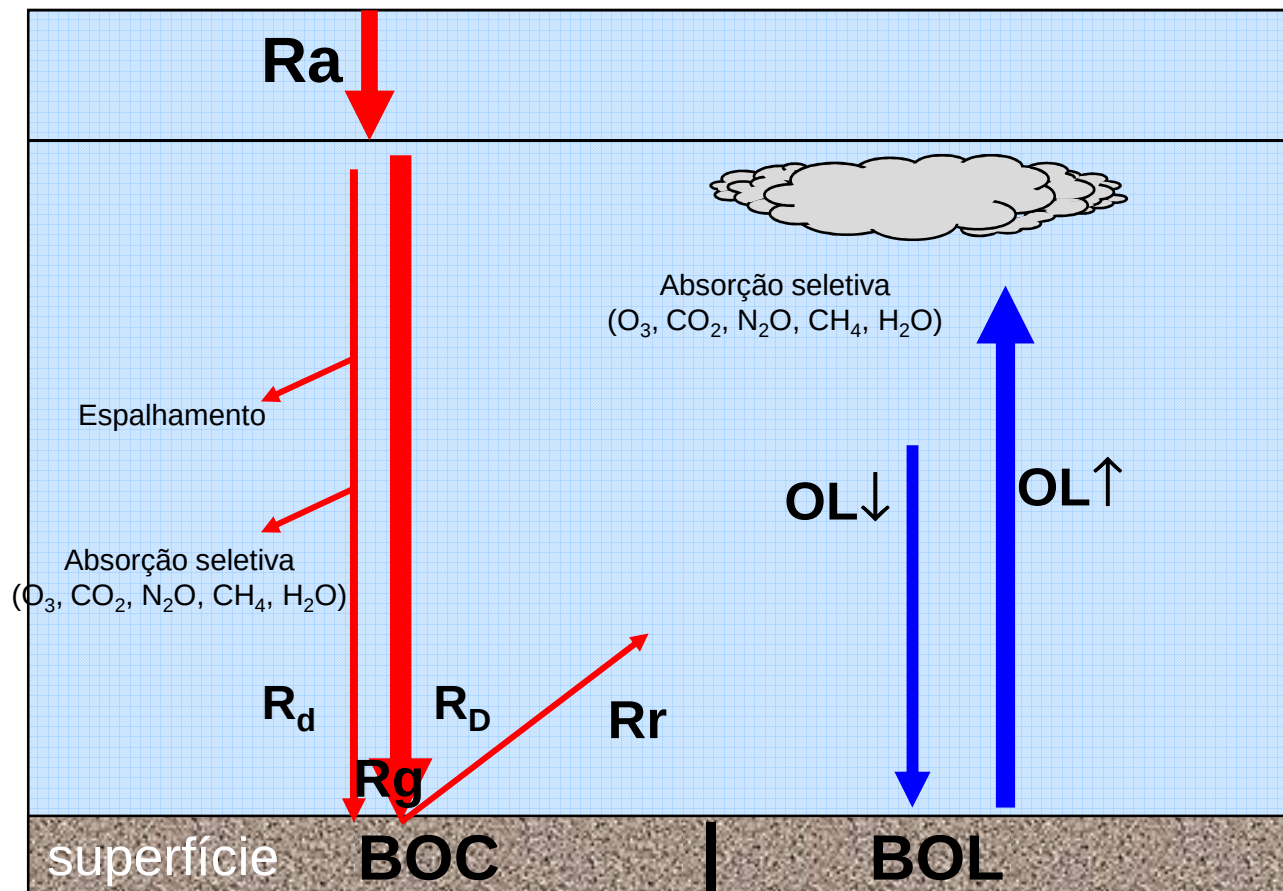


BALANÇO DE RADIAÇÃO

Roteiro de aula

- Balanço de radiação
- Medida e Estimativa dos componentes
- Radiação em superfícies inclinadas
- Balanço de Energia
- Exercício

Balanço de radiação na superfície



R_n – saldo de radiação

$$R_n = BOC + BOL$$

BOC – balanço de ondas curtas

R_a - radiação solar no topo da atmosfera

R_g - radiação solar global R_D - radiação direta

R_d - radiação difusa

R_r - radiação solar refletida

BOL – balanço de ondas longas

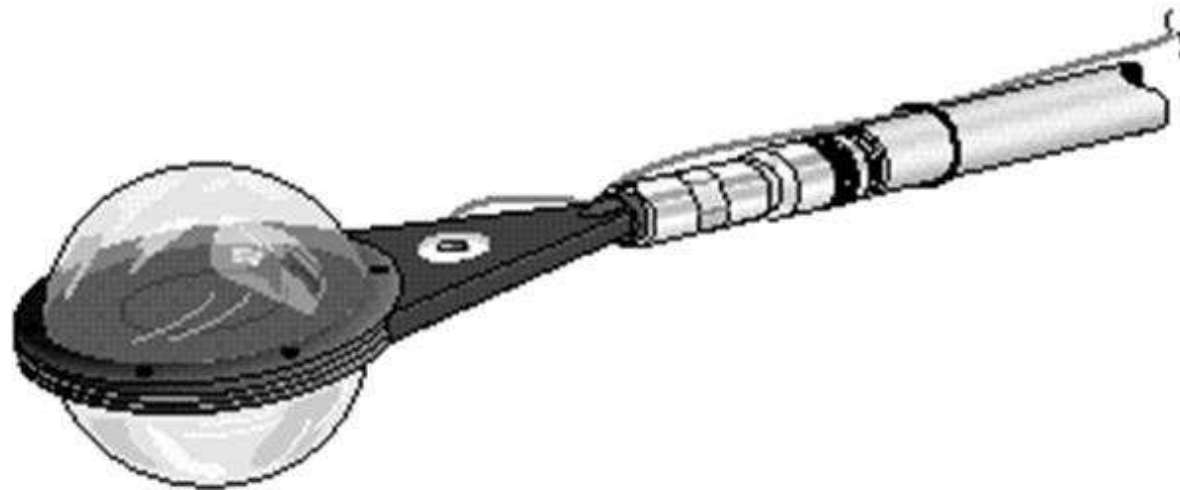
$OL \uparrow$ - radiação terrestre emitida

