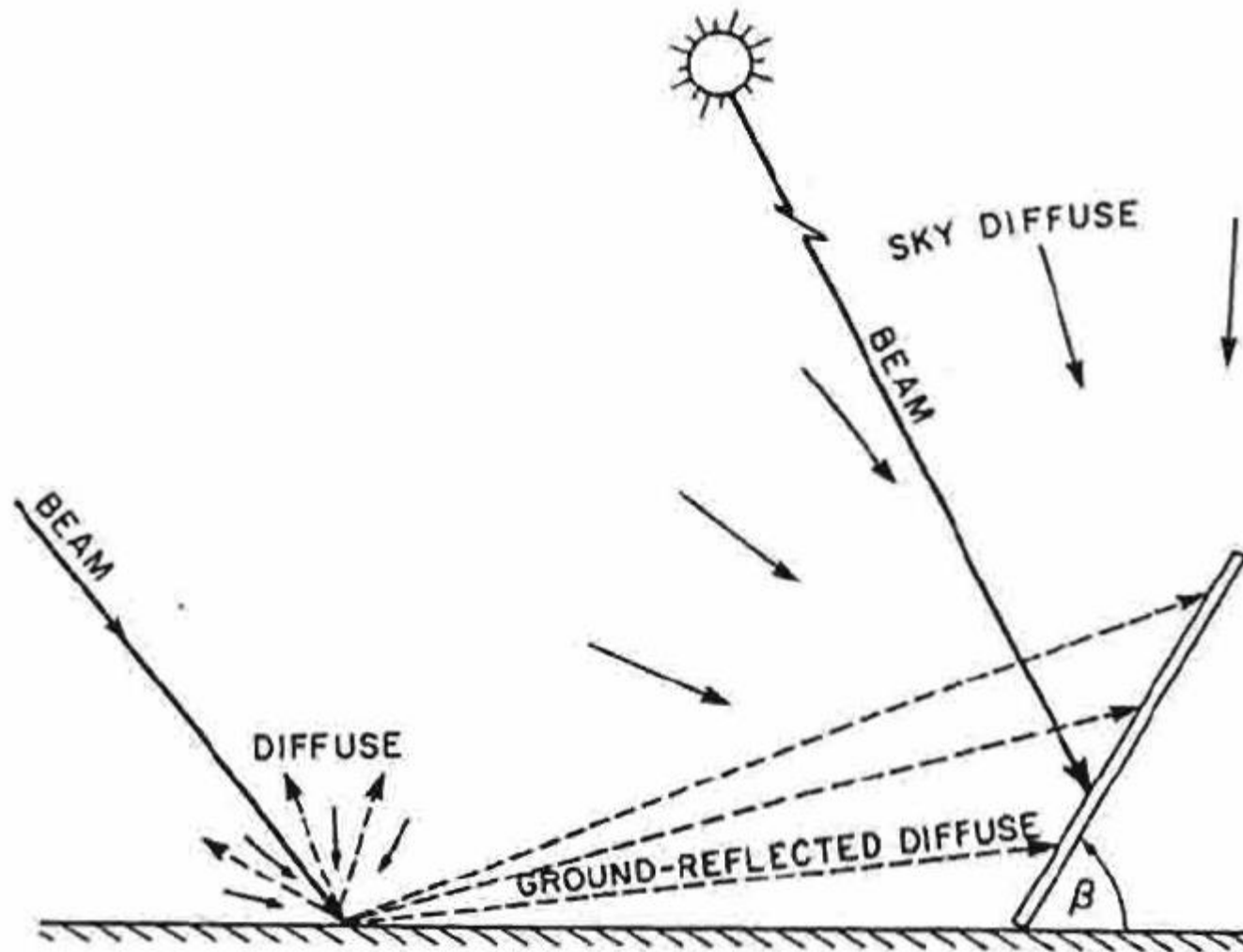


RADIAÇÃO E ENERGIA SOLAR

Miguel Centeno Brito

Radiação global no plano inclinado



Radiação direta no plano inclinado

A **radiação direta** (integrada para todo o espectro) pode ser determinada a partir da radiação extraterrestre, considerando a transmitância da atmosfera (que depende da hora):

$$I_b = \tau_b(\omega) I_0$$

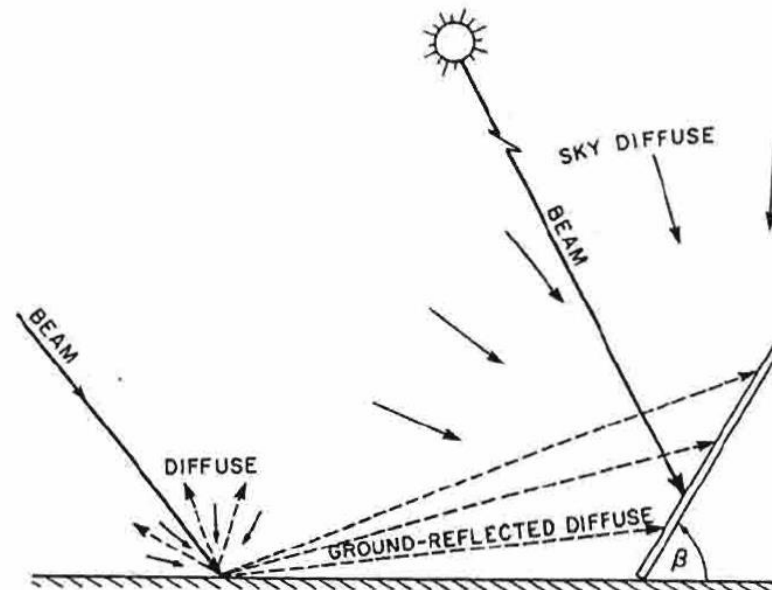
$$I_{b\beta\gamma} = \tau_b(\omega) I_{0\beta\gamma}$$

e portanto

$$I_{b\beta\gamma} = I_b (I_{0\beta\gamma} / I_0)$$

ou

$$I_{b\beta\gamma} = I_b (\cos \theta / \cos \theta_z) = I_b r_b$$



Radiação direta no plano inclinado

Ao longo de **uma hora** temos então

$$I_{b\beta\gamma} = I_b \int^{\text{1 h}} \tau_b(\omega) I_{0\beta\gamma} d\omega / \int^{\text{1 h}} \tau_b(\omega) I_0 d\omega$$

