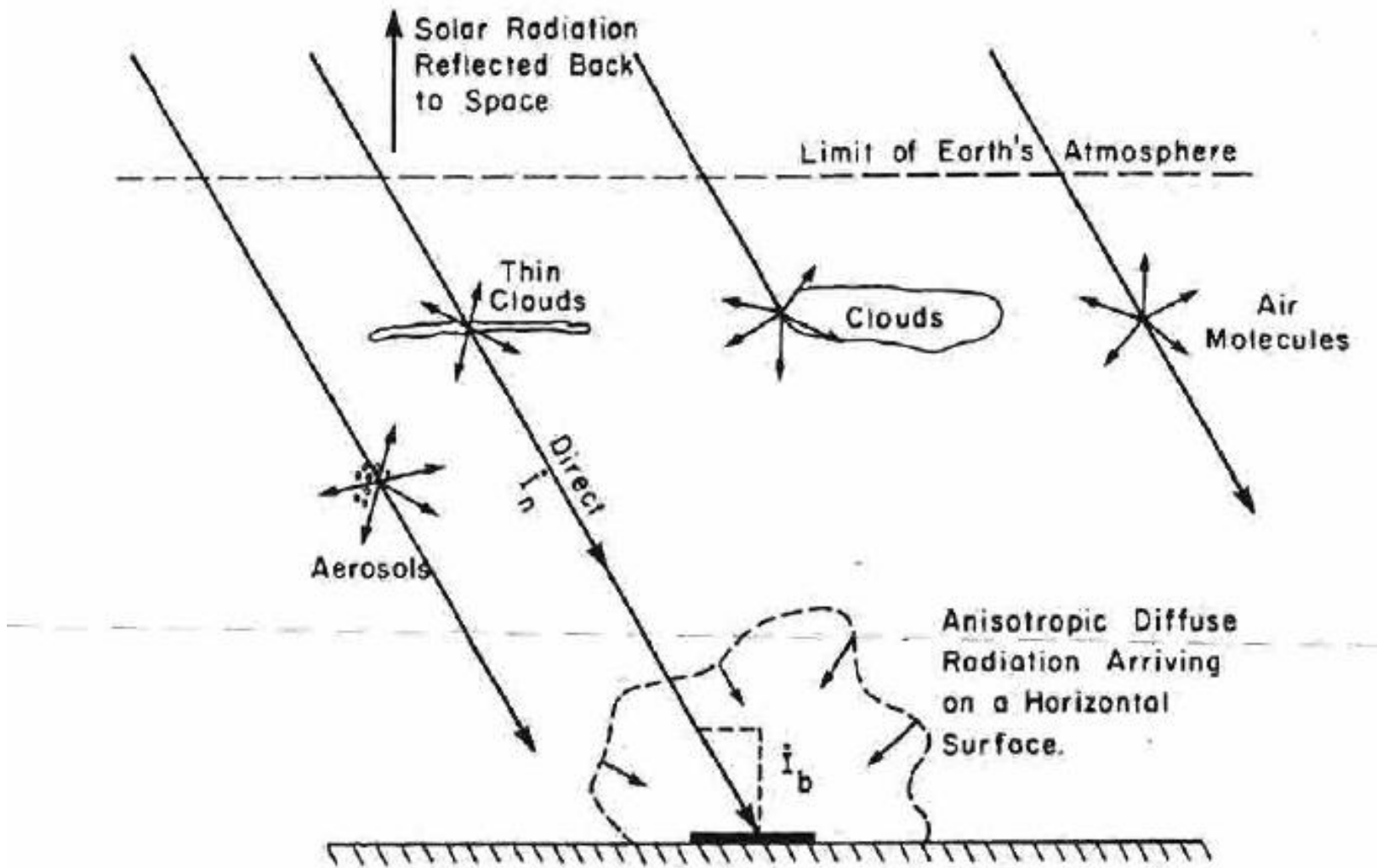


RADIAÇÃO NO PLANO HORIZONTAL E INCLINADO

Considerando o efeito da atmosfera

Radiação global na horizontal



Radiação global na horizontal

Ao contrário da radiação solar extraterrestre, a radiação solar na superfície, depois de atravessar a atmosfera, **não pode ser calculada** rigorosamente.

No entanto é **essencial** sabê-la estimar para podermos dimensionar sistemas solares, desenhar edifícios, compreender o crescimentos das plantas, etc.

Podemos **medir** as diferentes componentes da radiação solar (direta, difusa, global) ou estima-la a partir de **medidas indiretas**.

Radiação global na horizontal

- Modelo Iqbal (considerando efeitos atmosféricos)

$$\dot{I}_n = 0.9751 E_o \dot{I}_{sc} \tau_r \tau_o \tau_g \tau_w \tau_a$$

$$\dot{I}_b = \cos \theta_z \dot{I}_n$$

$$\dot{I}_d = \dot{D}_r + \dot{D}_a + \dot{D}_m$$

- Modelo ASRAE

$$\dot{I}_n = (C_n) A e^{-\frac{B}{\sec \theta_z}}$$

$$\dot{I}_t = \dot{I}_b + \dot{I}_d = \left(\dot{I}_n \cos \theta_z + \dot{D}_r + \dot{D}_a \right) \left(\frac{1}{1 - \rho_g \rho_a} \right)$$

$$\dot{I}_d = C \dot{I}_n F_{ss}$$

$$\dot{I}_r = \dot{I}_{t; \theta=0} \kappa_g F_{sg}$$

- Modelos considerando horas-de-sol (radiação global diária)

$$\frac{G_t}{G_o} = a_1 + b_1 \frac{S}{S_o}$$

Radiação global na horizontal

- Modelo considerando as nuvens

$$\bar{H}/\bar{H}_0 = a_2 - b_2 \bar{C}$$

- Modelo a partir da irradiação média diária

$$r_t = \frac{I_t}{G_t} = \frac{I_o}{G_o} (a_2 + b_2 \cos \omega_I)$$

$$a_2 = 0.409 + 0.5016 \sin(\omega_s - 60^\circ)$$

$$b_2 = 0.6609 - 0.4767 \sin(\omega_s - 60^\circ)$$

Collares-Pereira M, Rabl A. The average distribution of solar radiation-correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. Solar Energy 1979;22(2):155–64.



ELSEVIER


 Available online at www.sciencedirect.com
ScienceDirect

Solar Energy 110 (2014) 168–173

**SOLAR
ENERGY**
www.elsevier.com/locate/solener

Brief Note

Extreme overirradiance events in São Paulo, Brazil

 Marcelo Pinho Almeida^{a,*}, Roberto Zilles^a, Eduardo Lorenzo^b
^a *Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos, Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, Brazil*
^b *Grupo de investigación en Sistemas Fotovoltaicos, Instituto de Energía Solar, Universidad Politécnica de Madrid, Spain*

Received 28 February 2014; received in revised form 15 July 2014; accepted 8 September 2014

Available online 29 September 2014

Communicated by: Associate Editor Christian A. Gueymard

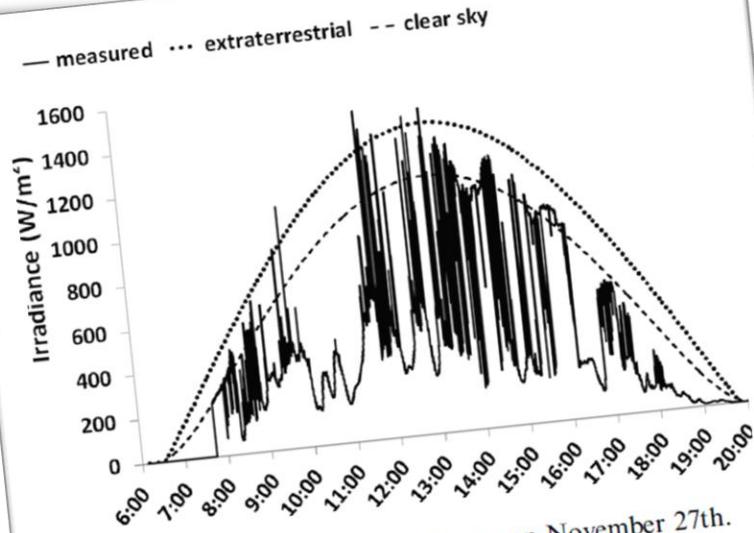


Fig. 3. Global horizontal irradiance on November 27th.

ena of overirradiance have been pointed all over the World. This note presents the most extreme enhancement event reported which contains an irradiance reading of 1590 W/m² measured in São Paulo (latitude 23°32'S) at relatively low altitude (760 m



Fig. 1. Examples of sky conditions around 13:00 on November 27th, but they do not necessarily represent the moments of maximum irradiance.

Radiação global na horizontal

Modelos de decomposição

Ajudam a determinar radiação horária direta e difusa a partir da medida de radiação global na horizontal – dados mais comumente medidos.

A estimativa das componentes direta e difusa é essencial para determinar a radiação global num plano inclinado. (E ainda útil para outras aplicações, e.g. dimensionamento de sistemas com concentração solar que só utilizam radiação direta.)

De facto o problema é a determinação da radiação difusa pois, uma vez resolvido esse problema, conhecida a radiação global é trivial calcular a radiação direta: é a diferença entre as outras!

Radiação global na horizontal

Modelos de decomposição

Liu & Jordan 1960 observaram que $\frac{I_d}{I_o} = 0.271 - 0.2939 \frac{I_b}{I_o}$

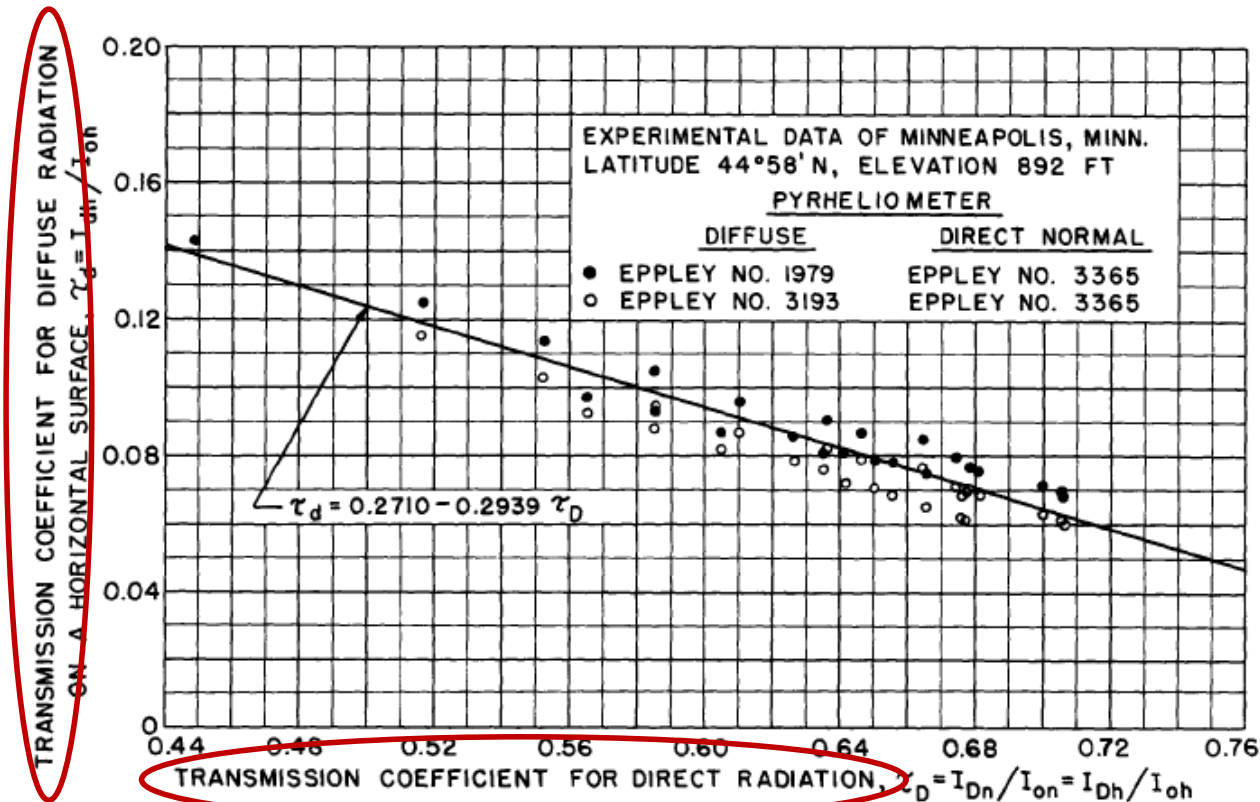


FIG. 3—Comparison of the empirical relation between the intensities of direct and diffuse radiation on a horizontal surface derived from the data for Hump Mountain, N. C., with the data for Minneapolis, Minn.

Radiação global na horizontal

Modelos de decomposição

Liu & Jordan 1960 observaram que $\frac{I_d}{I_o} = 0.271 - 0.2939 \frac{I_b}{I_o}$

Ora, como

$$\frac{I_t}{I_o} = (I_b + I_D)/I_o$$

Vem

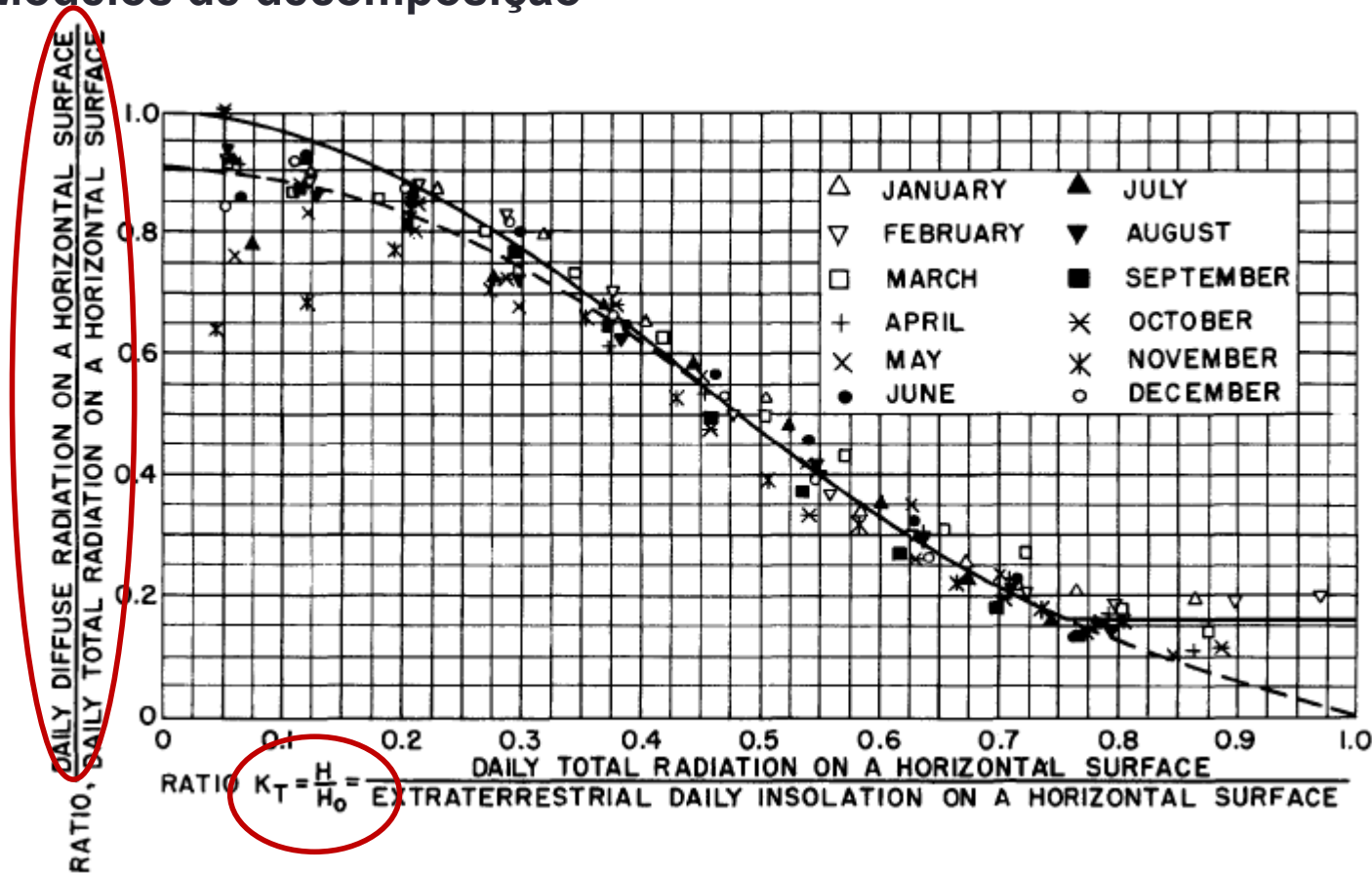
$$\frac{I_d}{I_o} = 0.384 - 0.416 \frac{I_t}{I_o}$$

Pelo que podemos calcular a radiação difusa I_d conhecendo a radiação total I_t (e calculando a radiação extraterrestre I_o)

Mais interessante ainda foi terem observado que existe uma relação entre os rácios das radiações global/extraterrestre e as radiações difusa/global

Radiação global na horizontal

Modelos de decomposição



Mais interessante ainda foi terem observado que existe uma relação entre os rácios das radiações global/extraterrestre e as radiações difusa/global

Radiação global na horizontal

Modelos de decomposição

Modelo de Ruth & Chant

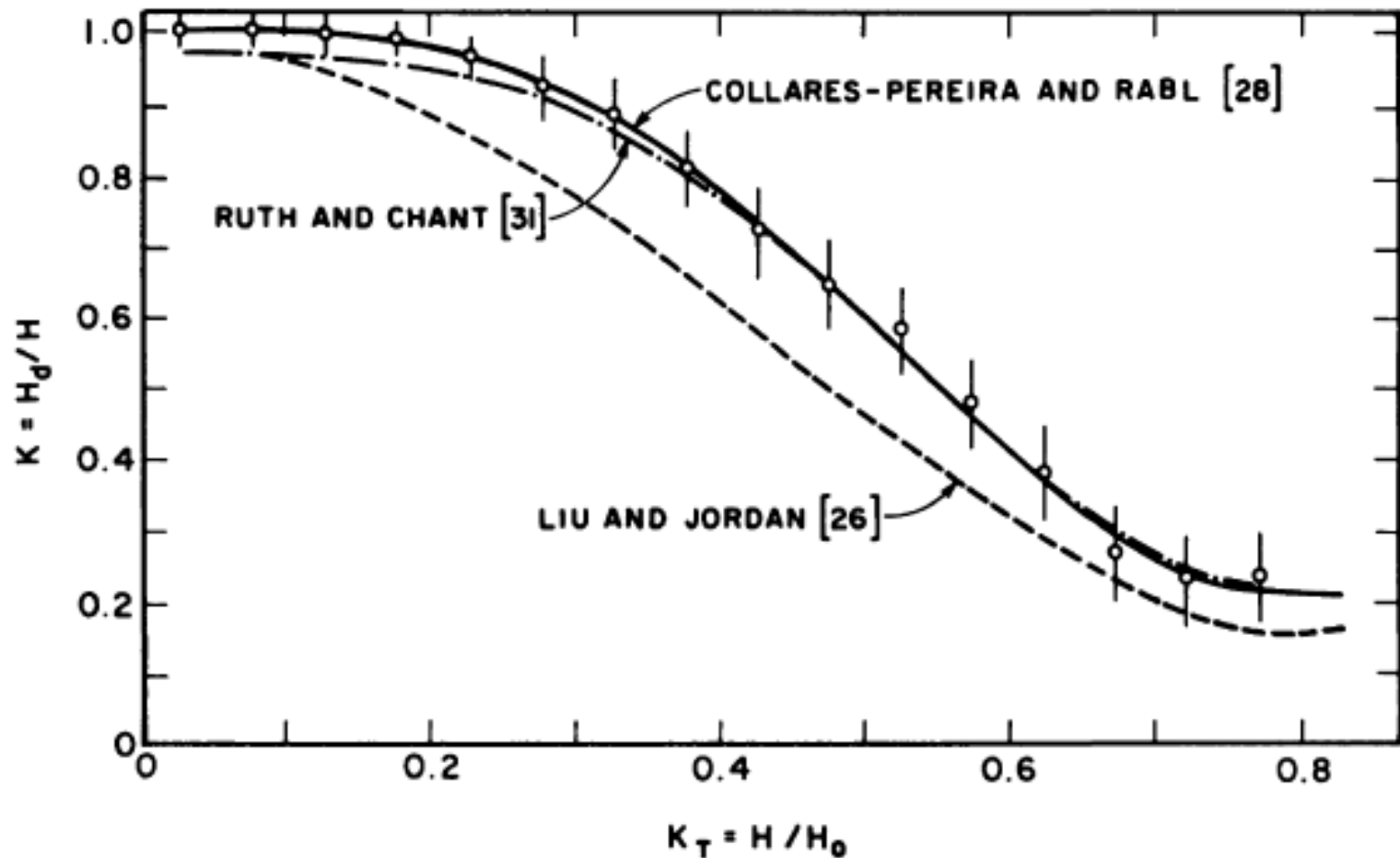
$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} 0.98 & K_T \leq 0.1, \\ 0.910 + 1.154K_T - 4.936K_T^2 + 2.848K_T^3, & 0.1 \leq K_T \leq 0.7. \end{cases}$$

Modelo de Collares Pereira

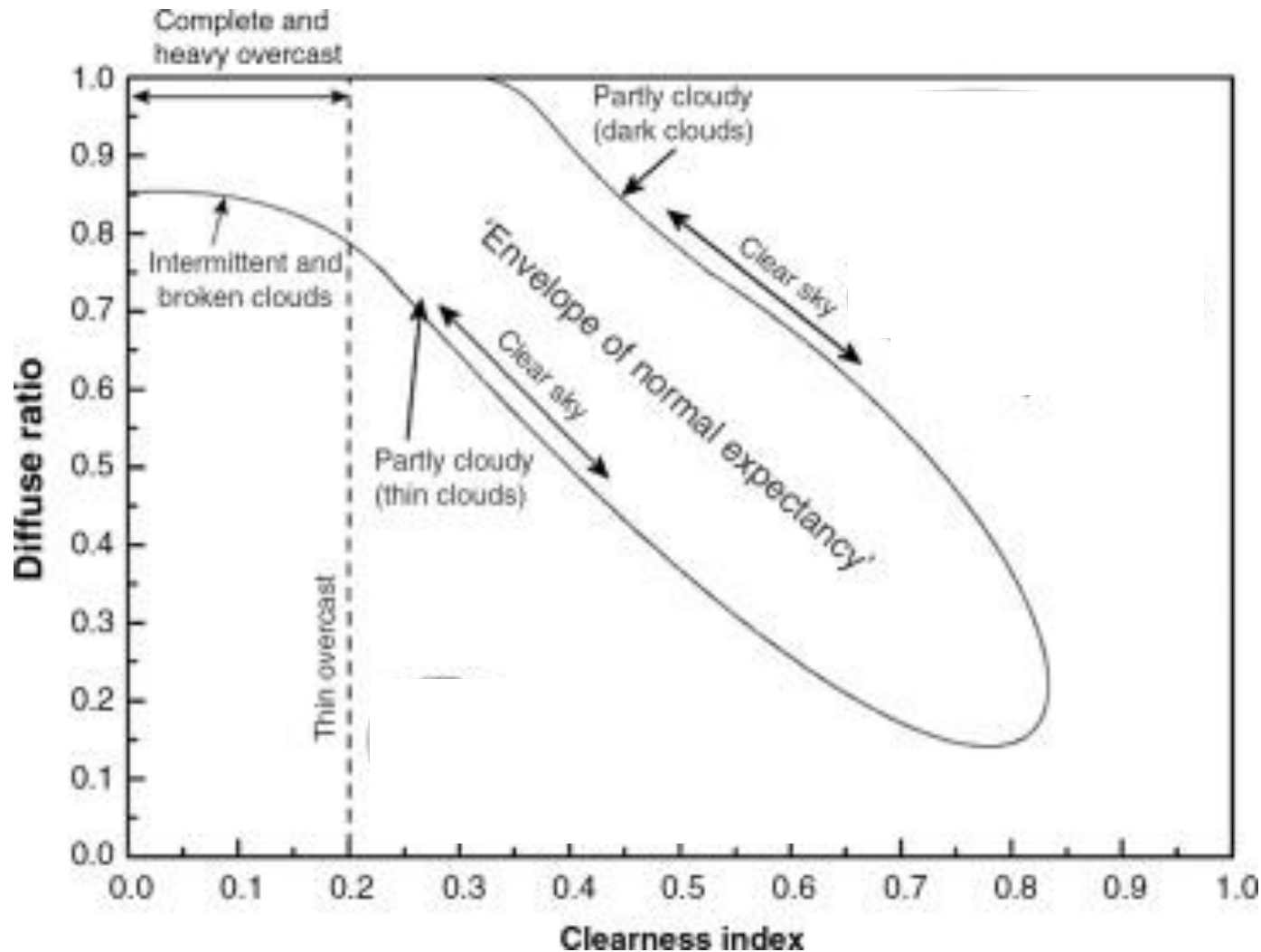
$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} 0.99, & K_T \leq 0.17, \\ 1.188 - 2.272K_T + 9.473K_T^2 - 21.856K_T^3 + 14.648K_T^4, & 0.17 \leq K_T \leq 0.8. \end{cases}$$

