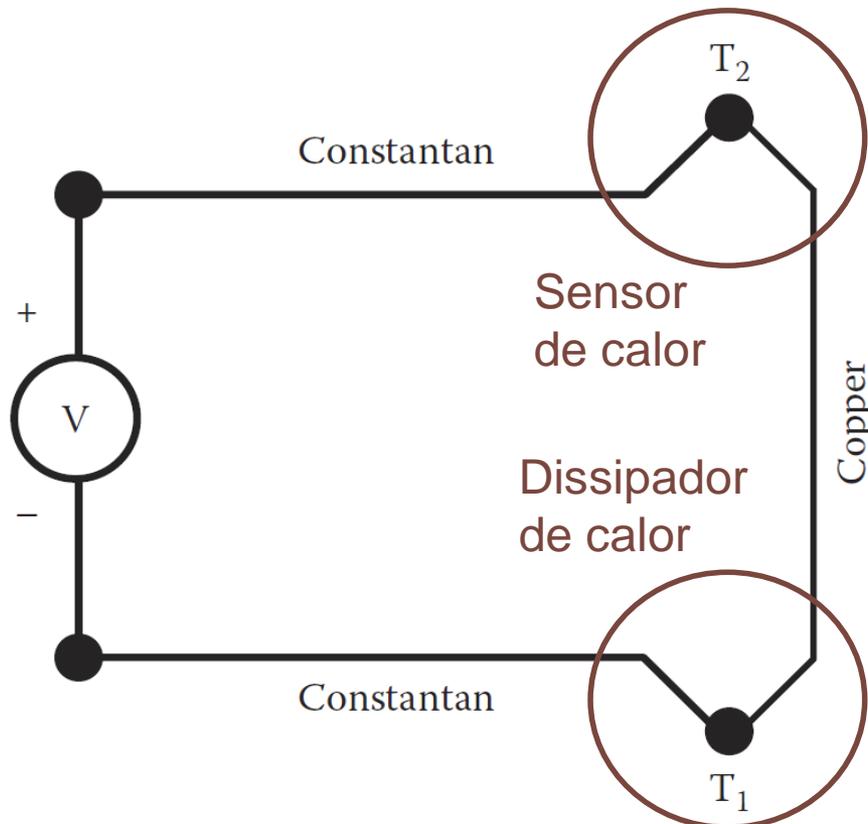


RADIAÇÃO E ENERGIA SOLAR

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)

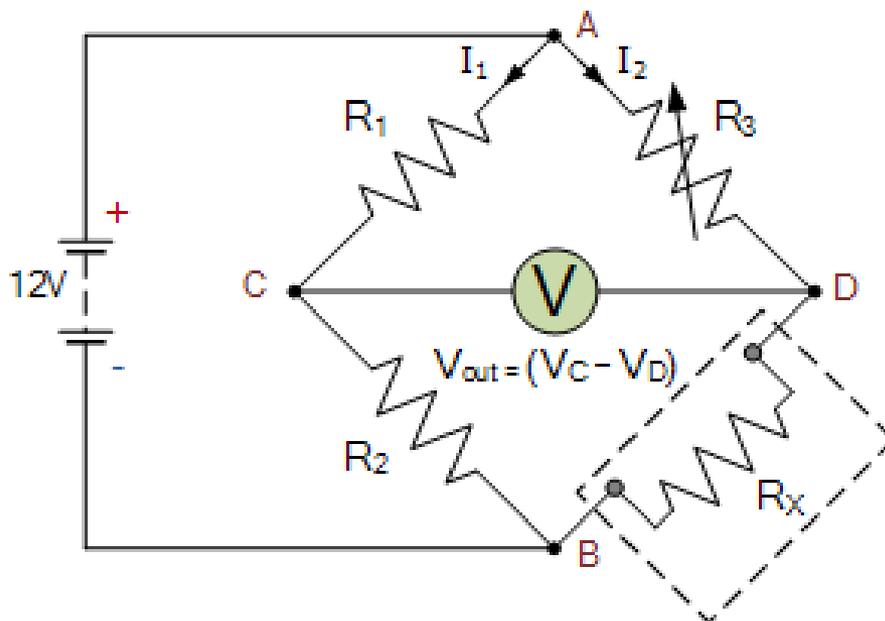
Apresenta baixa selectividade espectral

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

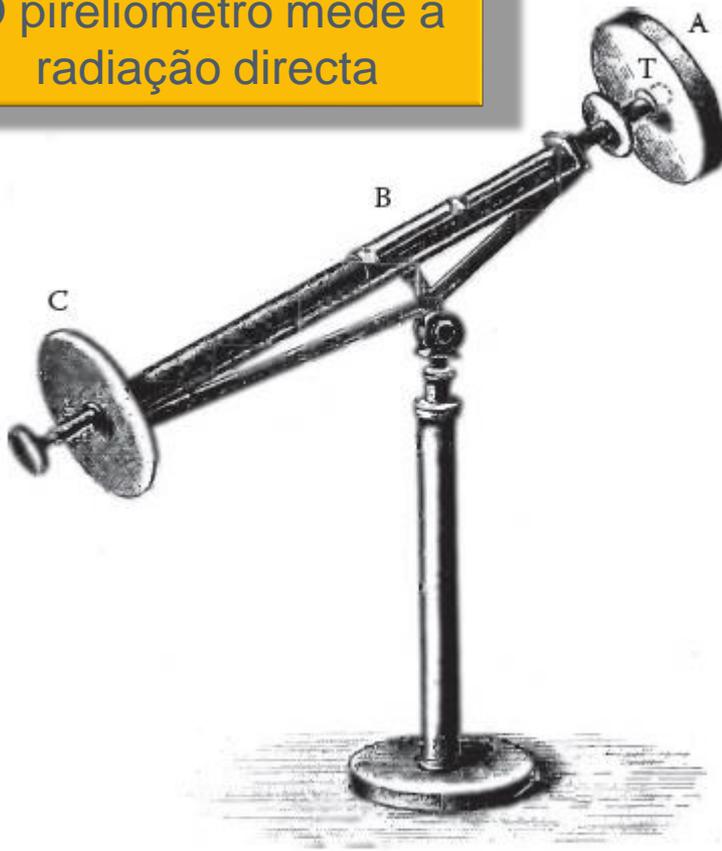
O sensor é activado pela incidência dos fotões. Apresentam selectividade espectral.

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.

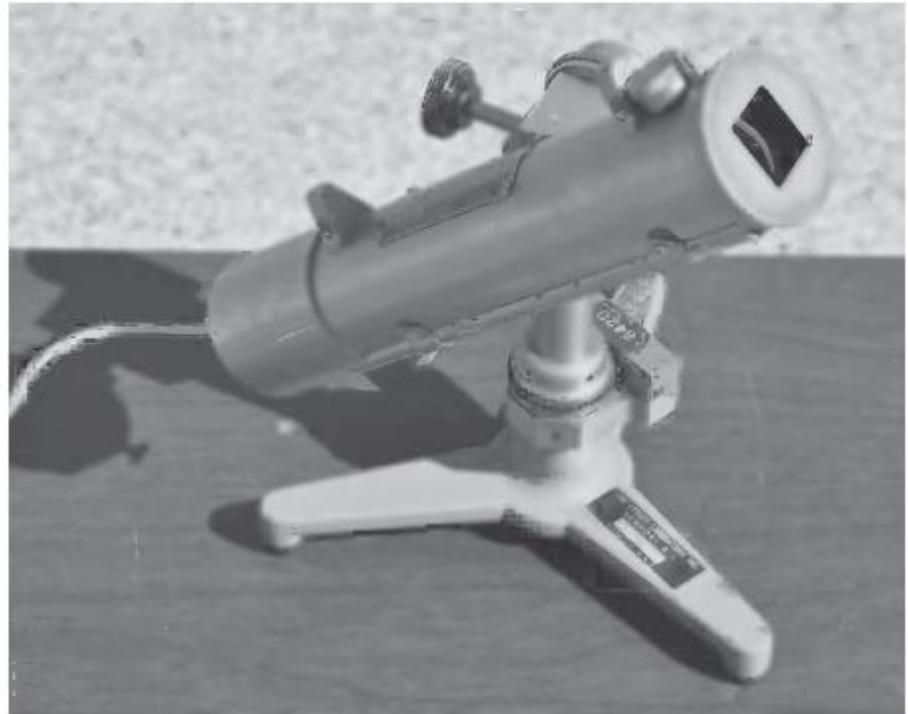


Instrumentos históricos

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



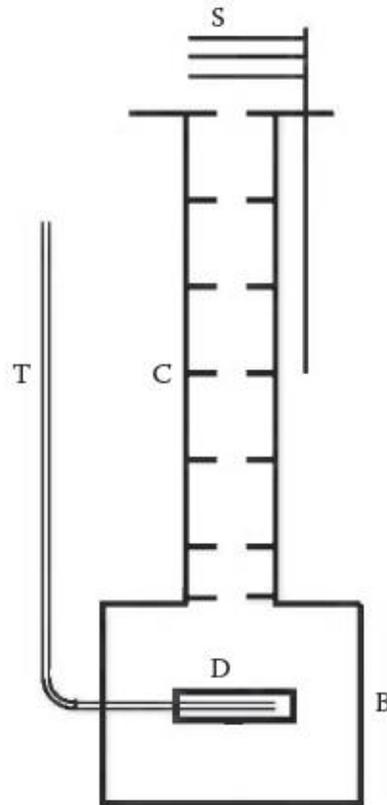
Piranómetro de Callendar (1898)

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

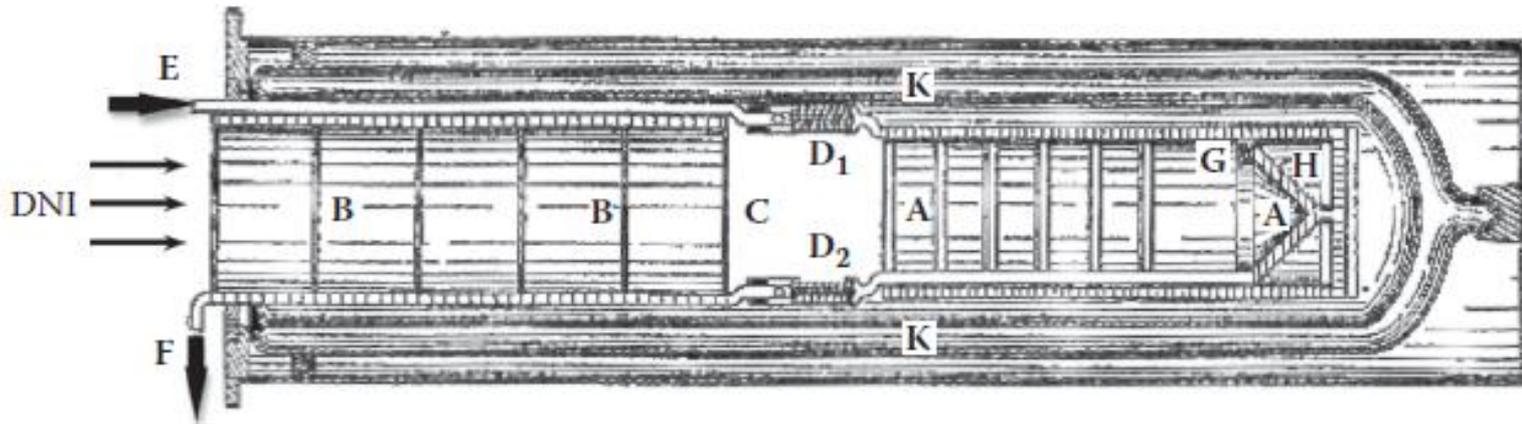


Pireliómetro de Abbot (1906)

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

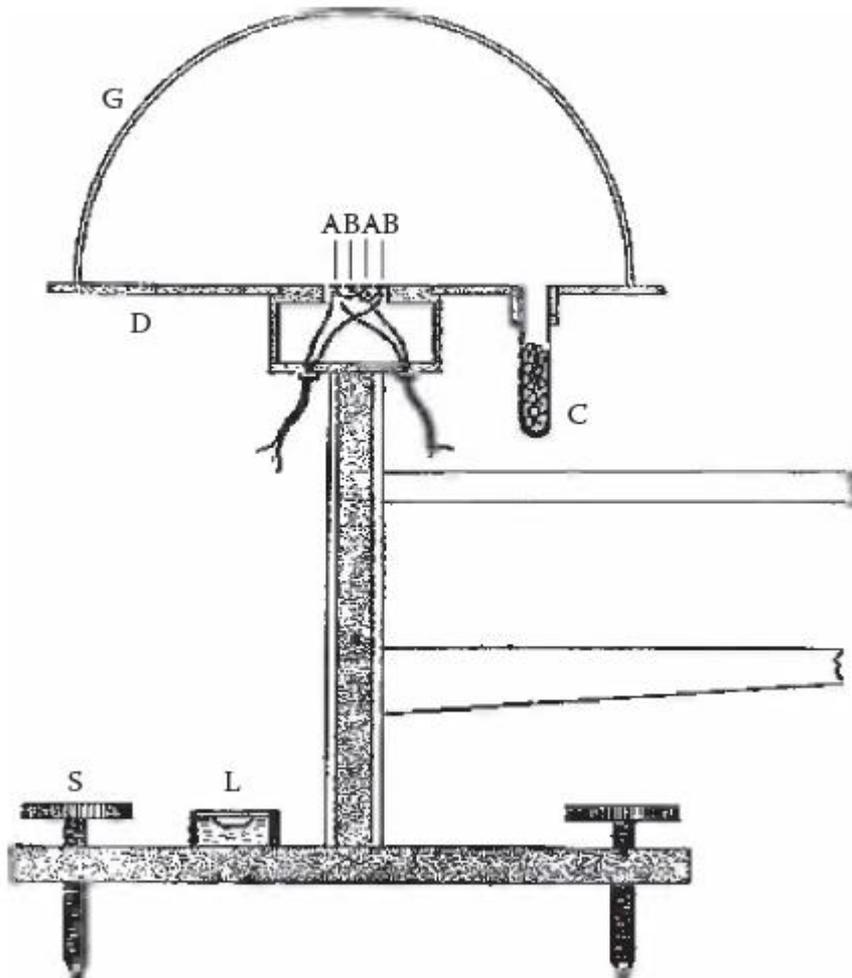


Pireliómetro de Smithsonian (1910), também desenvolvido por Abbot.

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.