Assumindo que a transmitância não muda nessa hora

$$I_{b\beta\gamma} = I_b \int^{\text{1 h}} I_{0\beta\gamma} d\omega / \int^{\text{1 h}} I_0 d\omega,$$

$$I_{b\beta\gamma} = I_b (I_{0\beta\gamma} / I_0).$$

Radiação direta no plano inclinado

Ao longo de **um dia** temos então

$$H_{b\beta\gamma} = H_b \int_{\omega_{sr}}^{-\omega_{ss}} \tau_b(\omega) \dot{I}_{0\beta\gamma} d\omega / \int_{\omega_s}^{-\omega_s} \tau_b(\omega) \dot{I}_0 d\omega$$

Assumindo que a transmitância não muda ao longo do dia (que sabemos estar errado!)

$$H_{b\beta\gamma} = H_b \int_{\omega_{sr}}^{-\omega_{ss}} \dot{I}_{0\beta\gamma} d\omega / \int_{\omega_s}^{-\omega_s} \dot{I}_0 d\omega$$

$$H_{b\beta\gamma} = H_b H_{0\beta\gamma} / H_0$$

Em alternativa, podemos somar os valores horários

$$H_{b\beta\gamma} = \sum^{\text{day}} I_{b\beta\gamma}$$

$$H_{b\beta\gamma} = H_b R_b \quad \text{com} \quad R_b = \frac{(\pi/180)\omega'_s \sin \delta \sin(\phi - \beta) + \cos \delta \cos(\phi - \beta) \sin \omega'_s}{(\pi/180)\omega_s \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \sin \omega_s}$$

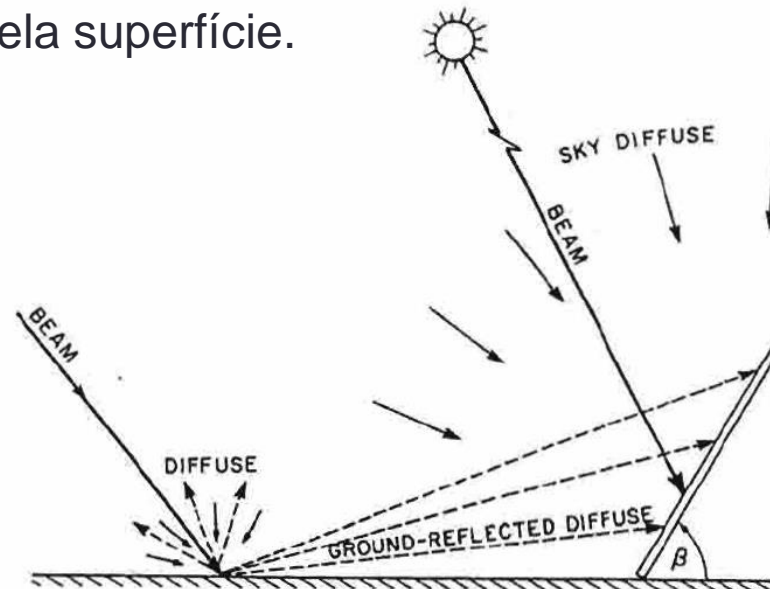
Ao longo de um mês podemos calcular o valor diário para o dia característico!

Radiação refletida no plano inclinado

A radiação refletida tem duas componentes, associadas à reflexão da radiação direta e à reflexão da radiação difusa

$$(I_b \rho_b + I_d \rho_d) A_g$$

em que A_g é a área de chão *vista* pela superfície.



Radiação refletida no plano inclinado

Assumindo que a reflexão é **isotrópica** podemos escrever

$$I_r A_c = (I_b \rho_b + I_d \rho_d) A_g F_{g \rightarrow c}$$

ou, assumindo que o chão é plano,

$$I_r = (I_b \rho_b + I_d \rho_d) \frac{1}{2} (1 - \cos \beta)$$

Se as refletâncias para a radiação difusa e a radiação direta forem iguais, podemos usar o albedo do chão:

$$I_r = \frac{1}{2} I \rho (1 - \cos \beta)$$

Casos típicos: radiação solar sobretudo difusa ou chão é um refletor difuso, e.g. como um chão de cimento.

Factor de forma fica

- igual a 0 quando a superfície é horizontal (porque a superfície não vê o chão),
- igual a $\frac{1}{2}$ quando superfície vertical e
- Igual a 1 quando superfície *virada para baixo*.

Radiação refletida no plano inclinado

Assumindo que a reflexão é **anisotrópica**

$$I_r = \frac{1}{2} I \rho (1 - \cos \beta) [1 + \sin^2(\theta_z/2)] (|\cos \Delta|)$$

em que Δ é a diferença entre a orientação da superfície e o azimute dos raios solares.

Casos típicos: radiação solar sobretudo directa e chão forte reflector, e.g. lençol de água ou plantas com folhas brilhantes

Radiação refletida no plano inclinado

No caso da reflexão **isotrópica**, a irradiância refletida diária é

$$H_r = \frac{1}{2} H \rho (1 - \cos \beta).$$

Enquanto para a reflexão **anisotrópica** não pode ser calculada directamente sendo necessário somar o valor para todas as horas.

$$H_r = \sum^{\text{day}} \left[I \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \left(1 + \sin^2 \frac{\theta_z}{2} \right) (|\cos \Delta|) \right]$$

Radiação difusa no plano inclinado

Distribuição angular da radiação difusa

A radiação emitida por um *elemento de céu* é

$$dI_d = i_d d\omega \cos \Phi$$

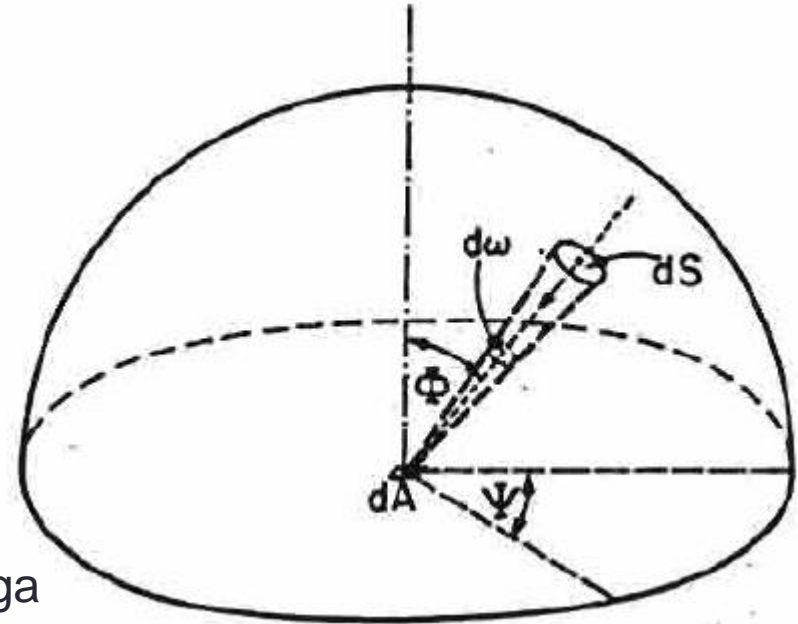
em que i_d tem unidades de $W/m^2/sr$.