Radiação global na horizontal

Modelos de decomposição



Radiação global na horizontal



Radiação global na horizontal

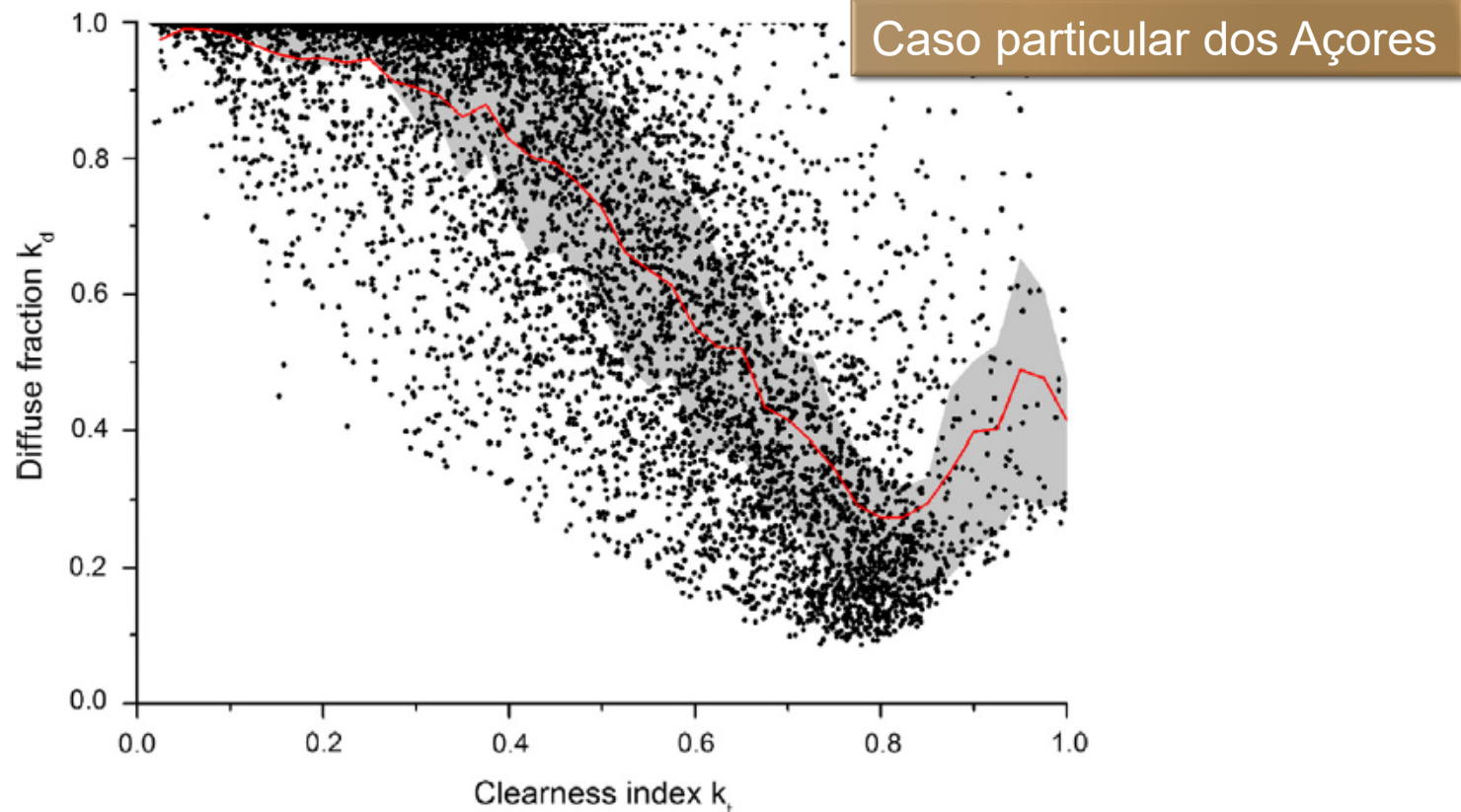


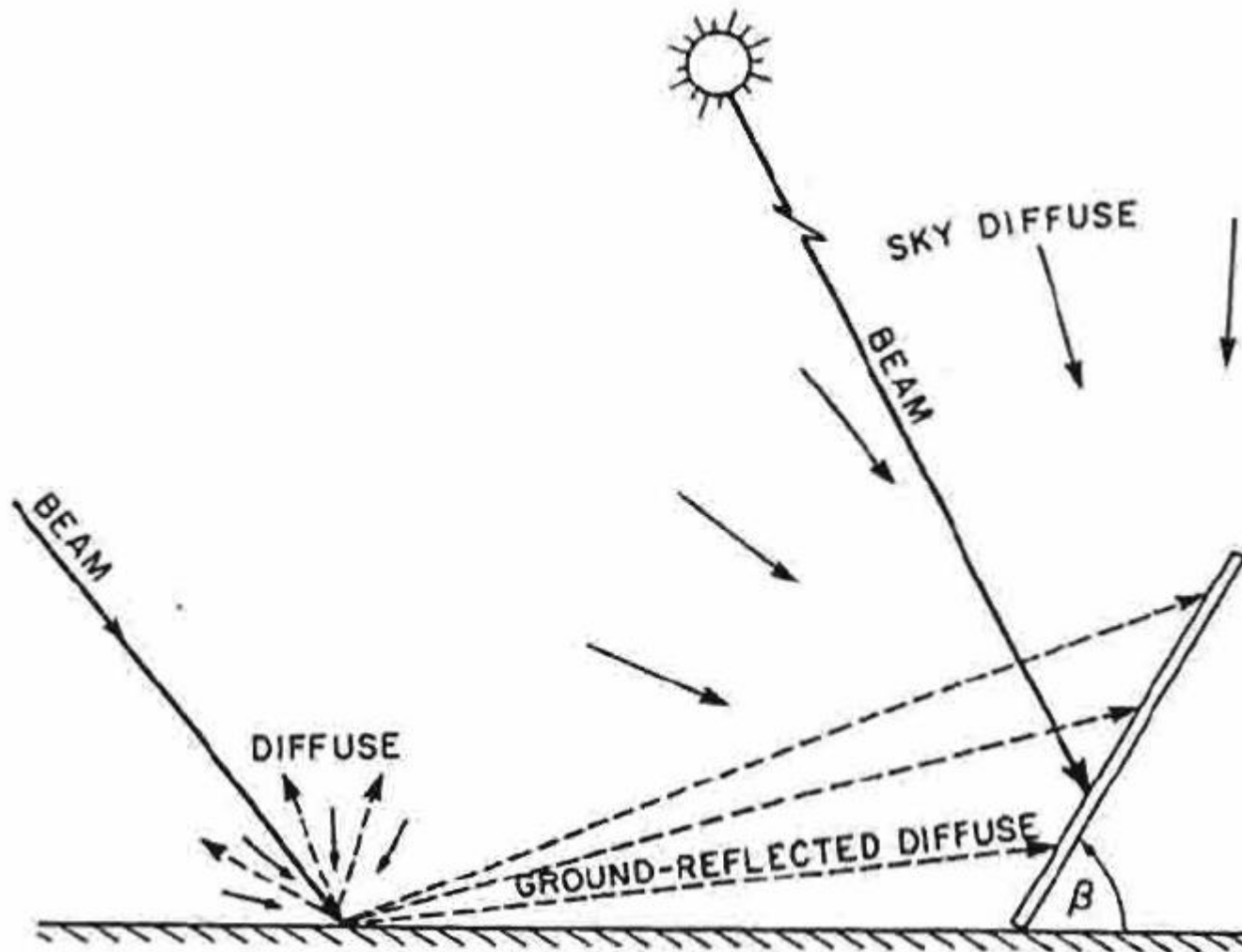
Fig. 2. The hourly diffuse fraction k_d (measured values) as a function of clearness index k_t . Grey region represents the band between the 25th and 75th quantile and in red is the mean line. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

Radiação global n

Cada um destes ajustes revela-se mais adequado para diferentes regiões/climas

Models	k_d	Intervals
Erbs et al.	$1.0 - 0.09 k_t$	$k_t \leq 0.22$
	$0.951 - 0.1604 k_t + 4.388 k_t^2 - 16.638 k_t^3 + 12.336 k_t^4$	$0.22 < k_t \leq 0.80$
	0.165	$k_t > 0.80$
Soares et al.	1.0	$k_t \leq 0.17$
	$0.90 + 1.1 k_t - 4.5 k_t^2 + 0.01 k_t^3 + 3.14 k_t^4$	$0.17 < k_t \leq 0.75$
	0.17	$k_t > 0.75$
Chandrasekaran and Kumar	1.0	$k_t \leq 0.24$
	$0.97 + 0.80 k_t - 3.00 k_t^2 - 3.10 k_t^3 + 5.2 k_t^4$	$0.24 < k_t \leq 0.80$
	0.17	$k_t > 0.80$
Karatasou et al.	$0.9995 - 0.05 k_t - 2.4156 k_t^2 + 1.4926 k_t^3$	$k_t \leq 0.78$
	0.17	$k_t > 0.78$
	$0.995 - 0.081 k_t$	$k_t \leq 0.21$
Miguel et al.	$0.724 + 2.738 k_t - 8.32 k_t^2 + 4.967 k_t^3$	$0.21 < k_t \leq 0.76$
	0.18	$k_t > 0.76$
	$1.012 - 0.248 k_t$	$k_t \leq 0.3$
Reindl et al.	$1.45 - 1.67 k_t$	$0.3 < k_t \leq 0.78$
	0.147	$k_t > 0.78$

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):

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

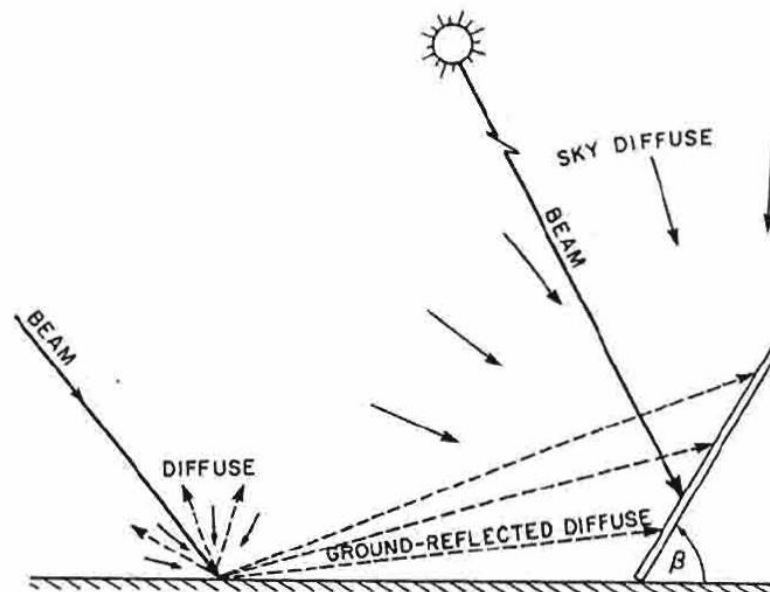
$$I_{b\beta\gamma} = \tau_b(\omega) I_{0\beta\gamma}$$

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

$$I_{b\beta\gamma} = I_b \int_{\text{1 h}} \tau_b(\omega) \dot{I}_{0\beta\gamma} d\omega \bigg/ \int_{\text{1 h}} \tau_b(\omega) \dot{I}_0 d\omega$$

Assumindo que a transmitância não muda nessa hora

$$I_{b\beta\gamma} = I_b \int_{\text{1 h}} \dot{I}_{0\beta\gamma} d\omega \bigg/ \int_{\text{1 h}} \dot{I}_0 d\omega,$$

$$I_{b\beta\gamma} = I_b (\dot{I}_{0\beta\gamma} / \dot{I}_0).$$

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

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

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

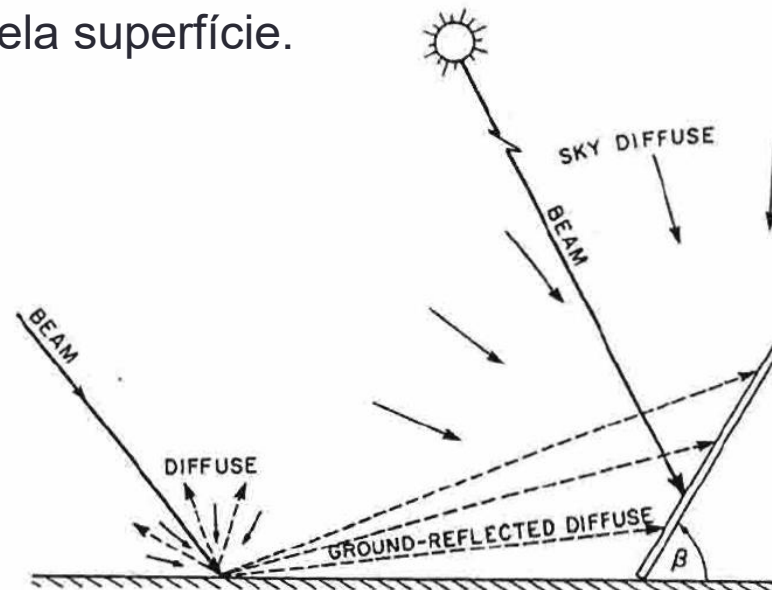
Ao longo de um mês podemos calcular o valor diário para o dia característico!

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

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

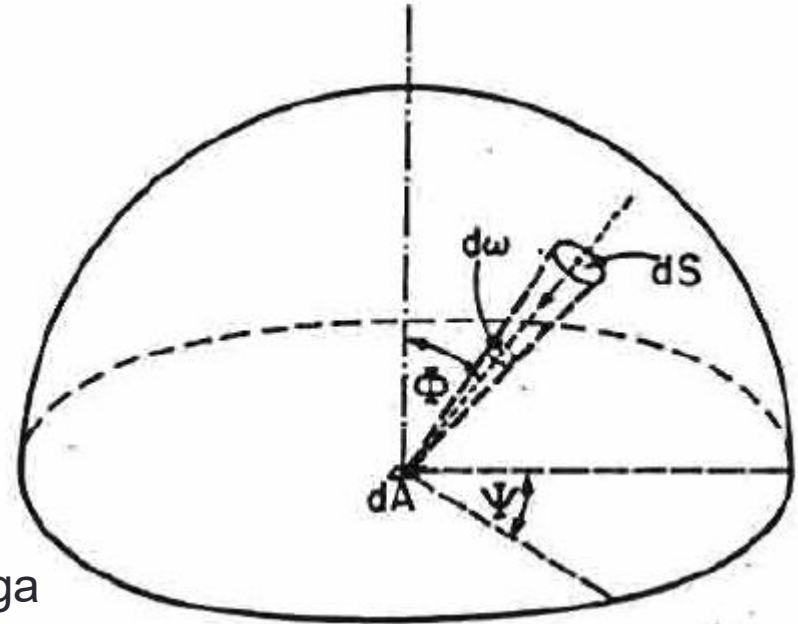
em que i_d tem unidades de $\text{W/m}^2/\text{sr}$.

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

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

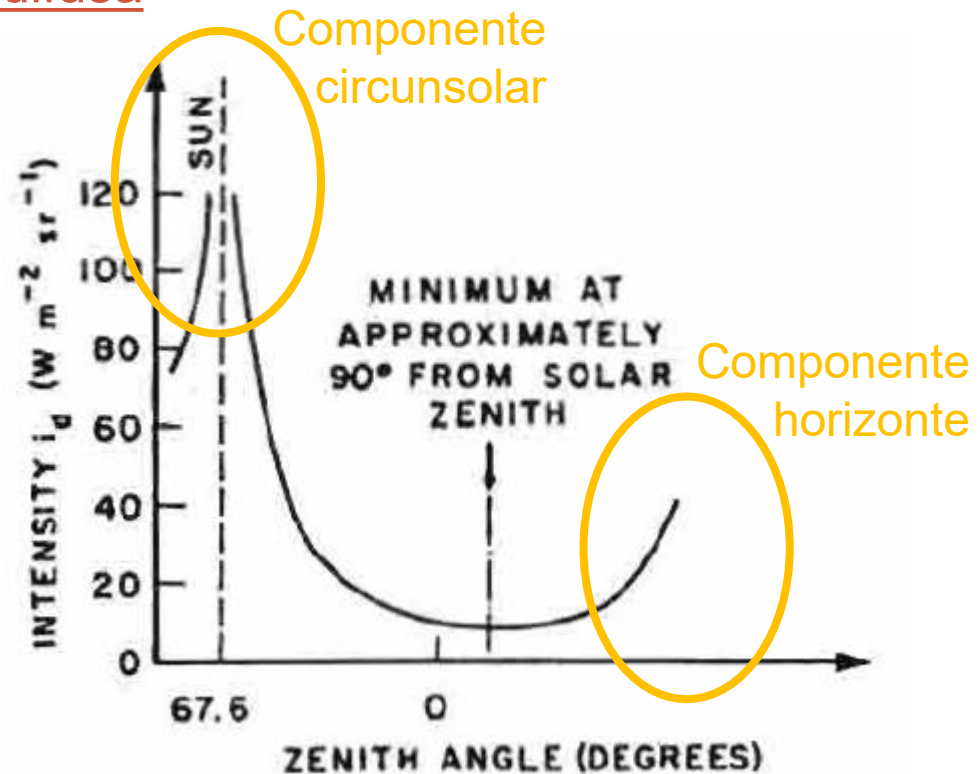
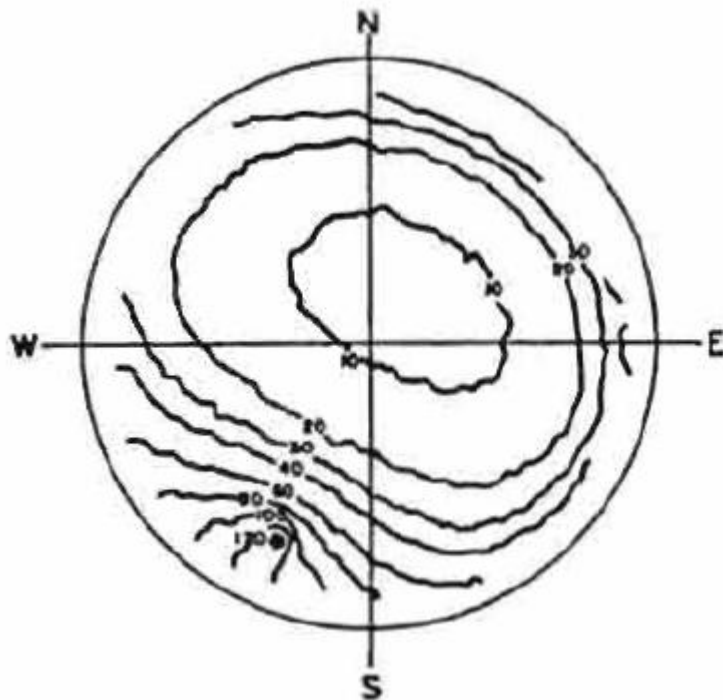
que se fosse isotrópica seria

$$I_d = \pi i_d$$



Radiação difusa no plano inclinado

Distribuição angular da radiação difusa

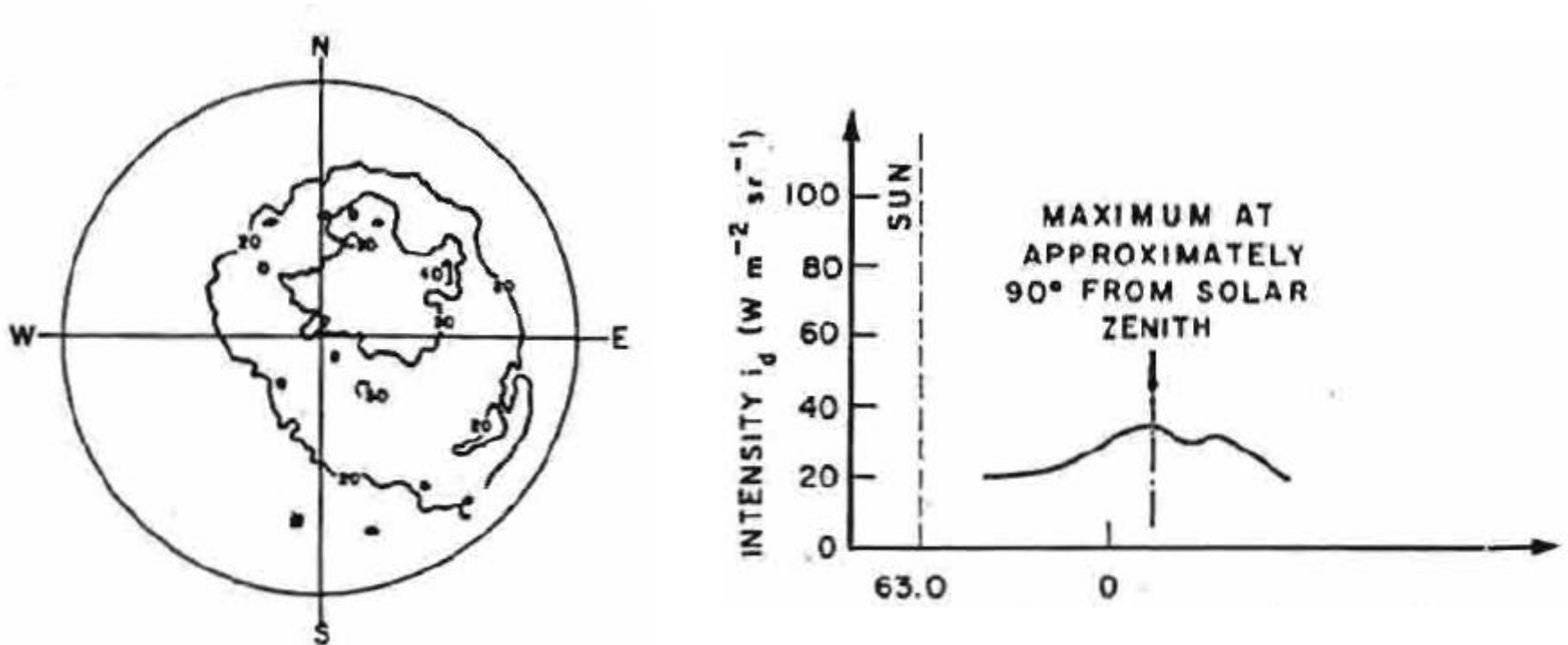


Para um dia de céu limpo

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

Radiação difusa no plano inclinado

Distribuição angular da radiação difusa

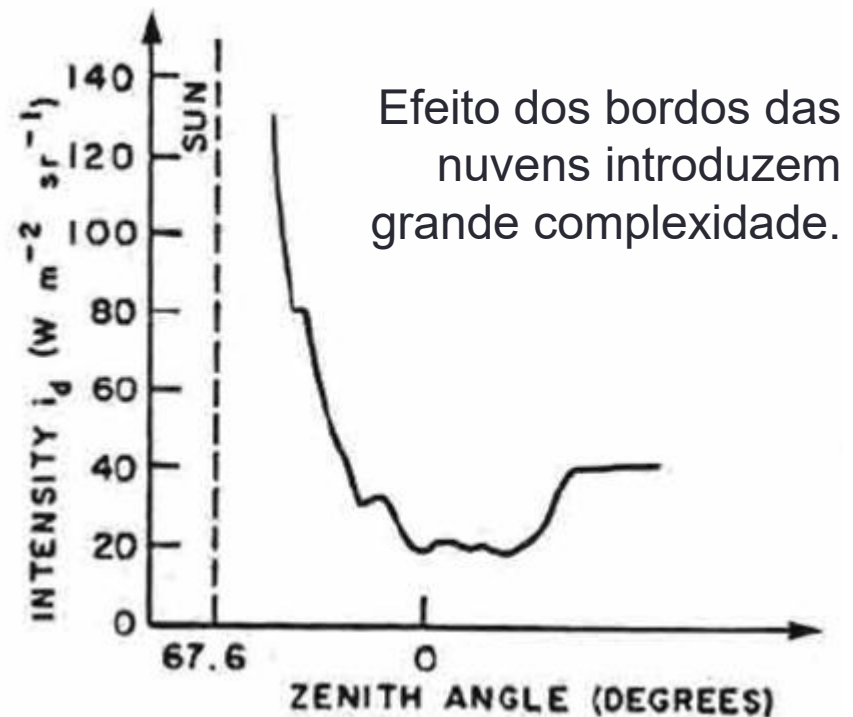
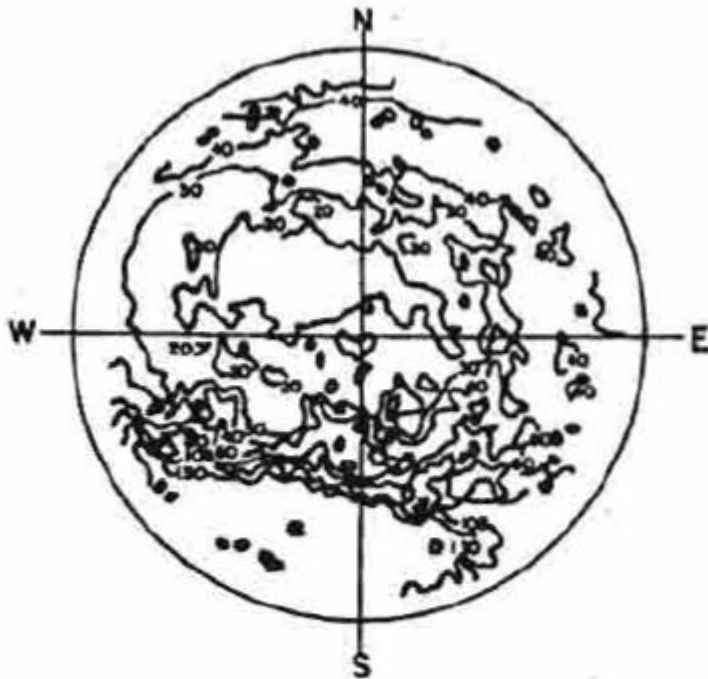


Para um dia de céu nublado

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*)

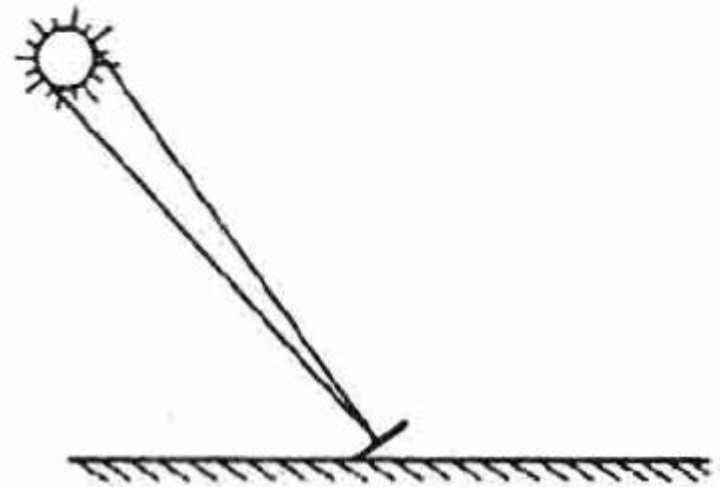
Radiação difusa no plano inclinado

Modelo circumsolar

Para dias de céu limpo; a radiação difusa é sobretudo circumsolar 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



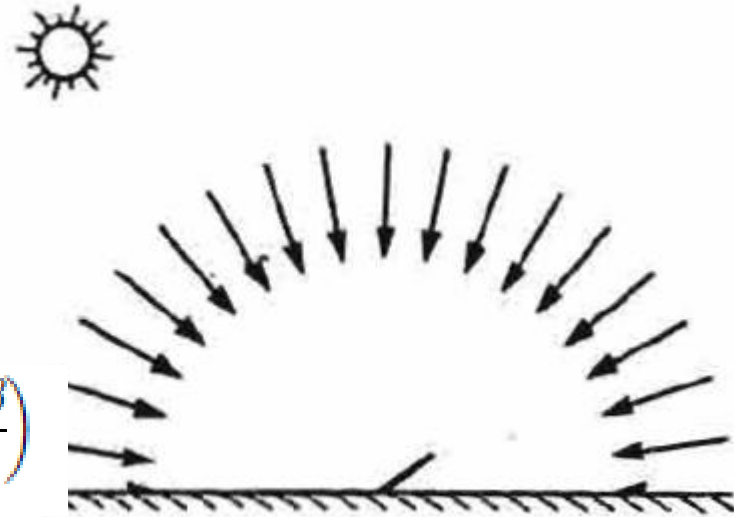
Radiação difusa no plano inclinado

Modelo isotrópico

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

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

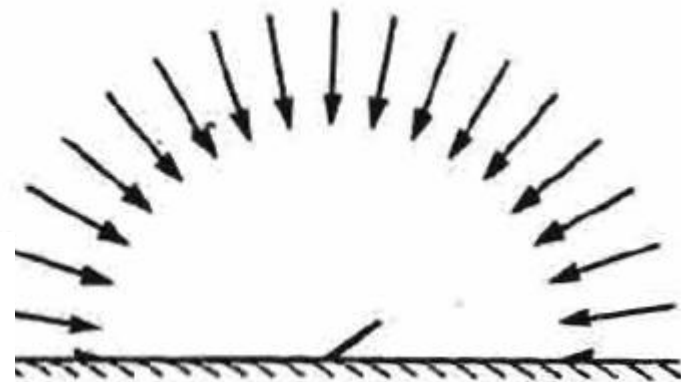
Este modelo geralmente subestima a
radiação difusa de superfícies
orientadas para o equador.



