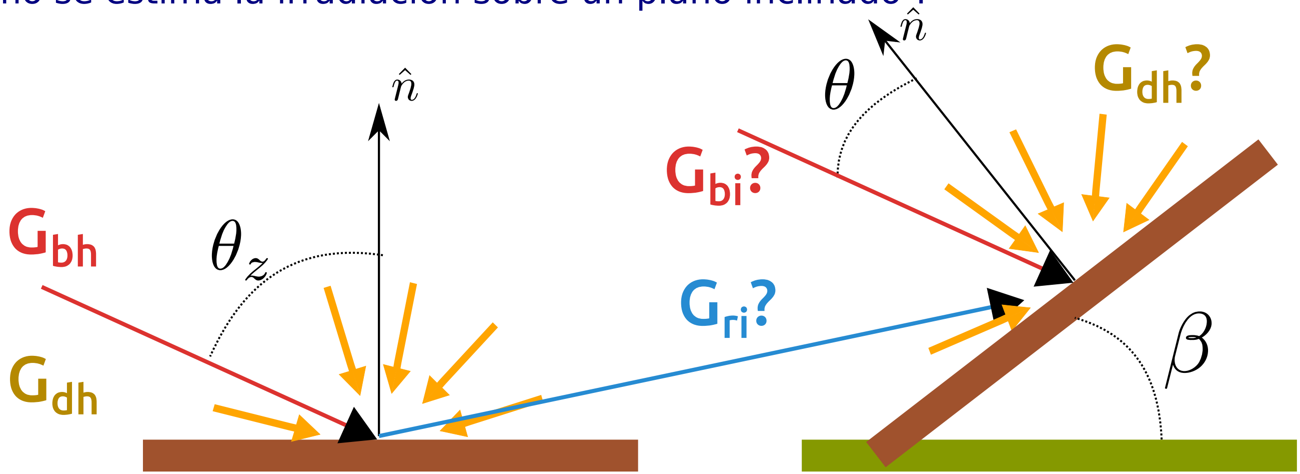
B: modelos de transporte - irradiación diaria

El problema del transporte de irradiancia

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

El caso de mas interés para la captación de energía por una superficie fija es cuando esta está orientada al ecuador (en el HS, la orientación es al Norte, γ=0).

Dada la irradiación horaria (subhoraria) en PH, G_h y sus componentes G_{bh} y G_{dh}
¿Cómo se estima la irradiación sobre un plano inclinado ?