Quando o sol está oculto a radiação que chega à superfície dA é

$$I_d = \int^{\rho} i_d d\omega \cos \Phi$$

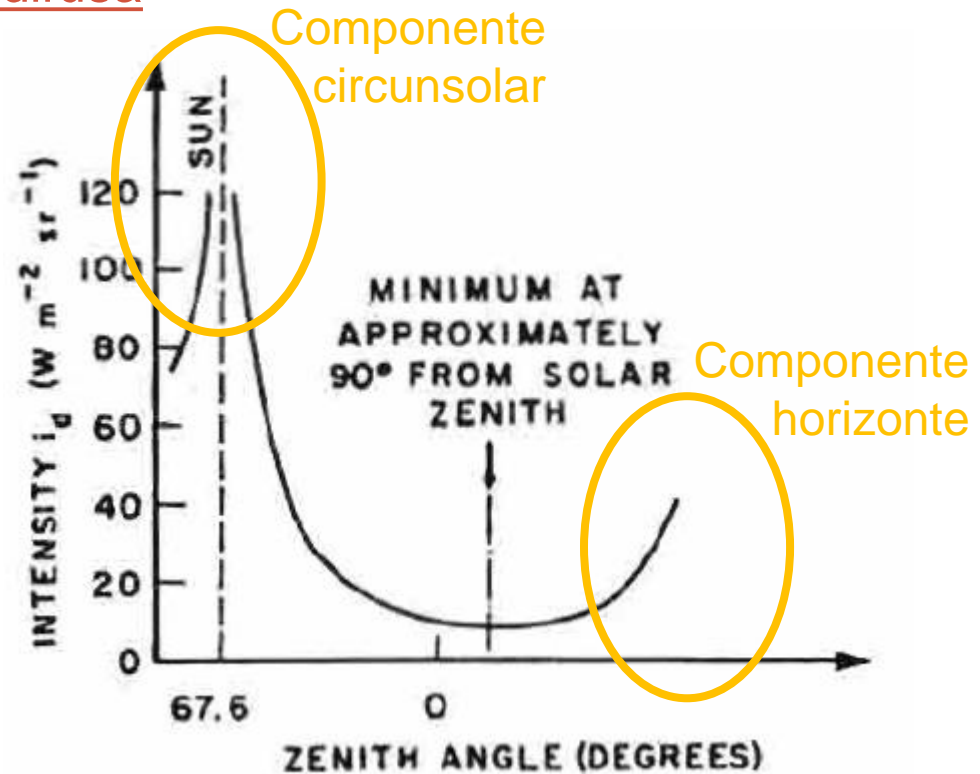
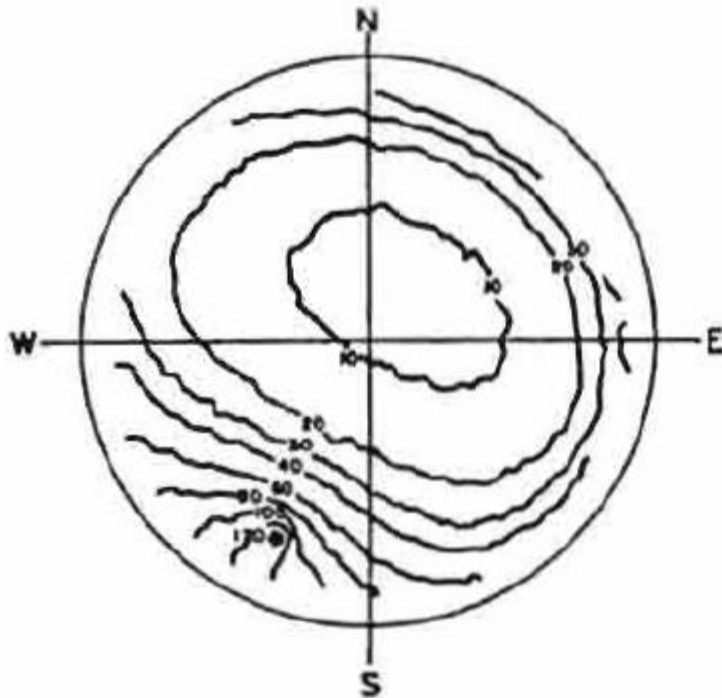
que se fosse isotrópica seria