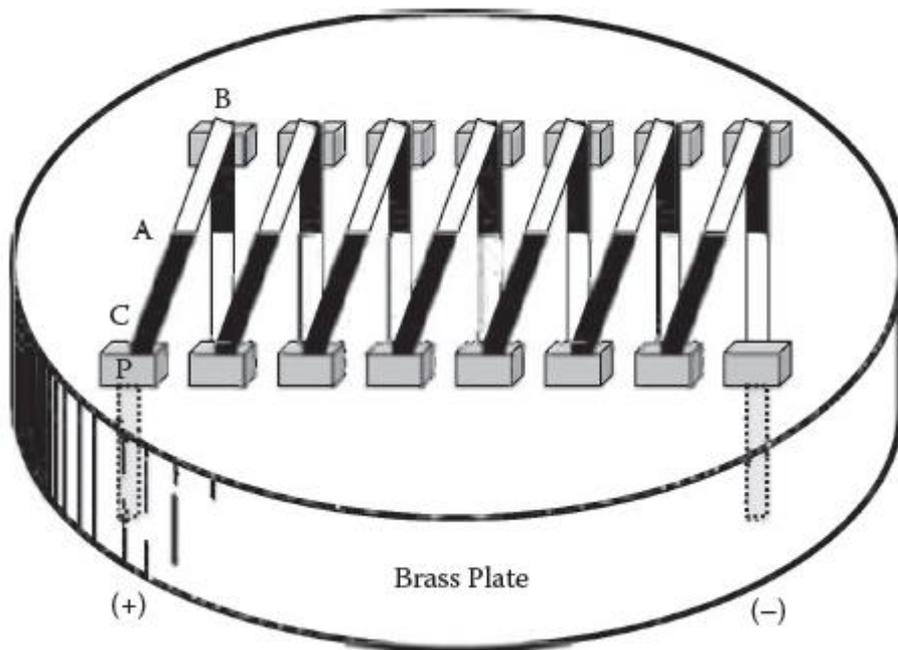
Instrumentos históricos



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



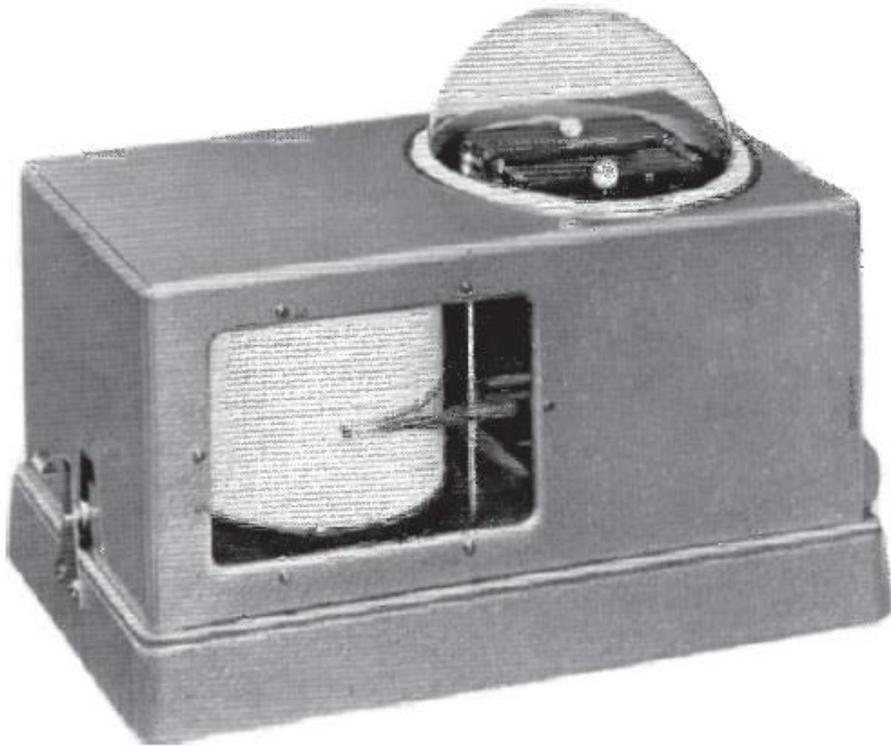
Solarímetro de Kipp & Zonen (1924)

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 bimetálica 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

Pireliómetro 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).

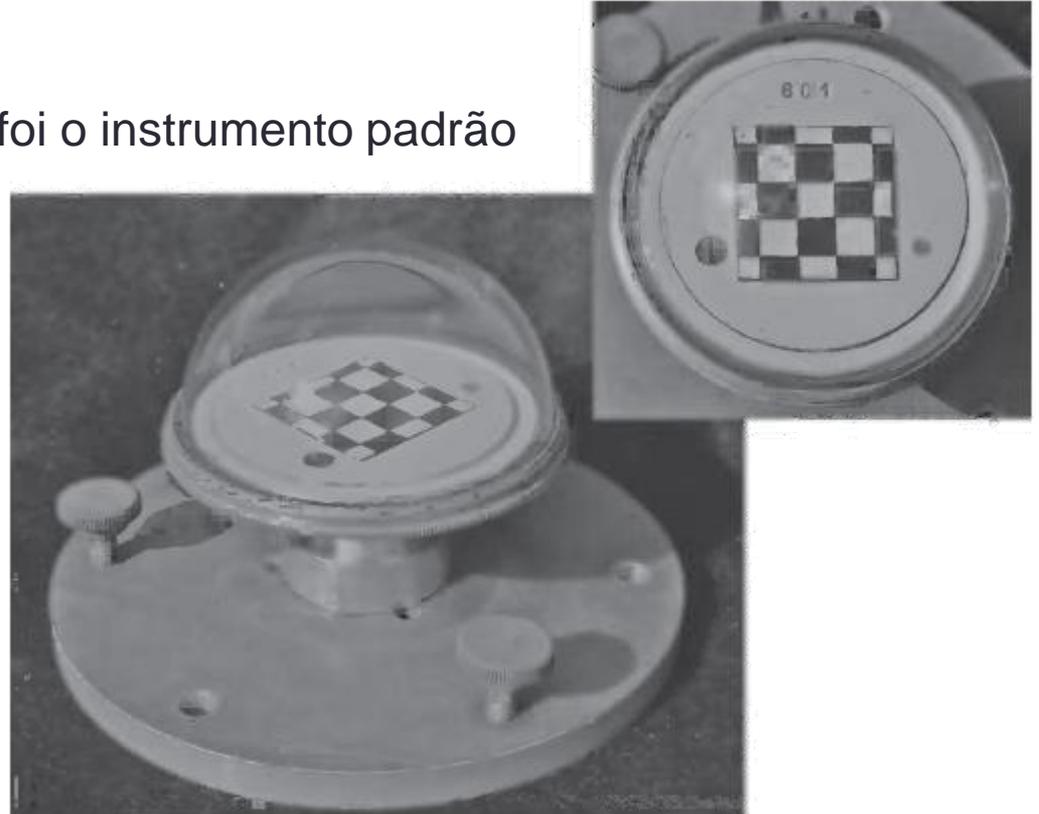
Resposta rápida (1''); dessecante substituível; hemisférios com cores diferentes, como filtros para

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

Instrumentos históricos

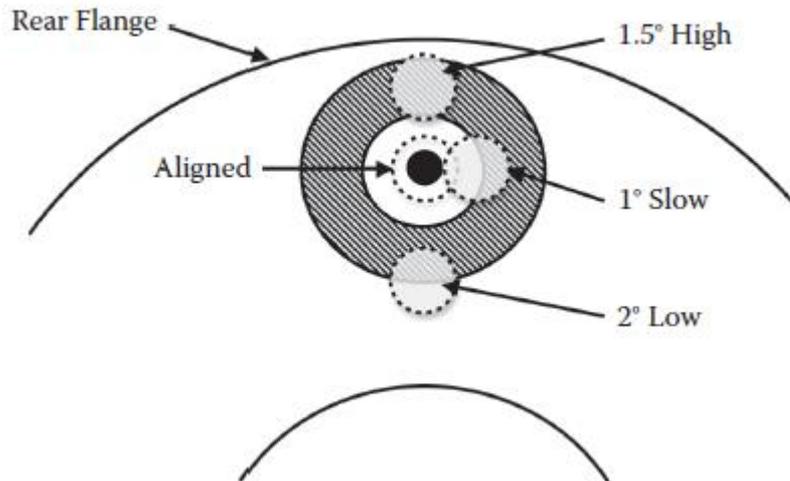
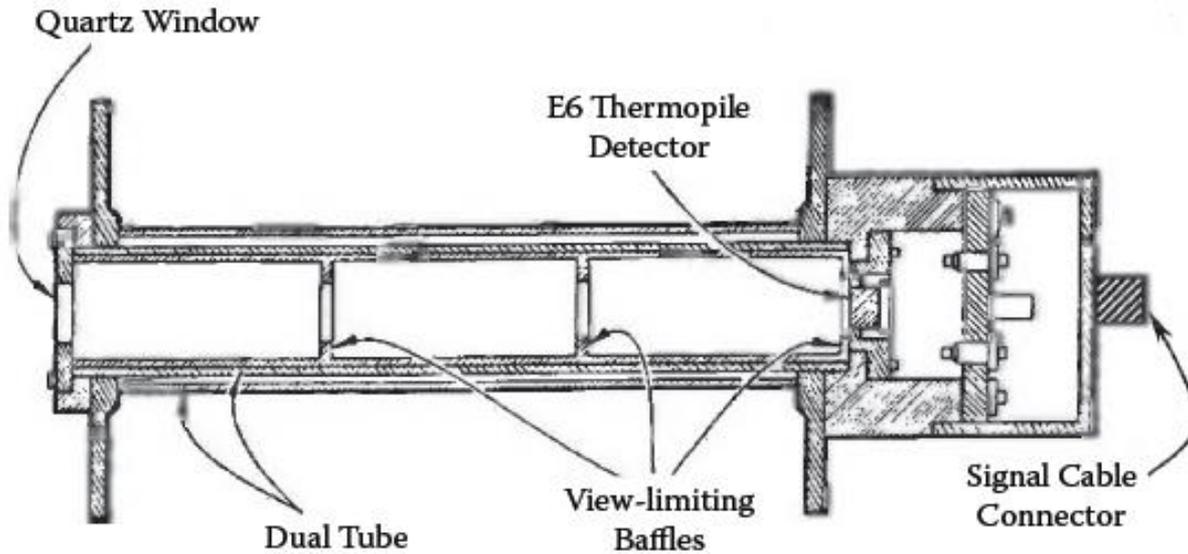
Piranómetro Yanishevsky (1957) foi o instrumento padrão na URSS.

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/m^2 na gama de medida entre 0 e 500 W/m^2 (2008)

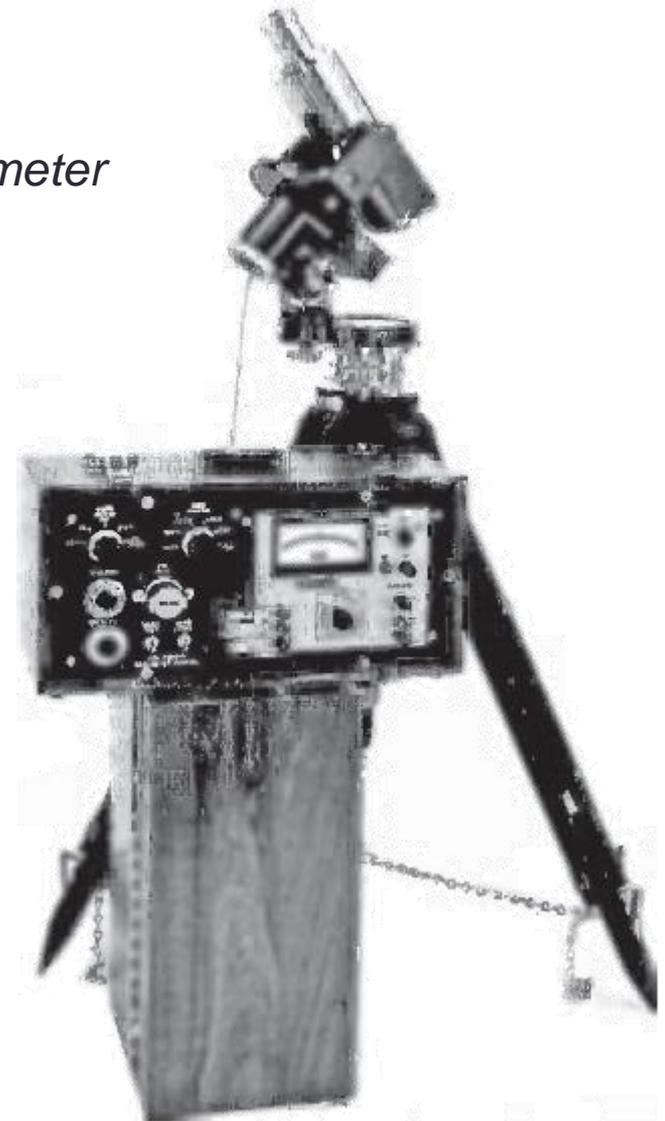
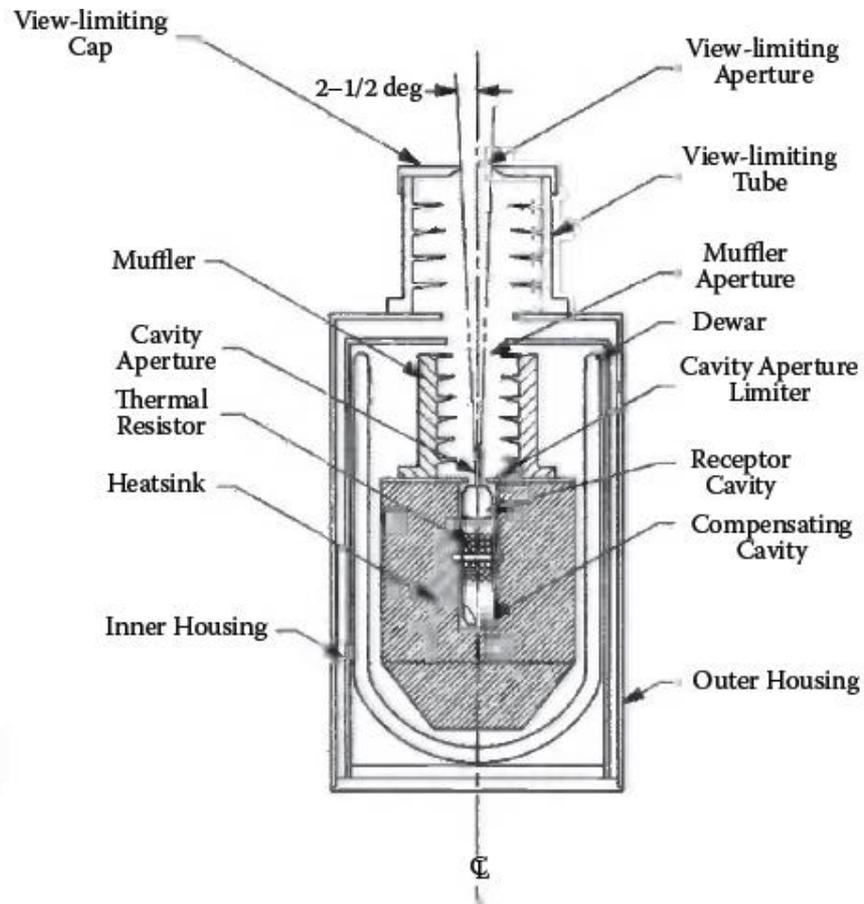
Instrumentos históricos



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

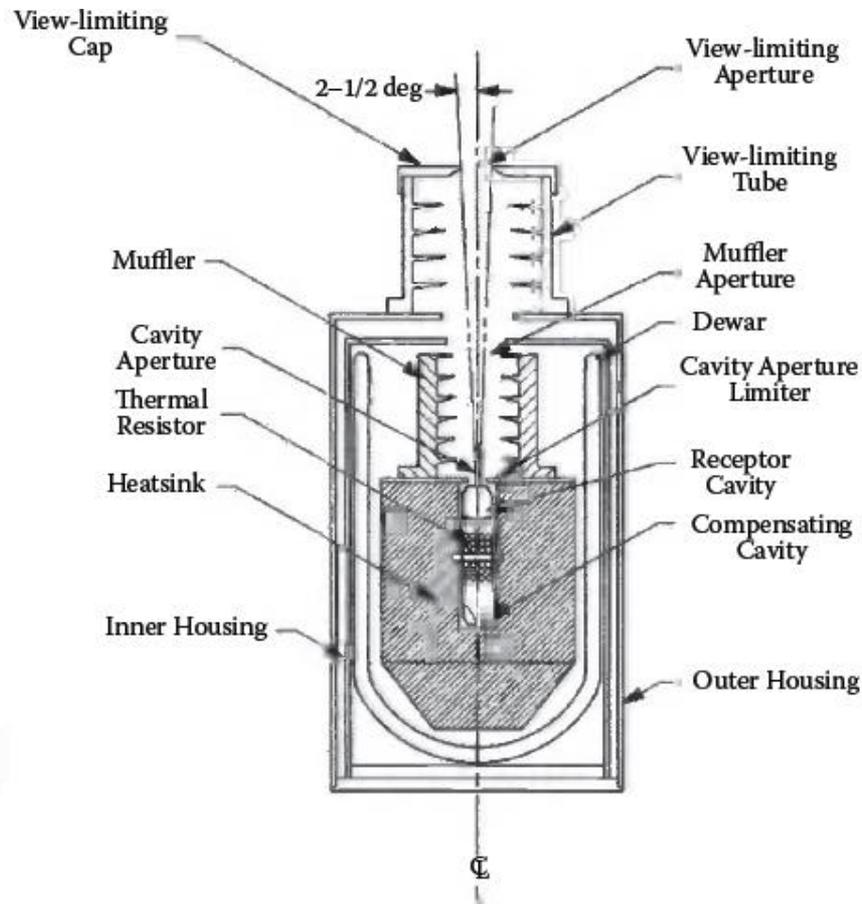
Instrumentos históricos

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 piranômetros e pireliômetros