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

global en PH, directa en PH, difusa en PH

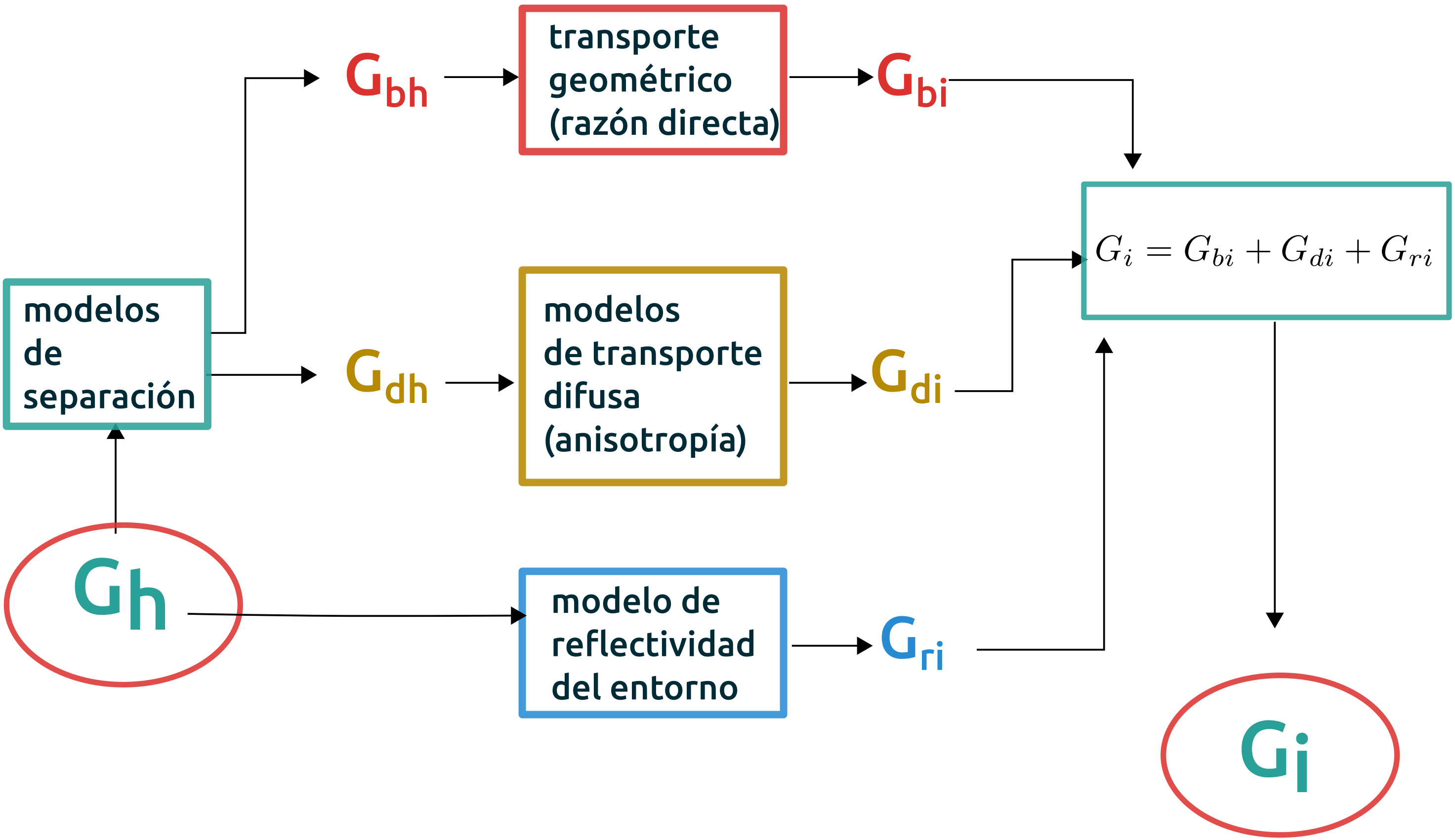
$$G_i = G_{bi} + G_{di} + G_{ri}$$

global sobre el plano inclinado, directa en PI, difusa en PI, reflejada sobre el PI

Observación: Esto es válido para nivel instantáneo (G)
o a nivel horario o subhoriario (I)

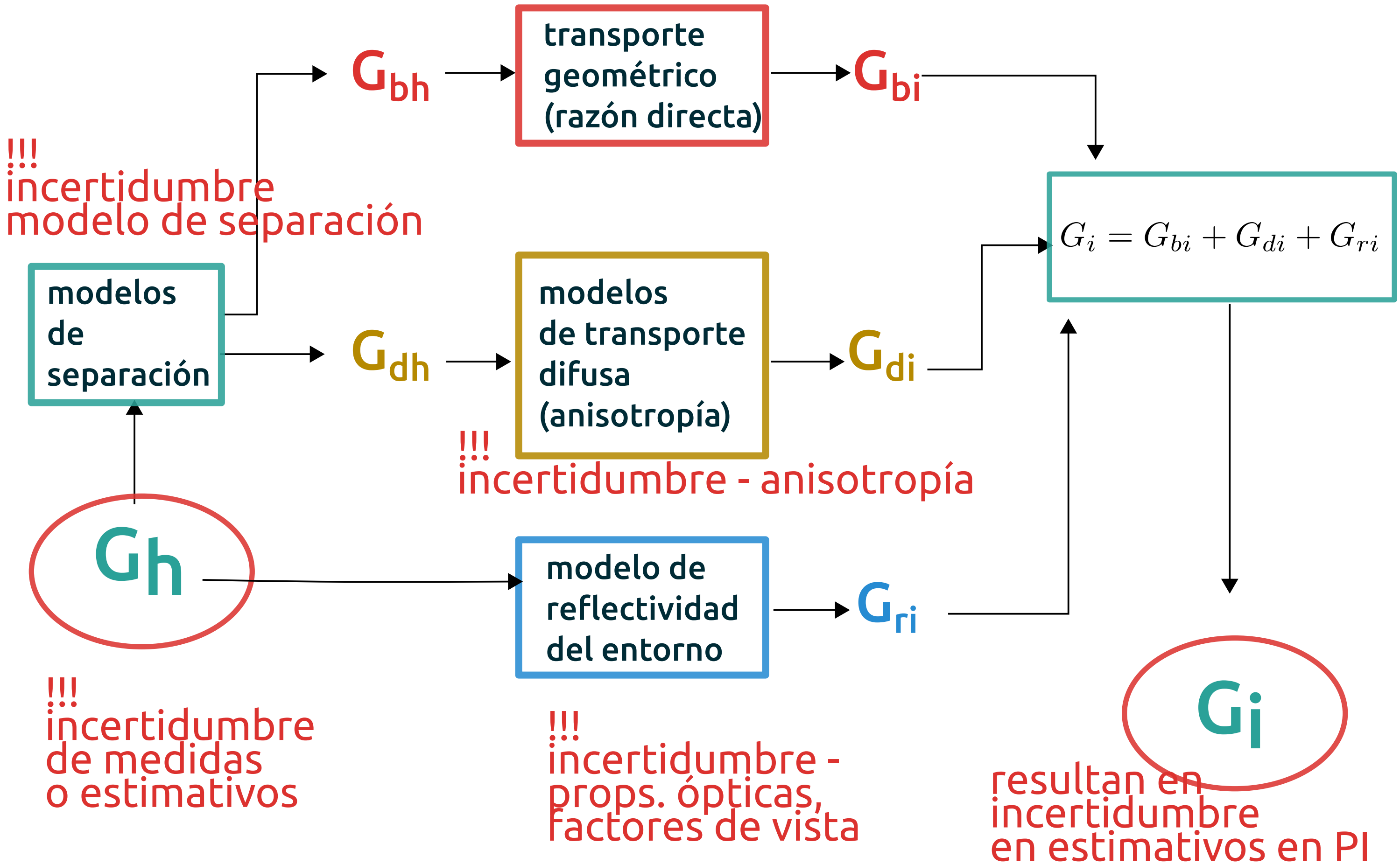
El problema del transporte de irradiación