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 circumsolar e uma componente de horizonte

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

[horizonte] [circumsolar]

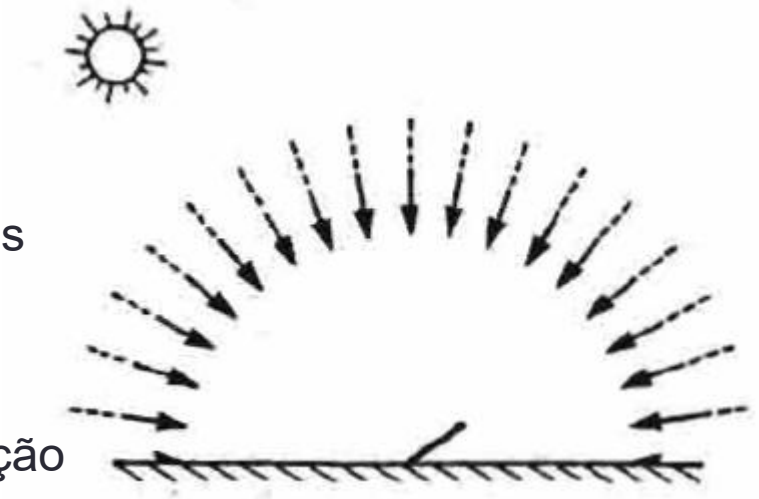
Em que F modula a cobertura de nuvens

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

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

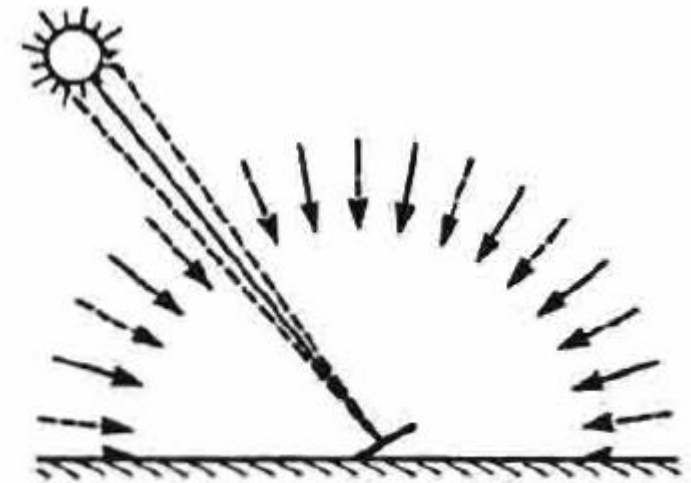
Modelo anisotrópico (Hay)

Considera componentes difusa circumsolar 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, circumsolar (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

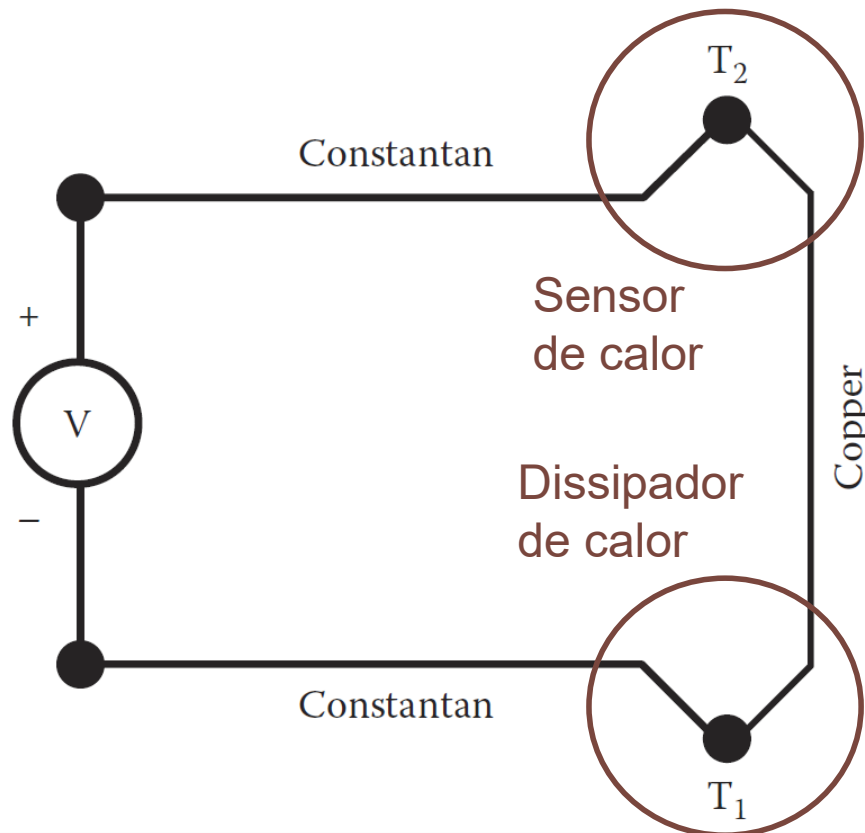
$\square \varepsilon$ bin	f11	f12	f13	f21	f22	f23
1 Overcast	-0.008	0.588	-0.062	-0.06	0.072	-0.022
2	0.13	0.683	-0.151	-0.019	0.066	-0.029
3	0.33	0.487	-0.221	0.055	-0.064	-0.026
4	0.568	0.187	-0.295	0.109	-0.152	-0.014
5	0.873	-0.392	-0.362	0.226	-0.462	0.001
6	1.132	-1.237	-0.412	0.288	-0.823	0.056
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

MEDIÇÃO DE RADIACÃO SOLAR

Miguel Centeno Brito

Como medir radiação

Detectores térmicos



Efeito de Seebeck

(1821, Thomas Seebeck)

À temperatura ambiente, uma junção entre **constantan** (liga de cobre e níquel) e **cobre** apresenta $41 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ entre T_2 e T_1

Aplicação em **termopares** ou **termopilhas** (i.e. termopares em série)

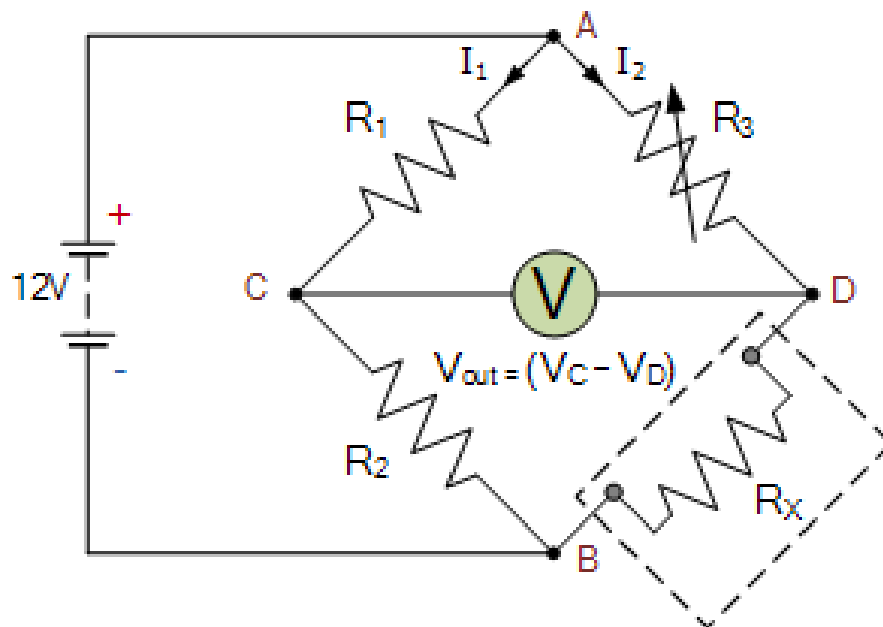
Apresenta baixa selectividade espectral

Como medir radiação

Detectores térmicos

Bolómetro é baseado na variação da resistência eléctrica dos materiais com a temperatura. Baixa selectividade espectral.

Configuração em ponte de Wheatstone ($V = 0$ quando $R_1/R_3 = R_2/R_x$).



Como medir radiação

Fotodetectores

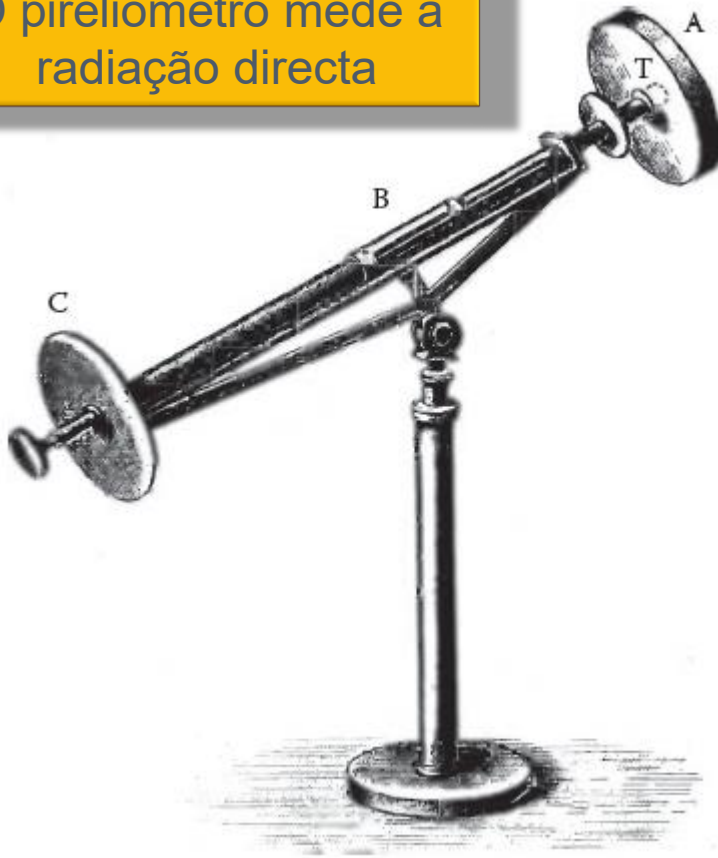
O sensor é activado pela incidência dos fótons. Apresentam selectividade espectral.

Os principais tipos de fotodetectores são:

- ❑ **Fotodiodos** – apropriados para radiação visível, IV e UV próximos, quando ligados em curto circuito produzem uma corrente proporcional à radiação solar incidente;
- ❑ **Fotocondutores** – apropriado para radiação infravermelha, a condutividade eléctrica do material varia com o fluxo de radiação incidente.

Instrumentos históricos

O pireliómetro mede a radiação directa



Pireliómetro de Pouillet (1837)

É um calorímetro para a medida de radiação directa normal, baseado na variação da temperatura de água num cilindro enegrecido (A).

A temperatura era medida com um termómetro (B), em contacto com a água.

O disco C é usado para alinhamento com o disco solar.

Com isto, Claude Pouillet mediu para a constante solar o valor de 1228 W/m^2

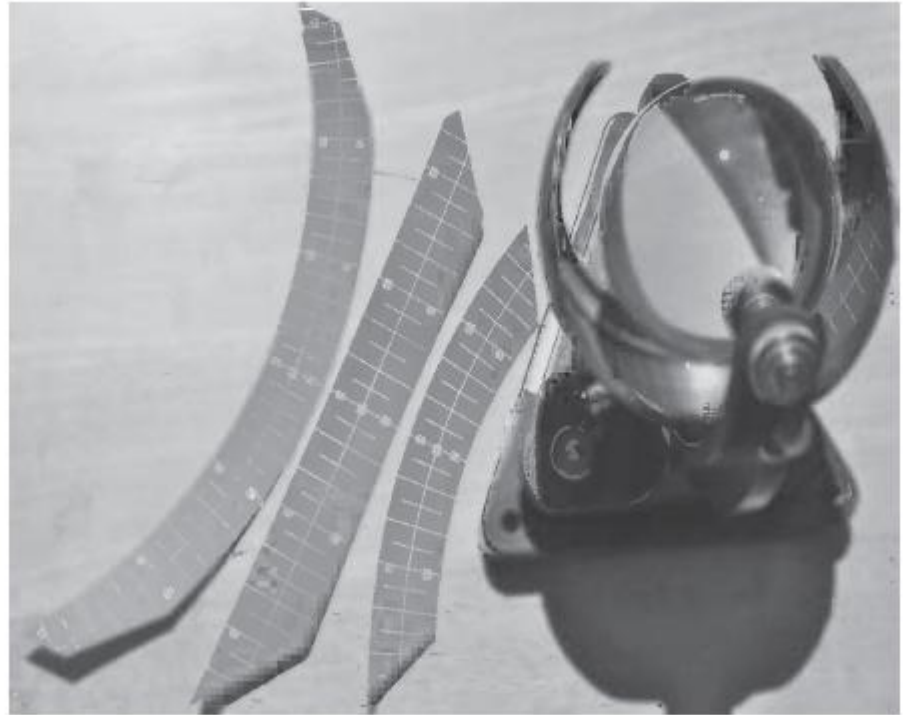
Instrumentos históricos

Esfera de Campbell-Stokes (1853)

para o registo da duração da radiação solar e estimar a irradiação solar diária.

Esfera funciona como concentrador de radiação solar que queima papel de registo (fitas diferentes para cada estação do ano).

Ainda é usado hoje em dia.

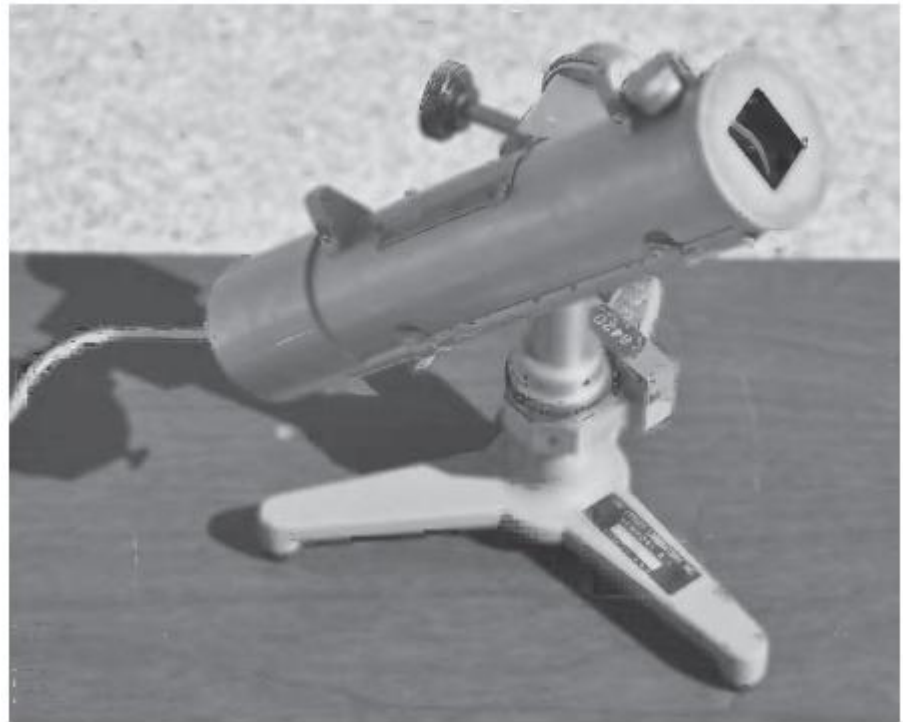


Instrumentos históricos

Pireliómetro de Angström (1893)

instrumento calorimétrico, ainda em uso, com pequenas adaptações.

Duas pequenas fitas pintadas de negro, alinhadas com duas entradas rectangulares. Um *shutter* tapa/destapa cada uma das fitas em intervalos de 90". A fita sombreada é aquecida por uma corrente eléctrica até a temperatura das fitas ser igual.



Mede corrente eléctrica para estimar
fluxo de calor (=radiação solar)

Instrumentos históricos



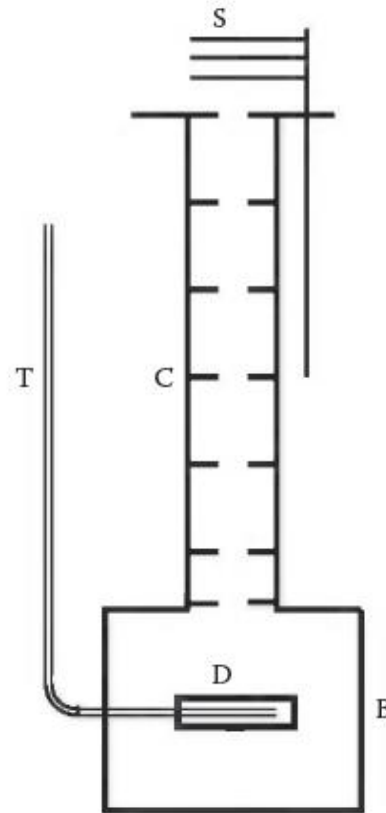
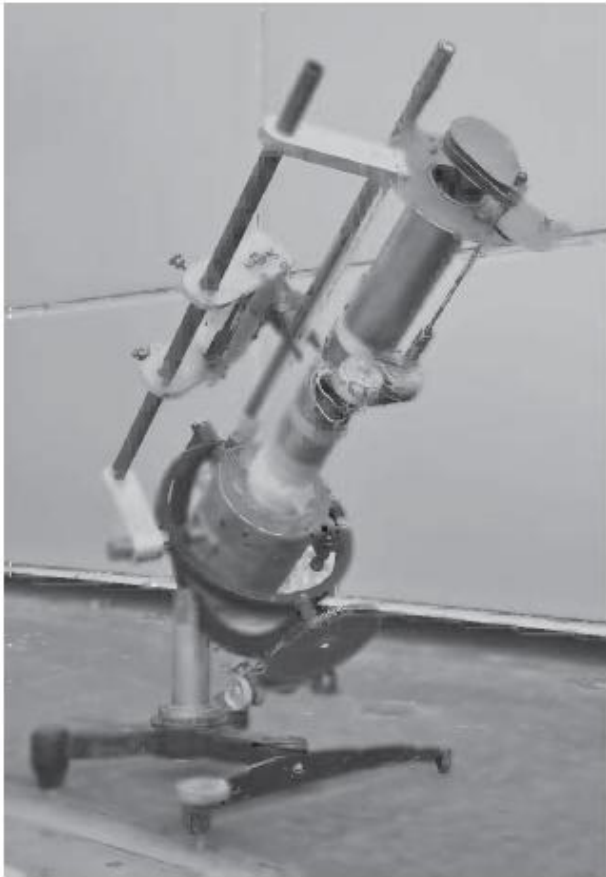
Piranómetro de Callendar (1898)

também conhecido como *receptor bolométrico de radiação solar*.

Composto por 4 quadrados de mica sobre uma rede de fios de platina, dois pintados de negro e dois reflectores, montados como ponte de Wheatstone.

O piranómetro mede a radiação global

Instrumentos históricos

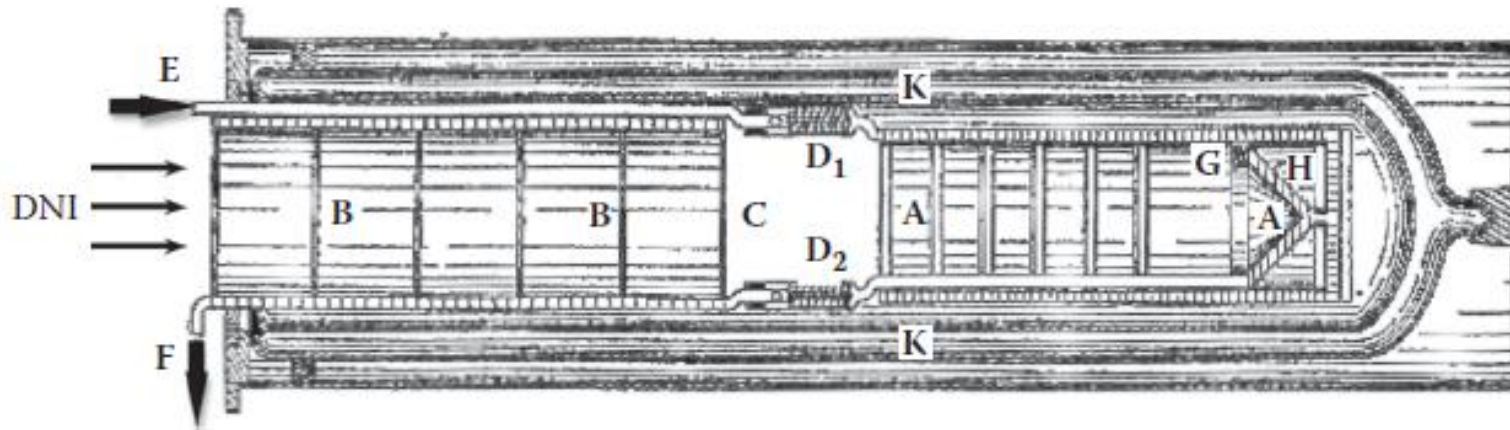


Pireliómetro de Abbot (1906)

calorímetro para medição de radiação directa normal.

O termómetro T mede a temperatura do disco D na base do instrumento que inclui ainda um colimador C e um *shutter* S de entrada.

Instrumentos históricos

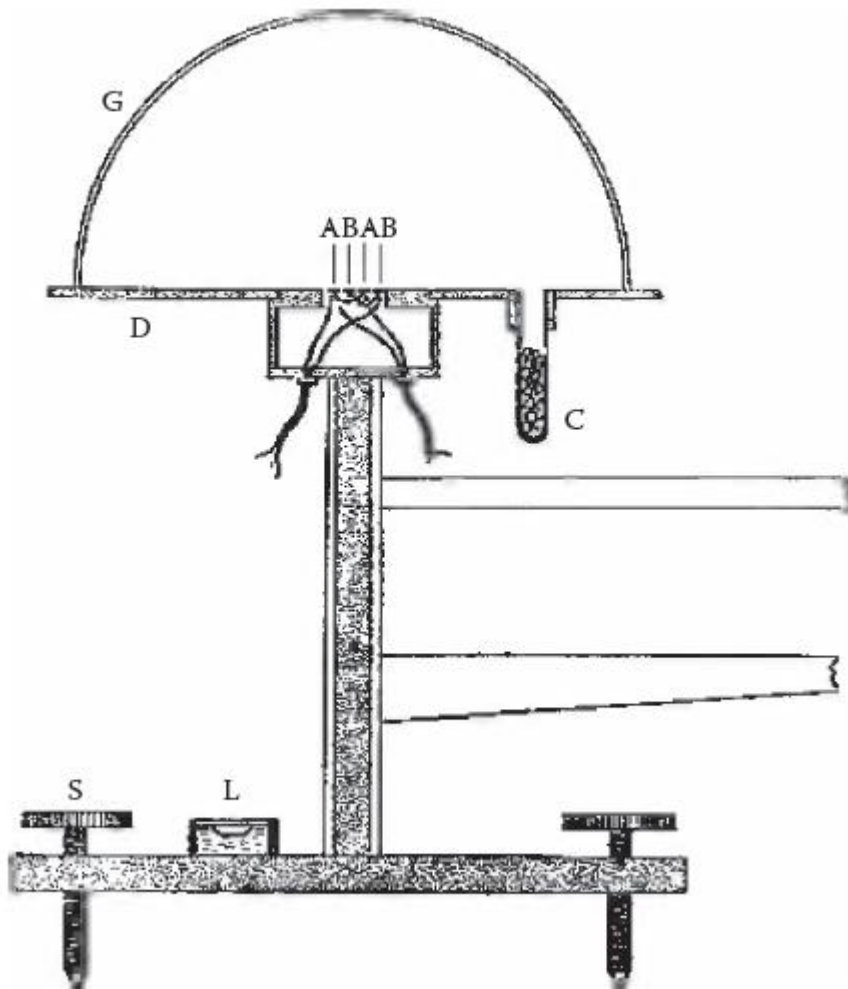


Pireliómetro de Smithsonian (1910), também desenvolvido por Abbot.

A radiação passa no colimador BB e abertura C, sendo absorvida na câmara A (negro, com um cone na base para favorecer a absorção da radiação), Sistema isolado termicamente pelo cilindro oco K. O circuito de água destilada passa pelas espirais em marfim D1 e D2 (com fio de platina no interior) antes de sair por F.

A diferença de temperatura entras as espirais é garantida por uma corrente eléctrica em D1.

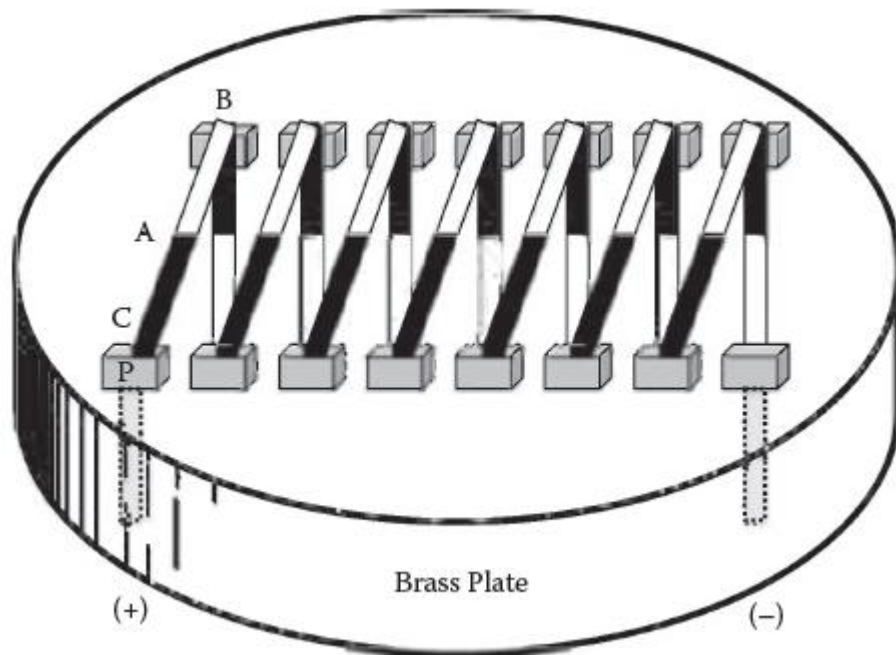
Instrumentos históricos



Piranómetro de Angström (1919), usa compensação eléctrica inventada pelo pai.

Fitas termopilhas brancas (A) e negras (B) montadas num disco de suporte (D) com protecção de uma esfera de vidro (G) e dessecante (C); inclui ainda nível (L) e parafusos de ajuste (S).