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 $\pm 2\%$ até 70° e
 $\pm 5\%$ 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

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



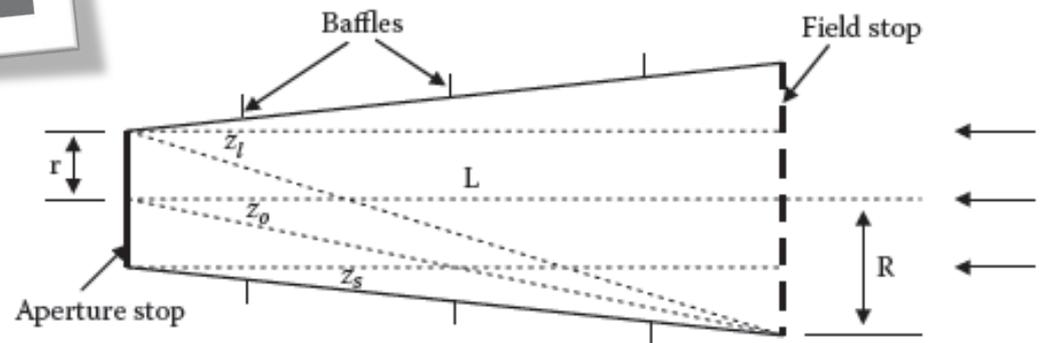
Pireliómetros funcionam quase sempre com termopilhas devido à sensibilidade espectral dos foto-díodos (sinal depende da composição da atmosfera)

TABLE 4.1

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

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

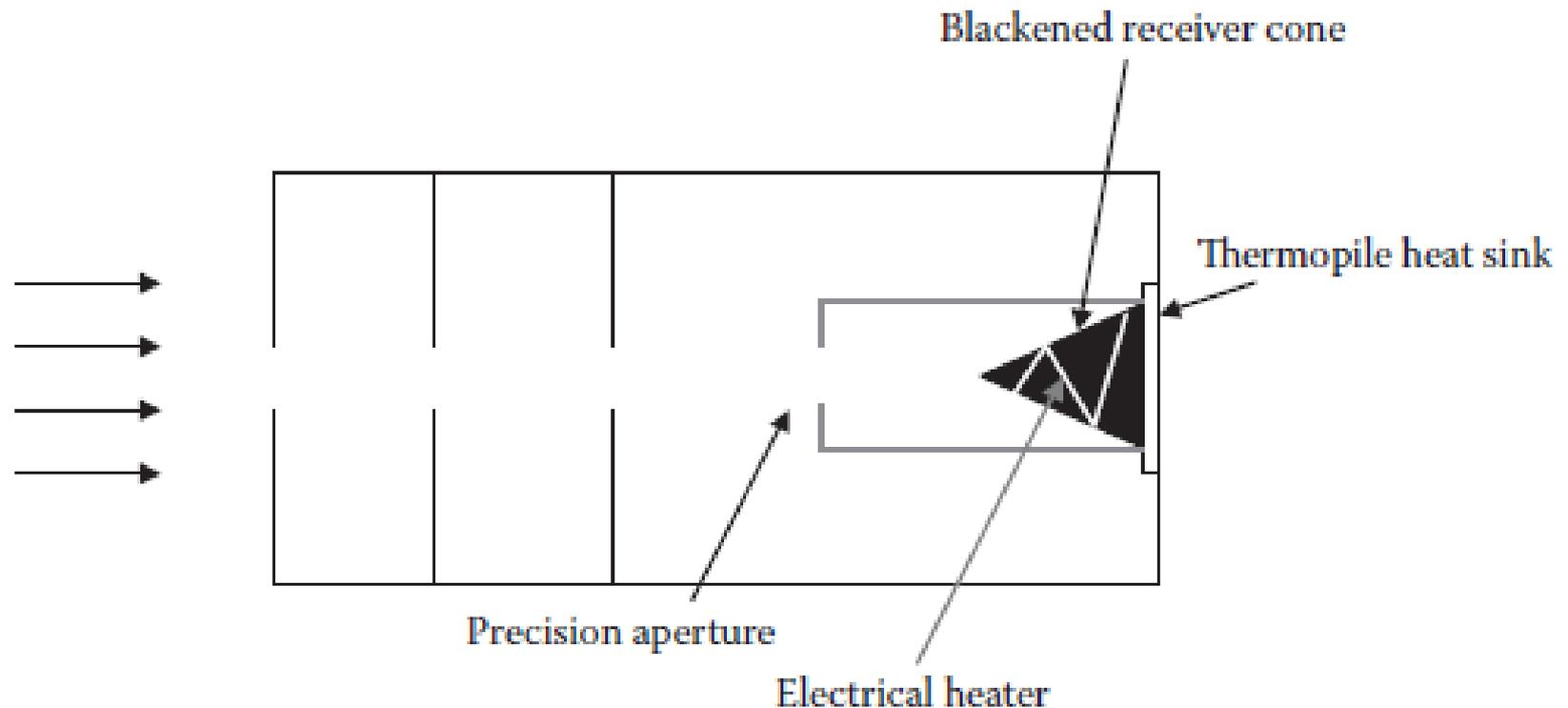
Characteristic WMO/ISO	High-quality/ Secondary Standard	Good-quality/ First Class	Second Class (ISO Only)
Response time (95%)	<15 sec	<30 sec/ <20 sec	<30 sec
Zero offset (signal for 5 K h ⁻¹ change in ambient temperature)	±2 W m ⁻²	±4 W m ⁻²	±8 W m ⁻²
Resolution (smallest detectable change)	±0.5 W m ⁻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.

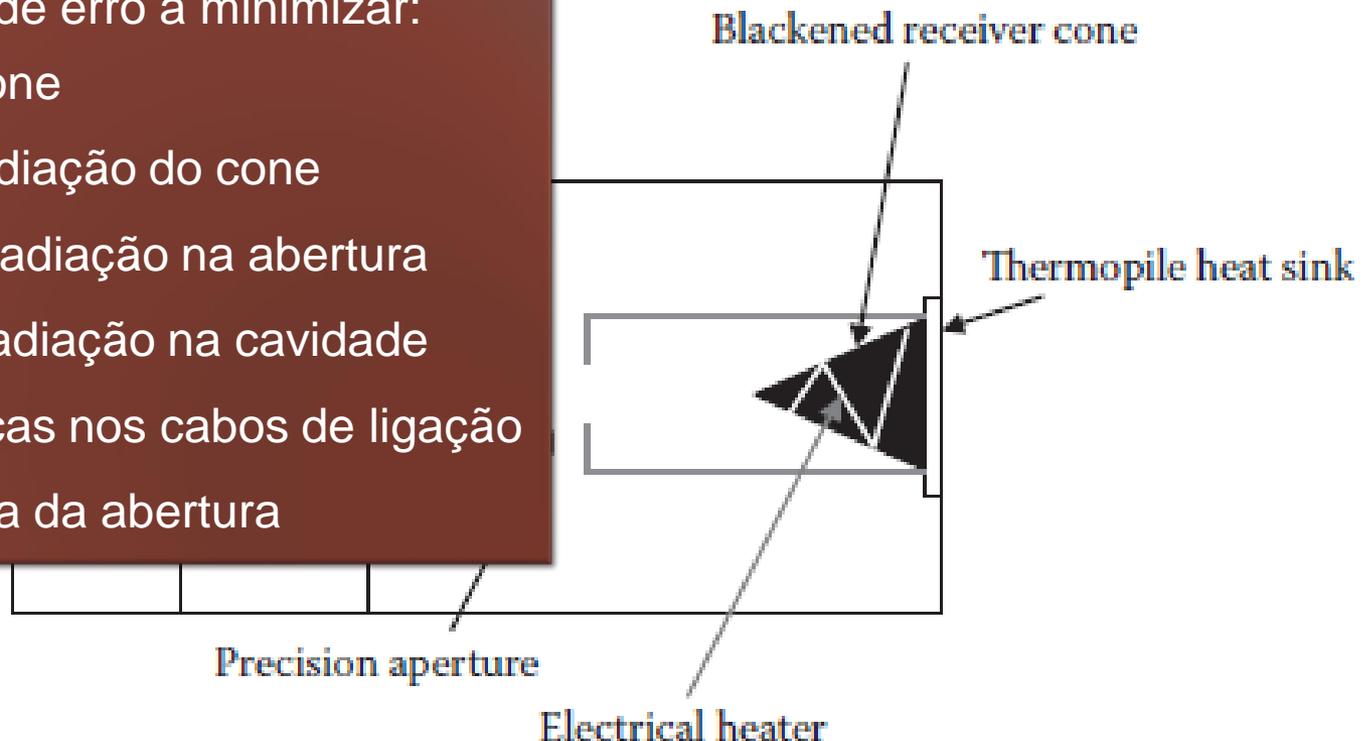


Medida de radiação directa

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*

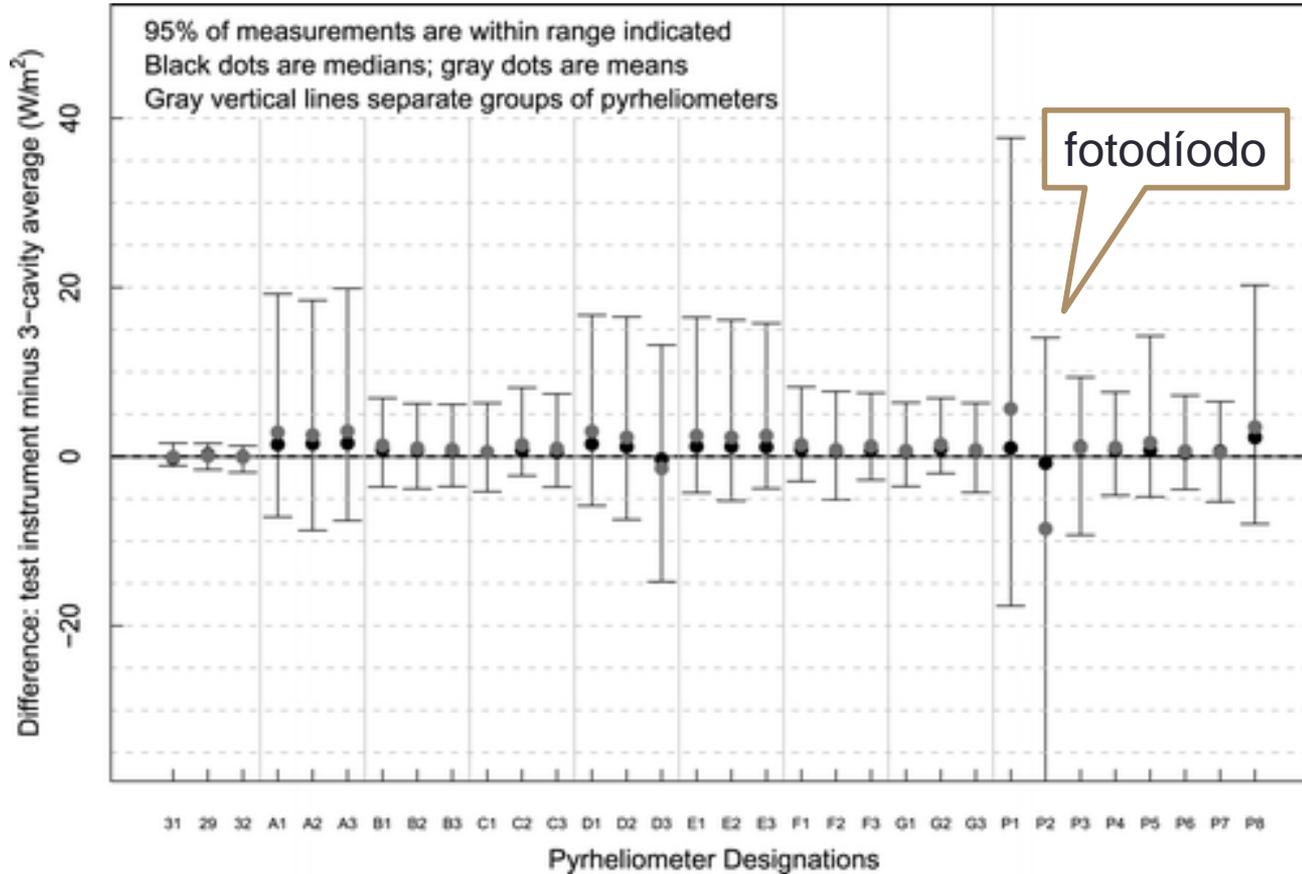
(Manuscript received 18 August 2010, in final form 19 November 2010)

Medida de radiação directa



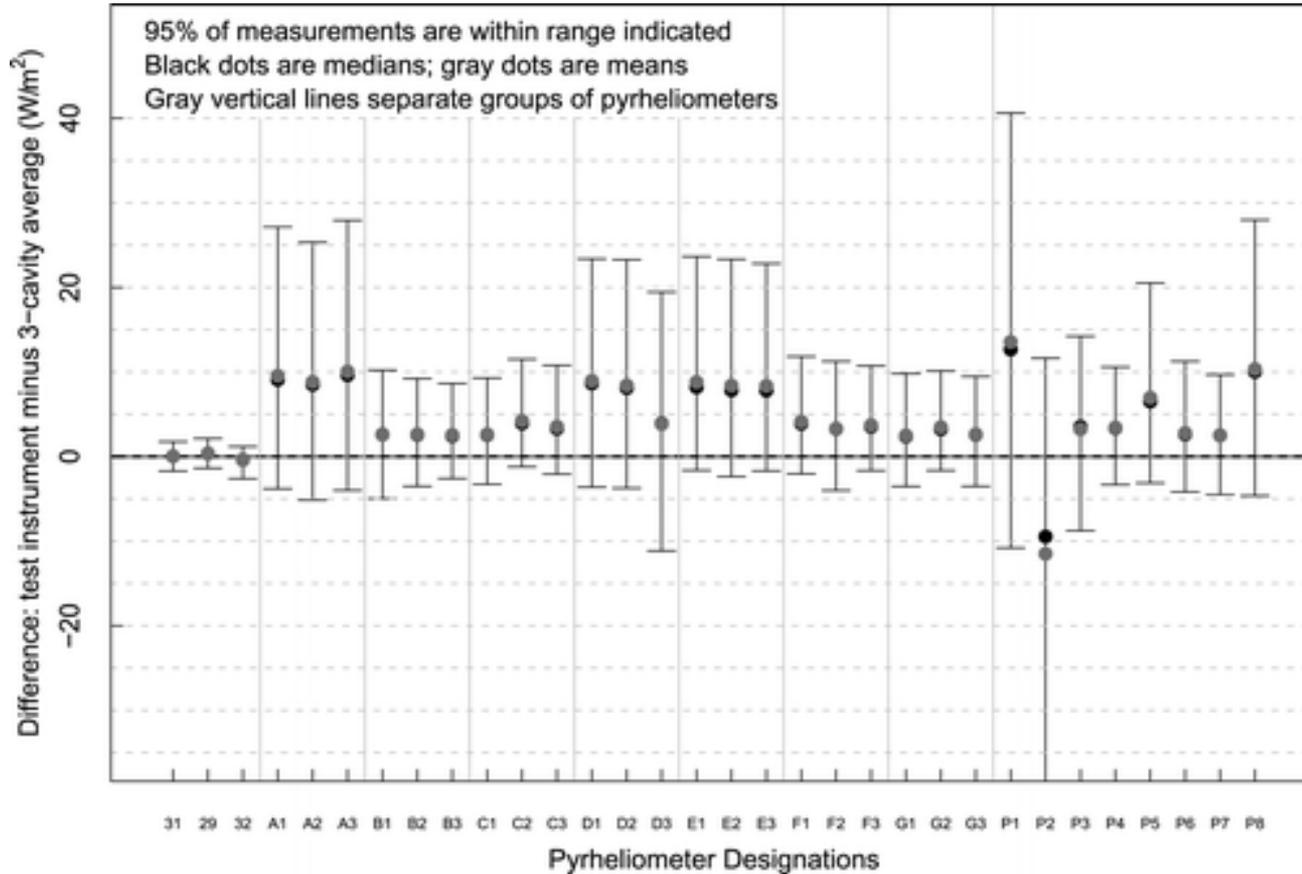
FIG. 1. The 33 pyrheliometers mounted on four trackers for the 10-month comparison. The four windowed cavity radiometers are on the second tracker from the left. (Credit: Stephen Wilcox, NREL.)