Estrategia



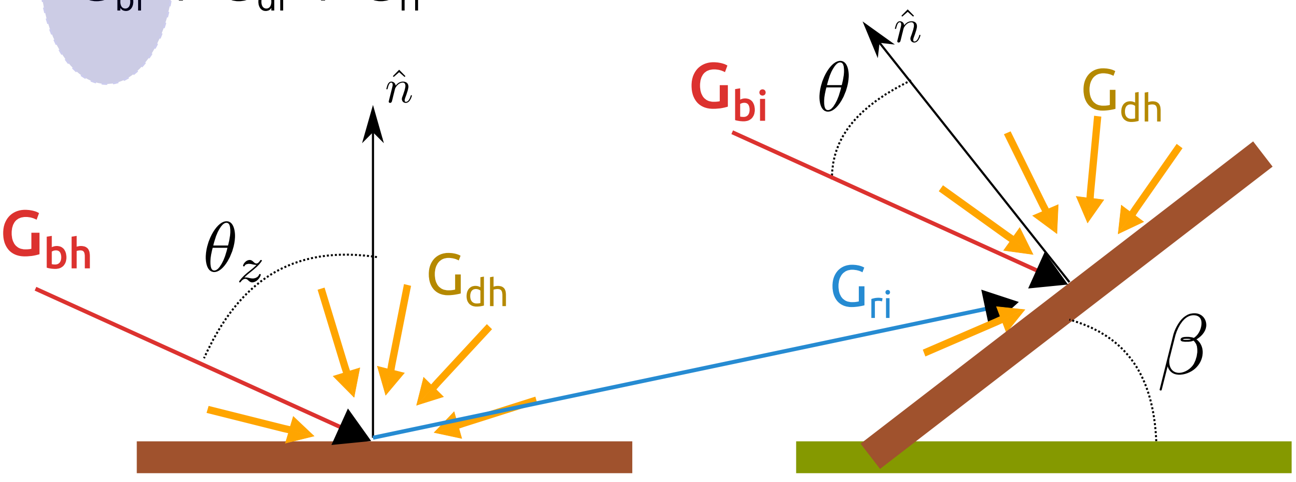
El problema del transporte de irradiación

Estrategia



El transporte de irradiancia directa es un problema geométrico

$$G_h = \overset{\text{directa}}{G_{bi}} + \overset{\text{difusa (sky)}}{G_{di}} + \overset{\text{reflejada}}{G_{ri}}$$



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

Transporte de irradiancia directa - razón 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 r_b:

$$r_b = \frac{G_{bi}}{G_{bh}} = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} \qquad \text{Si } \cos\theta > 0 \text{ y } \cos\theta_z > 0$$

$$r_b = 0 \qquad \text{de otro modo}$$

Sol sobre la superficie

Sol sobre el horizonte

es positiva y adimensionada

De modo que: $G_{bi} = r_b\, G_{bh}$

La razón directa de un plano horizontal es 1.
La de un plano inclinado, puede ser mayor o menor que 1.
La razón directa a la salida/puesta del Sol puede diverger.