$$I_d = \pi i_d$$



Radiação difusa no plano inclinado

Distribuição angular da radiação difusa

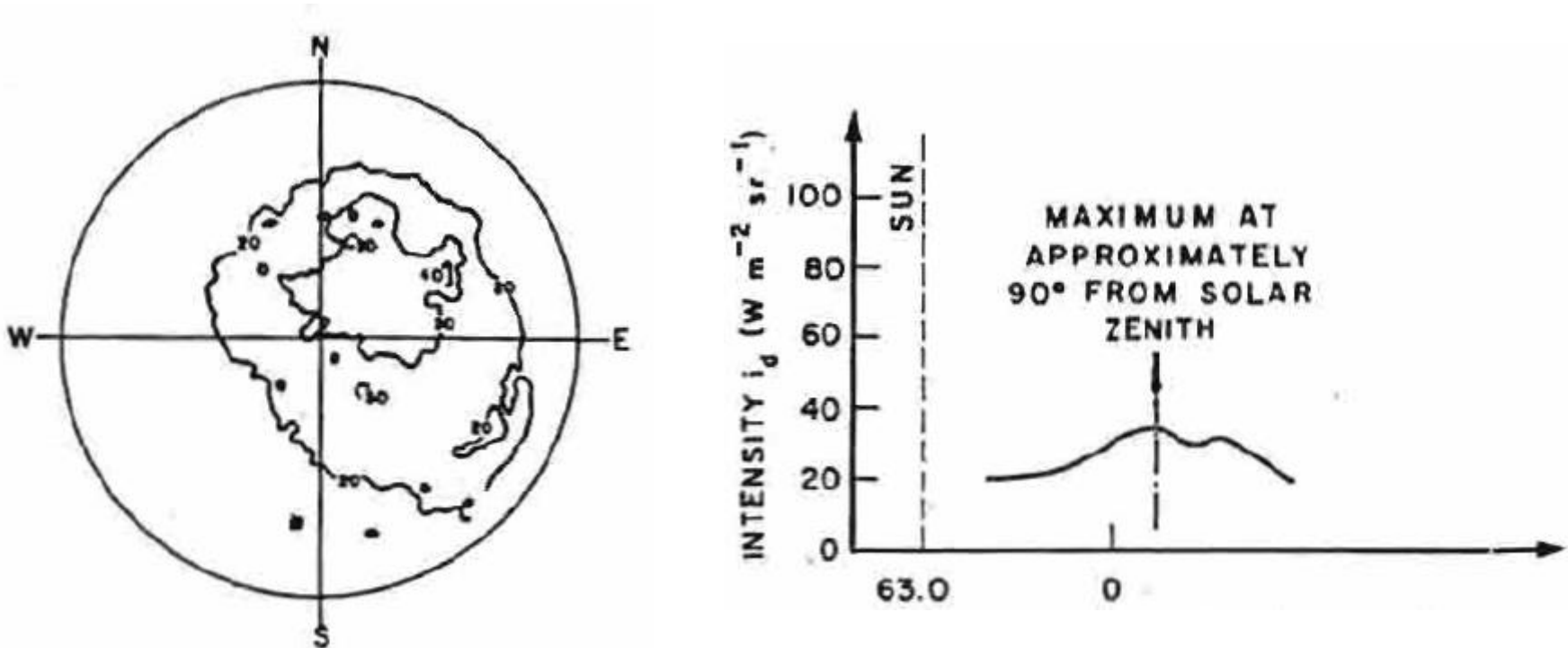


Para um dia de céu limpo

Pode ser medido com um *scanner radiometer* ou fotograficamente (*fish-eye lens*)

Radiação difusa no plano inclinado

Distribuição angular da radiação difusa

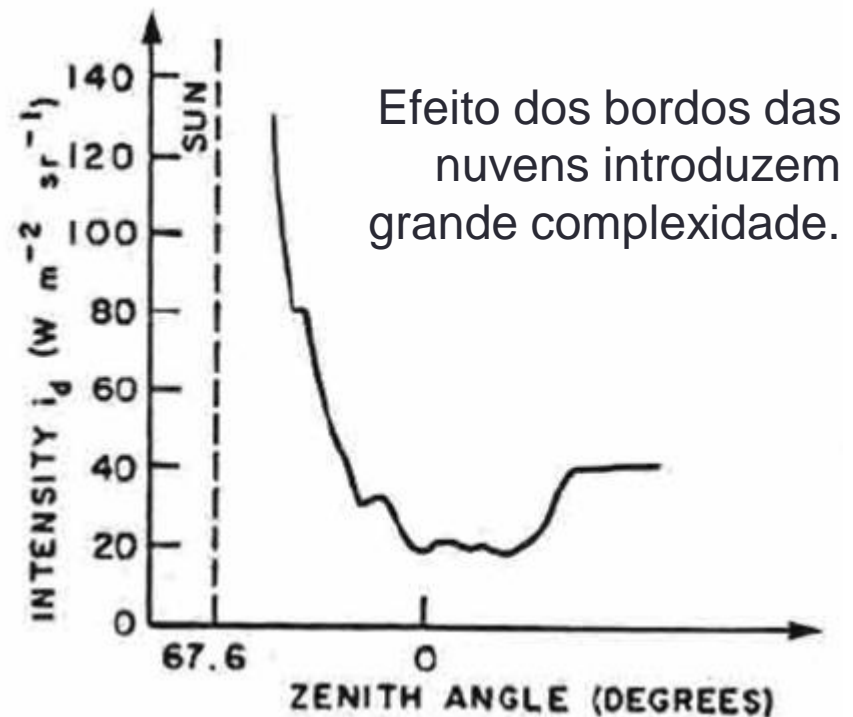
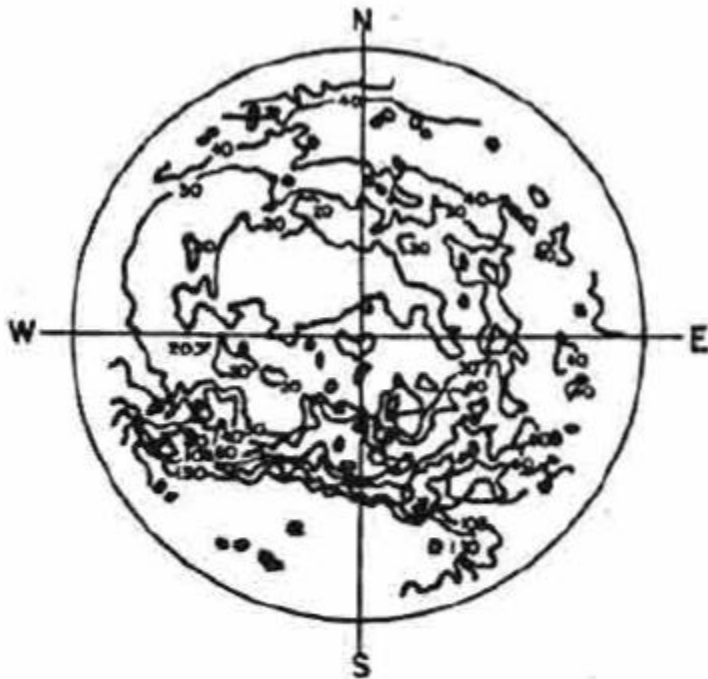


Para um dia de céu nublado

Pode ser medido com um *scanner radiometer* ou fotograficamente (*fish-eye lens*)

Radiação difusa no plano inclinado

Distribuição angular da radiação difusa



Para um dia de parcialmente coberto

Pode ser medido com um *scanner radiometer* ou fotograficamente (*fish-eye lens*)