Instrumentos históricos



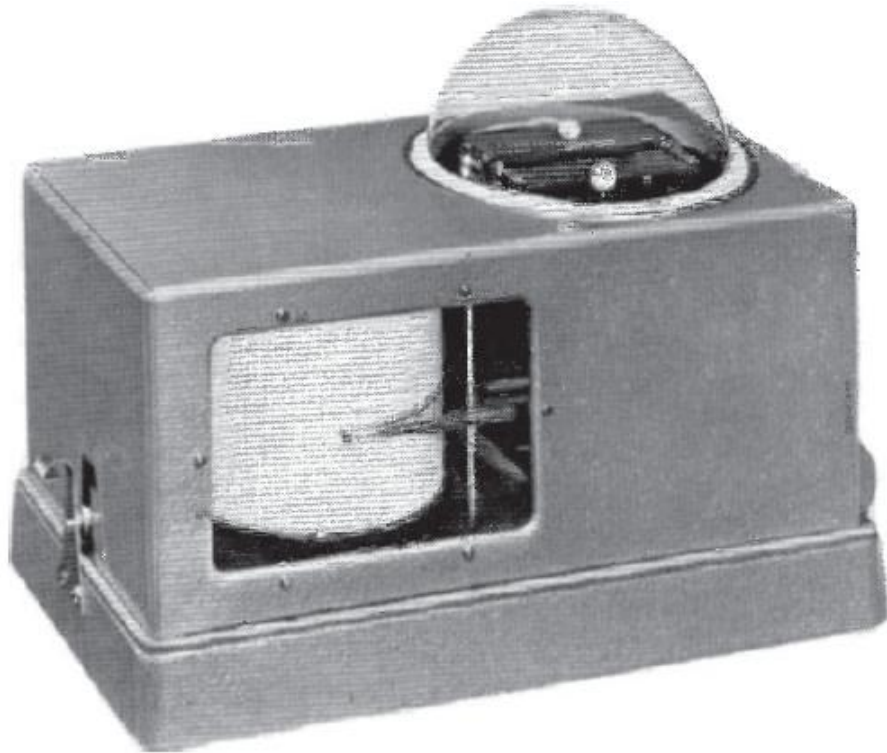
Solarímetro de Kipp & Zonen (1924)

usa a termopilha de Moll com uma série de termojunções de maganin e constantan (ligas de cobre e níquel) muito finas (0.005mm) soldadas em ‘apoios’ de cobre. Os apoios de cobre são aparafusados a um prato de bronze revestido com lacre (isolante eléctrico com boa condução térmica).

Boa e rápida resposta à radiação incidente, porque é fino mas ‘comprido’ e pouco sensível *a temperatura ambiente

Esteve comercialmente disponível até 1989!

Instrumentos históricos



Actinógrafo bimetalico de Robitzsch (1932) ainda comercialmente disponível.

Uma fita bimetalica enegrecida (com 8.5x1.5 cm) deforma-se com o aumento de temperatura. A deflecção induz mecanicamente o movimento da caneta de registo que escreve num tambor que gira com um relógio mecânico ($T = 24\text{h}$ ou 7 dias).

A cúpula de vidro protege das condições exteriores (convecção).

Instrumentos históricos

Pireliômetro Eppley de 180° (1930) usava uma termopilha com 10 termojunções de ligas de ouro-paládio e platina-ródio. Os anéis concêntricos eram revestidos de óxido de magnésio (elevada reflectividade) e lacre.

A câmara, estanque, era cheia de ar seco à pressão atmosférica quando fabricada.

O lacre (Parson, absorção 98% para o espectro solar) degrada-se, ainda que lentamente com a exposição solar.

Como foi muito comum até 1950s, dados de radiação antigos exigem recalibração (20% erro)



Instrumentos históricos

Piranómetro Eppley PSP (1957) – *Precision spectral pyromometer*.



Com compensação eléctrica relativa a temperatura exterior, reduz sensibilidade espectral evitando o óxido de magnésio (tira branca).

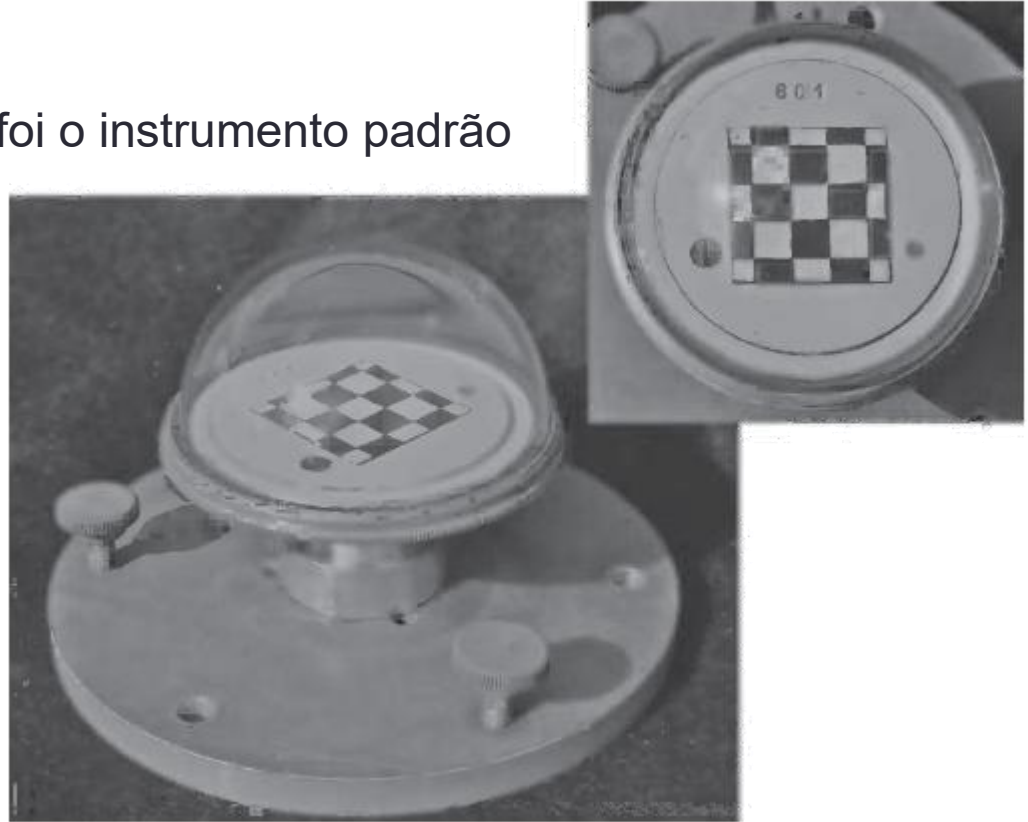
Resposta rápida (1"); dessecante substituível; hemisférios com cores diferentes, como filtros para

para análises espectrais; hemisférios de parede dupla e 'chapéu', para melhor isolamento térmico; ventilador opcional.

Instrumentos históricos

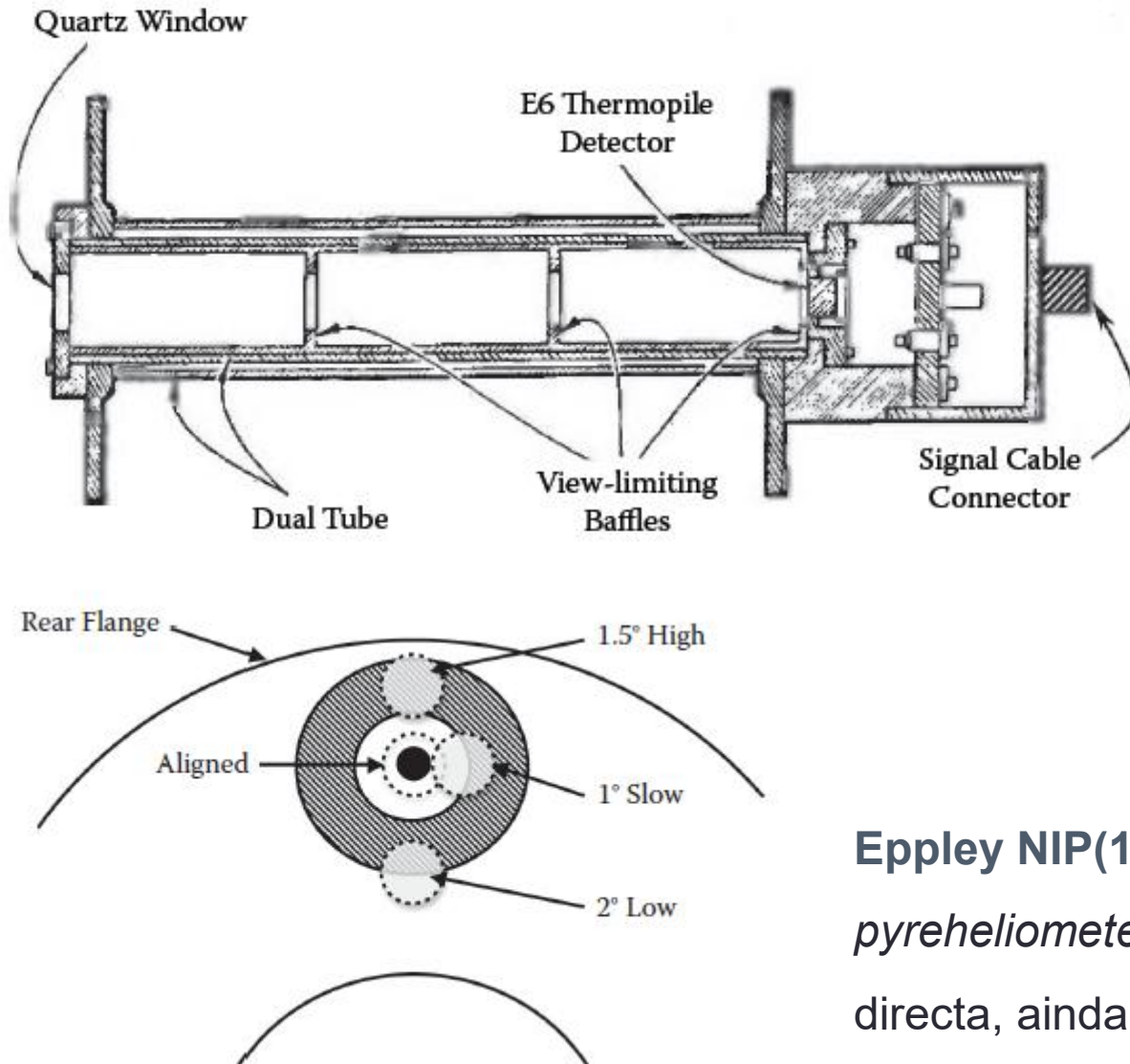
Piranómetro Yanishevsky (1957) foi o instrumento padrão na URSS.

Termojunções de manganin e constantan. As junções quentes são escurecidas com fuligem de carbono e as junções frias com óxido de magnésio.



Comparação entre piranómetros soviéticos e ocidentais apresentam diferenças inferiores a **7 W/m²** na gama de medida entre 0 e 500 W/m² (2008)

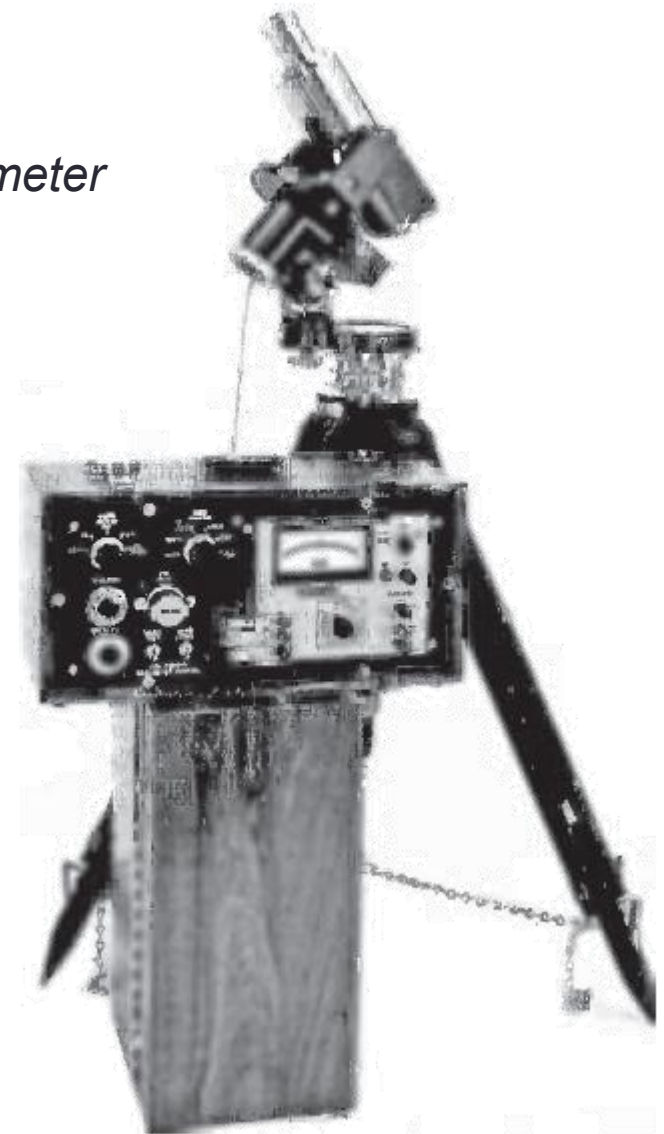
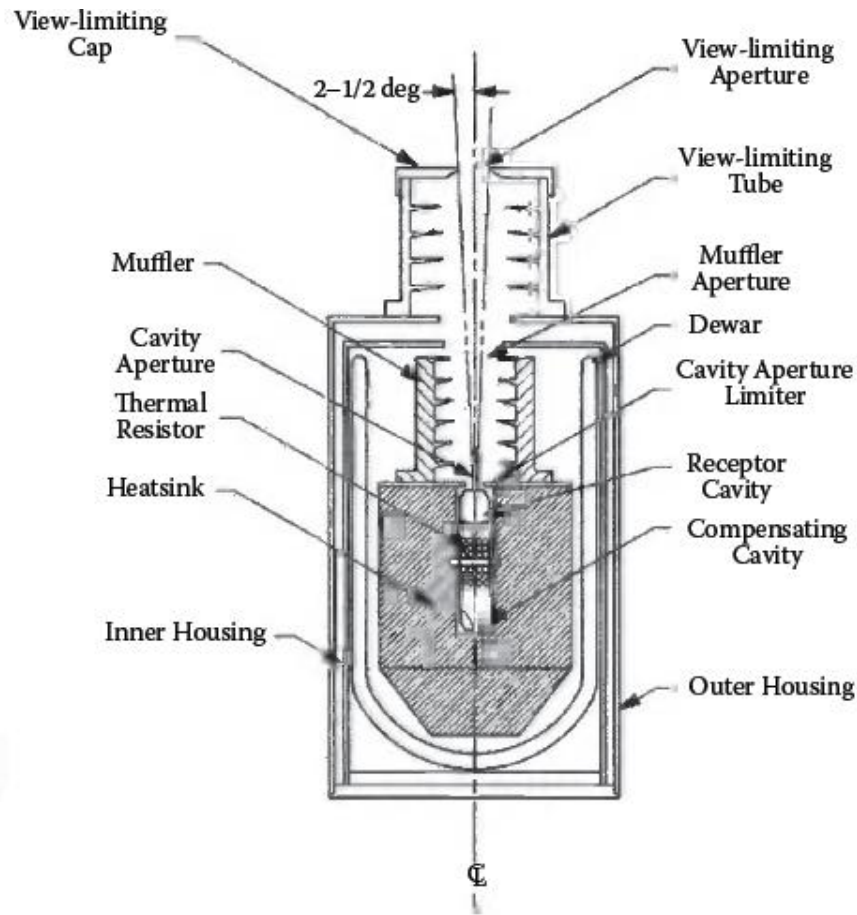
Instrumentos históricos



Eppley NIP(1957) – *normal incidence pyreheliometer* , para medir radiação directa, ainda em uso hoje em dia..

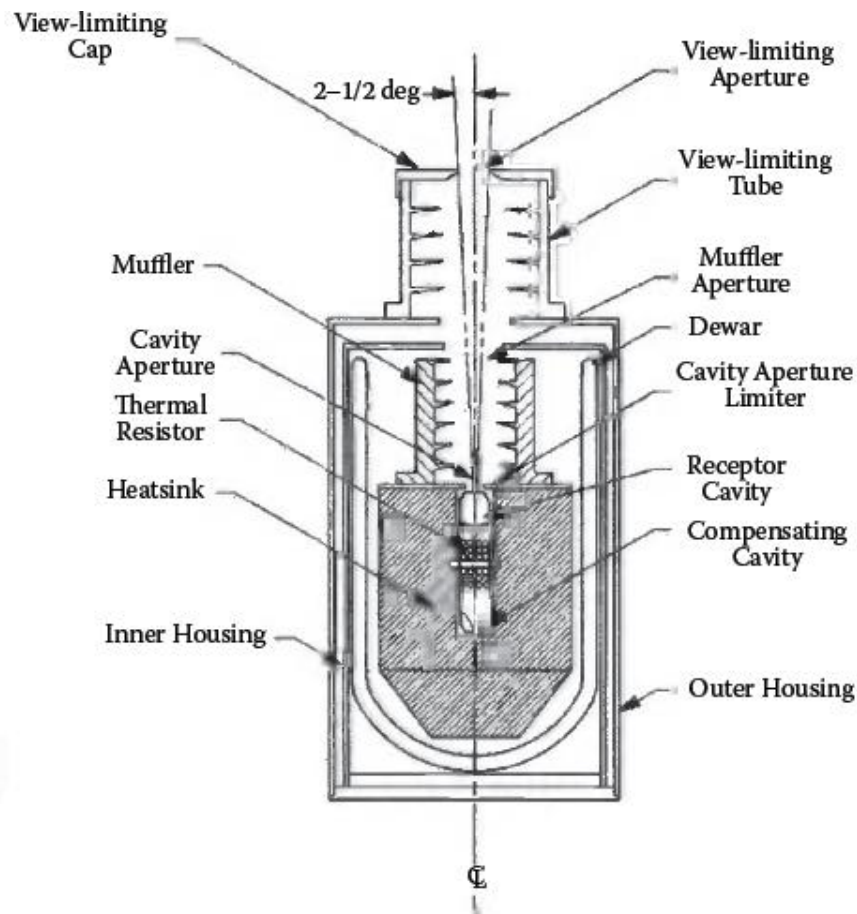
Instrumentos históricos

PACRAD (1969) – *primary absolute cavity radiometer*



Instrumentos históricos

PACRAD (1969) – *primary absolute cavity radiometer*



- ❑ Cavidade para aumentar absorção (reduz fótons reflectidos)
- ❑ Aquecimento resistivo calibrado
- ❑ Dissipador de calor com elevada massa para garantir que temperatura 'fria' não varia com fluxo de calor do receptor.

Utilizado como referência para calibração de piranómetros e pireliómetros

Instrumentos históricos



Pireliómetro Eppley 8-48 (1969)

substitui o Eppley 180°.

Junção negra ainda lacre de Parson
mas junção branca com sulfato de
bário

Resposta angular de $\pm 2^\circ$ até 70° e
 $\pm 5^\circ$ entre $70-80^\circ$.

Instrumentos históricos

LI-COR Model LI-200SA (1971)

Piranómetro *low cost* com fotodíodo de silício.

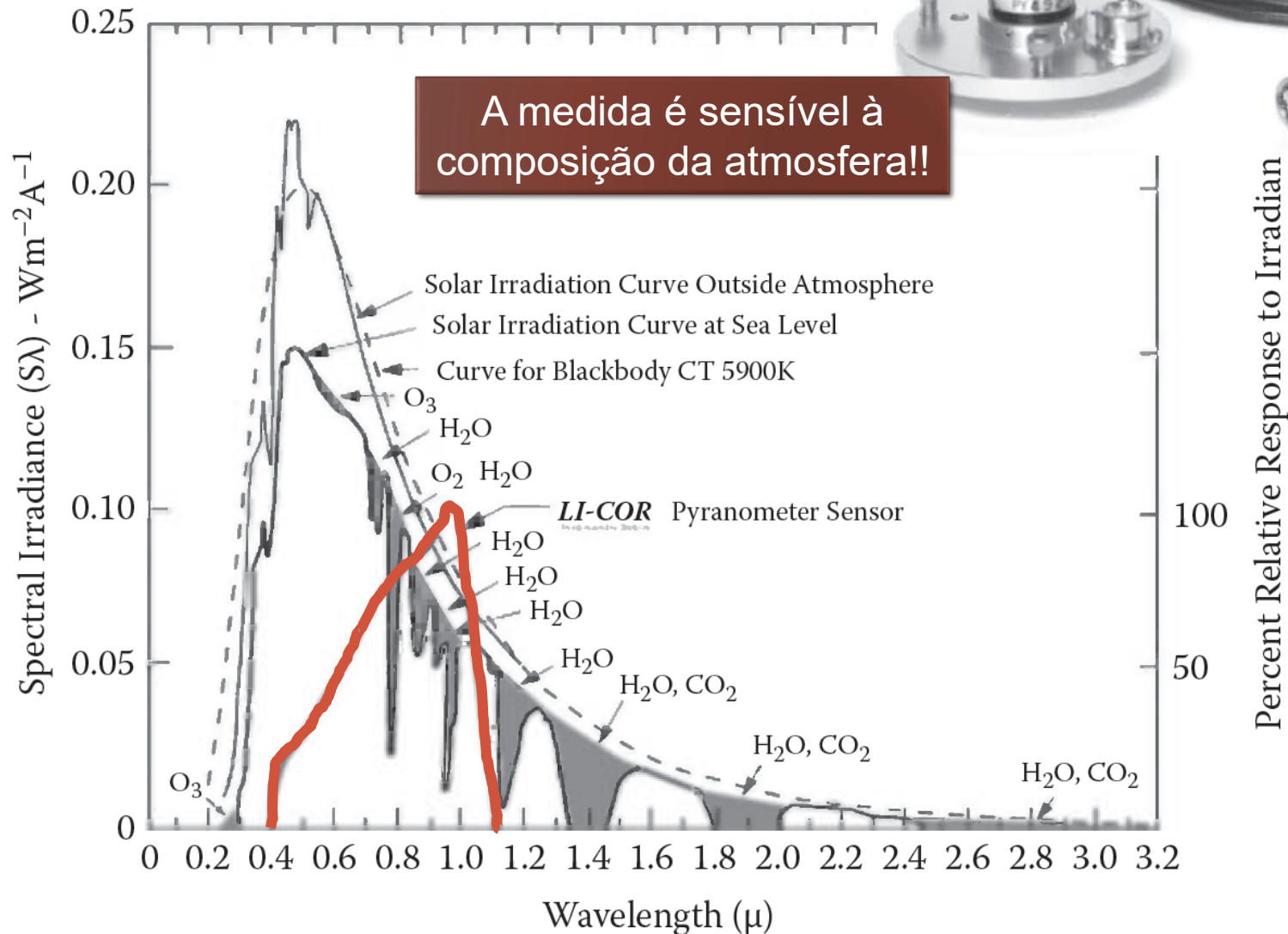


- ❑ Resposta **muito rápida** ($10\mu\text{s}$) mas **não uniforme** para todo o espectro solar, com limitações sobretudo no infravermelho e no azul (400nm) pelo que pode trazer erros importantes em dias de céu limpo.
- ❑ Corrente do fotodíodo aumenta com a **temperatura ambiente** pelo que, se não for ajustado à temperatura exterior (medida independente) pode introduzir um erro de 3% para uma variação de 10°C
- ❑ Resposta **angular** limitada a $0-60^{\circ}\text{C}$, pode ser melhorada usando difusor óptico.

Instrumentos históricos

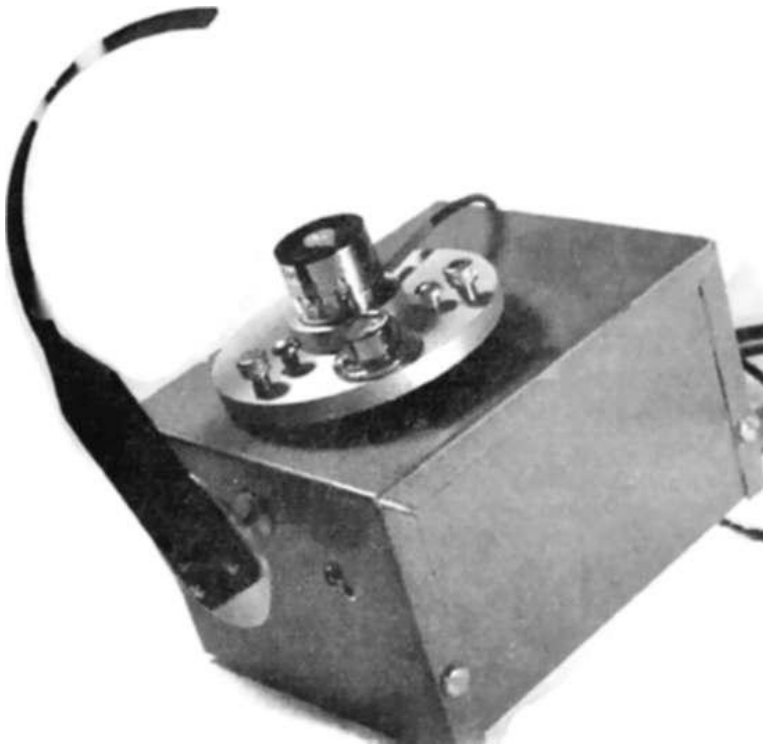


A medida é sensível à
composição da atmosfera!!



Instrumentos históricos

Radiometro DIAL (1975) ou com banda de sombra rotativa usa o LI-COR Model LI-200SA para medir radiação **D**ifusa, estimar a **d**ireta e medir glob**AL**.



- ☐ Radiação difusa durante sombreamento (leitura do mínimo no piranómetro)
- ☐ Radiação global durante não sombreamento (leitura máximo no piranómetro)
- ☐ Rotações completas todos os 4 minutos (0.25 rpm): sombreamento de 0.7s.
- ☐ Difusor com correcção de coseno do ângulo zenital.