LES

Razón directa: ¿De qué depende ?

$$r_b = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z}$$

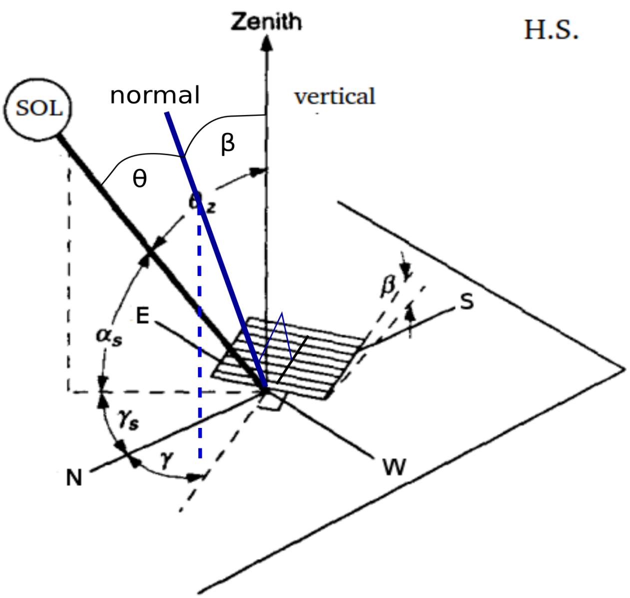
- ubicación del observador (latitud, longitud)
- hora del día
- día del año (ordinal día)

Ademas, depende de la orientación de la superficie (β, γ)

Para superficie de orientación cualquiera:

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

Obs: si β=0 se tiene θ_z



Caso mas relevante: superficie fija orientada al ecuador

$$\gamma = 0 \text{ o } \gamma = \pi \qquad \sin\gamma = 0 \qquad s = \cos\gamma = \pm 1$$

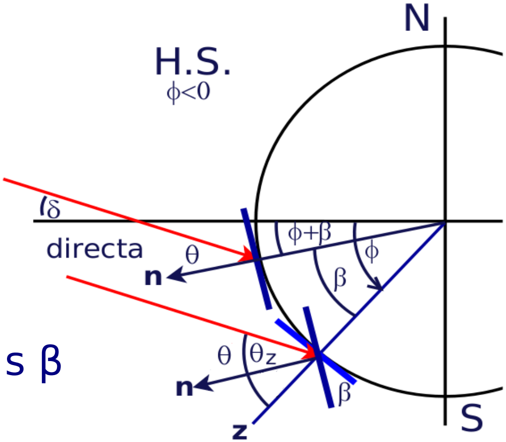
H.S. H.N.

H.S. : s = +1
H.N.: s = -1

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

Más fácil: usar **latitud equivalente**

$$\phi' = \phi + s\beta$$



Una superficie inclinada (β) en latitud Φ
es paralela a una horizontal en latitud Φ' = Φ + s β

$$\begin{aligned} \cos\theta &= \cos\phi'\cos\delta\cos\omega + \sin\phi'\sin\delta \\ &= \cos(\phi + s\beta)\cos\delta\cos\omega + \sin(\phi + s\beta)\sin\delta \end{aligned}$$

Para una superficie orientada al ecuador

razón directa:

$$r_b(\beta) = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} = \frac{\cos(\phi + s\beta)\cos\delta\cos\omega + \sin(\phi + s\beta)\sin\delta}{\cos\phi\cos\delta\cos\omega + \sin\phi\sin\delta}$$

o cero si numerador o denominador no son positivos.

H.S.: s = 1
H.N.: s = -1

Componente directa en plano inclinado:

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

el método de transporte es geométrico.