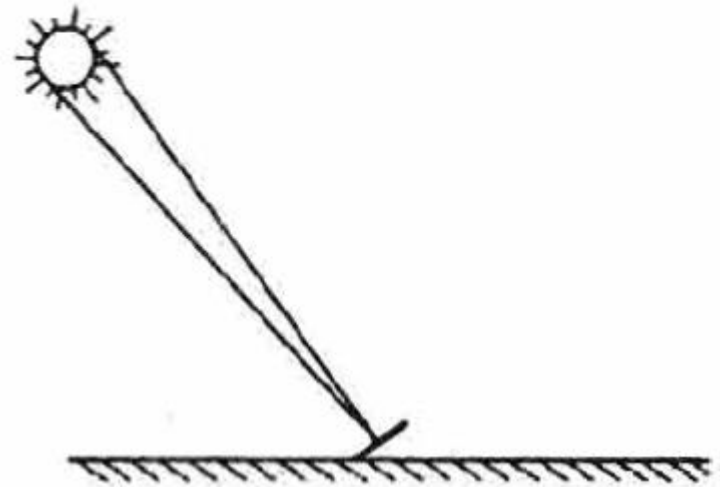
Radiação difusa no plano inclinado

Modelo circunsolar

Para dias de céu limpo; a radiação difusa é sobretudo circunsolar e portanto pode ser tratada da mesma forma que a radiação directa.

$$I_s = I_d r_b$$

Este modelo geralmente sobrestima a irradiação difusa



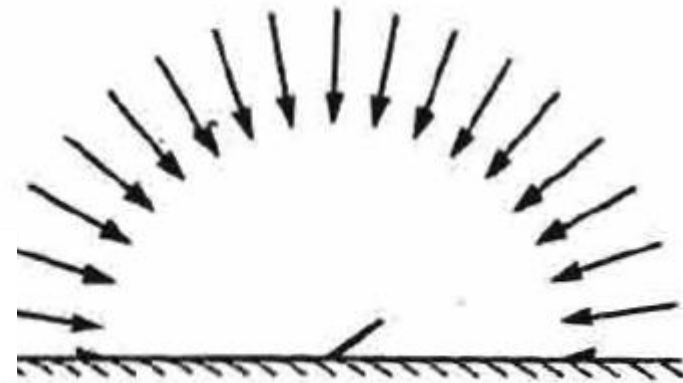
Radiação difusa no plano inclinado

Modelo isotrópico

Para dias de céu totalmente nublado;
a radiação difusa é isotrópica pelo
que basta considerar a fracção de
céu vista pela superfície

$$I_T = I_{h,b}R_b + I_{h,d}\left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) + I_{h,\rho}\left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right)$$

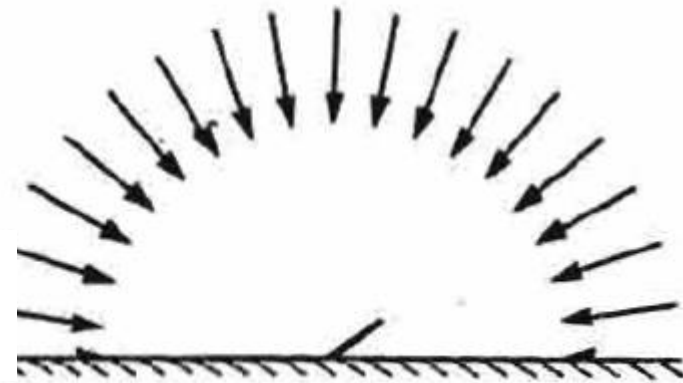
Este modelo geralmente subestima a
radiação difusa de superfícies
orientadas para o equador.



Radiação difusa no plano inclinado

Modelo isotrópico

Para dias de céu totalmente nublado;
a radiação difusa é isotrópica pelo
que basta considerar a fracção de
céu vista pela superfície



$$I_T = I_{h,b}R_b + I_{h,d}\left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) + I_{h,\rho}\left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right)$$

Outros modelos isotrópicos:

$$R_D = \frac{1}{3[2 + \cos TLT]}$$

Koronakis P. On the choice of the angle of tilt for south facing solar collectors in the Athens basin area. *Sol Energy* 1986;36:217-25.

$$R_D = \frac{3 + \cos(2TLT)}{4}$$

Badescu V. A new kind of cloudy sky model to compute instantaneous values of diffuse and global irradiance. *Theor Appl Climatol* 2002;72:127-36.

$$R_D = 1 - \frac{TLT}{180}$$

Tian YQ, Davies-Colley RJ, Gong P, Thorrold BW. Estimating solar radiation on slopes of arbitrary aspect. *Agric Forest Meteorol* 2001;109:67-77.

Radiação difusa no plano inclinado

Modelo anisotrópico (Klucher)

Introduz uma componente circunsolar e uma componente de horizonte

$$I_T = I_{h,b}R_b + I_{h,d} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left[1 + F' \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] \left[1 + F' \cos^2 \theta \sin^3 \theta_z \right] + I_h \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

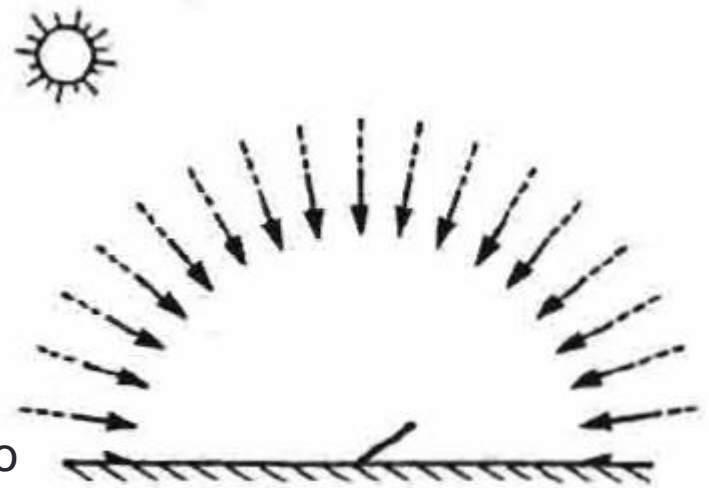
[horizonte] [circunsolar]

Em que F modula a cobertura de nuvens

$$F = 1 - (I_d/I)^2$$

As componentes anisotrópicas são mais importantes quando a radiação difusa é mais importante!