Medida de radiação directa

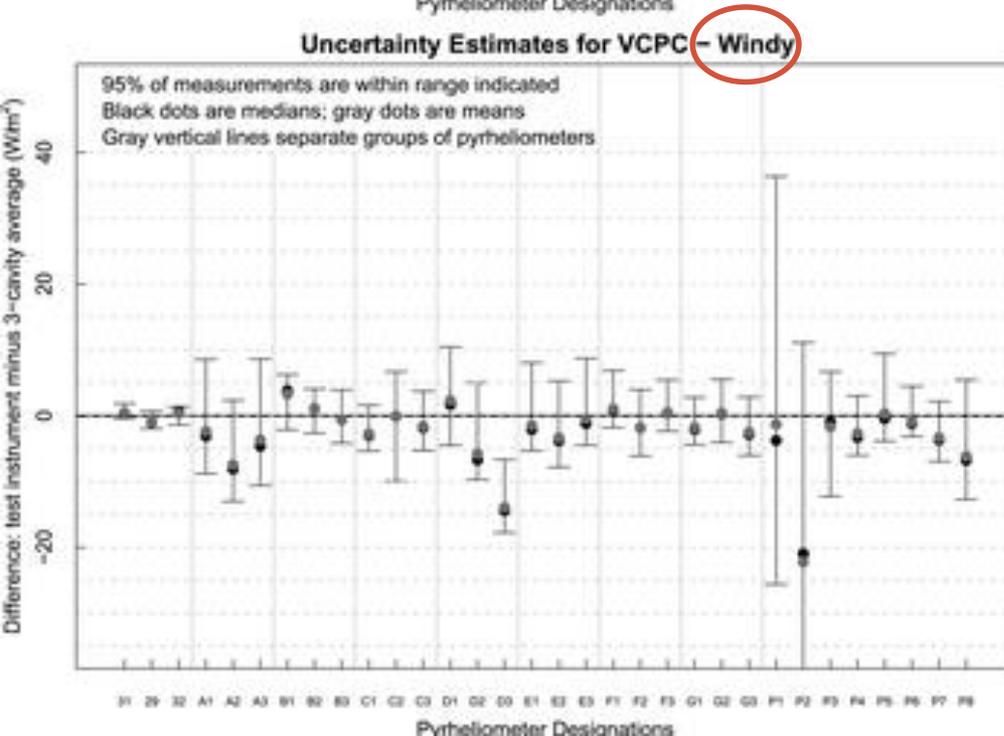
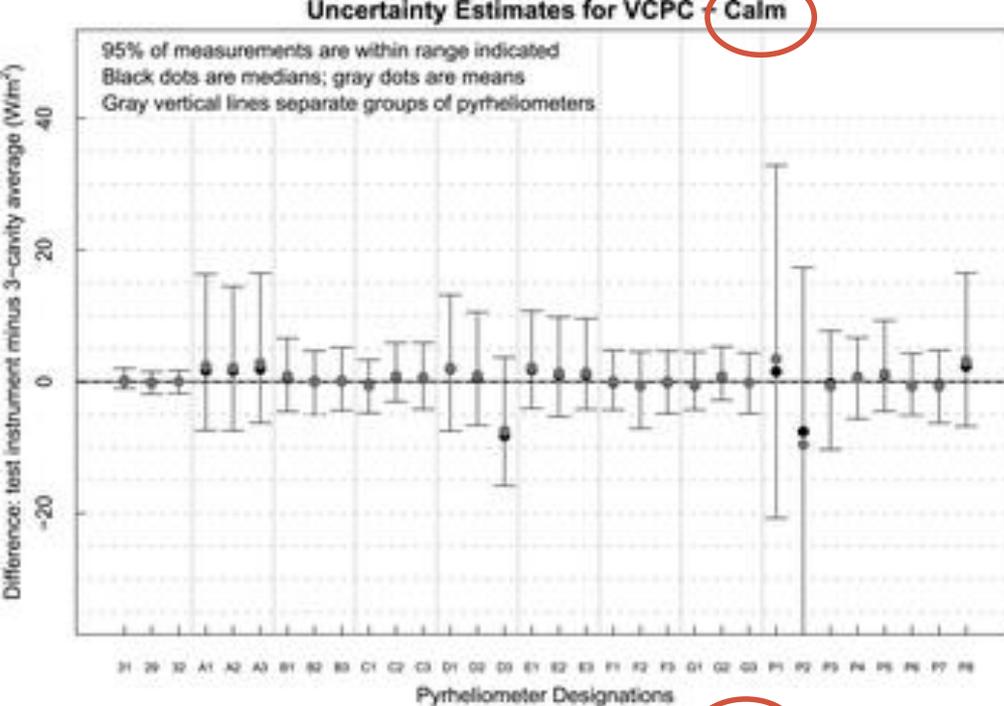


Daytime data defined as points with the SZA $< 91.2^\circ$. The average direct irradiance is 410 W m^{-2} . This plot reveals groups with similar behavior. Cavities perform the best and agree very well (see text for discussion of cavity results).

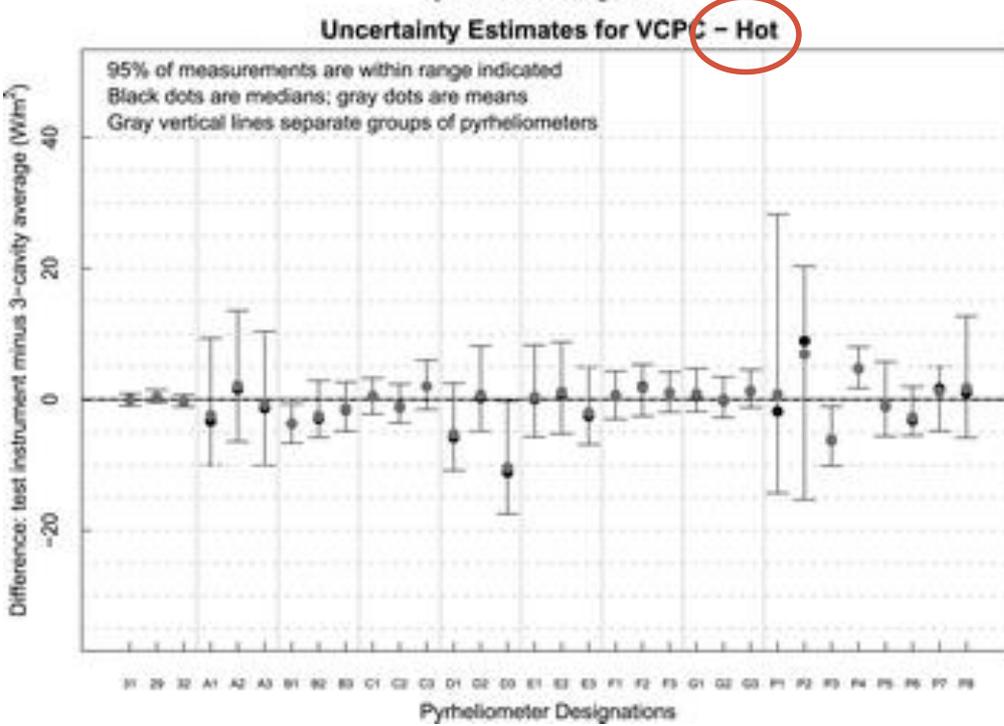
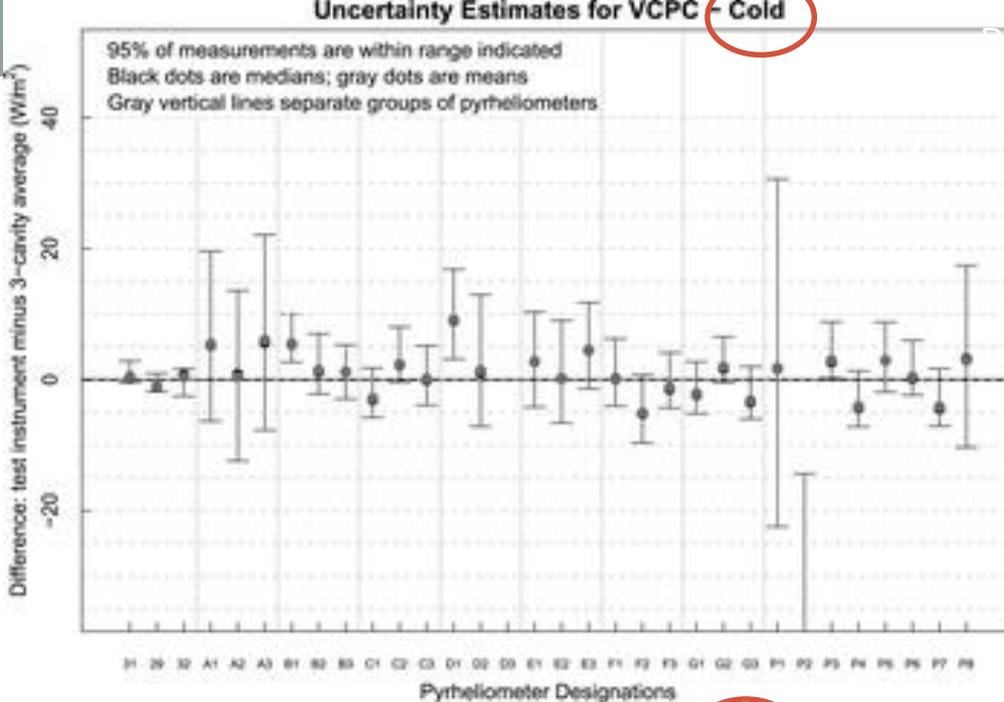
Medida de radiação directa



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

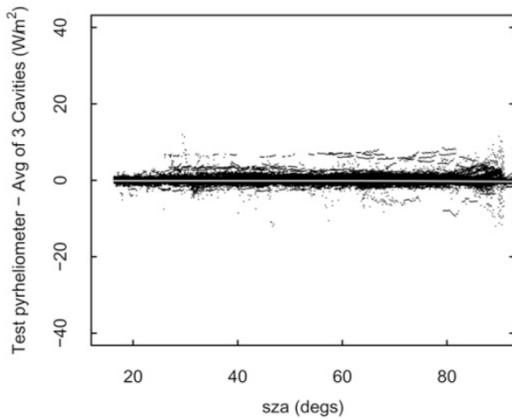


Plots are for (top) calm and (bottom) windy conditions with direct irradiance $> 700 W m^{-2}$. (top) Similar to Fig. 5. (bottom) Suggests that the wind produces negative offsets vis-à-vis calm circumstances; however, this is not always true and the instruments within groups showed independent behavior.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

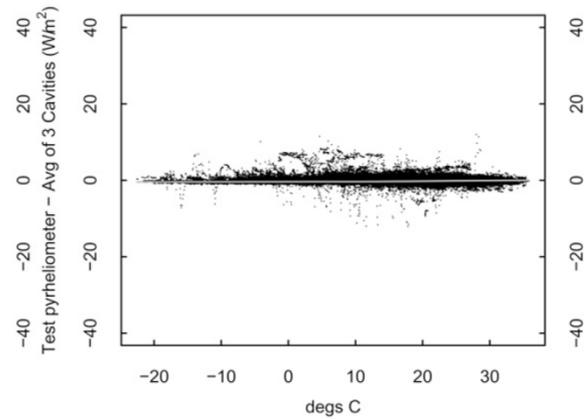


Plots are for direct irradiance $>700 W m^{-2}$. (top) Cold conditions below $0^{\circ}C$ and (bottom) hot conditions above $30^{\circ}C$. There clearly is some change but with no consistent pattern within groups.