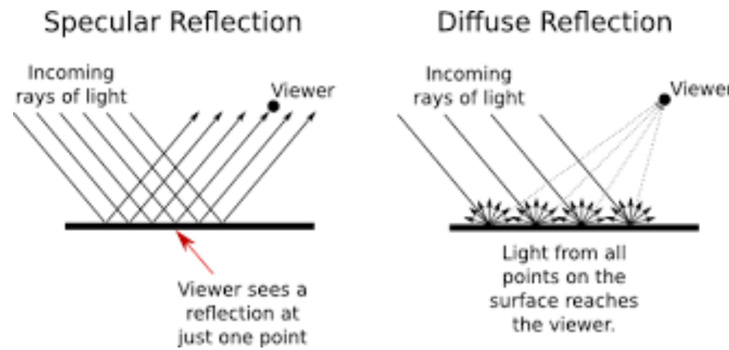
Irradiancia reflejada

$$\underbrace{G_h}_{} = \underbrace{G_{bi}}_{\text{directa}} + \underbrace{G_{di}}_{\text{difusa (sky)}} + \underbrace{G_{ri}}_{\text{reflejada}}$$

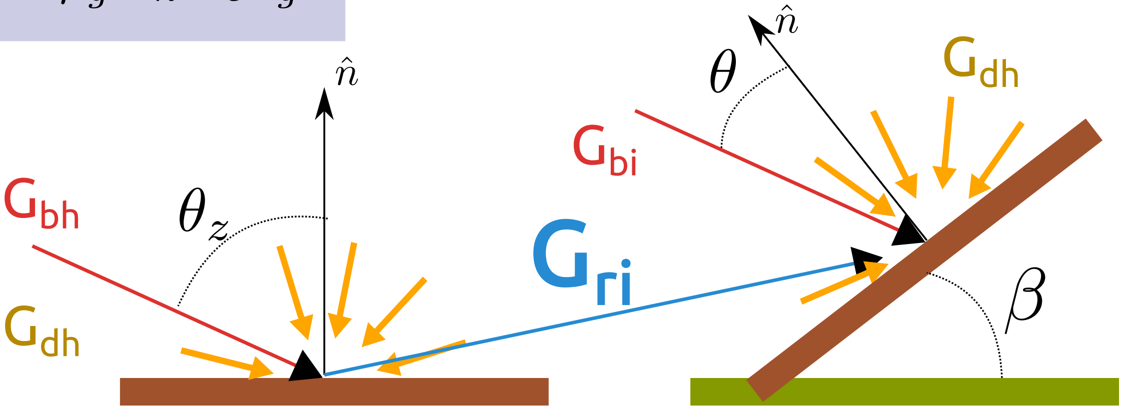
Requiere suposiciones sobre el entorno de la superficie captadora.

Suponemos: reflección solo del suelo (plano e infinito) y lo modelamos como un **reflector difuso ideal** con reflectividad ρ_g.

Puede ser mas complicado en situaciones reales !



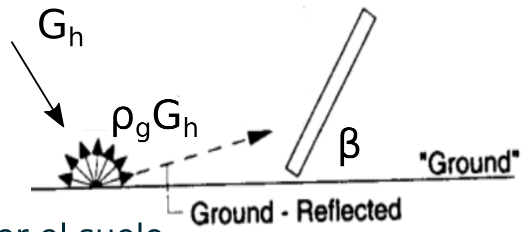
$$\boxed{G_{ri} = \rho_g G_h F_{c-g}}$$



Factores de vista $F_{c\text{-}g}$ y $F_{c\text{-}sky}$

factor de vista
colector - suelo

$$G_{ri} = G_h \rho_g \, F_{c-g}$$



Factor de vista colector-suelo ($F_{c\text{-}g}$):
Es la porción del campo visual del colector ocupada por el suelo.
Factor de vista reflector-cielo ($F_{c\text{-}s}$): análogo.