Medida de radiação directa

DNI – direct normal irradiation ou beam irradiation

- ❑ Essencial para a produção de electricidade com concentração, por via fotovoltaica (**CPV**) ou térmica (**CSP**)
- ❑ **Pireliómetro** mais barato que um bom piranómetro, mas precisa de **seguimento solar** (10x mais caro e 100x menos comum)
- ❑ Medidas por **satélite** podem servir para análises de tendência a longo prazo e, se ‘calibradas’ por medidas locais podem ser muito úteis para estimativas de potencial de DNI
- ❑ Também pode ser estimado indirectamente com *rotating shadowband radiometer* (RSR)
- ❑ Calibrados por *Absolute cavity radiometers* (ACV)

Medida de radiação directa



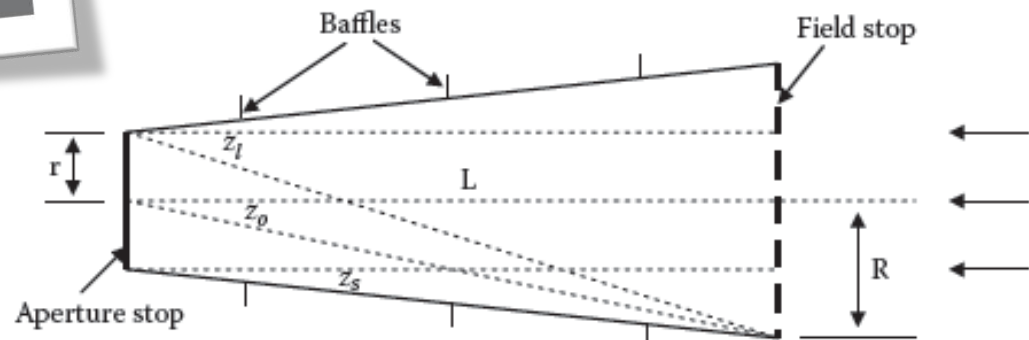
Pireliómetros funcionam quase sempre com termopilhas devido à sensibilidade espectral dos foto-díodos (sinal depende da composição da atmosfera)

TABLE 4.1

Optical Geometry (Defined in Figure 4.4) for a Few Pyrhemimeters

Pyrheliometer	Slope Angle z_s (°)	Opening Angle z_o (°)	Limit Angle z_l (°)
Eppley NIP	1.78	2.91	4.03
Eppley AHF	0.804	2.50	4.19
Kipp & Zonen CHP 1	1.0	2.5	4.0

Source: Gueymard, C., *Journal of Applied Meteorology*, 37, 414–435, 1998.



$$\tan(z_o) = R/L \quad \text{opening angle}$$

$$\tan(z_s) = (R-r)/L \quad \text{slope angle}$$

$$\tan(z_l) = (R+r)/L \quad \text{limiting angle}$$

Medida de radiação directa

TABLE 4.2
Operational Characteristics of High-, Good-, and Secondary-Quality
Pyrheliometers

Characteristic WMO/ISO	High-quality/ Secondary Standard	Good-quality/ First Class	Second Class (ISO Only)
Response time (95%)	<15 sec	<30 sec/ <20 sec	<30 sec
Zero offset (signal for 5 K h ⁻¹ change in ambient temperature)	±2 W m ⁻²	±4 W m ⁻²	±8 W m ⁻²
Resolution (smallest detectable change)	±0.5 W m ⁻²	±1 W m ⁻²	±5 W m ⁻²
Stability (% of full scale change/year)	±0.1% / ±0.5%	±0.5% / ±1%	±2%
Temperature response (maximum % error for 50 K change in ambient temperature)	±1%	±2%	±10%
Nonlinearity (% deviation from response at 500 W m ⁻² within the 100–1100 W m ⁻² range)	±0.2%	±0.5%	±2%
Spectral sensitivity (% deviation of transmission times absorption from this product mean between 300 and 3000 nm)	±0.5%	±1.0%	±5%
Tilt response (% deviation from response in horizontal position to a 1000 W m ⁻² beam between 0 and 90°)	±0.2%	±0.5%	±2%

Medida de radiação directa

TABLE 4.2

Operational Characteristics of High-, Good-, and Secondary-Quality Pyrheliometers

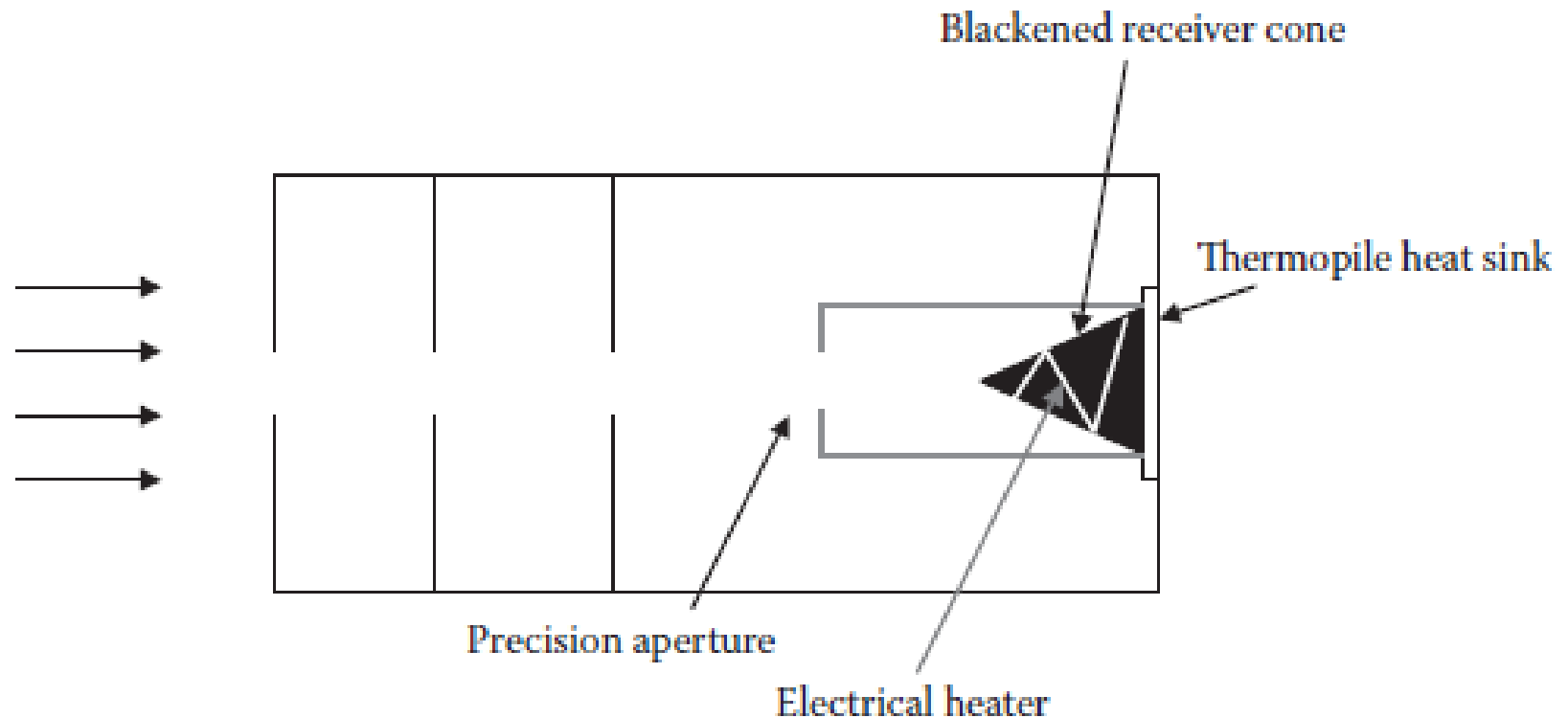
Characteristic WMO/ISO	High-quality/ Secondary Standard	Good-quality/ First Class	Second Class (ISO Only)
Response time (95%)	<15 sec	<30 sec/ <20 sec	<30 sec
Zero offset (signal for 5 K h ⁻¹ change in ambient temperature)	±2 W m ⁻²	±4 W m ⁻²	±8 W m ⁻²
Resolution (smallest detectable change)	±0.5 W m ⁻²	±1 W m ⁻²	±5 W m ⁻²
Stability (% of full scale change/year)	±0.1% / ±0.5%	±0.5% / ±1%	±2%
Temperature response (maximum % error for 50 K change in ambient temperature)	±1%	±2%	±10%
Nonlinearity (% deviation from response at 500	±0.2%	±0.5%	±2%

Principais fontes de erro a minimizar:

- ☐ Transmissividade da janela (a sua sensibilidade espectral)
- ☐ Sensibilidade espectral do revestimento do receptor
- ☐ Sensibilidade à temperatura (circuito electrónico de compensação)

Medida de radiação directa

Radiómetros por cavidade absoluta (ACR) são instrumentos autocalibráveis: antes e depois da medida da irradiação directa, a abertura é fechada, aplica-se calor por efeito Joule e a temperatura do receptor é medida.

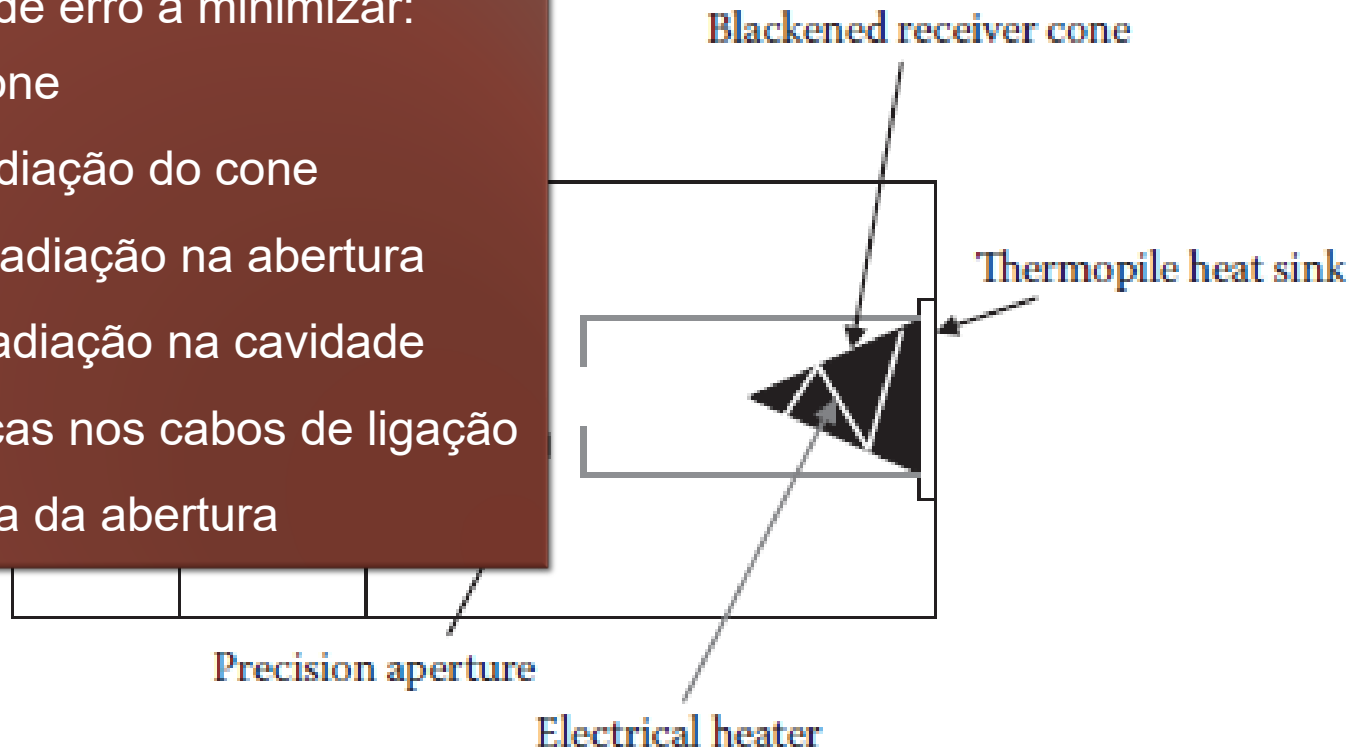


Medida de radiação directa

Radiómetros por cavidade absoluta (ACR) são instrumentos autocalibráveis: antes e depois da medida da irradiação directa, a abertura é fechada, aplica-se calor por efeito Joule e a temperatura do receptor é medida.

Principais fontes de erro a minimizar:

- ☐ Reflexão do cone
- ☐ Emissão de radiação do cone
- ☐ Dispersão da radiação na abertura
- ☐ Difracção de radiação na cavidade
- ☐ Perdas eléctricas nos cabos de ligação
- ☐ Medida da área da abertura



Medida de radiação directa

An Extensive Comparison of Commercial Pyrheliometers under a Wide Range of Routine Observing Conditions

JOSEPH MICHALSKY,* ELLSWORTH G. DUTTON,* DONALD NELSON,* JAMES WENDELL,*
STEPHEN WILCOX,+ AFSHIN ANDREAS,+ PETER GOTSEFF,+ DARYL MYERS,+ IBRAHIM REDA,+
THOMAS STOFFEL,+ KLAUS BEHRENS,# THOMAS CARLUND,@ WOLFGANG FINSTERLE,&
AND DAVID HALLIWELL**

** NOAA/Earth System Research Laboratory, Boulder, Colorado*

+ National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado

Deutscher Wetterdienst, Meteorologisches Observatorium, Lindenberg, Germany

@ Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Norrköping, Sweden

& Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos, World Radiation Center, Davos, Switzerland

*** Environment Canada, Wilcox, Saskatchewan, Canada*

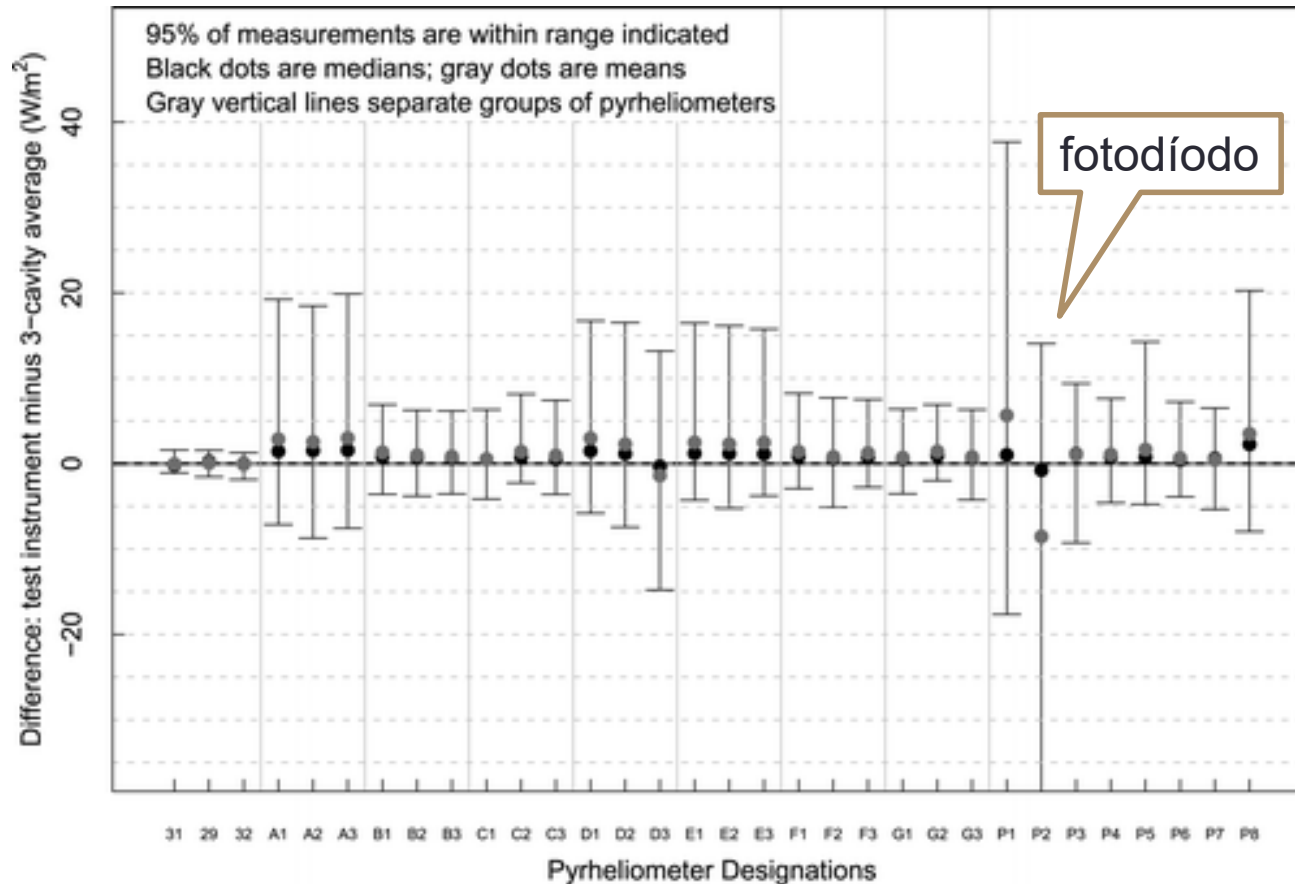
(Manuscript received 18 August 2010, in final form 19 November 2010)

Medida de radiação directa



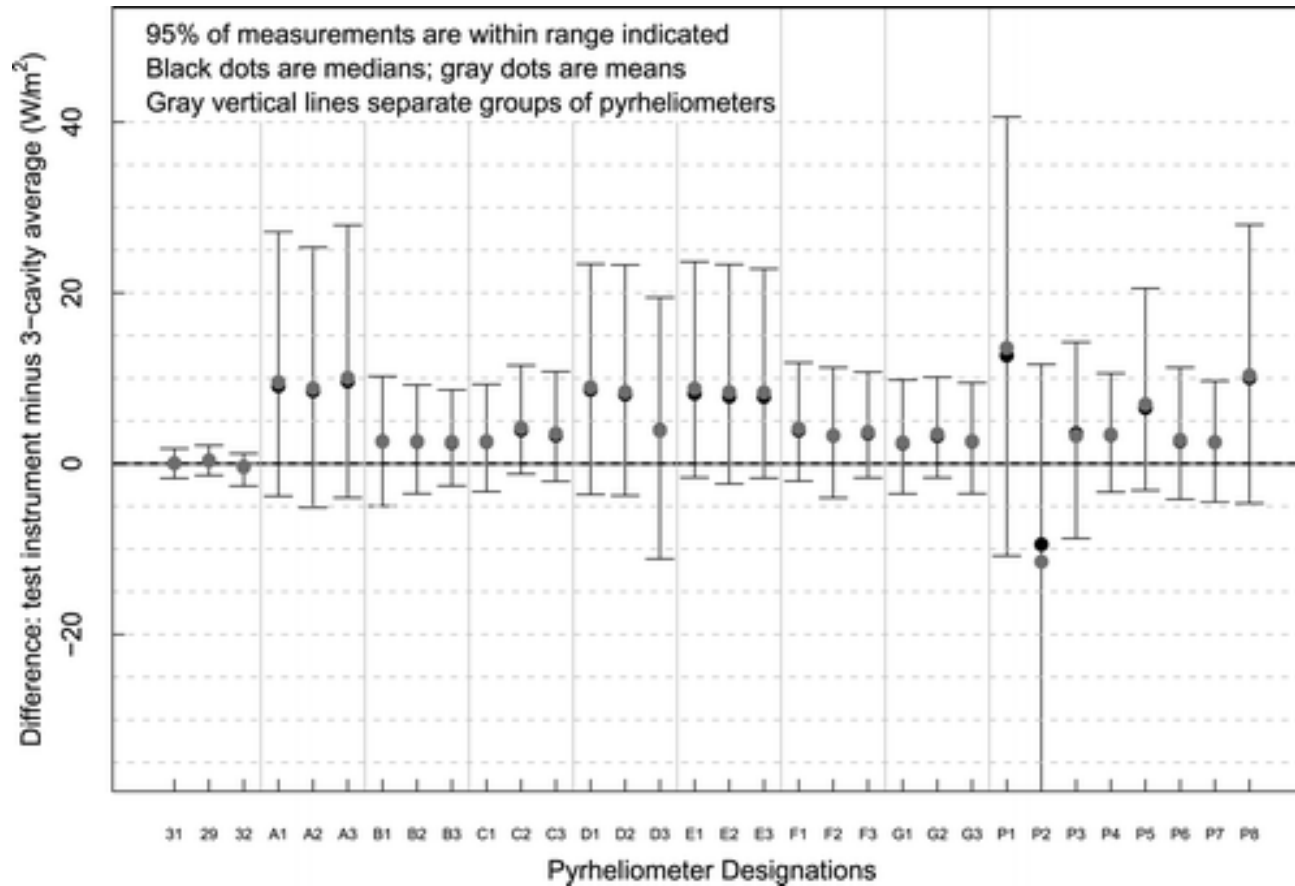
FIG. 1. The 33 pyrheliometers mounted on four trackers for the 10-month comparison. The four windowed cavity radiometers are on the second tracker from the left. (Credit: Stephen Wilcox, NREL.)

Medida de radiação directa

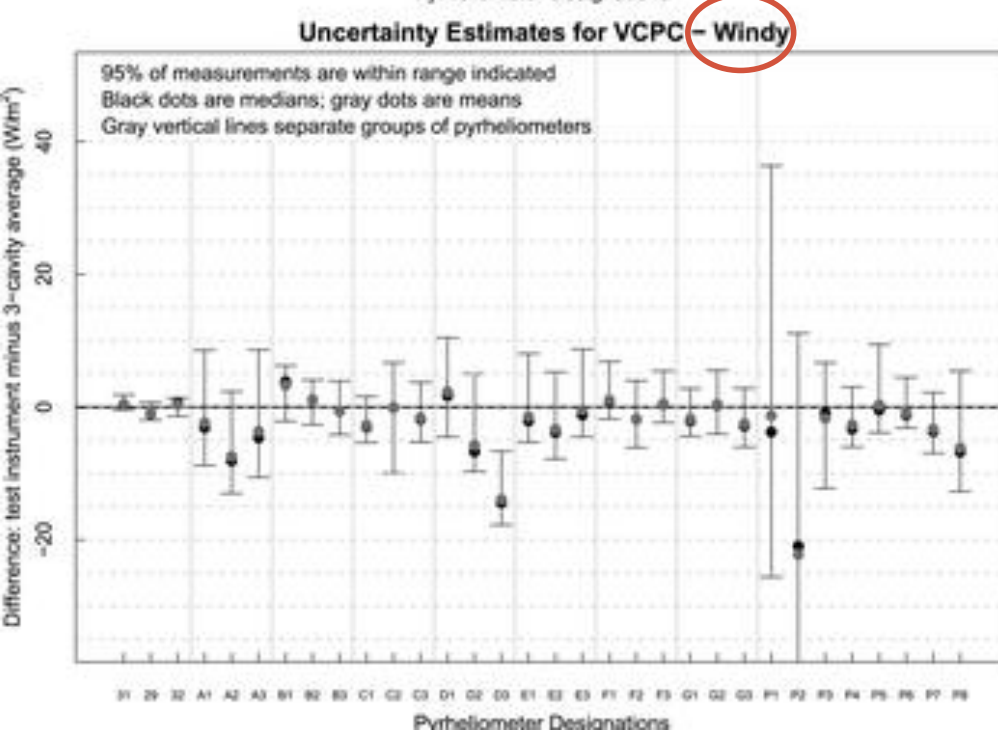
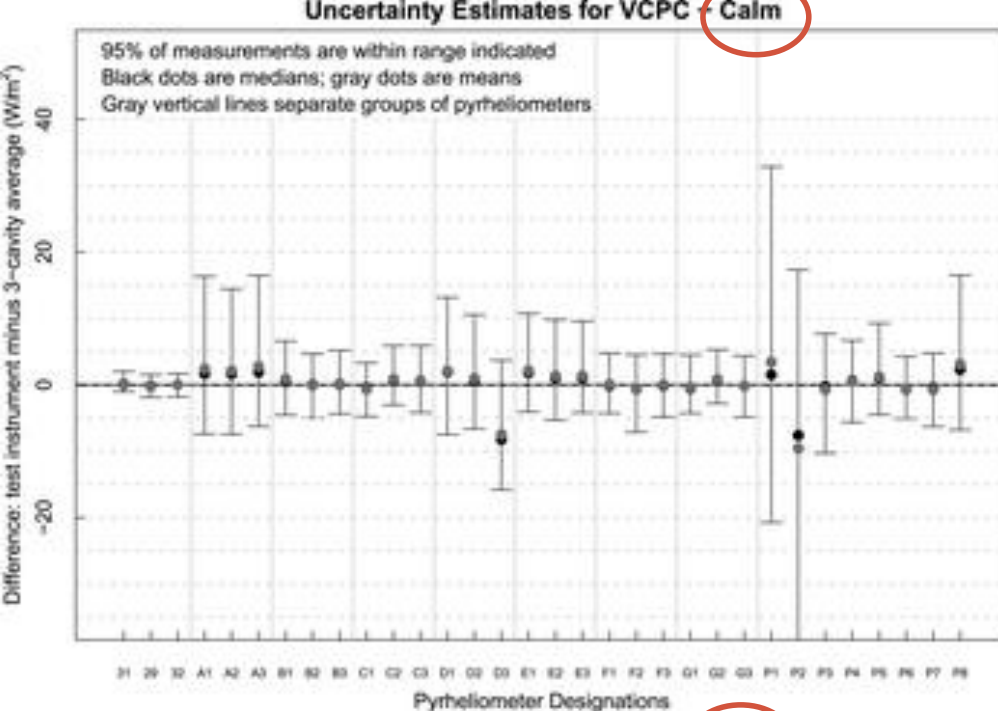


Daytime data defined as points with the SZA $< 91.2^\circ$. The average direct irradiance is $410 W m^{-2}$. This plot reveals groups with similar behavior. Cavities perform the best and agree very well (see text for discussion of cavity results).