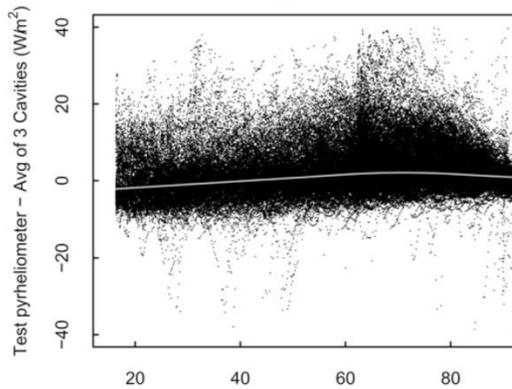
31114



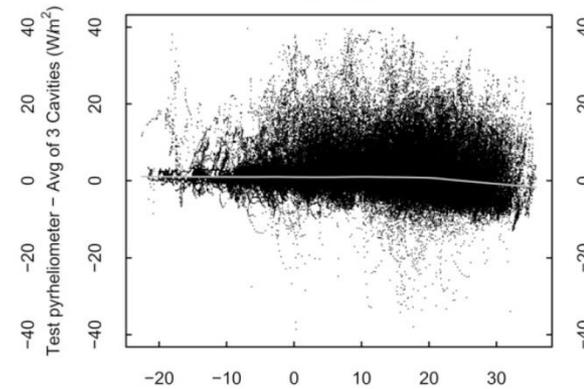
31114



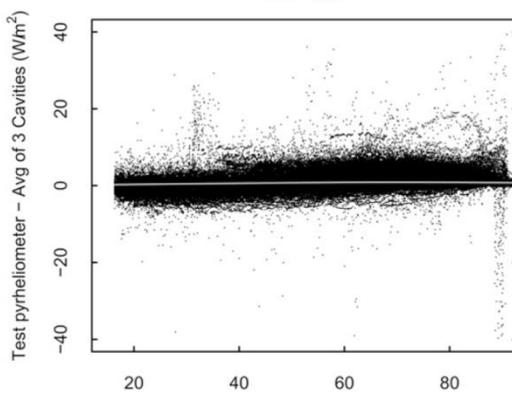
A1-101



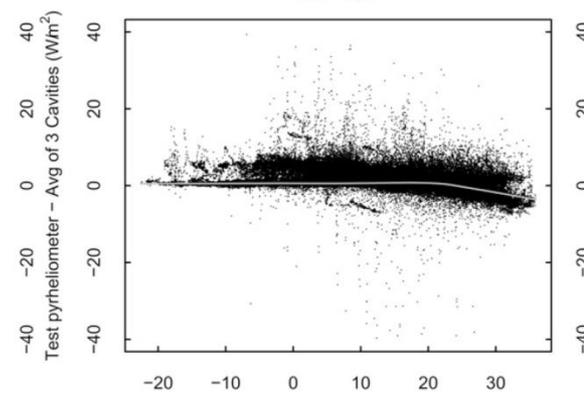
A1-101



B1-102



B1-102

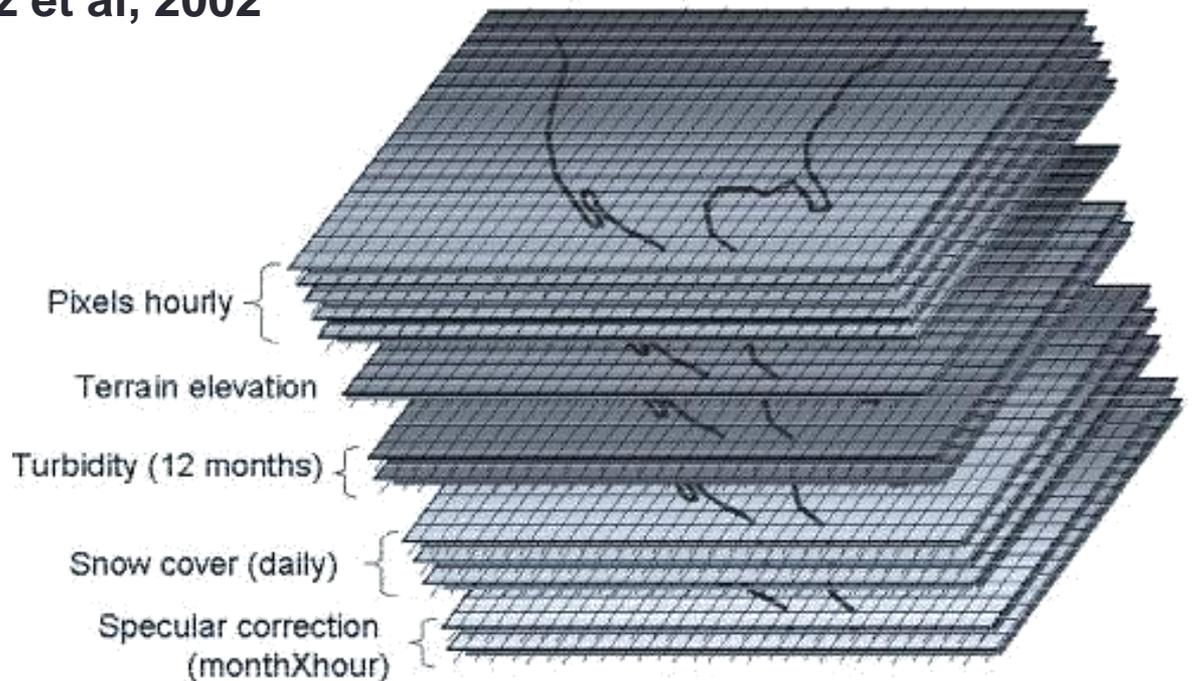


Plots illustrating the temperature (T) and SZA response as an example of each pyrheliometer category of defined above each panel. The gray line is a smoother through the data to guide the eye. The cavity has no T or SZA dependence. The B-type pyrheliometer has little SZA dependence but shows some T dependence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

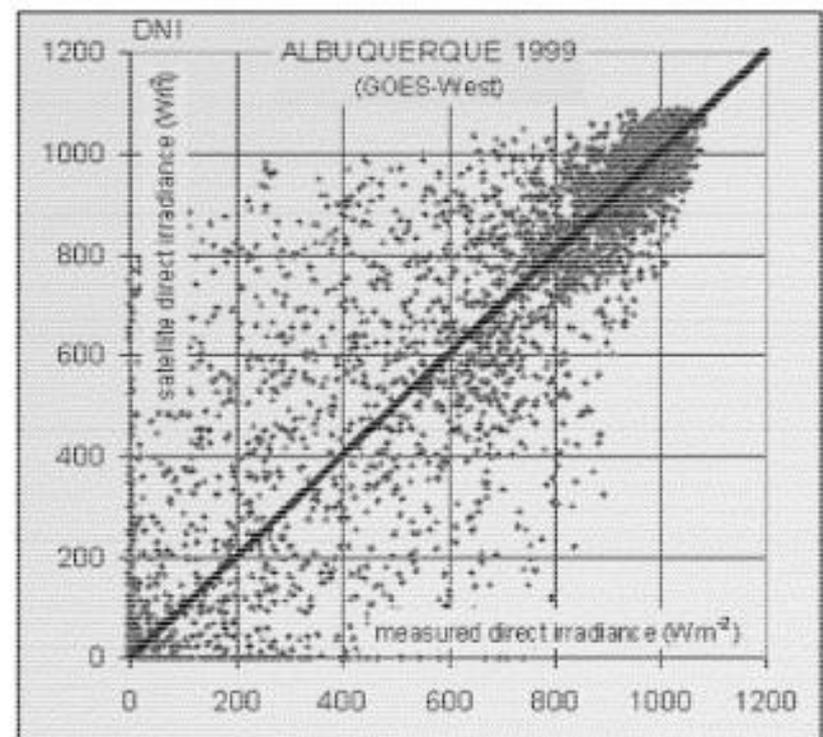
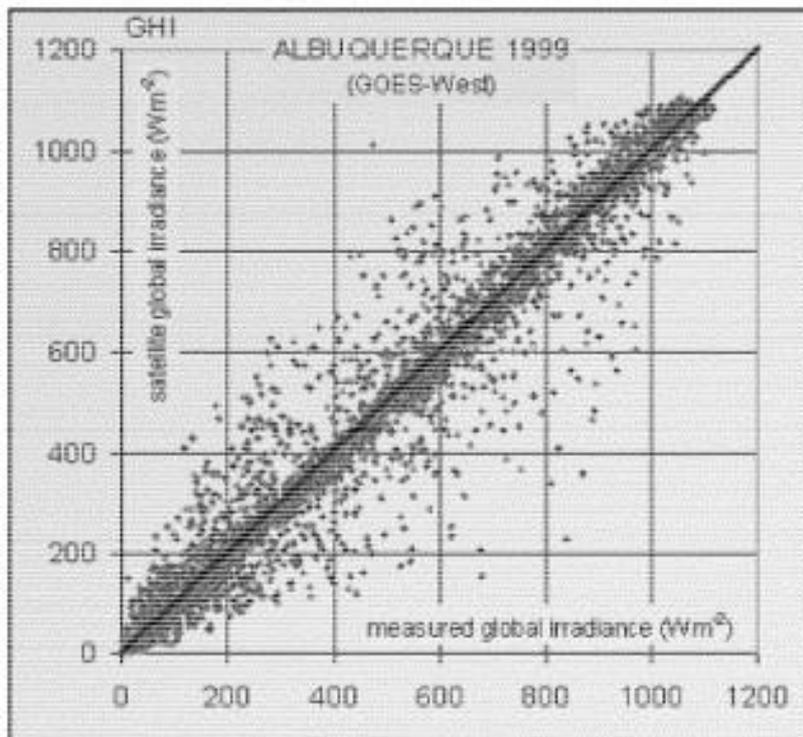
Modelo híbrido de Perez et al, 2002



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

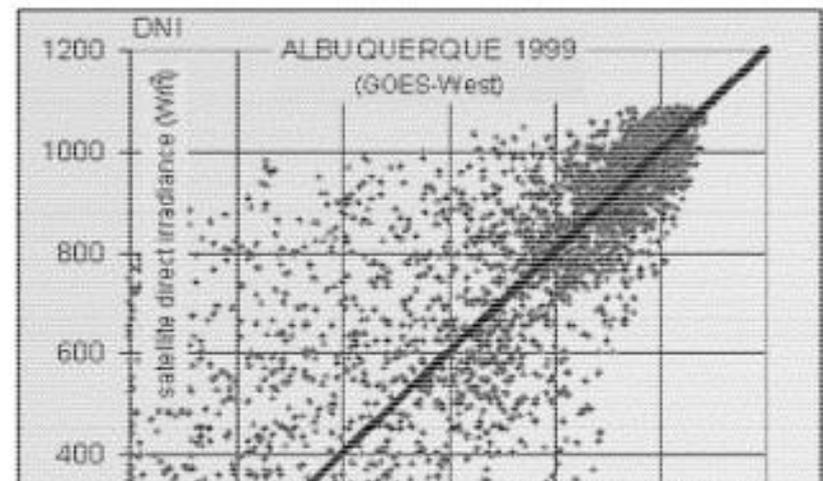
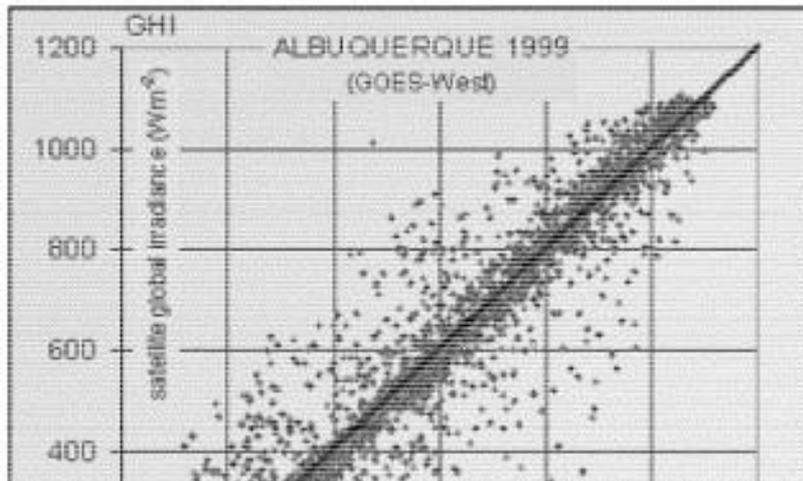
Medida de radiação directa

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

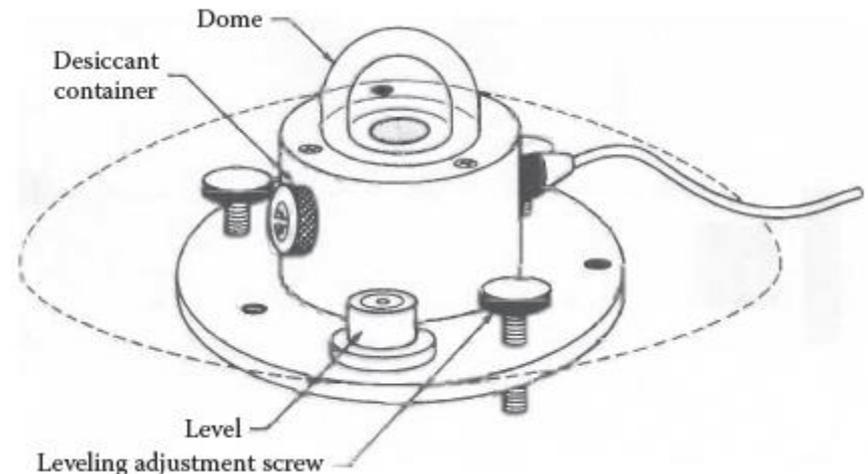
- Sensibilidade à **temperatura** (offset e linearidade)
- Sensibilidade **espectral**
- Sensibilidade ao **ângulo de incidência** (resposta do coseno)

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

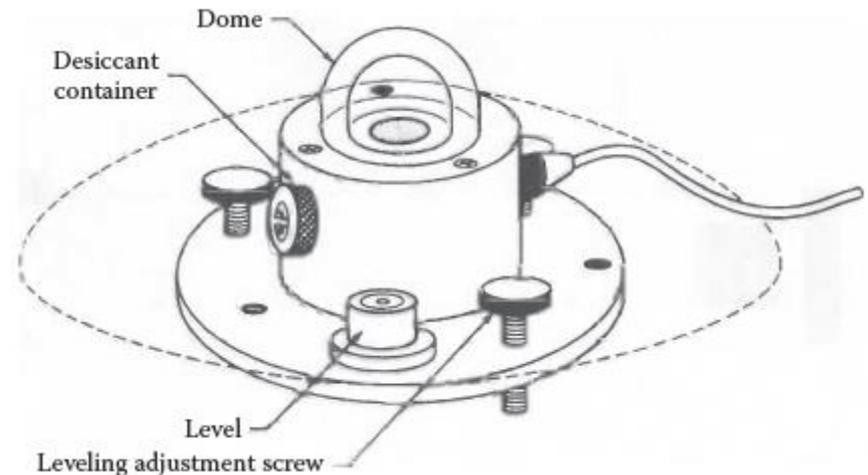


Medida de radiação global

Termopilha com disco negro

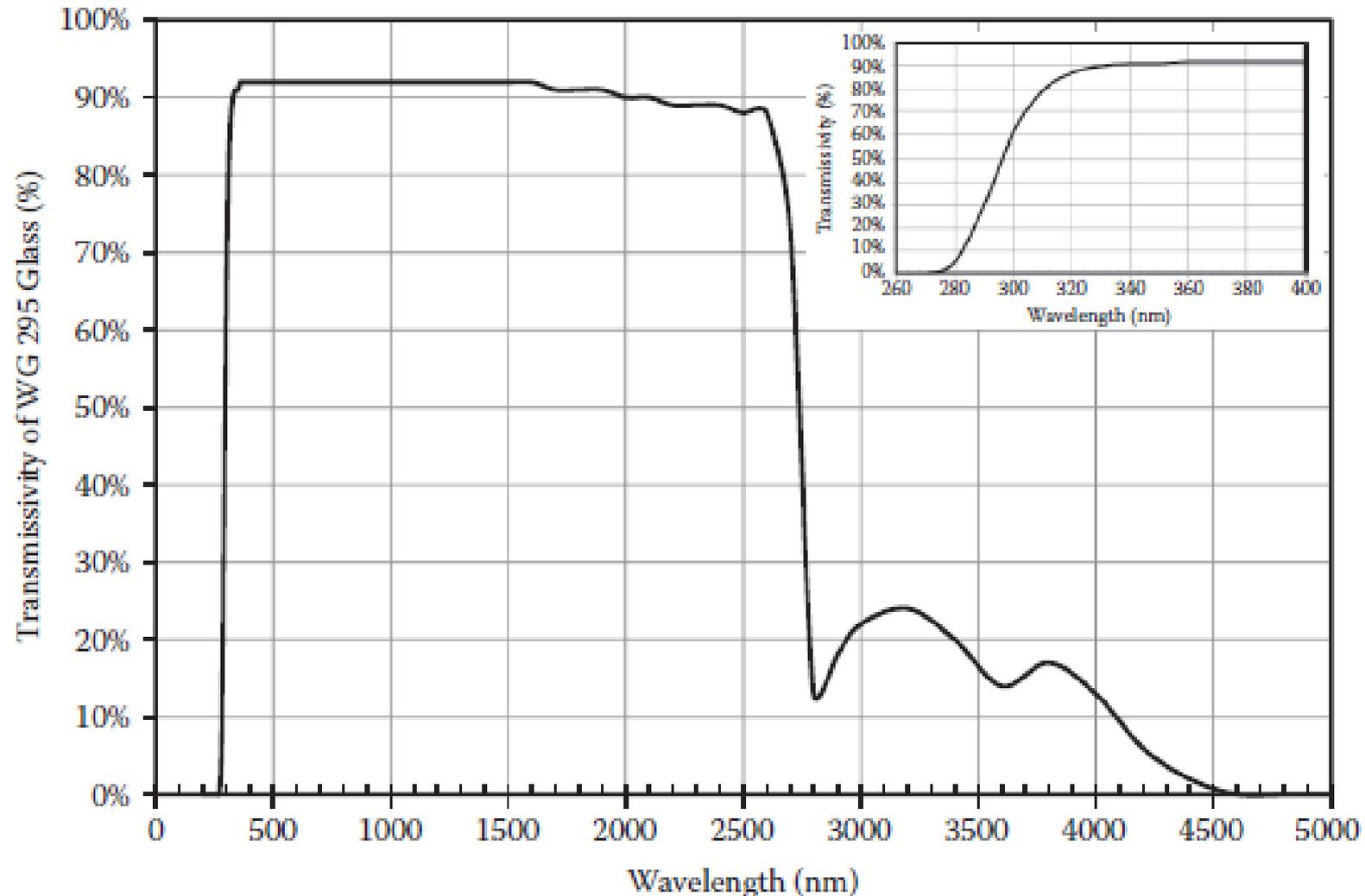
- ❑ Medida de fluxo de calor entre o disco e o corpo do instrumento
- ❑ Dupla-cúpula para redução perdas convectivas
- ❑ Isolamento térmico da termopilha para redução de perdas por condução
- ❑ Erro ($<30 \text{ W/m}^2$) aumenta com temperatura, devido à emissão do receptor (depende do local, da estação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