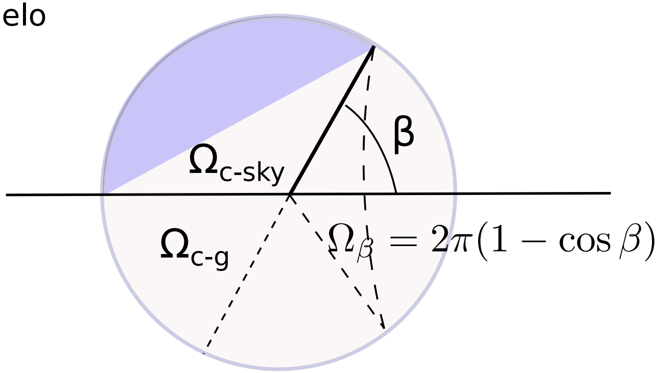
el colector solo ve al cielo o al suelo:

$$F_{c-g} + F_{c-sky} = 1$$

factor de vista
colector - cielo

$$F_{c-sky} = \frac{\Omega_{c-sky}}{2\pi} = \frac{1}{2}(1 + \cos\beta)$$

$$F_{c-g} = 1 - F_{c-sky} = \frac{1}{2}(1 - \cos\beta)$$



Componente reflejada

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

importa más cuanto mayor es β

Superfice	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
caminos de tierra	0,04
suelo arcilloso	0,14
superficies de agua (ángulo de incidencia grande)	0,07

reflectividad típica vegetación: ~0.25

$$G_{ri}^{max} = \frac{1}{2}\rho_g G_h$$

si β=90º

puede tener una dependencia estacional...

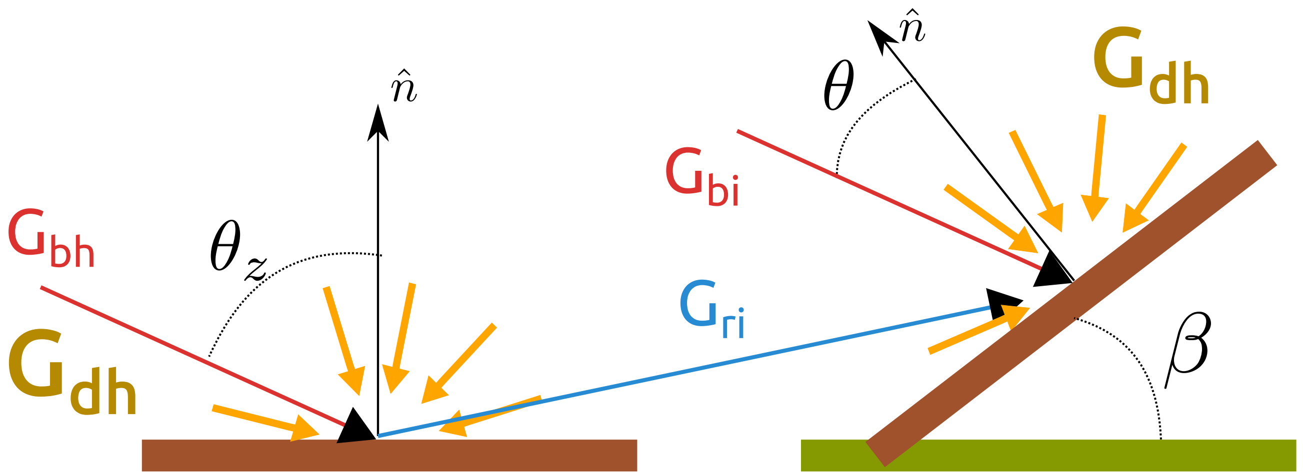
puede haber otras superficies contribuyendo en forma importante...

Transporte de irradiancia difusa

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

directa — difusa (sky) — reflejada

si la irradiancia difusa se distribuyese en forma isotrópica en el cielo → el transporte de plano horizontal a plano inclinado sería un problema puramente geométrico. Pero....



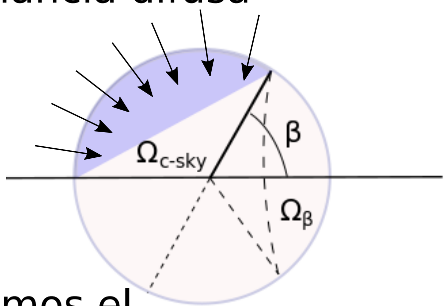
...el transporte de irradiancia difusa no es solo un problema geométrico debido a la anisotropía.

Hay varias estrategias...

Transporte a PI: Modelo isotrópico

Si suponemos una distribución isotrópica de la irradiancia difusa en la bóveda celeste, una fracción $F_{c\text{-}sky}$ de la irradiancia difusa horizontal incide en la superficie inclinada.

$$G_{di}^{iso} = F_{c-sky}\, G_{dh} = \frac{1}{2}(1 + \cos\beta)\, G_{dh}$$



Considerando las hipótesis antes mencionadas tenemos el **modelo isotrópico:**

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

en términos adimensionados $r_i = G_i / G_h$

es necesario separar directa y difusa antes del transporte

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

Comentario: 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.