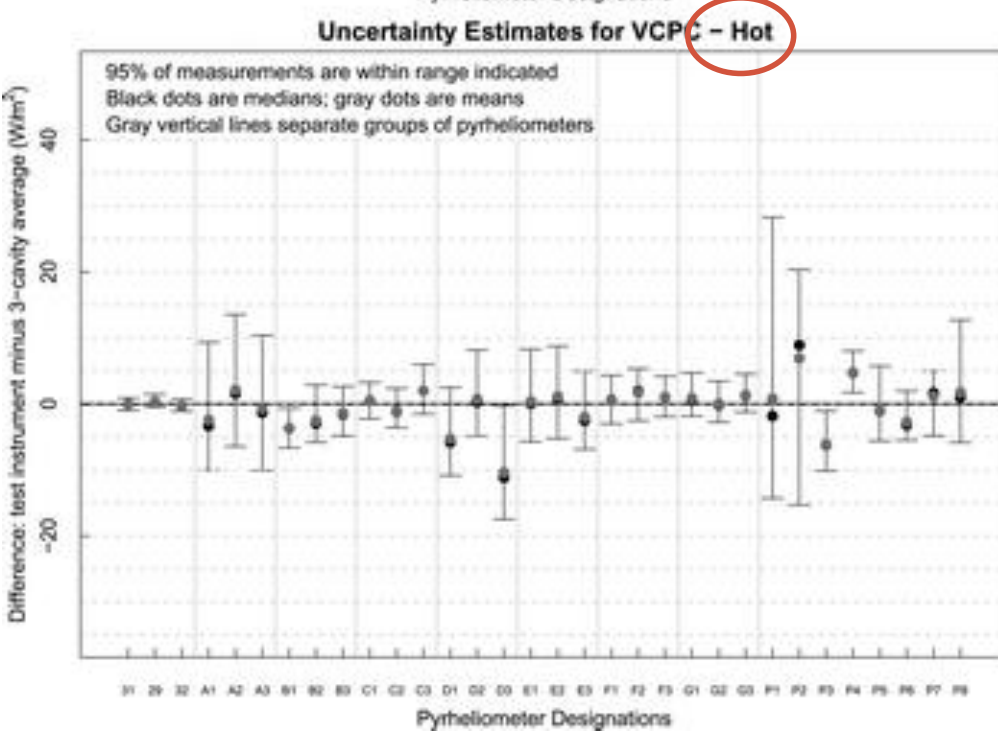
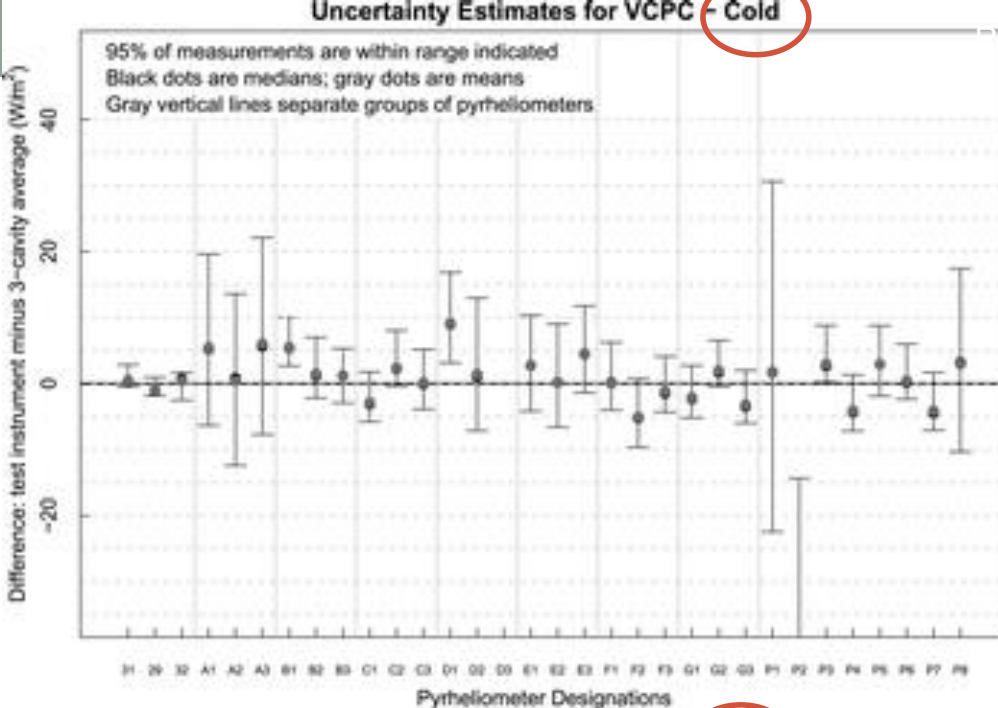
Medida de radiação directa



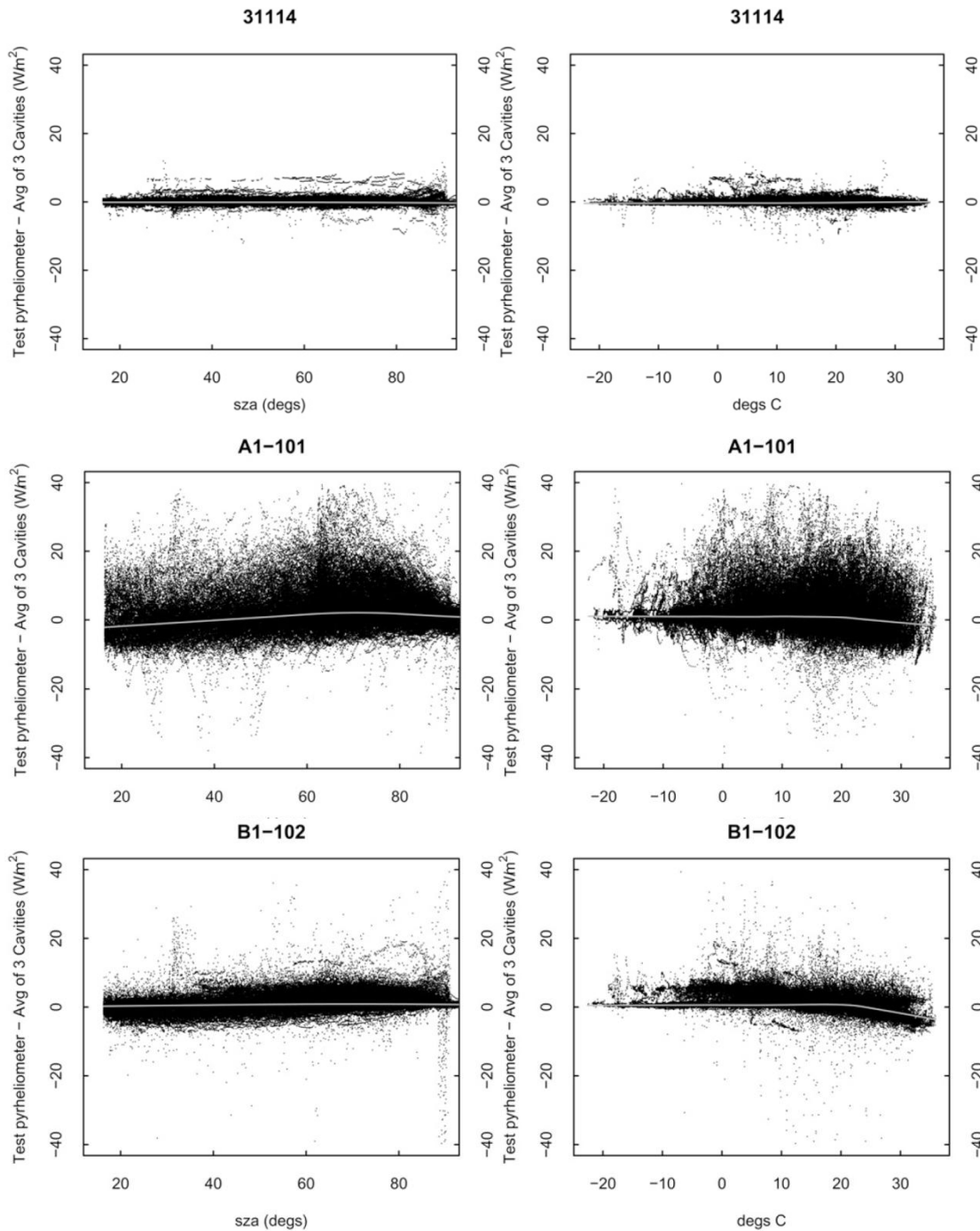
Data obtained having a 1-min average of $>50 \text{ W m}^{-2}$ and a standard deviation $> 10 \text{ W m}^{-2}$ caused by clouds passing through the field of view. These conditions produced unexplained positive offsets for all test pyrheliometers.



Plots are for (top) calm and (bottom) windy conditions with direct irradiance $> 700 \text{ W m}^{-2}$. (top) Similar to Fig. 5. (bottom) Suggests that the wind produces negative offsets vis-à-vis calm circumstances; however, this is not always true and the instruments within groups showed independent behavior. The 95% ranges were similar within the groups.



Plots are for direct irradiance $>700 \text{ W m}^{-2}$. (top) Cold conditions below 0°C and (bottom) hot conditions above 30°C . There clearly is some change but with no consistent pattern within groups.

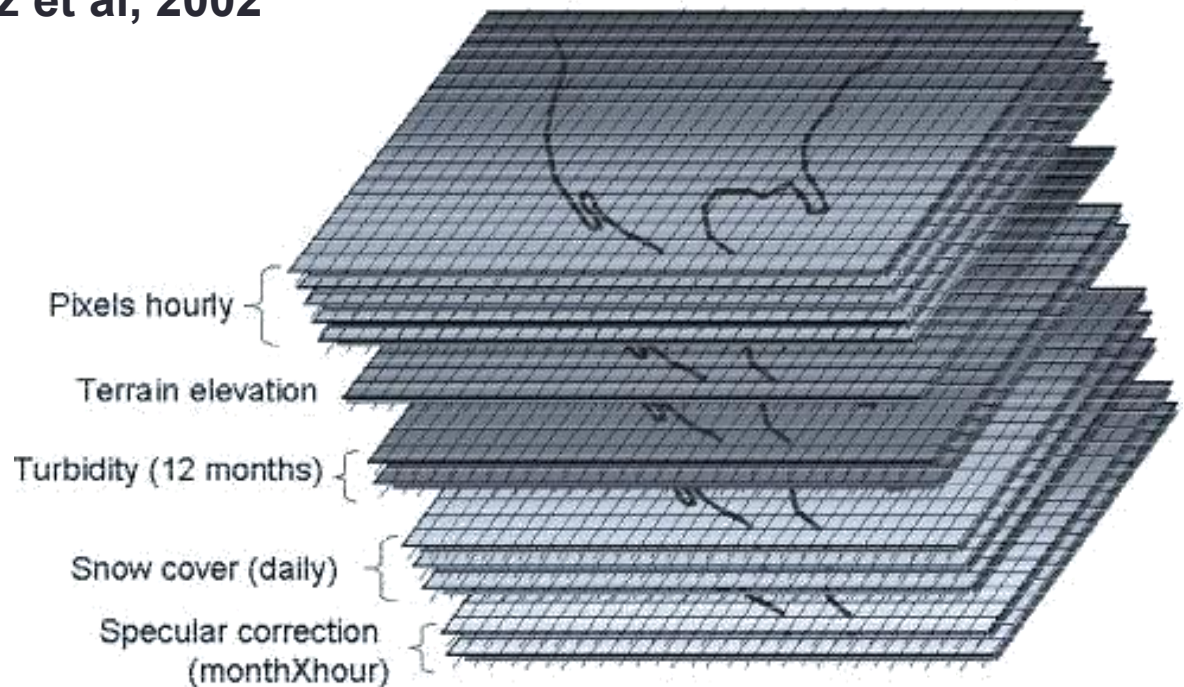


Plots illustrating the temperature (T) and SZA response as an example of each pyrheliometer category of defined above each panel. The gray line is a smoother through the data to guide the eye. The cavity has no T or SZA dependence. The B-type pyrheliometer has little SZA dependence but shows some T dependence above 20°C . The A-type pyrheliometer indicates both SZA and T dependence.

Medida de radiação directa

A partir de dados de satélite, através do brilho dos *pixels* (método totalmente empírico) e/ou com modelos de transferência radiativa da atmosfera (propriedades das nuvens, aerossóis, humidade e perfis de temperatura).

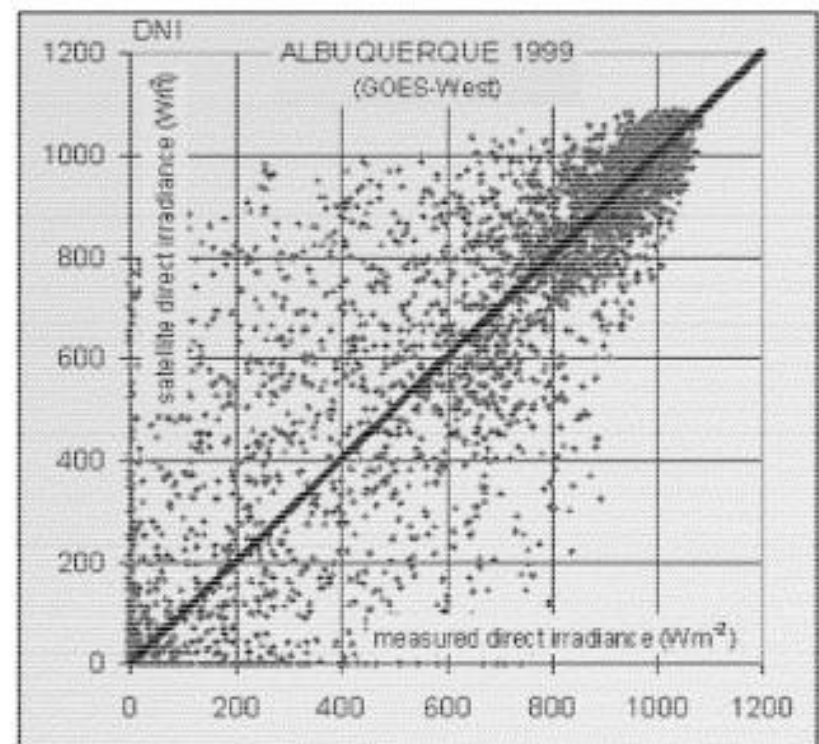
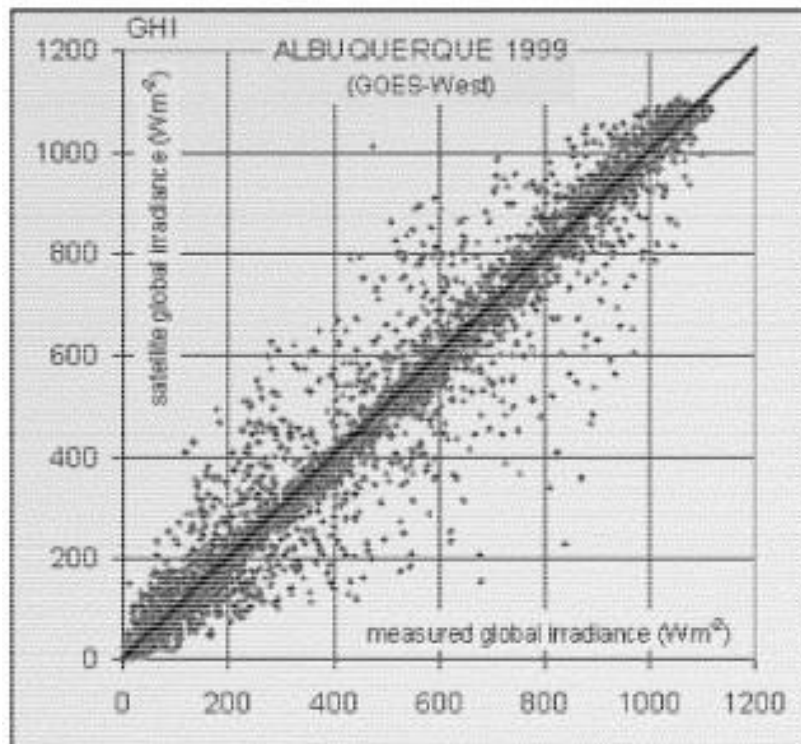
Modelo híbrido de Perez et al, 2002



Richard Perez, Pierre Ineichen, Kathy Moore, Marek Kmiecik, Cyril Chain, Ray George, Frank Vignola, *A new operational model for satellite-derived irradiances: description and validation*, Solar Energy, Volume 73, Issue 5, 2002, 307- 317

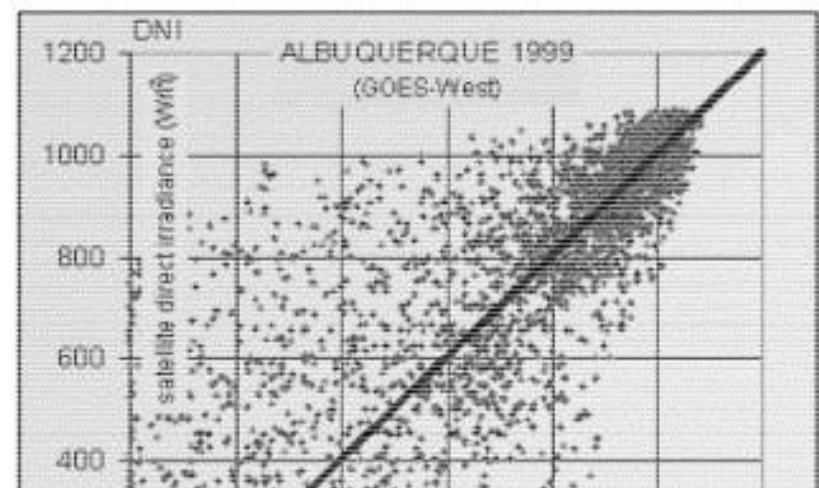
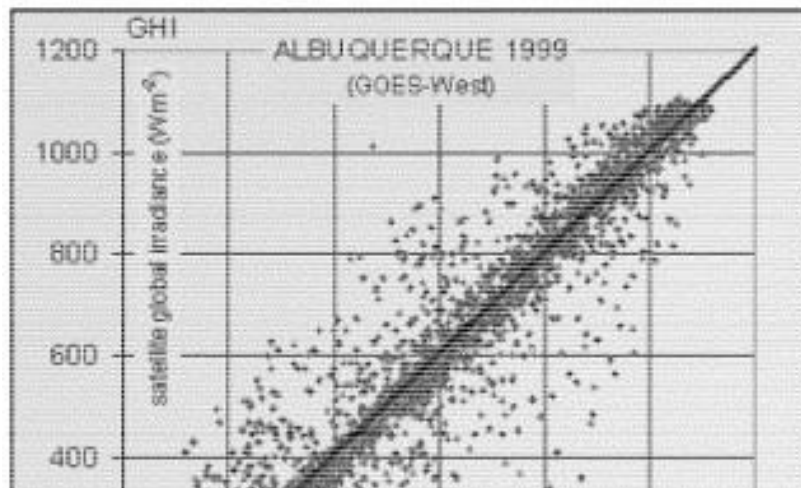
Medida de radiação directa

A partir de dados de satélite, através do brilho dos *pixels* (método totalmente empírico) e/ou com modelos de transferência radiativa da atmosfera (propriedades das nuvens, aerossóis, humidade e perfis de temperatura).



Medida de radiação directa

A partir de dados de satélite, através do brilho dos *pixels* (método totalmente empírico) e/ou com modelos de transferência radiativa da atmosfera (propriedades das nuvens, aerossóis, humidade e perfis de temperatura).



Incerteza na medida de radiação directa a partir de dados de satélite é tipicamente duas vezes maior do que medidas com pireliómetros com erros BIAS <5% mas RMSE de 35-40% para valores horários.

Medida de radiação global

Tipos de **piranômetros**

- ☐ Termopilha com disco negro
- ☐ Termopilha com matriz negro-branco
- ☐ Fotodíodo

Características diferenciadoras

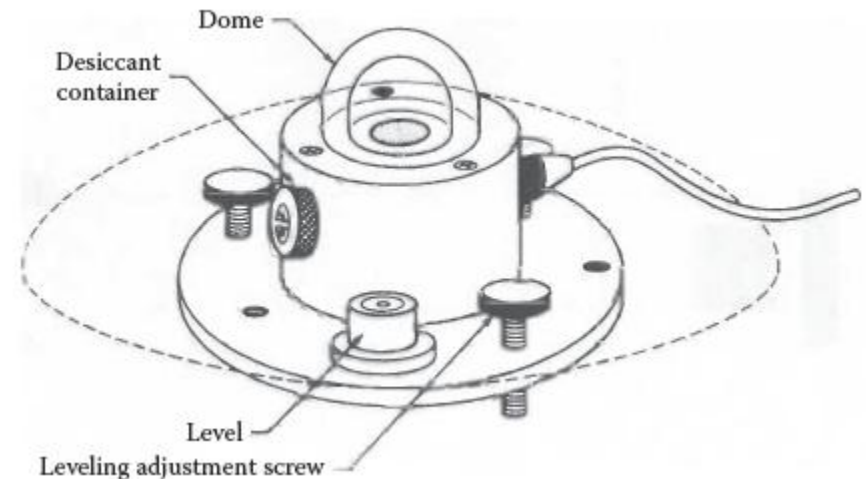
- ☐ Sensibilidade à **temperatura** (offset e linearidade)
- ☐ Sensibilidade **espectral**
- ☐ Sensibilidade ao **ângulo de incidência** (resposta do cosseno)

Medida de radiação global

Termopilha com disco negro

- ❑ Medida de fluxo de calor entre o disco e o corpo do instrumento
- ❑ Dupla-cúpula para redução perdas convectivas
- ❑ Isolamento térmico da termopilha para redução de perdas por condução
- ❑ Erro ($<30 \text{ W/m}^2$) aumenta com temperatura, devido à emissão do receptor (depende do local, da estação e da hora, porque varia com a *temperatura do céu*)

As perdas por radiação são maiores com céu limpo, porque quando há nuvens a sua temperatura não é muito diferente da da superfície da Terra

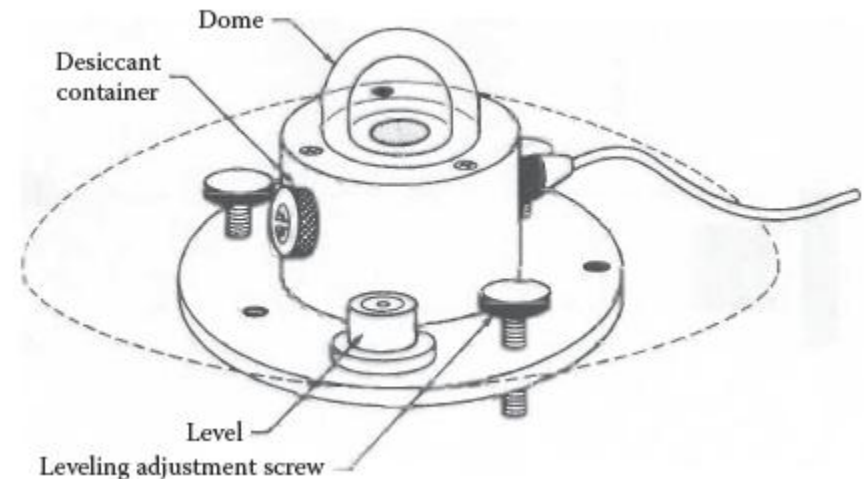


Medida de radiação global

Termopilha com disco negro

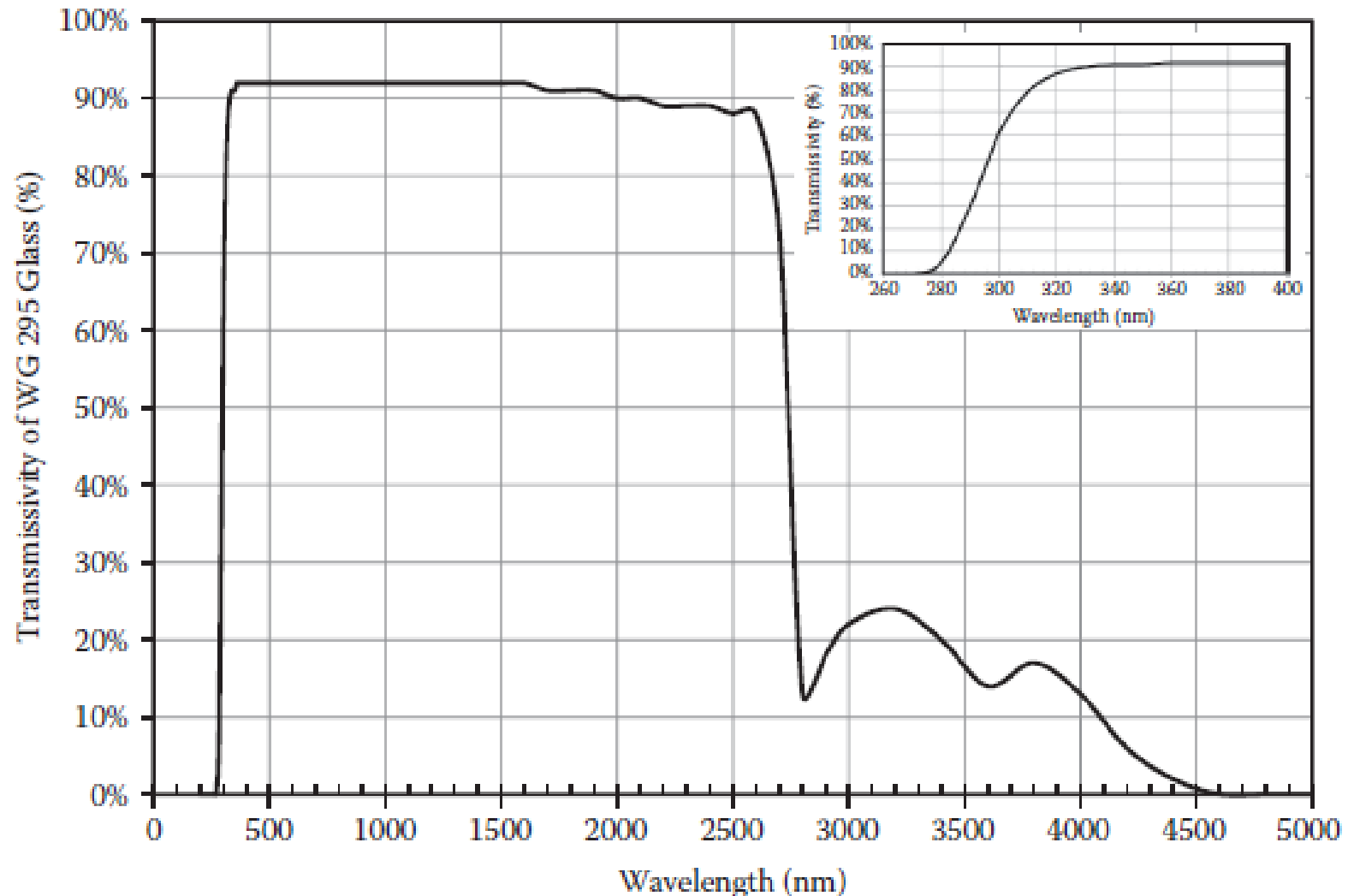
- ❑ Medida de fluxo de calor entre o disco e o corpo do instrumento
- ❑ Dupla-cúpula para redução perdas convectivas
- ❑ Isolamento térmico da termopilha para redução de perdas por condução
- ❑ Erro ($<30 \text{ W/m}^2$) aumenta com temperatura, devido à emissão do receptor (depende do local, da estação e da hora, porque varia com a *temperatura do céu*)

Erro de temperatura pode ser minimizado subtraindo a medida de radiação noturna (inferior a zero! porque não recebe radiação mas emite)