- F = 0**, temos o modelo isotrópico
- F = 1**, temos as 3 componentes de radiação difusa



Radiação difusa no plano inclinado

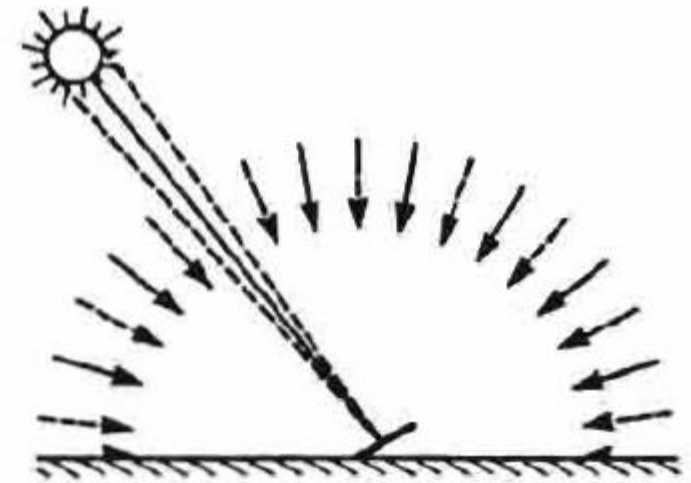
Modelo anisotrópico (Hay)

Considera componentes difusa circunsolar e difusa isotrópica, usando um *índice de isotropia* (A), que é postulado como dependendo da componente de radiação difusa na radiação extraterrestre global.

$$A = \frac{I_{bn}}{I_{on}}$$

$$I_T = (I_{h,b} + I_{h,d}A)R_b + I_{h,d}(1 - A)\left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) + I_h\rho\left(\frac{1 - \cos\beta}{2}\right)$$

Não considera a componente do horizonte.



(d) ANISOTROPIC MODEL

Radiação difusa no plano inclinado

Modelo anisotrópico (Reindl)

Parecido com o modelo de Hay mas considerando a componente do horizonte

$$I_T = (I_{h,b} + I_{h,d}A)R_b + I_{h,d}(1 - A) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left[1 + \sqrt{\frac{I_{h,b}}{I_h}} \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] + I_h \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

Radiação difusa no plano inclinado

Modelo anisotrópico (Munner)

Trata separadamente as superfícies à sombra ou expostas diretamente à radiação, em dias cobertos

$$I_T = I_{h,b}R_b + I_{h,d}T_F + I_h\rho\left(\frac{1 - \cos\beta}{2}\right)$$

Ou expostas à irradiação solar em dias não cobertos

$$I_T = I_{h,b}R_b + I_{h,d}[T_F(1 - A) + AR_b] + I_h\rho\left(\frac{1 - \cos\beta}{2}\right)$$

Definindo T_F (*tilt factor*) como o rácio entre as irradiâncias difusas no plano inclinado e na superfície:

$$T_F = \left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) + \frac{2B}{\pi(3 + 2B)} \left[\sin\beta - \beta\cos\beta - \pi\sin^2\frac{\beta}{2} \right]$$

Radiação difusa no plano inclinado

Modelo anisotrópico (Perez) – o modelo padrão usado hoje em dia

Descreve as componentes isotrópica, circunsolar (F_1) e de horizonte (F_2) usando coeficientes empíricos

$$I_T = I_{h,b}R_b + I_{h,d} \left[(1 - F_1) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + F_1 \frac{a}{b} + F_2 \sin \beta \right] + I_h \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

a e b depende do ângulo de incidência na superfície inclinada e os F's dependem do estado da atmosfera (ε – claridade; Δ - brilho)

$$a = \max(0^\circ, \cos \theta)$$

$$b = \max(\cos 85^\circ, \cos \theta_z)$$

$$\varepsilon = \frac{\frac{I_{h,d} + I_h}{I_{h,d}} + 5.535 \cdot 10^{-6} \theta_z^3}{1 + 5.535 \cdot 10^{-6} \theta_z^3}$$

$$\Delta = m \frac{I_{h,d}}{I_{on}}$$

Radiação difusa no plano inclinado

Modelo anisotrópico (Perez) – o modelo padrão usado hoje em dia

ε bin	f11	f12	f13	f21	f22	f23
1 Overcast	-0.008	0.588	-0.062	-0.06	0.072	-0.022
2	0.13	0.683	-0.151	-0.019	0.066	-0.029
3	0.33	0.487	-0.221	0.055	-0.064	-0.026
4	0.568	0.187	-0.295	0.109	-0.152	-0.014
5	0.873	-0.392	-0.362	0.226	-0.462	0.001
6	1.132	-1.237	-0.412	0.288	-0.823	0.056
7	1.06	-1.6	-0.359	0.264	-1.127	0.131
8 Clear	0.678	-0.327	-0.25	0.156	-1.377	0.251

Radiação difusa no plano inclinado

INEICHEN, Pierre. *Global irradiance on tilted and oriented planes: model validations*.
Genève : 2011, 73 p.