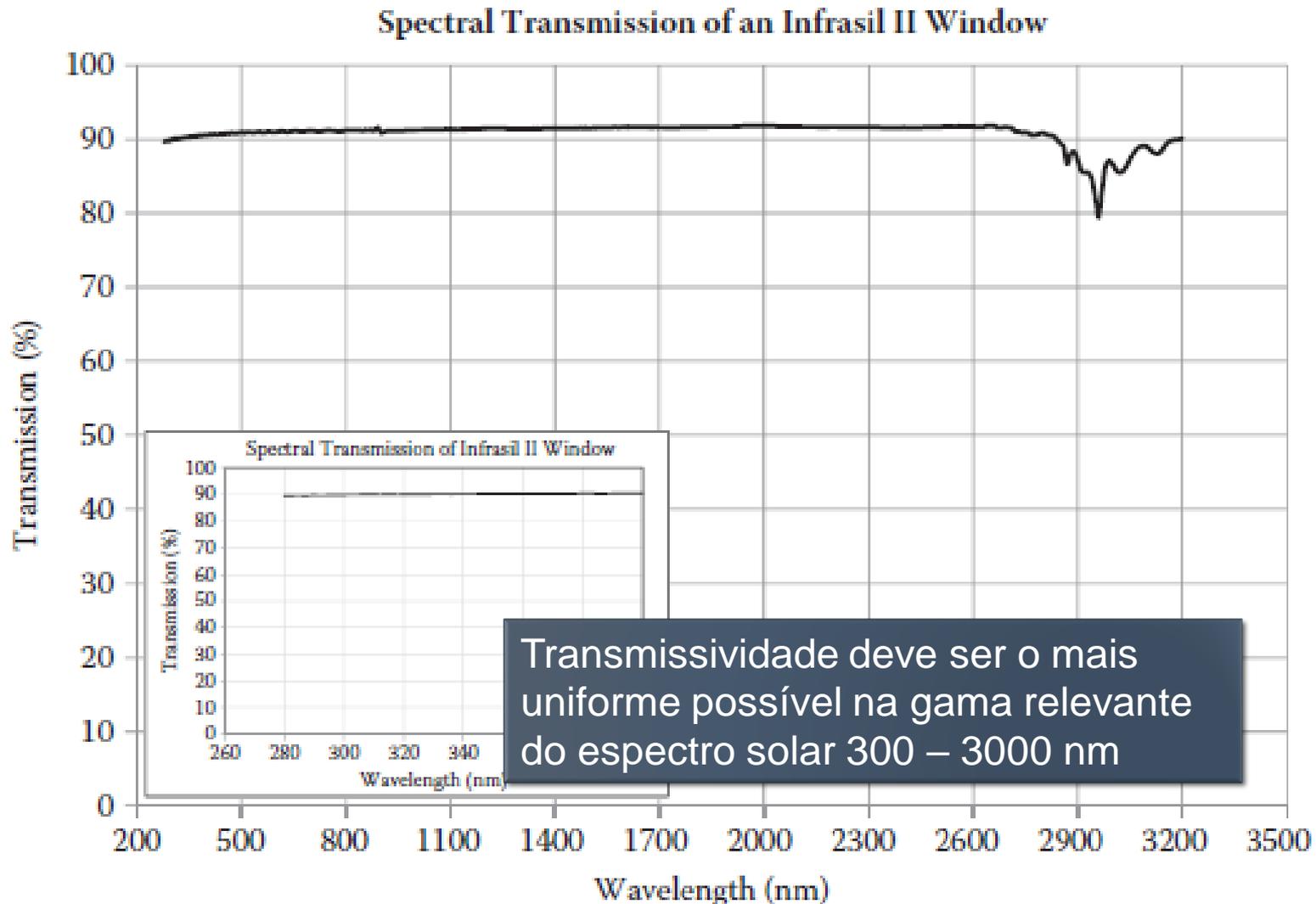


Medida de radiação global

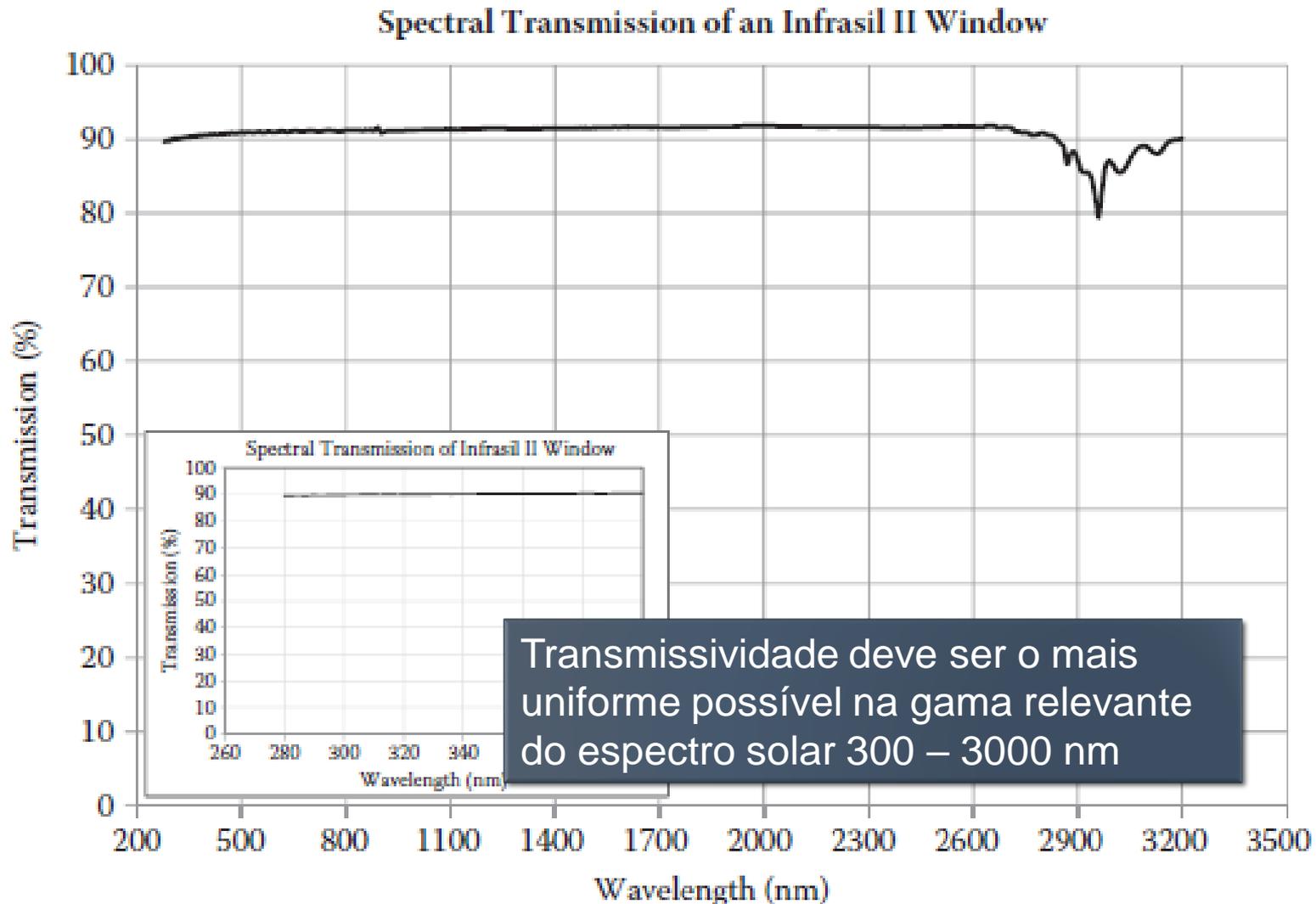
Transmissivity of WG 295 Glass Window



Medida de radiação global



Medida de radiação global



Medida de radiação global

Dependência com o **ângulo de incidência**

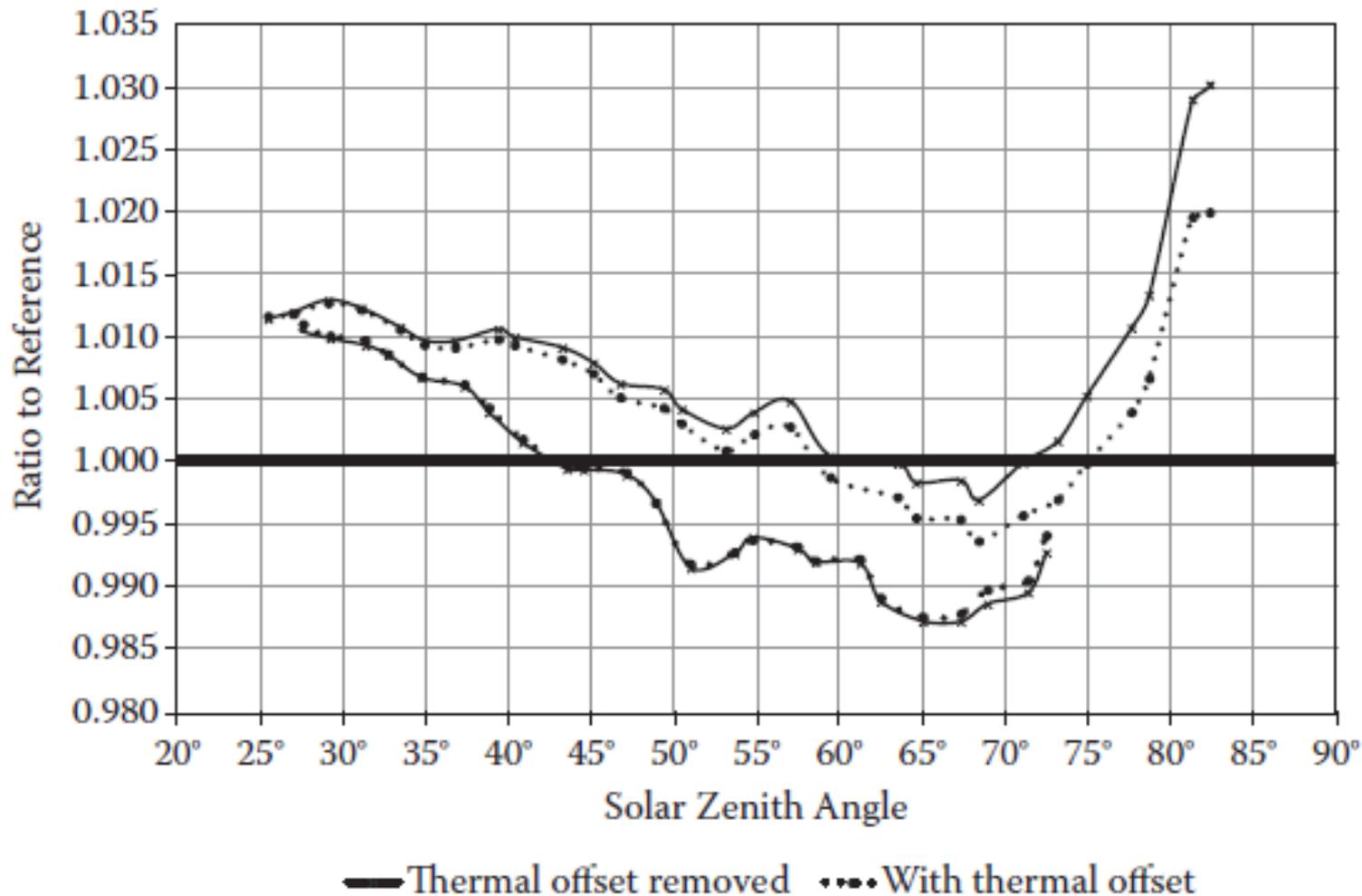
(também chamada de *resposta de coseno*)

- ❑ 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

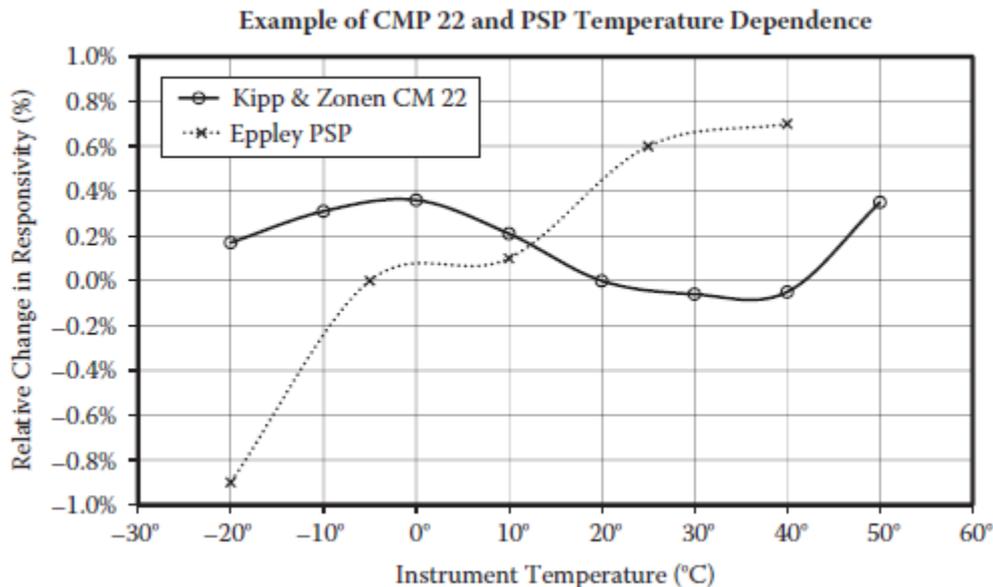


Medida de radiação global

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

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

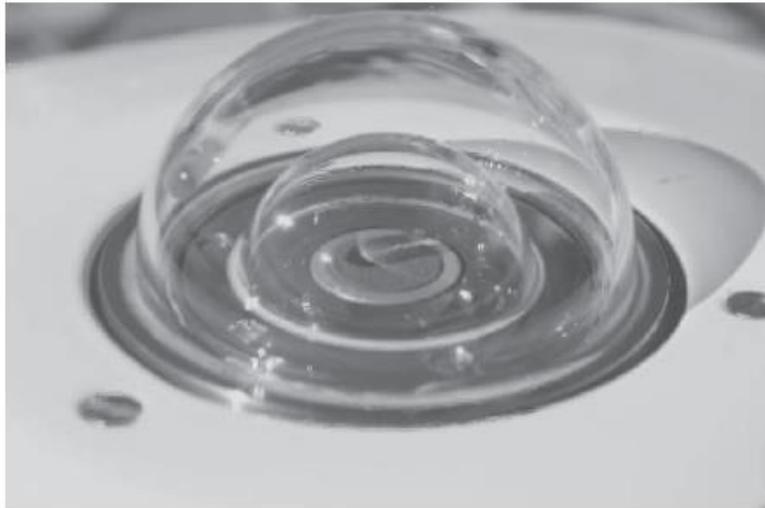
Não linearidade na resposta à temperatura