Anisotropía en la irradiancia difusa

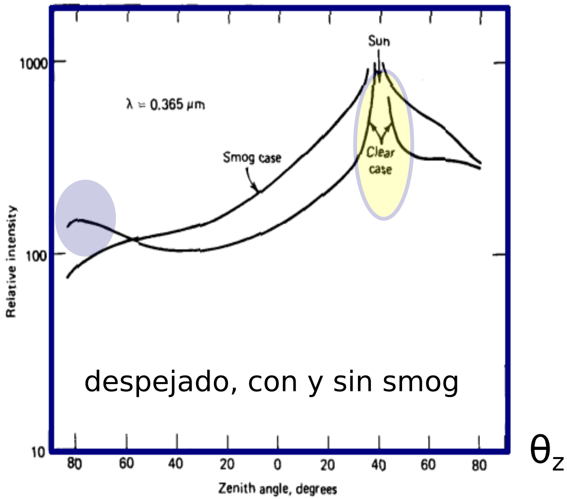
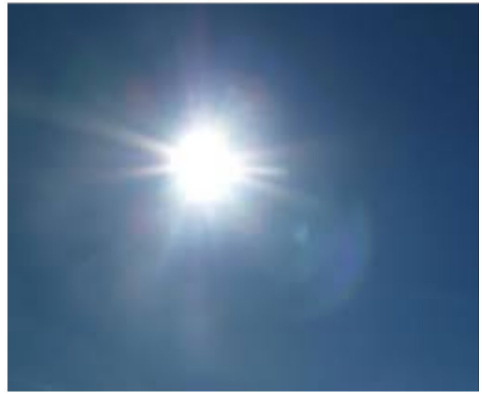


Fig. de Duffie & Beckman ver Notas FRS



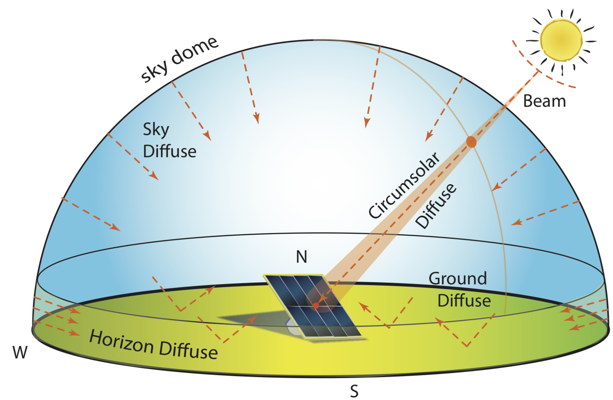
En condiciones cubiertas es aproximadamente isotrópica

anisotropías principales para cielo no cubierto:

circumsolar

$$G_{di} = G_{di}^{iso} + G_{di}^{cs} + G_{di}^{hz}$$

brillo de horizonte



Transporte a PI: modelo HD (Hay y Davies)

tiene en cuenta la **anisotropía circumsolar**, usando un índice de anisotropicidad A_i, igual a la transmitancia directa:

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

una fracción A_i de la difusa horizontal se considera como circumsolar y se trata como directa, lo cual aumenta algo el estimado en plano inclinado

$$G_{di} = \underbrace{(1-A_i)G_{dh}\frac{1}{2}(1+\cos\beta)}_{\text{isotrópica}} + \underbrace{A_i G_{dh}\times r_b(\beta)}_{\text{circumsolar}} \qquad \underbrace{G_{di}^{hz}\approx 0}_{\text{brillo horizonte}}$$

en condiciones nubladas, $A_i = 0$, es toda difusa isotrópica.

en condiciones despejadas, $A_i \approx 0.85$ la mayor parte se trata como directa.

$$G_i^{HD} = r_b(\beta)\,\left(G_{bh} + A_i G_{dh}\right) + (1-A_i)\frac{1}{2}(1+\cos\beta)\,G_{dh} + \frac{1}{2}(1-\cos\beta)\rho_g\,G_h$$

versión adimensionada:

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

Transporte a PI: modelo HD (Hay y Davies)

Observación:

En términos adimensionados, el modelo HD puede expresarse formalmente igual al modelo isotrópico, pero con una fracción difusa modificada

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

La transmitancia directa (o factor de anisotropía) es

$$A_i = \frac{G_b}{G_s F_n} = \frac{G_{bh}}{G_s F_n \cos\theta_z} = \frac{G_{bh}}{G_h} \underbrace{\frac{G_h}{G_s F_n \cos\theta_z}}_{k_t} = (1 - f_d)\,k_t$$

definiendo la fracción difusa modificada:

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

Usando $\tilde{f}_d \to f_d$ se recupera el modelo isotrópico.