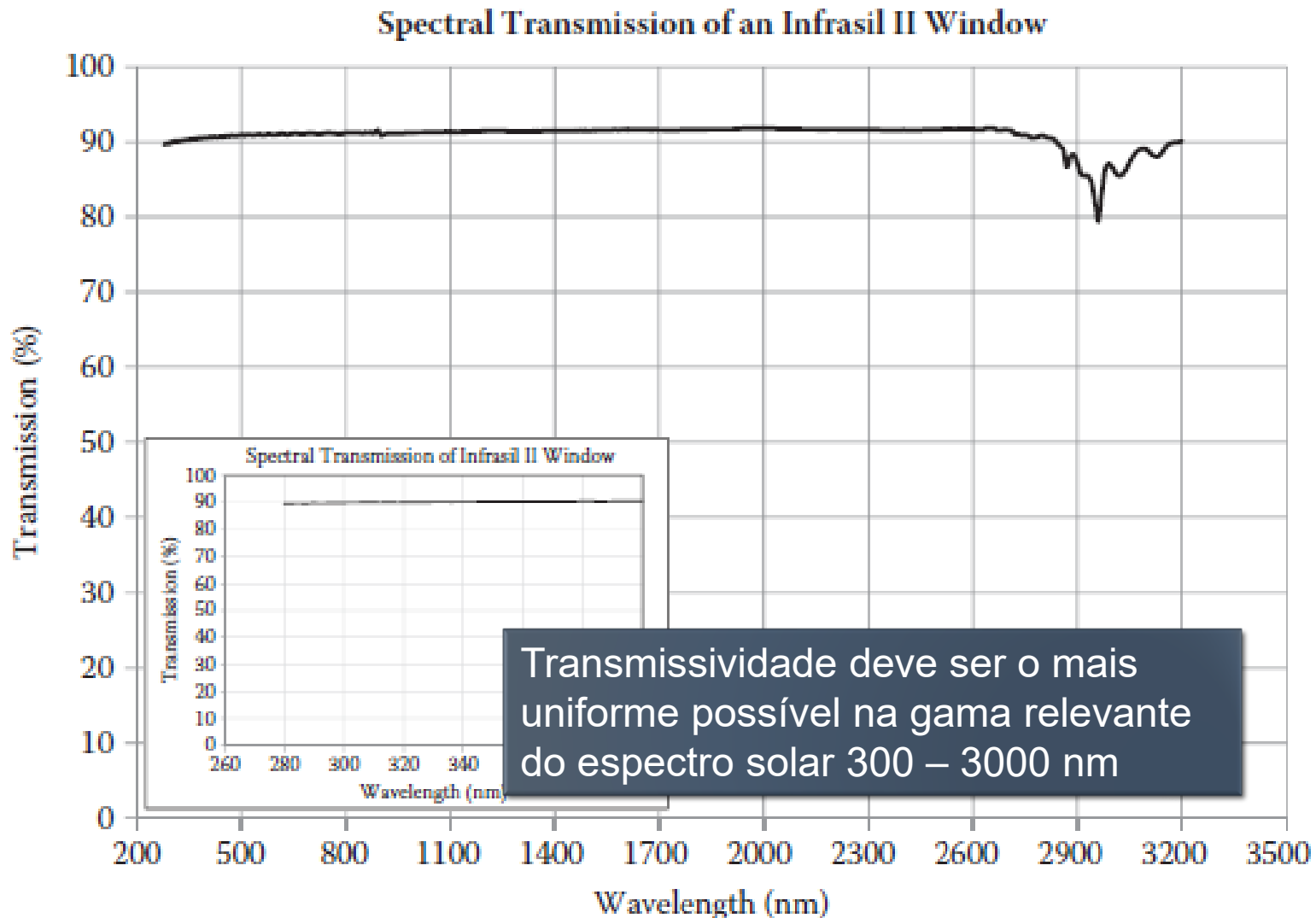


Medida de radiação global

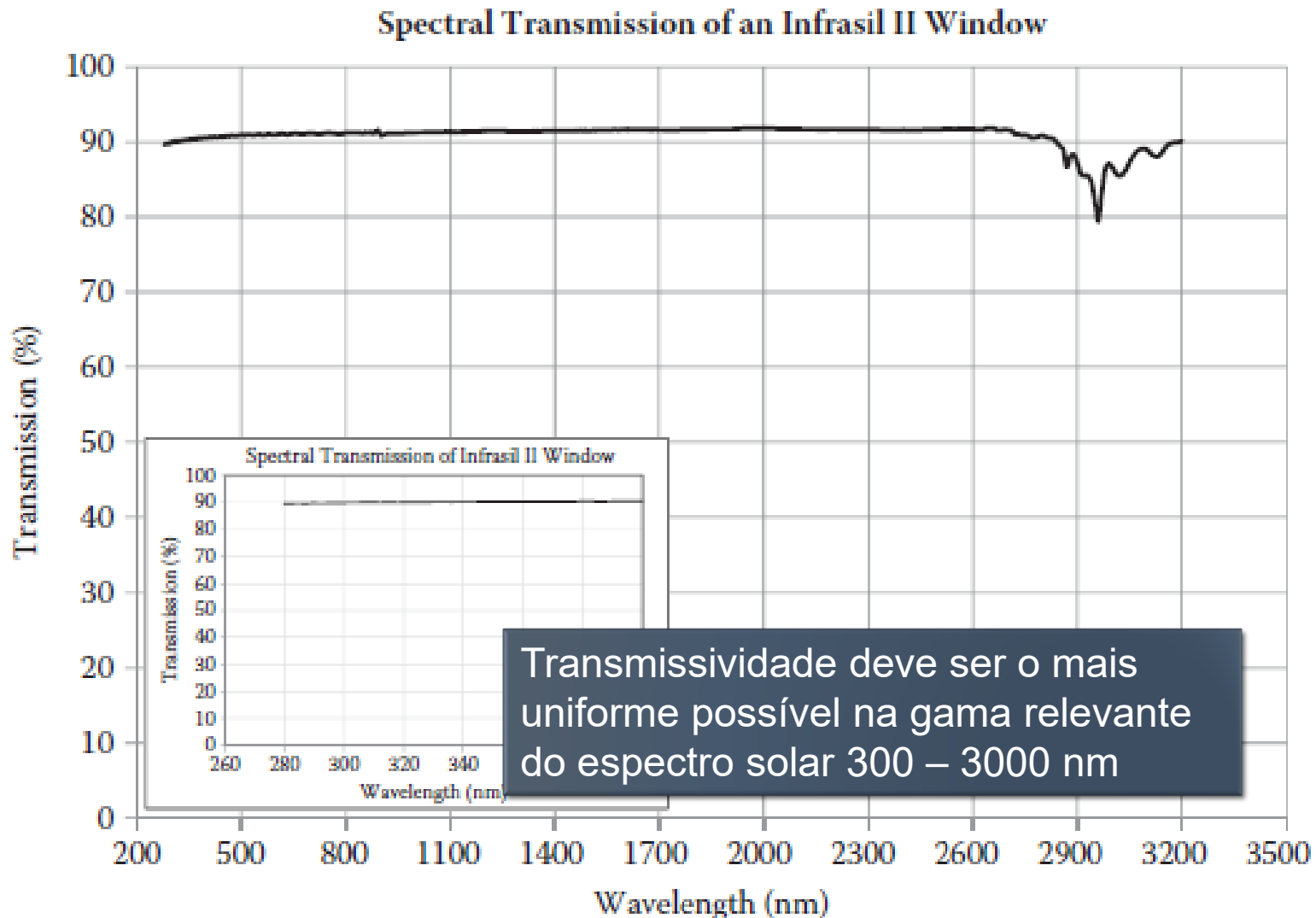
Transmissivity of WG 295 Glass Window



Medida de radiação global



Medida de radiação global



Medida de radiação global

Dependência com o **ângulo de incidência**

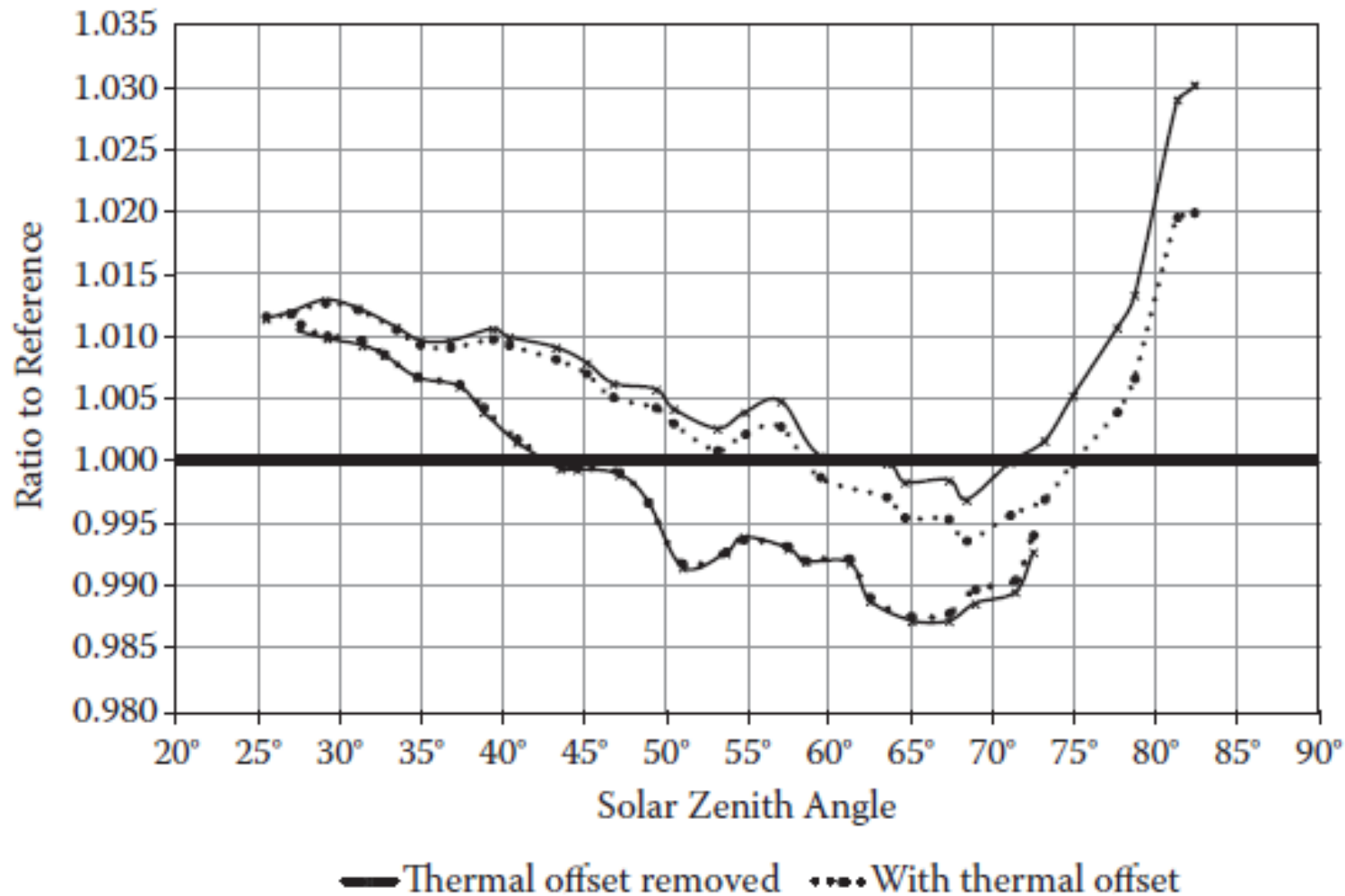
(também chamada de *resposta de coseno*)

- ❑ Numa superfície ideal (cuja resposta é independente do ângulo de incidência) a irradiância é proporcional ao coseno do ângulo de incidência – resposta de **Lambert**
- ❑ Limitações devido à óptica da cúpula (variações na espessura do vidro e deformações) e à variação da reflectividade do sensor com o ângulo de incidência, particularmente difícil para sensores maiores
- ❑ Efeito mais relevante para elevados ângulos zenitais, pode variar com o azimute (erros nas medidas da manhã e da tarde pode ser diferentes!)

Essencial garantir que piranómetro está na horizontal, nivelado e bem fixo.

Medida de radiação global

Calibration of a CM 10 Pyranometer

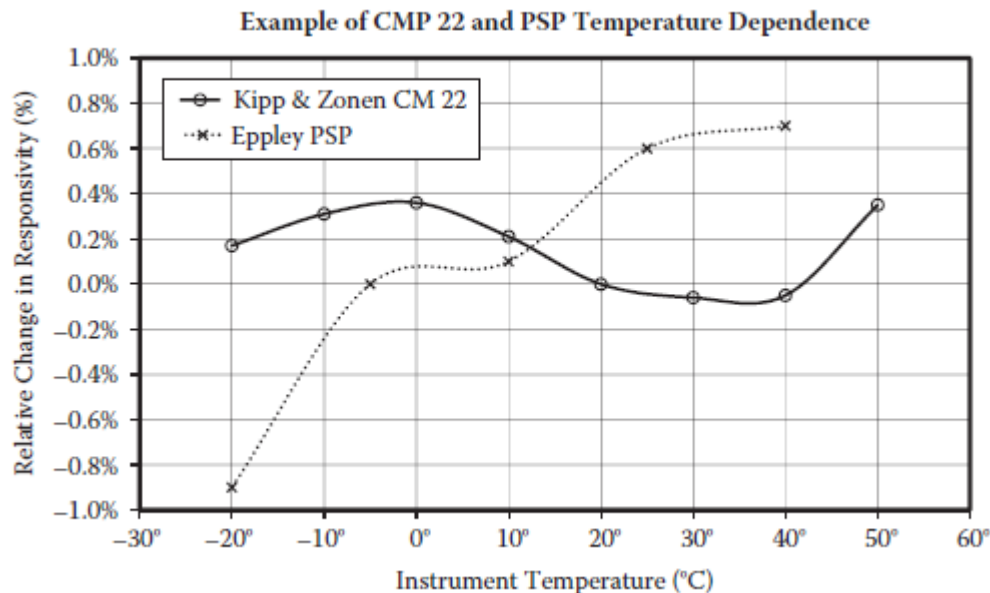


Medida de radiação global

Degradação com exposição á radiação (-1%/ano)

- ❑ Em particular do revestimento do receptor (tinta preta)
- ❑ Devido sobretudo a radiação ultravioleta

Não linearidade na resposta à temperatura



Medida de radiação global

Efeitos ópticos

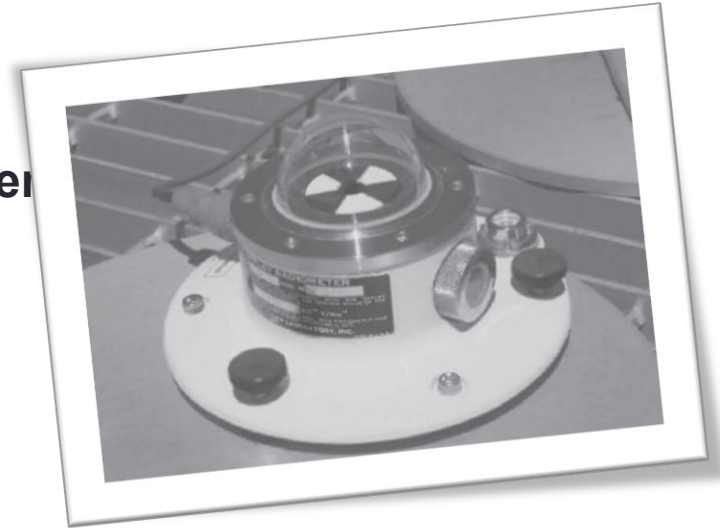
- ❑ Reflexões internas na cúpula podem provocar *bright spots* em determinados momentos do dia
- ❑ Efeito exacerbado por humidade ou sujidade



Medida de radiação global

Piranómetros preto-e-branco

- ☐ Termopilhas com superfícies alternadamente brancas e negras
- ☐ Sensibilidade ao azimuth
- ☐ Sensibilidade à temperatura
- ☐ Sensibilidade a desvios da horizontalidade



Um mau reflector (tinta preta) é um bom absorvador e portanto bom emissor.

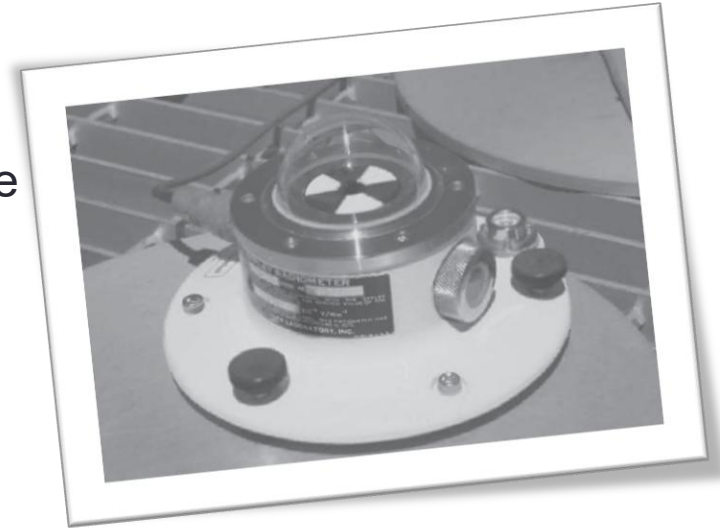
Um bom reflector (tinta branca) é um mau absorvador e portanto mau emissor.

Porém, como a emissão é num comprimento de onda (infravermelho) diferente da absorção, é possível minimizar as diferenças nas perdas de calor por radiação.

Medida de radiação global

Piranómetros preto-e-branco

- ☐ Termopilhas com superfícies alternadamente brancas e negras
- ☐ **Sensibilidade ao azimuth**
- ☐ Sensibilidade à temperatura
- ☐ Sensibilidade a desvios da horizontalidade



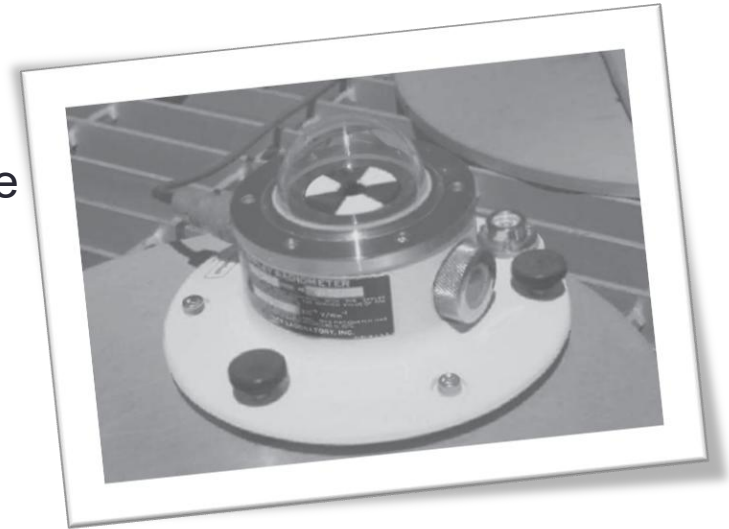
Sensibilidade ao azimuth porque o sinal do piranómetro é diferente se radiação incidente está alinhada com a superfície branca ou a negra

Pode ser minimizada usando outros padrões, áreas mais pequenas ou com seguimento solar.

Medida de radiação global

Piranômetros preto-e-branco

- ☐ Termopilhas com superfícies alternadamente brancas e negras
- ☐ Sensibilidade ao azimuth
- ☐ **Sensibilidade à temperatura**
- ☐ Sensibilidade a desvios da horizontalidade

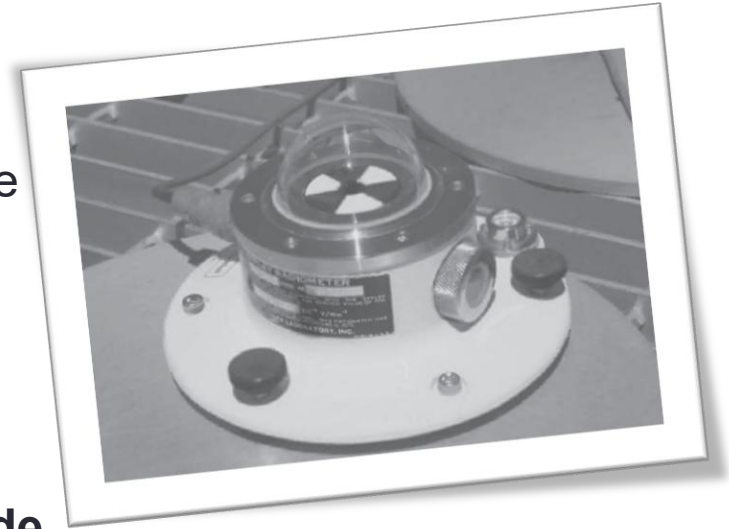


Tipicamente têm apenas uma cúpula e por isso apresentam maiores perdas convectivas

Medida de radiação global

Piranômetros preto-e-branco

- ☐ Termopilhas com superfícies alternadamente brancas e negras
- ☐ Sensibilidade ao azimuth
- ☐ Sensibilidade à temperatura
- ☐ **Sensibilidade a desvios da horizontalidade**



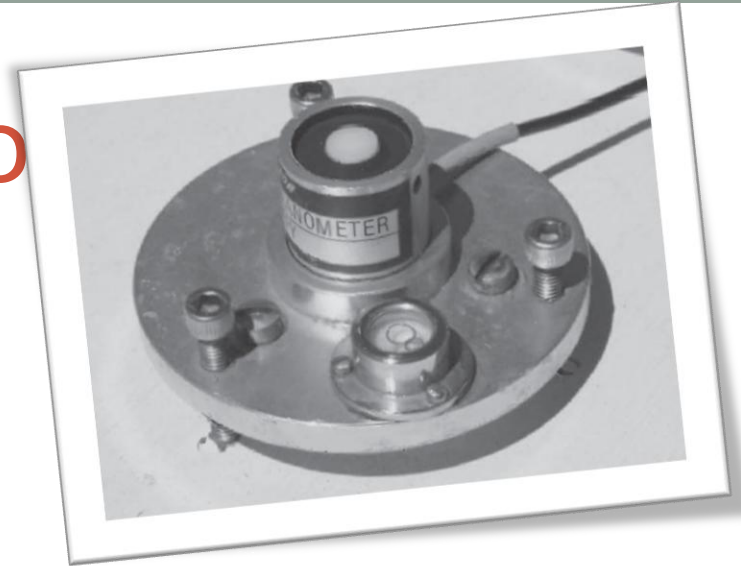
Tipicamente têm áreas maiores do que os piranômetros de disco negro e por isso é mais difícil garantir planaridade – maior dependência com o ângulo de incidência

Inclinação altera convecção dentro da cúpula e perturba medição, pelo que não deve ser montado num seguidor

Medida de radiação glo

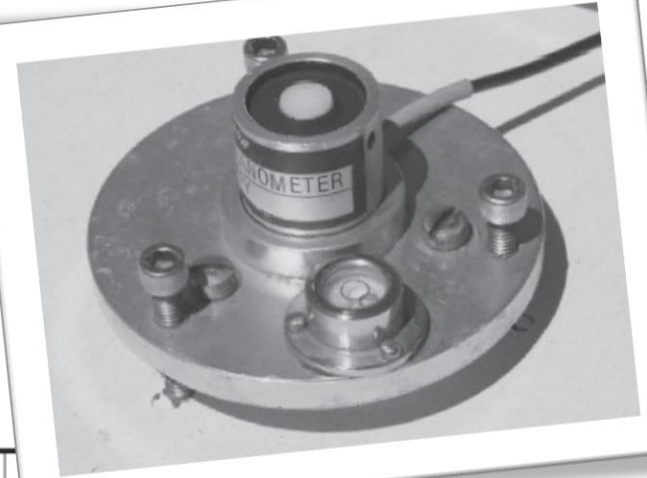
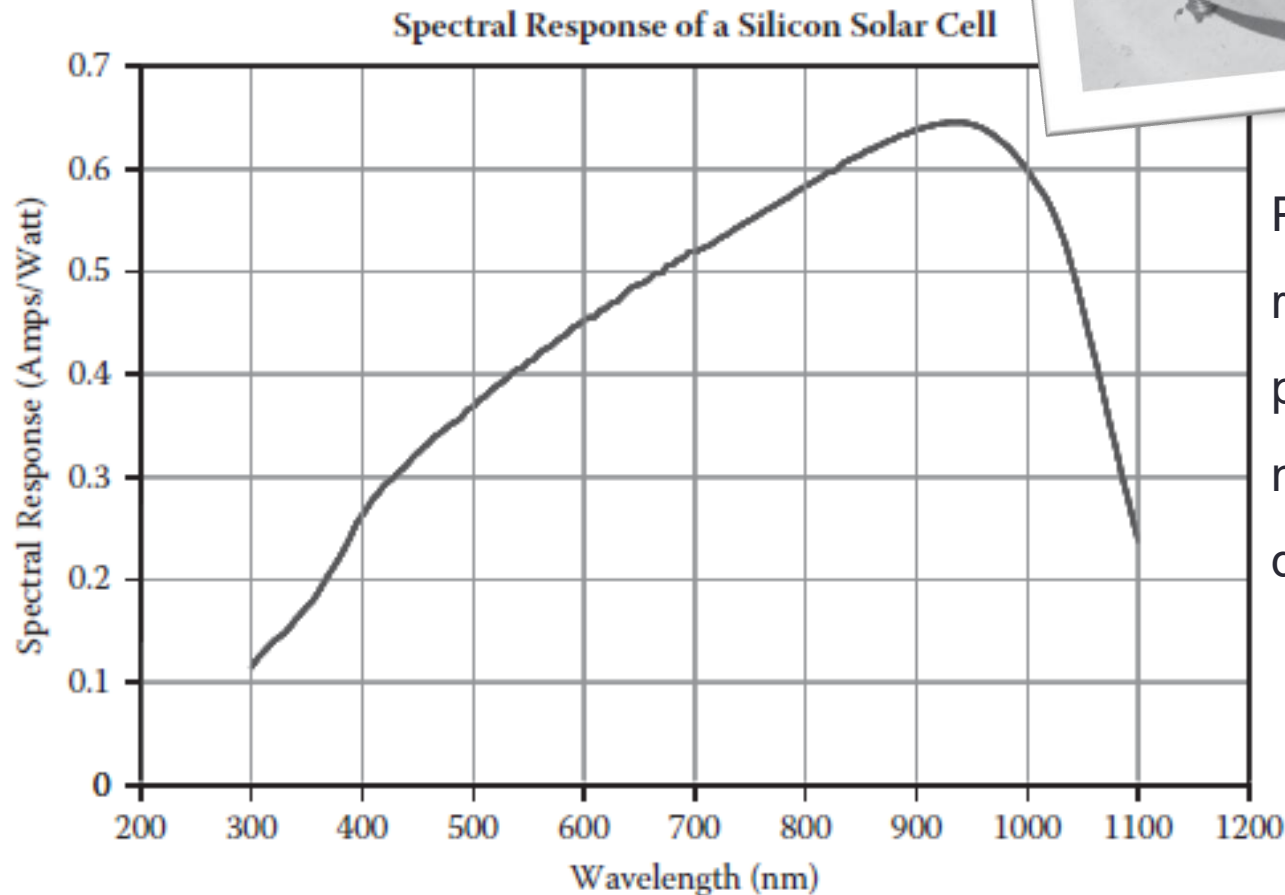
Piranómetros com fotodíodos

- ☐ Resposta rápida
- ☐ Baseado na corrente de curto circuito de células solares de silício cristalino (melhorada na região do azul)
- ☐ Pode incluir óptica para melhorar resposta angular do dispositivo
- ☐ Sensibilidade à temperatura
- ☐ Sensibilidade espectral
- ☐ Não depende da inclinação do instrumento
- ☐ Mas medidas com inclinação depende das características espectrais da reflexão no solo