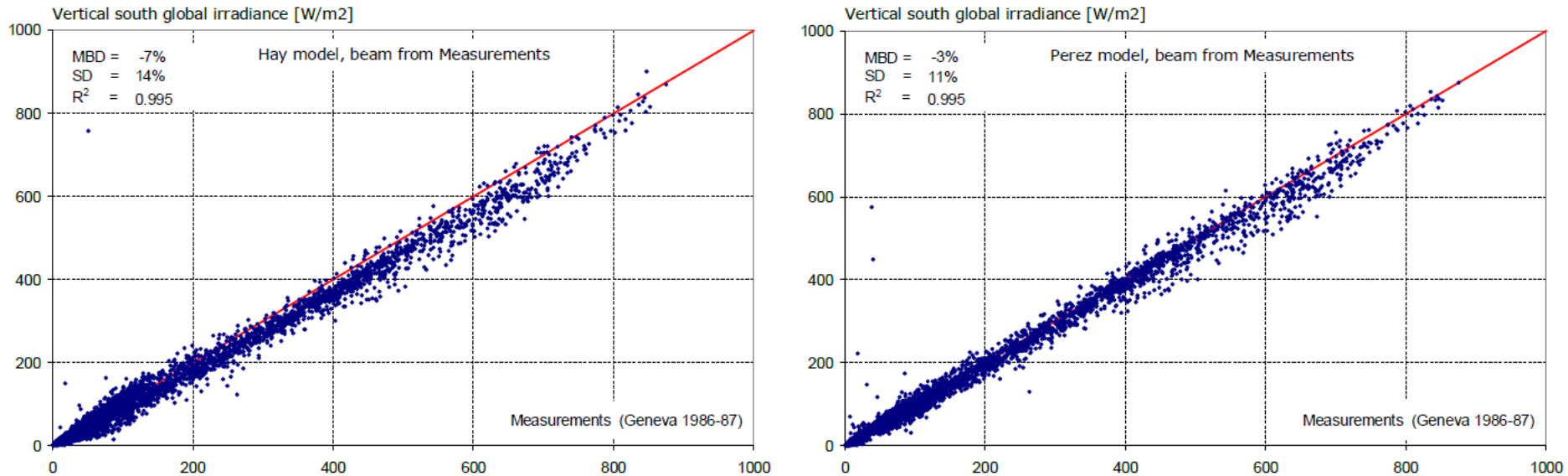
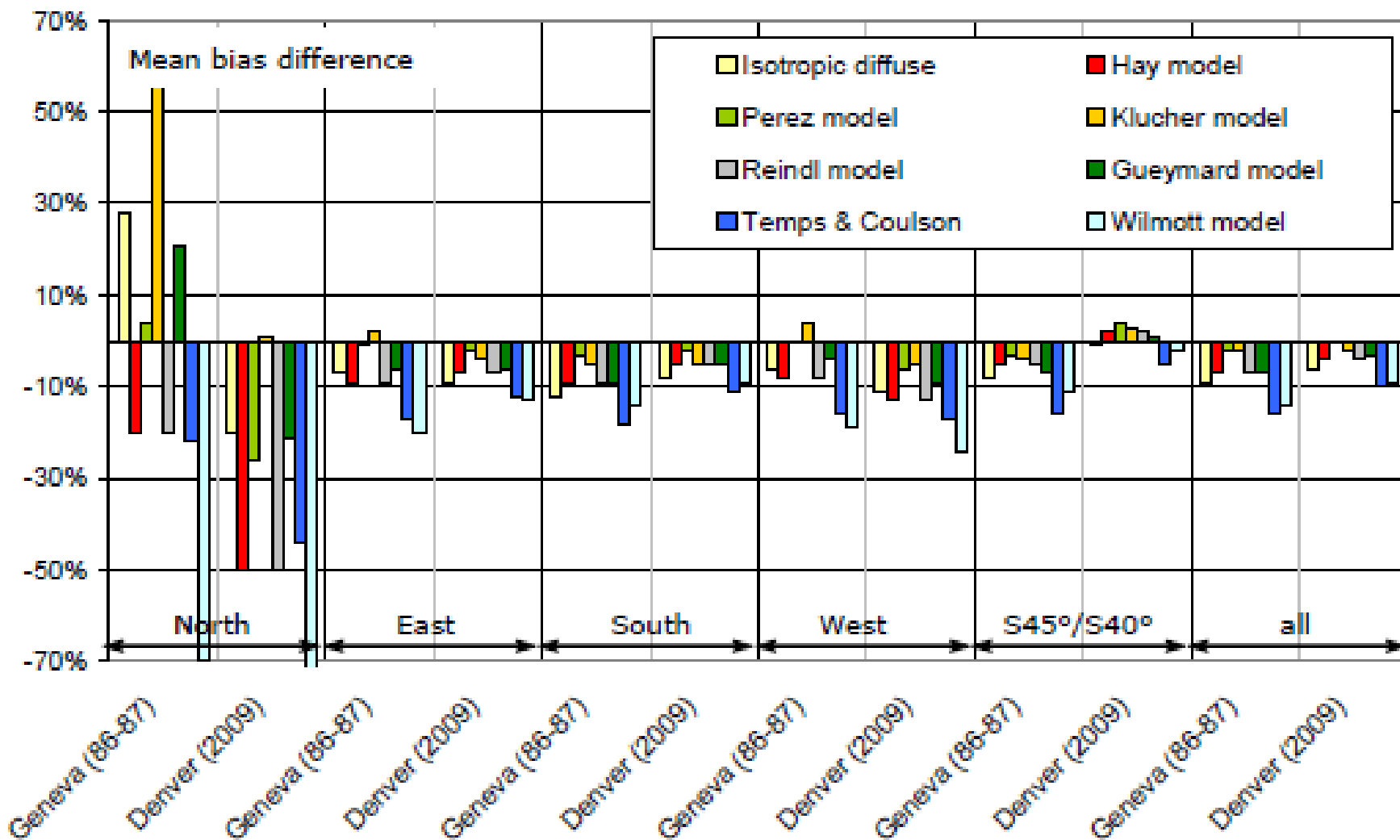


Figure 3 Scatter plots for the site of Geneva and two transposition models: Hay and Perez. The mean bias difference, the standard deviation and the correlation coefficient are given on the graph.