Transporte a PI: modelo HDKR

Agrega al modelo HD la **anisotropía de horizonte**, usando un factor f que depende de la fracción difusa: (Klucher y Reindl, ver NRS)

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

$$f = \sqrt{1-f_d}$$

contribución mayor en cielo despejado:

despejado: $f_d \approx 0.15 \rightarrow f \approx 0.92$

cubierto: $f_d = 1 \rightarrow f = 0$

$$G_i^{HDKR} = r_b(\beta)\ (G_{bh} + A_i G_{dh}) + (1-A_i)\frac{1}{2}(1+\cos\beta)\left[1+f\sin^3\left(\frac{\beta}{2}\right)\right] G_{dh} + \frac{1}{2}(1-\cos\beta)\rho_g\, G_h$$

razón directa

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

Desempeño de modelos de transporte (horario y sub-horario)

Dificultad: existen pocos datos confiables de G_i, G_{bh} y G_{dh} en Uruguay

Parte del trabajo de tesis de Inti Piccioli en la Maestría en Ing. Energía), en curso

Validación de modelos de transporte utilizando medidas (con control de calidad) registradas en el LES (Salto) durante años 2017-2020, integradas a irradiación 10-minutal u horaria.

se obtiene irradiación en plano inclinado G_i (β=30° y 45°), a partir de:

- medidas G_h, G_b, G_{dh} (notación "sin sep")
- medidas de G_h y modelos de separación (notación "con sep")

rMBE	beta=30°				beta=45°			
	10-minutal		horario		10-minutal		horario	
Modelo	Sin Sep	Con Sep	Sin Sep	Con Sep	Sin Sep	Con Sep	Sin Sep	Con Sep
ISO	-2.5	-0.3	-2.3	-0.2	-1.8	0.4	-1.4	0.7
HD	-0.9	1.3	-0.8	1.4	0.6	3	1	3.1
HDKR	-0.8	1.4	-0.7	1.5	0.9	3.3	1.3	3.5

rRMSD	beta=30°				beta=45°			
	10-minutal		horario		10-minutal		horario	
Modelo	Sin Sep	Con Sep	Sin Sep	Con Sep	Sin Sep	Con Sep	Sin Sep	Con Sep
ISO	4.2	4.2	3.8	3.6	5	5.1	4.2	4.5
HD	2.9	3.9	2.4	3.3	3.6	5.7	3	5.1
HDKR	2.8	3.9	2.4	3.3	3.6	5.9	3.1	5.3
GTImedia (W/m2)	690.7	598.6	731.6	638.9	663.6	565.4	705.5	597.2
# datos	11563	14424	1386	1919	23150	29014	2938	4127

todos los valores expresados en % de la media de las medidas

Algunas conclusiones preliminares:

- A menor escala temporal más incertidumbre. A mayor ángulo de inclinacion más incertidumbre. (en términos de rRMSD)

- **Incertidumbre característica:** entre 3 y 5 % de la media de la medida (mayores para inclinación de 45º). Es del orden de la incertidumbre en la medida en PH. El transporte no introduce mucha incertidumbre, si se conoce la separación directa-difusa.

- Los sesgos de los modelos varían en su signo para diferentes inclinaciones de la transposición. Utilizando la separación directa-difusa el **modelo isotrópico subestima** la irradiación en plano inclinado con sesgos negativos de -3%. Con modelos de separación **HD y HDKR sobreestiman** entre 1--3%.

- Si no se conoce la separación directa-difusa y se usa un modelo de separación la incertidumbre introducida afecta menos al **modelo isotrópico** que es mas robusto y pasa a tener un desempeño competitivo al de modelos mas sofisticados: rMBD = -0.3% y rRMSD = 4--5 %.

Resultados preliminares, trabajo en curso.

Fin de la Parte 1 de la Unidad 4