Medida de radiação global

Efeitos ópticos

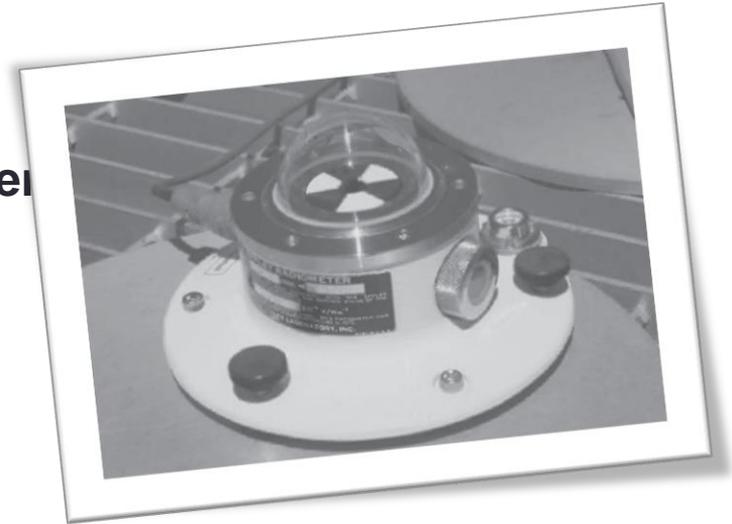
- ❑ Reflexões internas na cúpula podem provocar *bright spots* em determinados momentos do dia
- ❑ Efeito exacerbado por humidade ou sujidade



Medida de radiação global

Piranómetros preto-e-branco

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



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

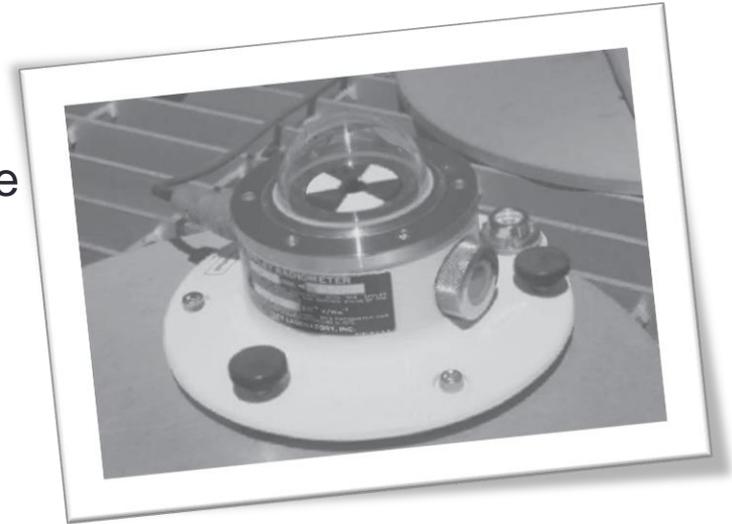
Um bom reflector (tinta branca) é um mau absorvedor e portanto mau emissor.

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 azimute**
- Sensibilidade à temperatura
- Sensibilidade a desvios da horizontalidade



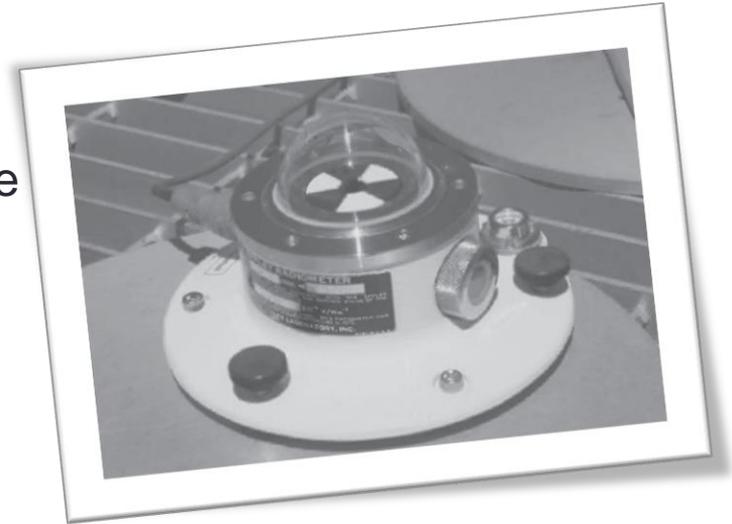
Sensibilidade ao azimute porque o sinal do piranómetro é diferente se radiação incidente está alinhada com a superfície branca ou a negra

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 azimute
- Sensibilidade à temperatura**
- Sensibilidade a desvios da horizontalidade

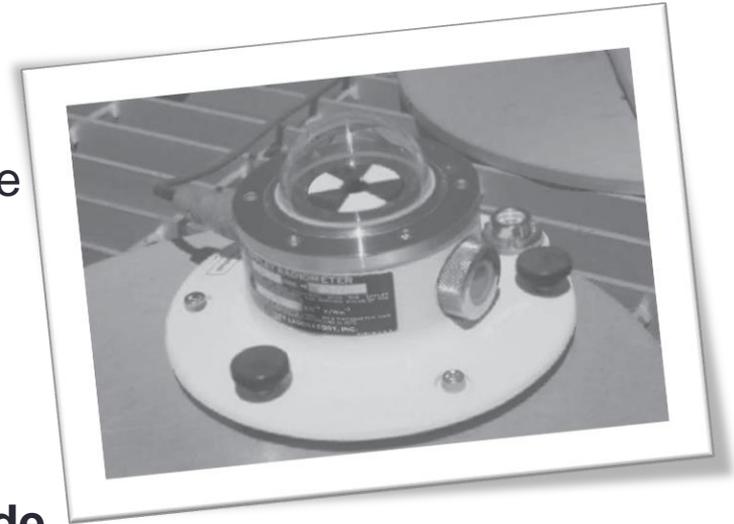


Tipicamente têm apenas uma cúpula e por isso apresentam maiores perdas convectivas

Medida de radiação global

Piranômetros preto-e-branco

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



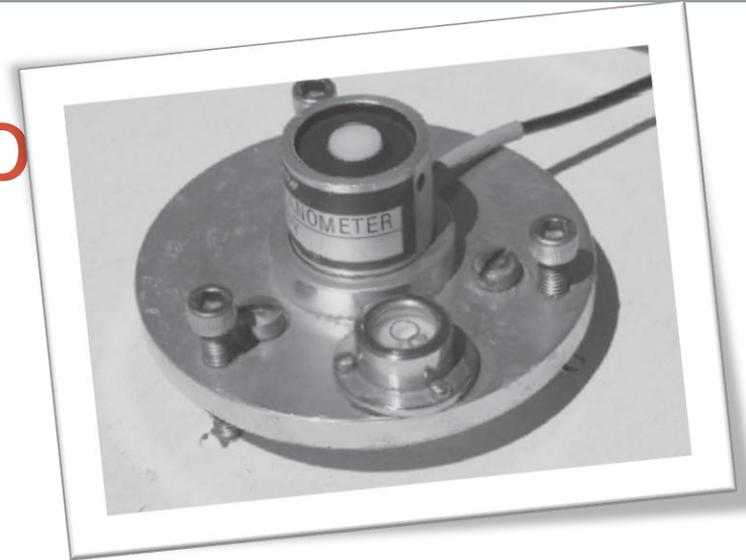
Tipicamente têm áreas maiores do que os piranômetros de disco negro e por isso é mais difícil garantir planaridade – maior dependência com o ângulo de incidência

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

Medida de radiação glo

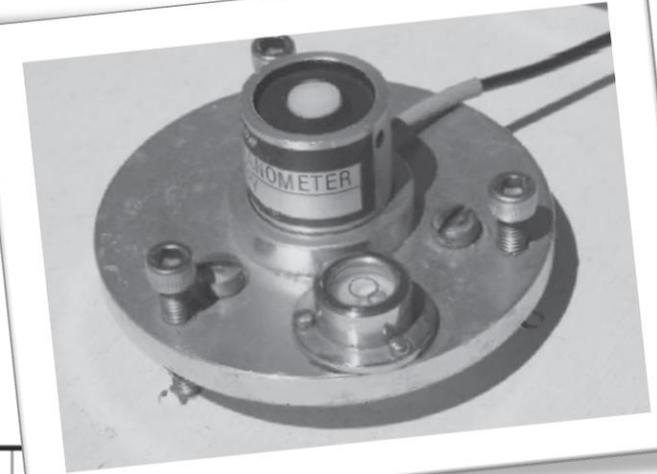
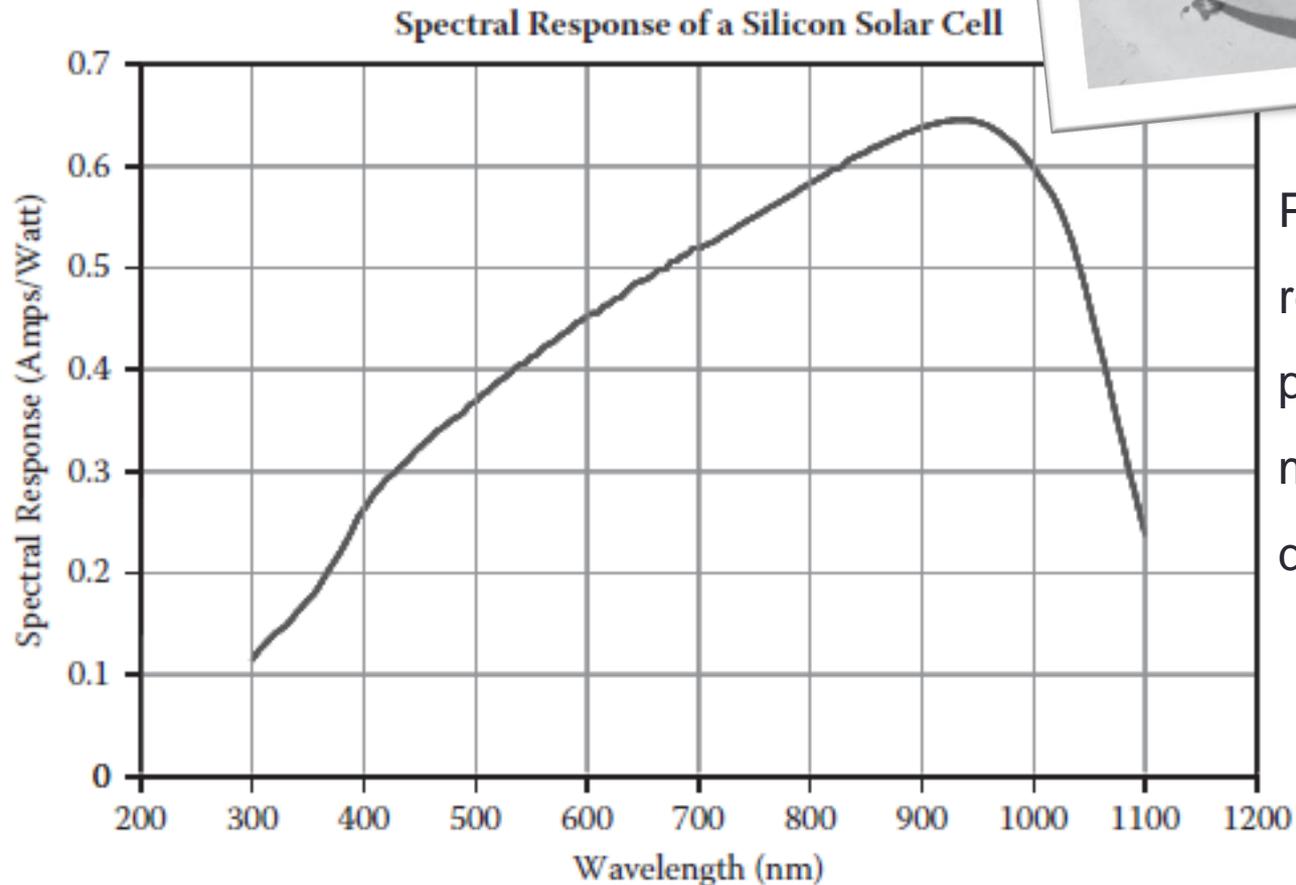
Piranómetros com fotodíodos

- 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

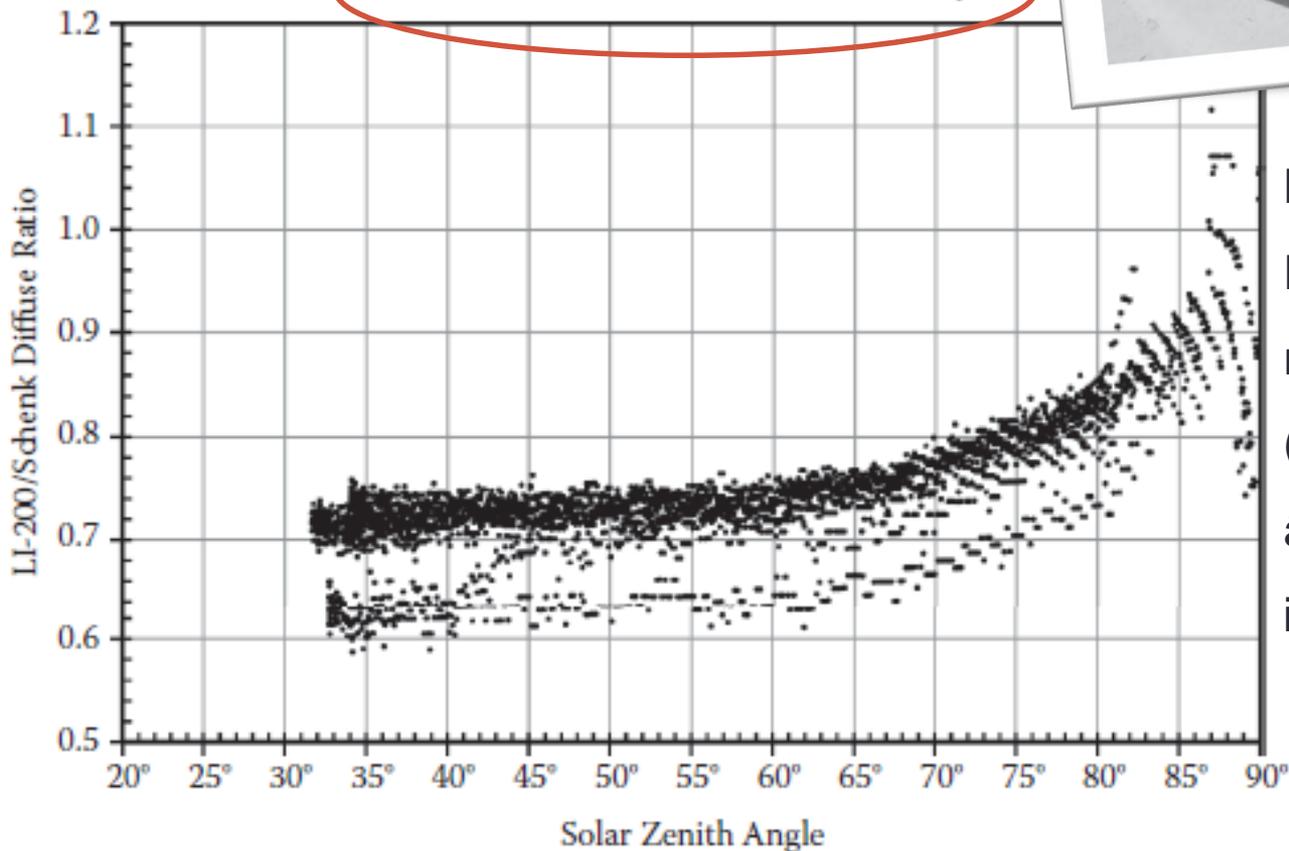


Precisa de ser
recalibrado se for
para usar para
medição de radiação
difusa

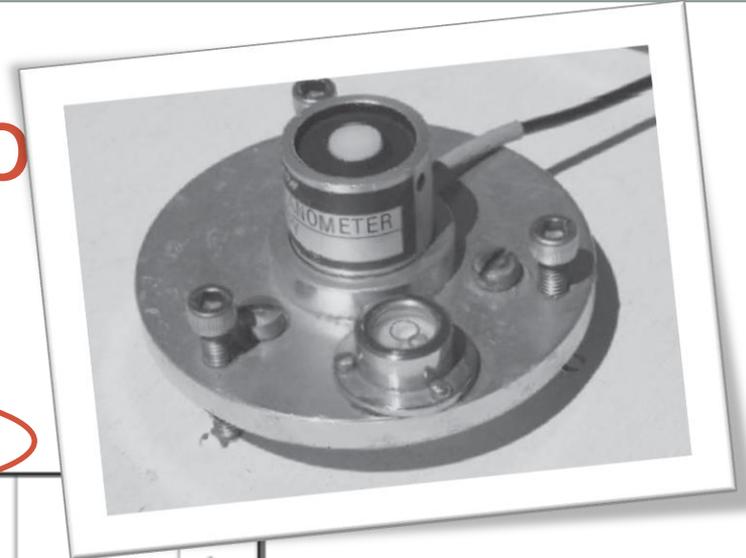
Medida de radiação glo

Comparação com RSR (termopilhas)