Medida de radiação glo

Sensibilidade espectral

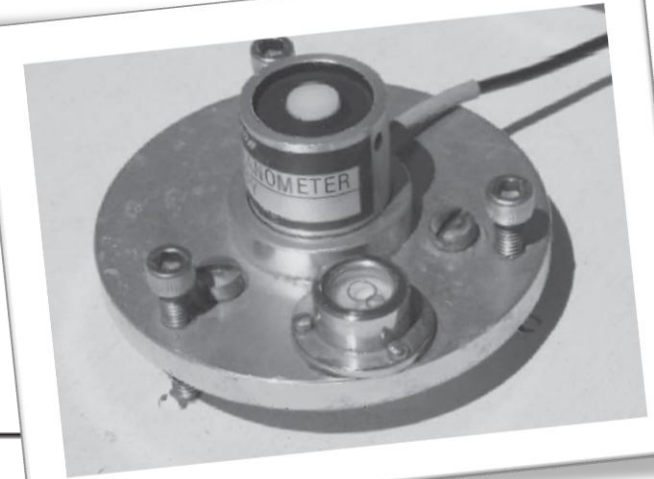
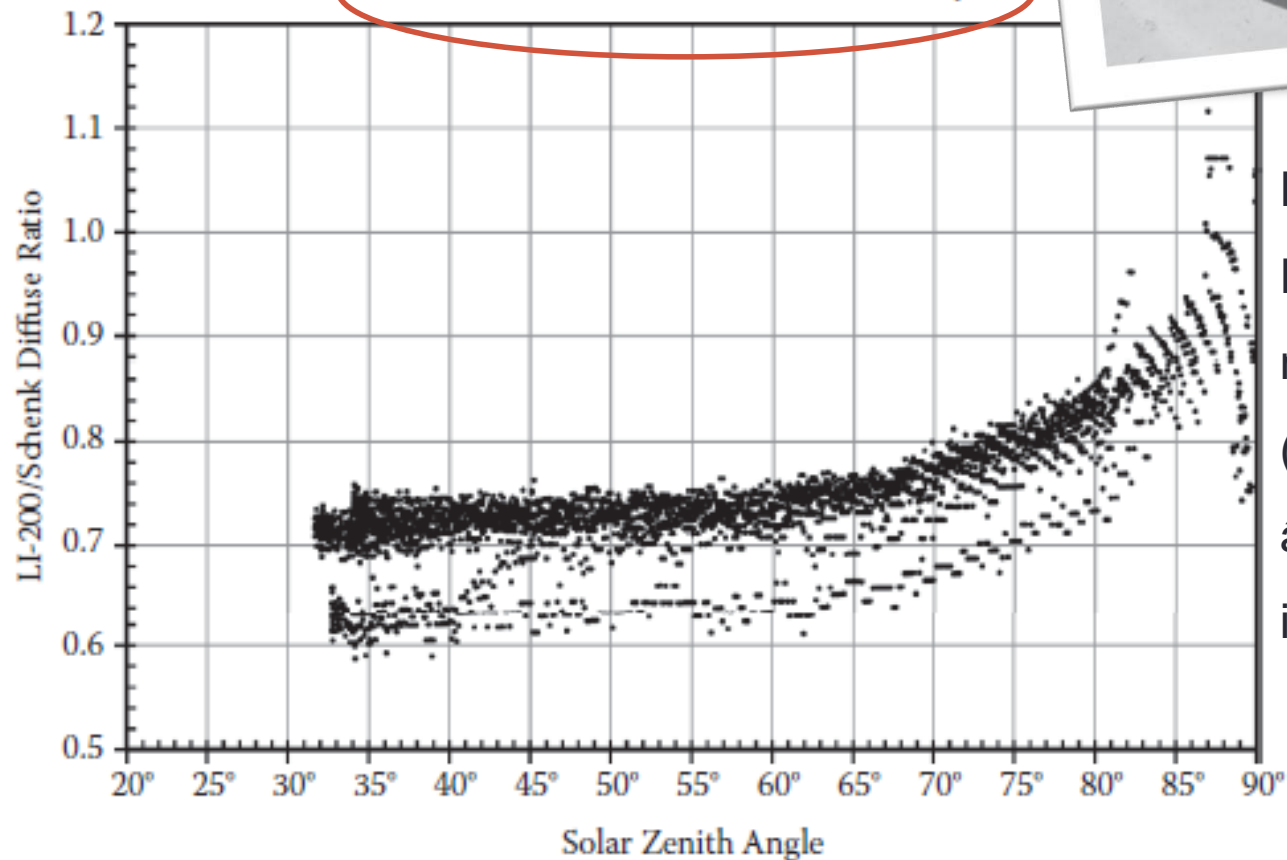


Precisa de ser
recalibrado se for
para usar para
medição de radiação
difusa

Medida de radiação glo

Comparação com RSR (termopilhas)

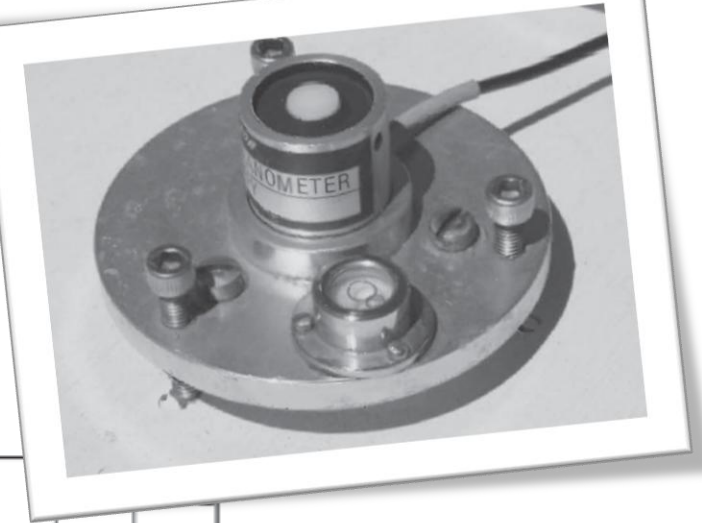
LI-200/Schenk Diffuse Ratio — Clear Days



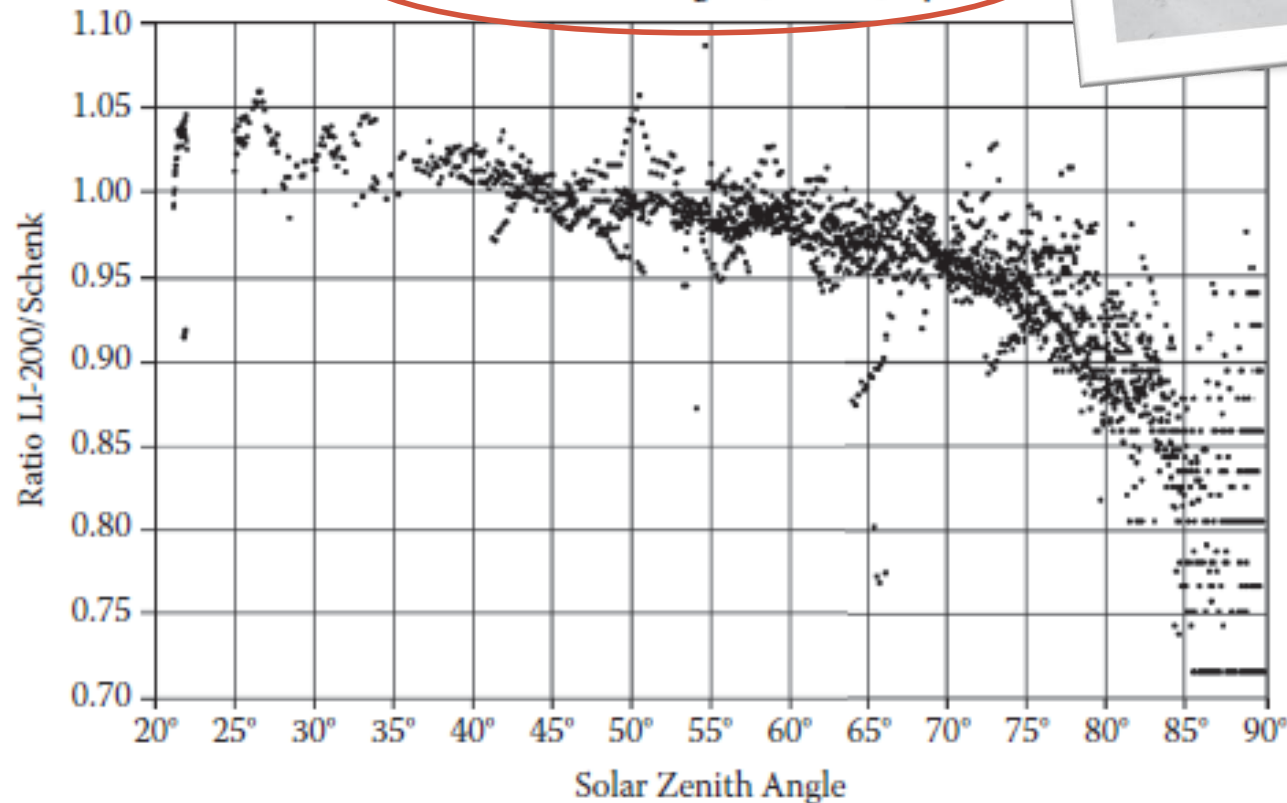
Desvios até 30%
Responde melhor na
região do vermelho
(para maiores
ângulos de
incidência)

Medida de radiação glo

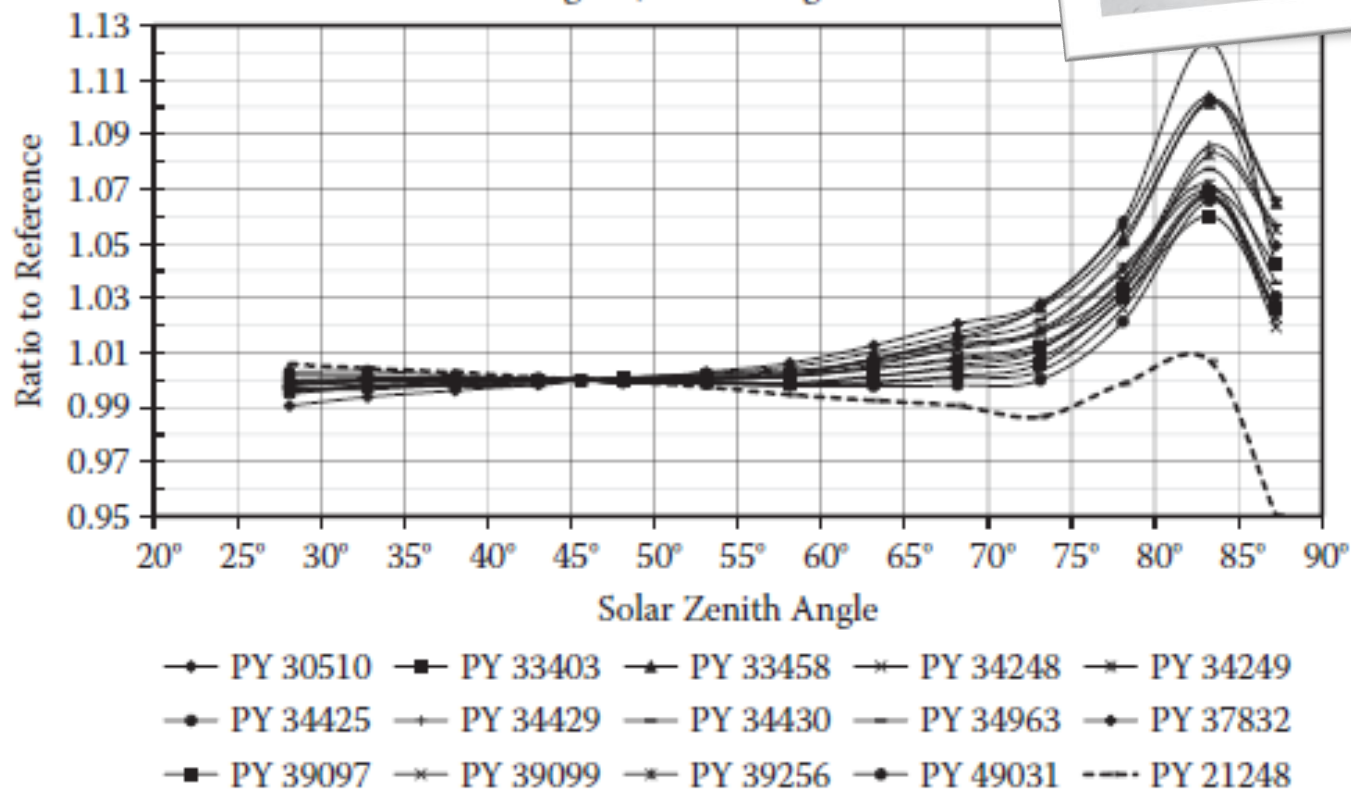
Comparação com RSR (termopilhas)



"Diffuse" Ratio During Cloudy Periods
DNI $< 1 \text{ W/m}^2$ — Eugene, OR — July 2010



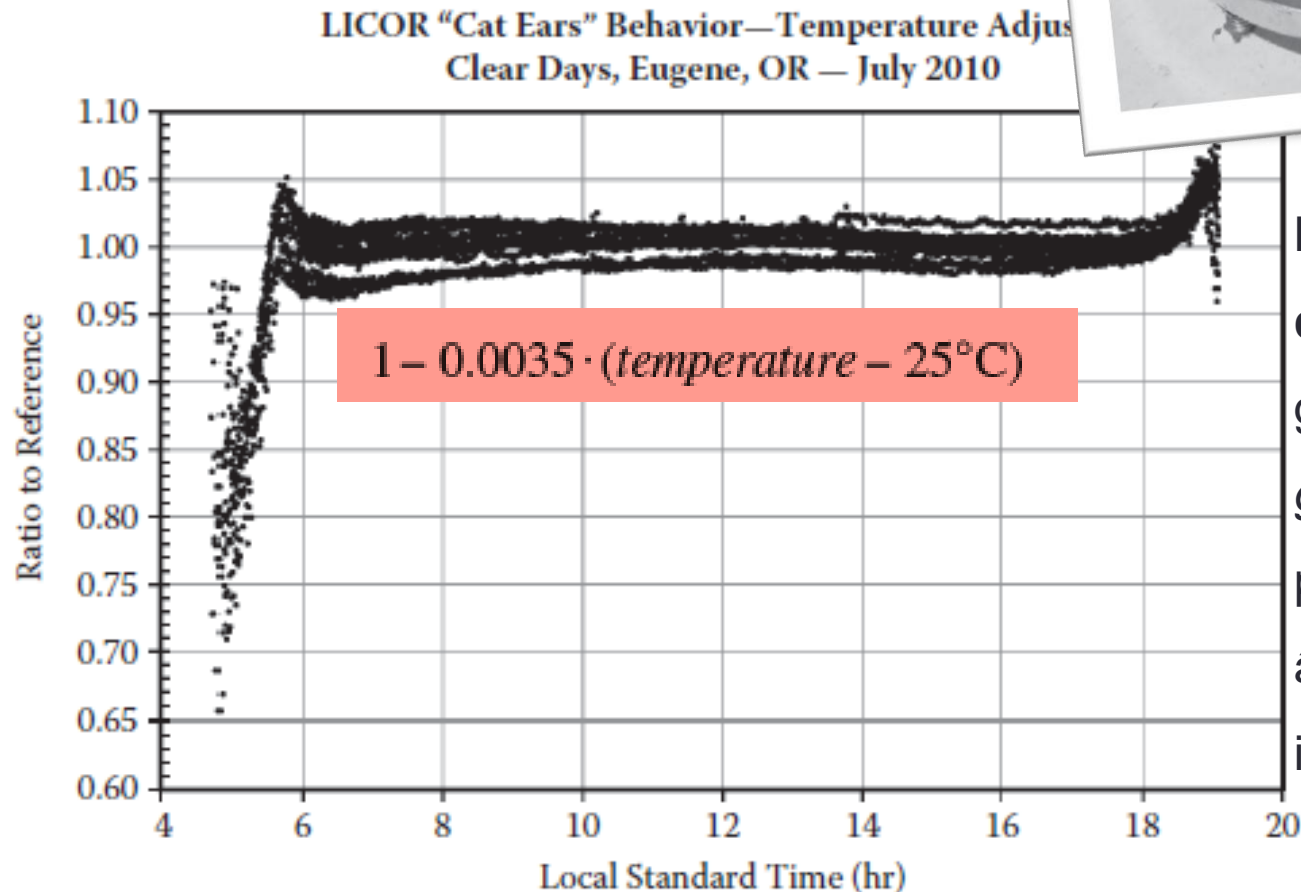
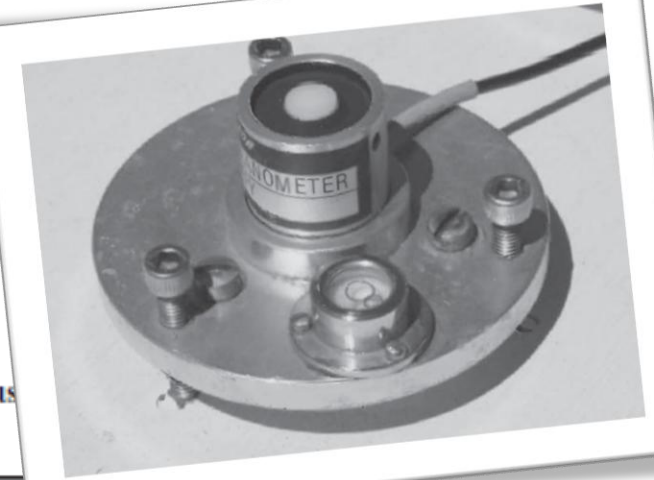
Para dias com nuvens o espectro é semelhante para a difusa (DHI) e a global (GHI) e por isso desvios são menores.



Limitações do
difusor óptico :
gráfico *orelhas de*
gato, com dois picos,
para elevados
ângulos de
incidência

Medida de radiação glo

Variação ao longo do dia

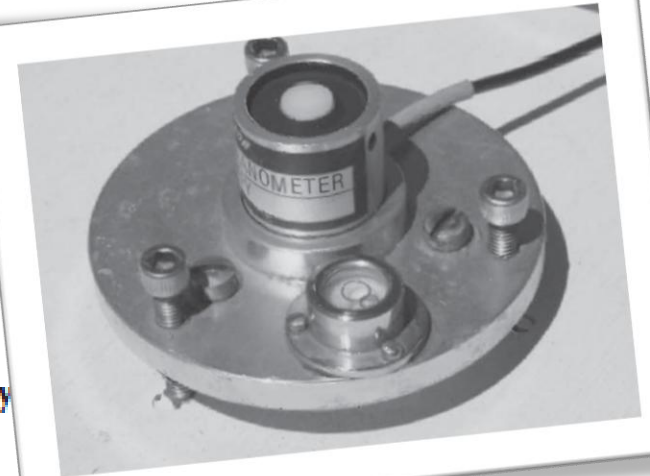
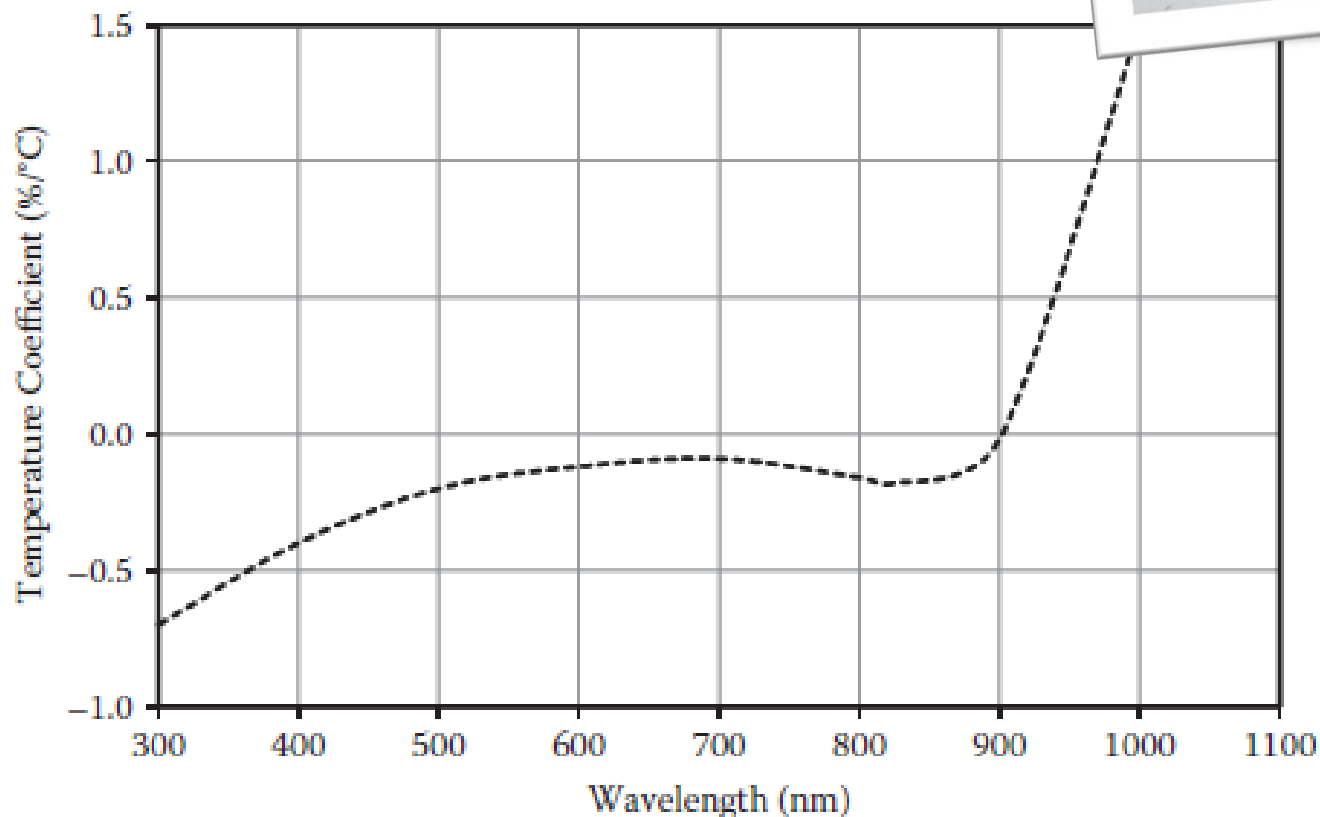


Limitações do
difusor óptico :
gráfico *orelhas de*
gato, com dois picos,
para elevados
ângulos de
incidência

Medida de radiação glo

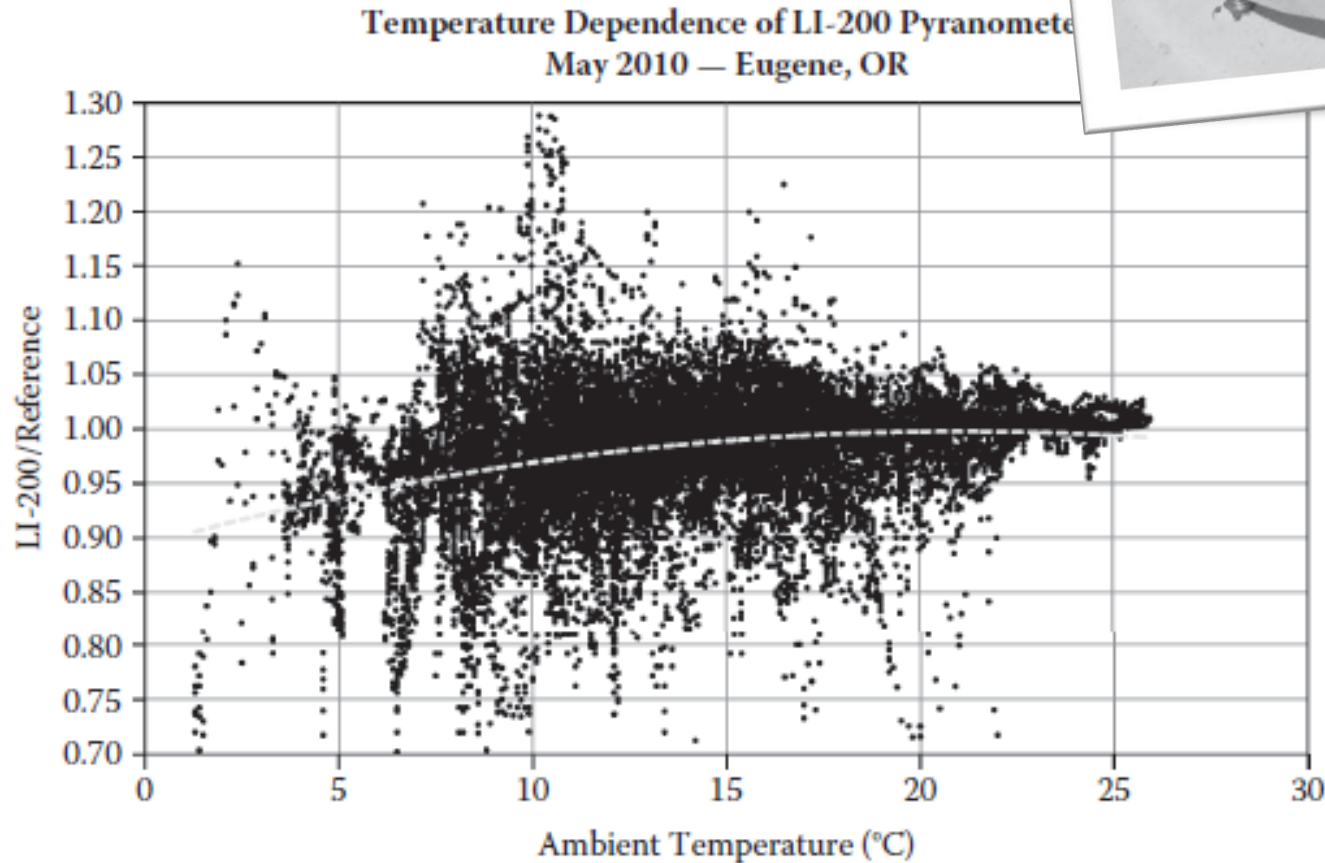
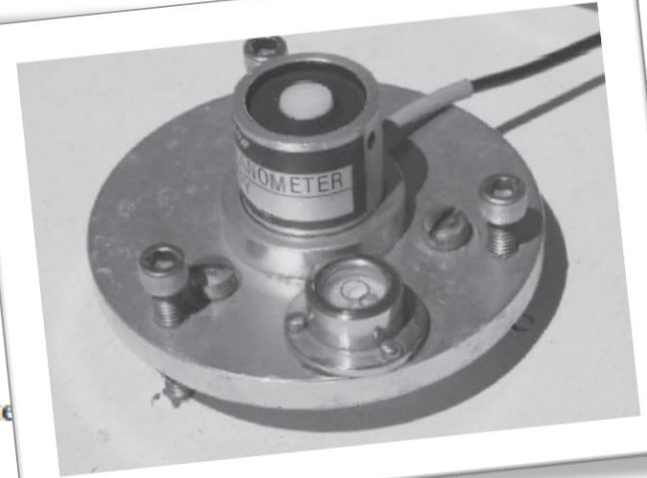
Variação com a temperatura

Typical Temperature Dependence of Responsivity
of a Silicon Photodiode



Medida de radiação glo

Variação com a temperatura



Medida de radiação global

TABLE 5.1

Specifications for Pyranometer Classification

ISO Specifications/WMO Characteristics	Secondary Standard/ High-Quality	First Class/ Good Quality	Second Class/ Moderate Quality
Response time (to 95% of final value)	<15 s	<30 s	<60 s
Zero offset response: to 200 Wm ⁻² net radiant loss to sky (ventilated)	7 Wm ⁻²	15 Wm ⁻²	30 Wm ⁻²
Zero offset response: to 5°C/hr change in ambient temperature	±2 Wm ⁻²	±4 Wm ⁻²	±8 Wm ⁻²
Resolution (smallest detectable change)	±1 Wm ⁻²	±5 Wm ⁻²	±10 Wm ⁻²
Stability (change in sensitivity per year)	±0.8%	±1.6/1.5%	±2.0/3.0%
Nonlinearity (deviation from sensitivity at 500 Wm ⁻² over 100 to 1000 Wm ⁻² range)	±0.2%/0.5%	±0.5%/1.0%	±2.0%/3.0%
Directional response for beam radiation (error due to assuming that the normal incidence response at 1000 Wm ⁻² is valid for all directions)	±10 Wm ⁻²	±20 Wm ⁻²	±30 Wm ⁻²
Spectral selectivity (deviation of the product of spectral absorptance and transmittance from the mean)	±2%	±5%	±10%
Temperature response (error due to 50°C ambient temperature change)	±2%	±4%	±8%
Tilt response (deviation from horizontal responsivity due to tilt from horizontal to vertical at 1000 Wm ⁻²)	±0.5%	±2%	±5%
Suitable applications	Working standard	Network operations	Low-cost network

Medida de radiação difusa

Disco de sombra com seguimento solar

- ☐ Exige seguimento solar
- ☐ Sombra limita-se a ocultar o disco sol e por isso introduz menos incerteza



Medida de radiação difusa

Banda de sombra rotativa

- ❑ Equivalente à sombra fixa mas calibrado *in situ*
- ❑ Sensor de radiação deve ser um fotodíodo devido à rapidez da medição