Global tilted irradiance based on beam measurements

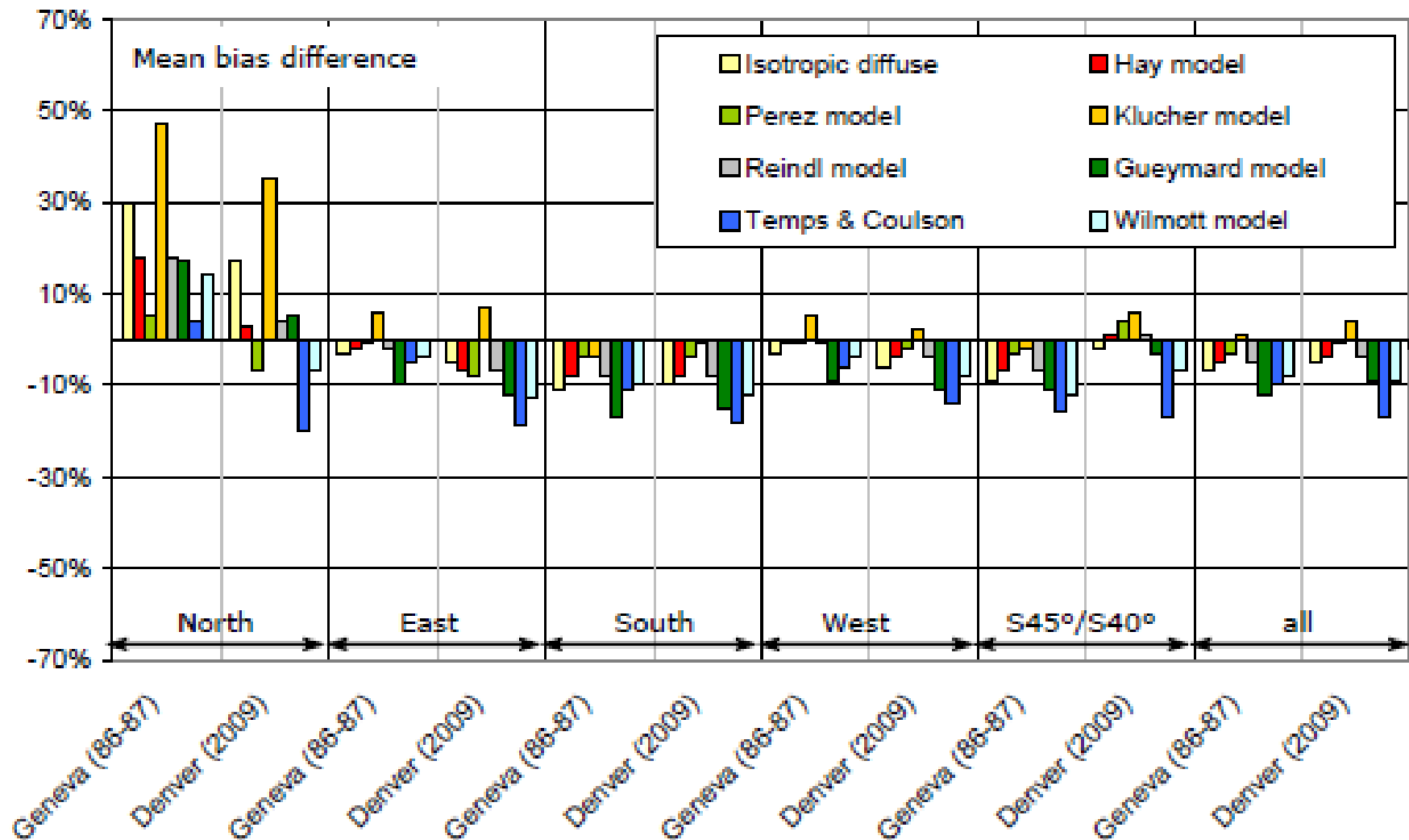
Clear sky conditions: $0.65 < K_t \leq 1.00$



Mean bias difference between model and measurements for the two sites and all the oriented/inclined planes.

Global tilted irradiance based on beam measurements

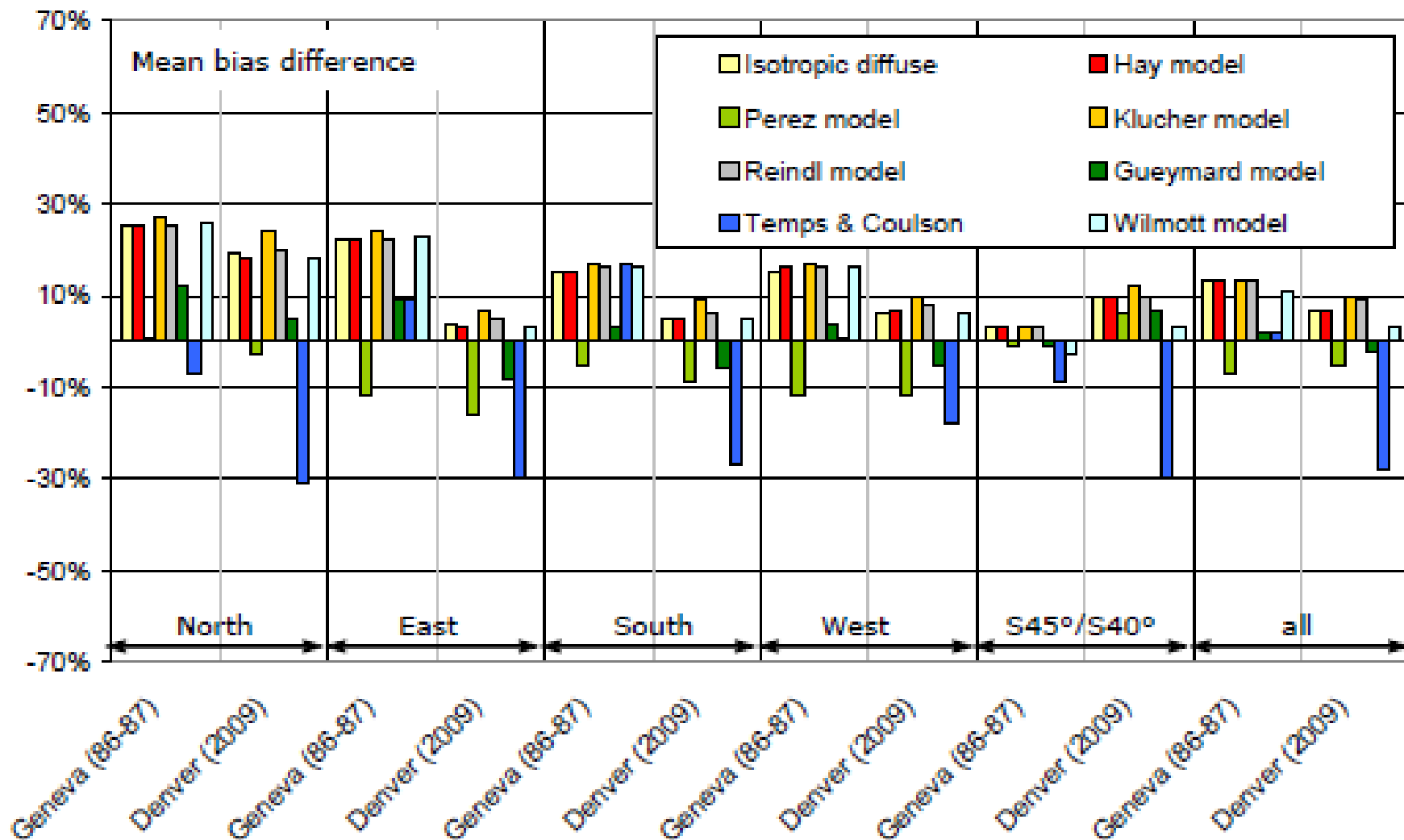
Intermediate sky conditions: $0.30 < K_t \leq 0.65$



Mean bias difference between model and measurements for the two sites and all the oriented/inclined planes.

Global tilted irradiance based on beam measurements

Overcast sky conditions: $0 < K_t \leq 0.30$



Mean bias difference between model and measurements for the two sites and all the oriented/inclined planes.