LI-200/Schenk Diffuse Ratio — Clear Days



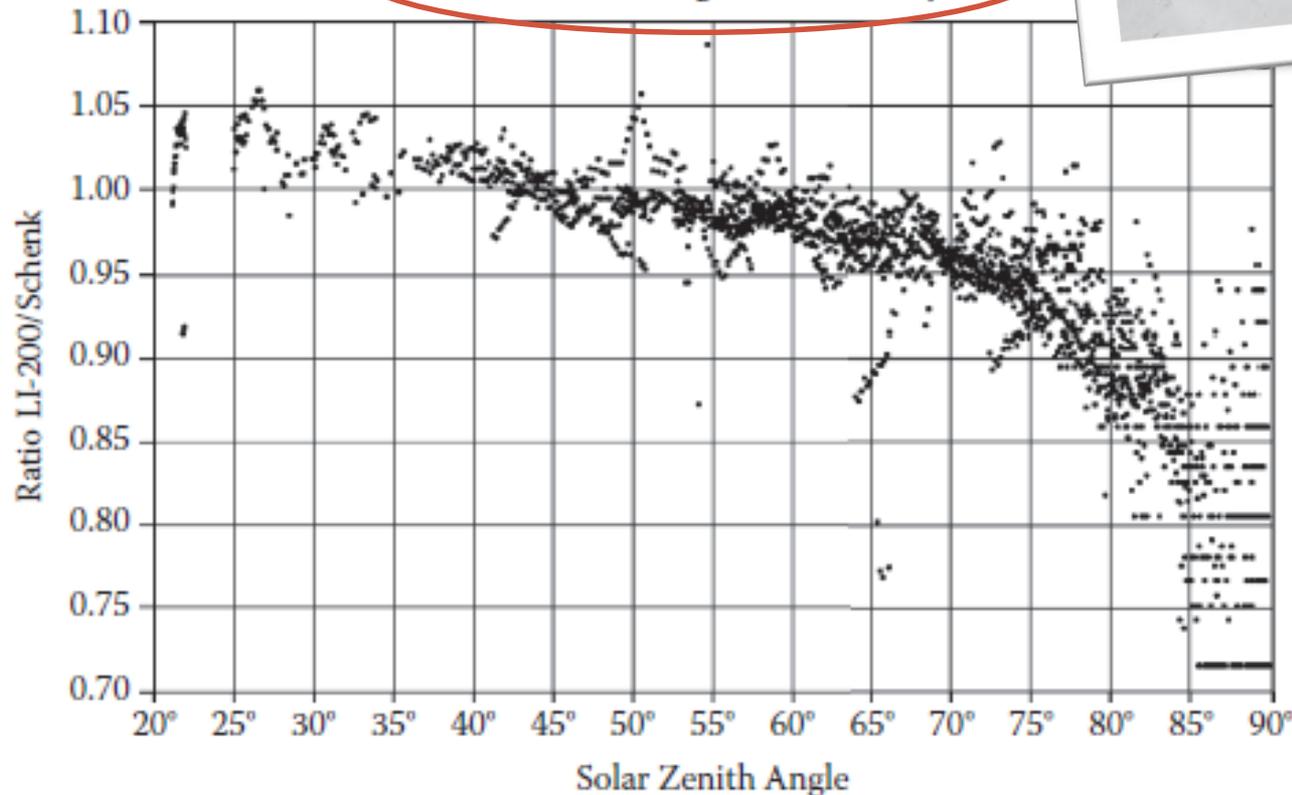
Desvios até 30%
Responde melhor na
região do vermelho
(para maiores
ângulos de
incidência)



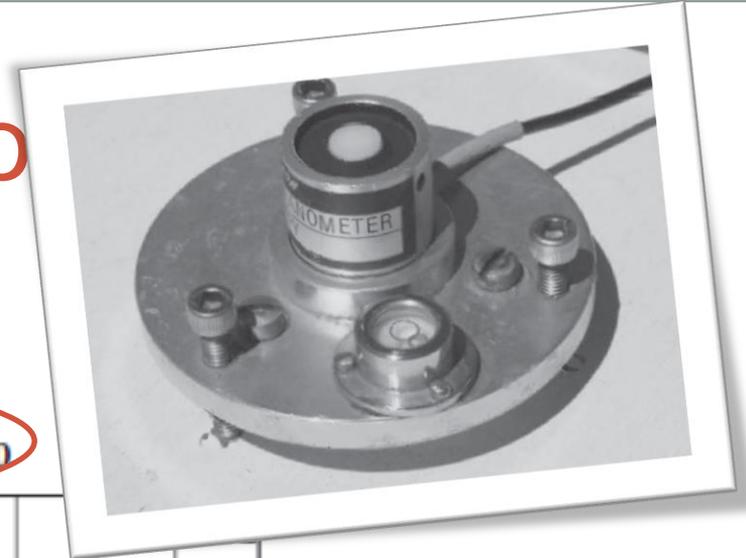
Medida de radiação glo

Comparação com RSR (termopilhas)

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



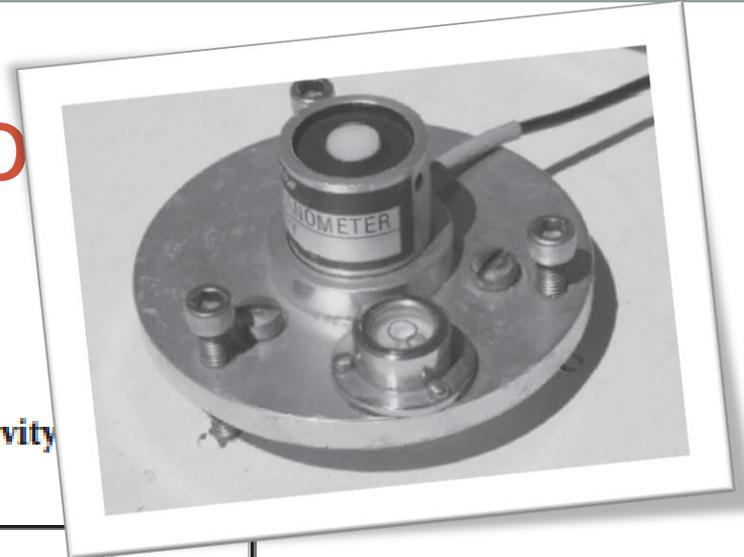
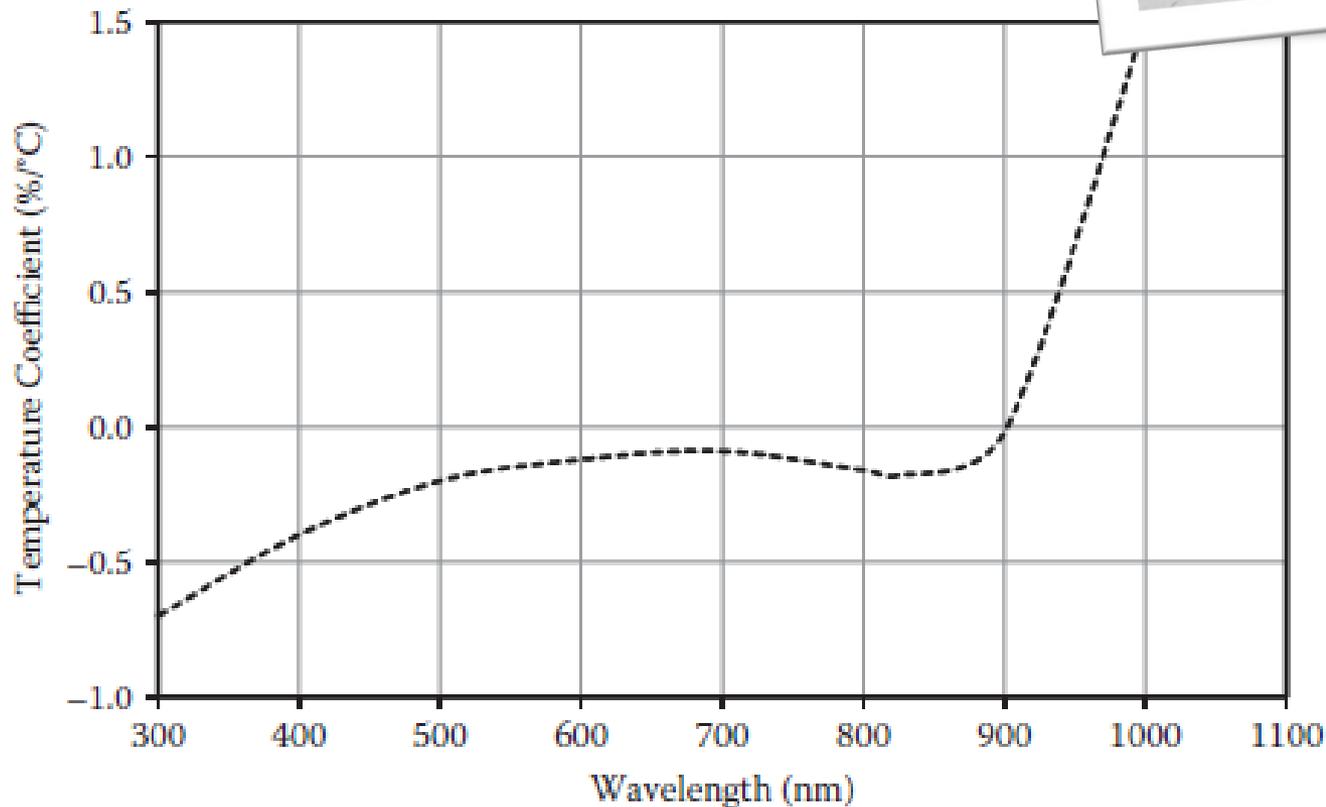
Para dias com nuvens o espectro é semelhante para a difusa (DHI) e a global (GHI) e por isso desvios são menores.



Medida de radiação glo

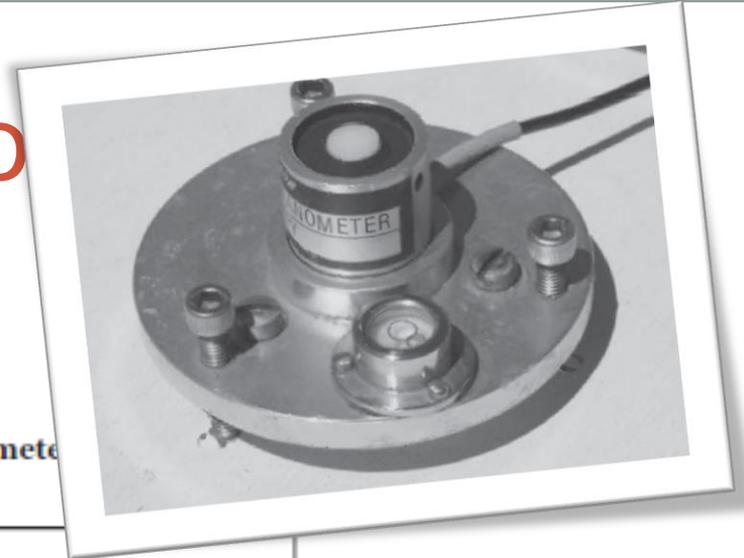
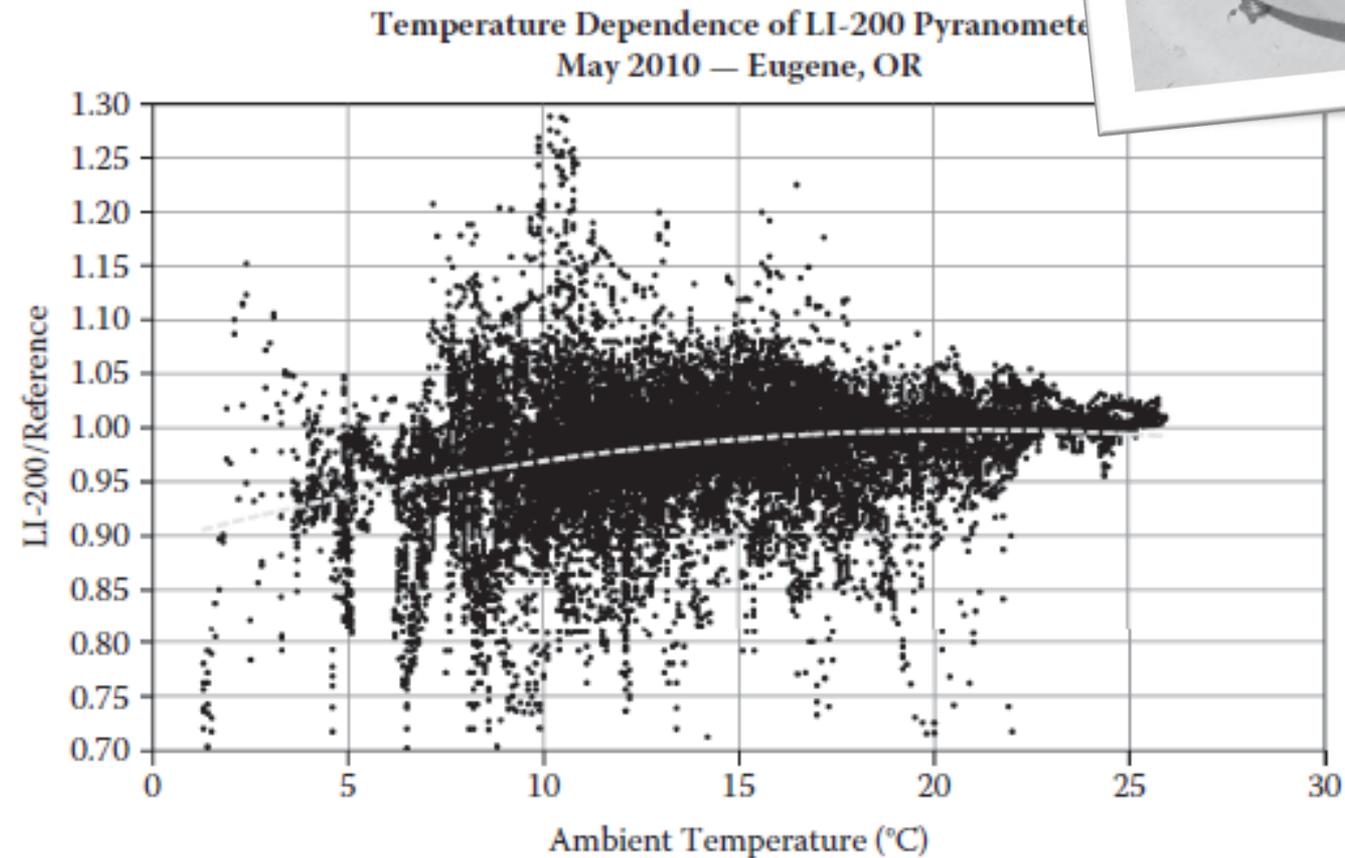
Variação com a temperatura

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