$OL \downarrow$ - contrarradiação

Determinação do balanço de radiação

- Medição do saldo de radiação: *restrito a trabalhos de pesquisa*
- Estimativa dos componentes do BR: *feita a partir de instrumentos disponíveis em estações meteorológicas convencionais.*

Instrumento de medida do Saldo de Radiação



Saldo Radiômetro
Instrumento de pesquisa

SALDO DE RADIAÇÃO

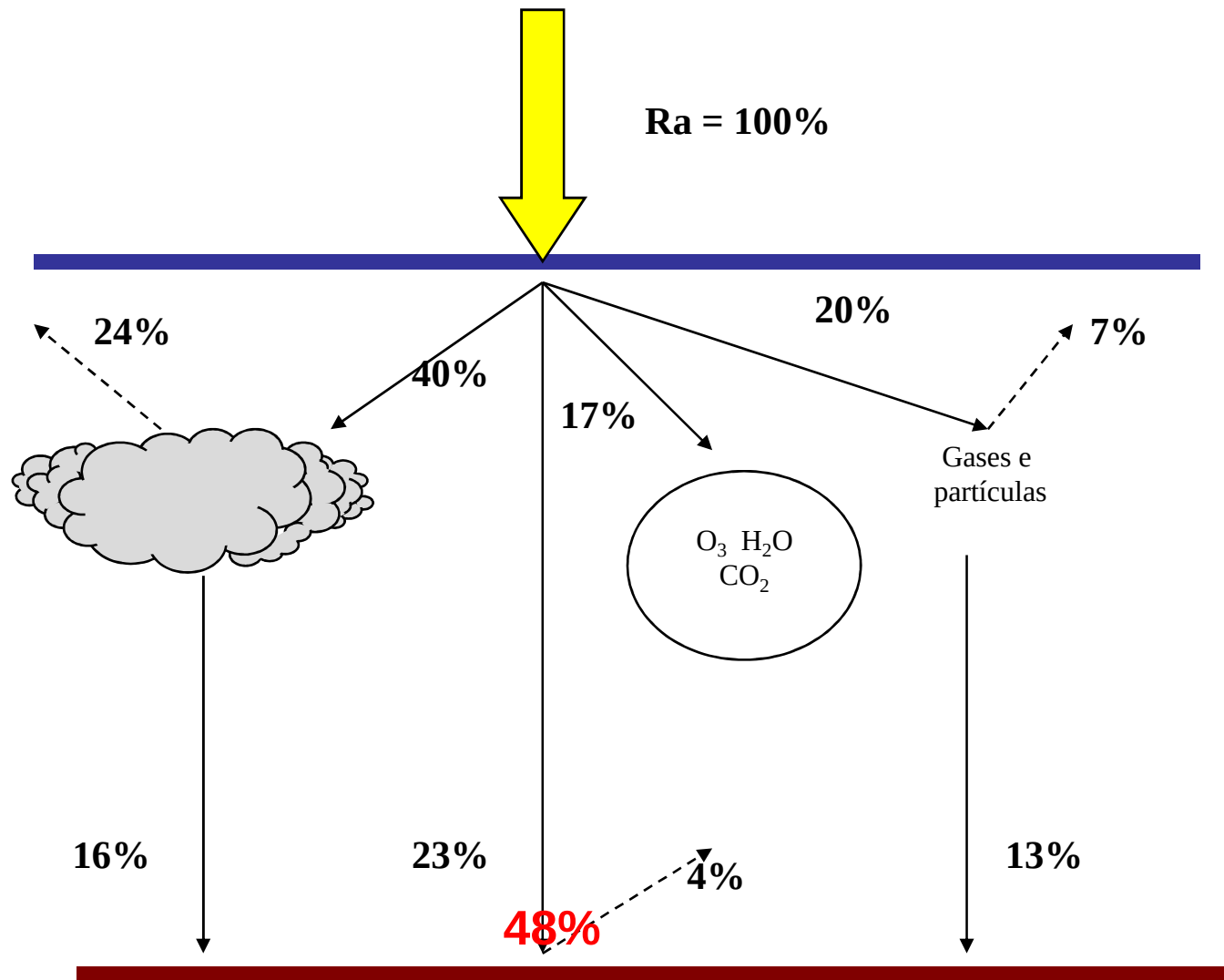
$$R_n = BOC + BOL$$

$$R_n = \text{BOC} + \text{BOL}$$

COMPONENTES DE ONDAS CURTAS

$$\text{BOC} = R_g - R_r$$

Balanço médio de radiação de ondas curtas



Fonte: *Pereira et al. (2002)*

$$R_n = \text{BOC} + \text{BOL}$$

COMPONENTES DE ONDAS CURTAS

$$\text{BOC} = \underline{R_g} - R_r$$

Radiação solar global (R_g)

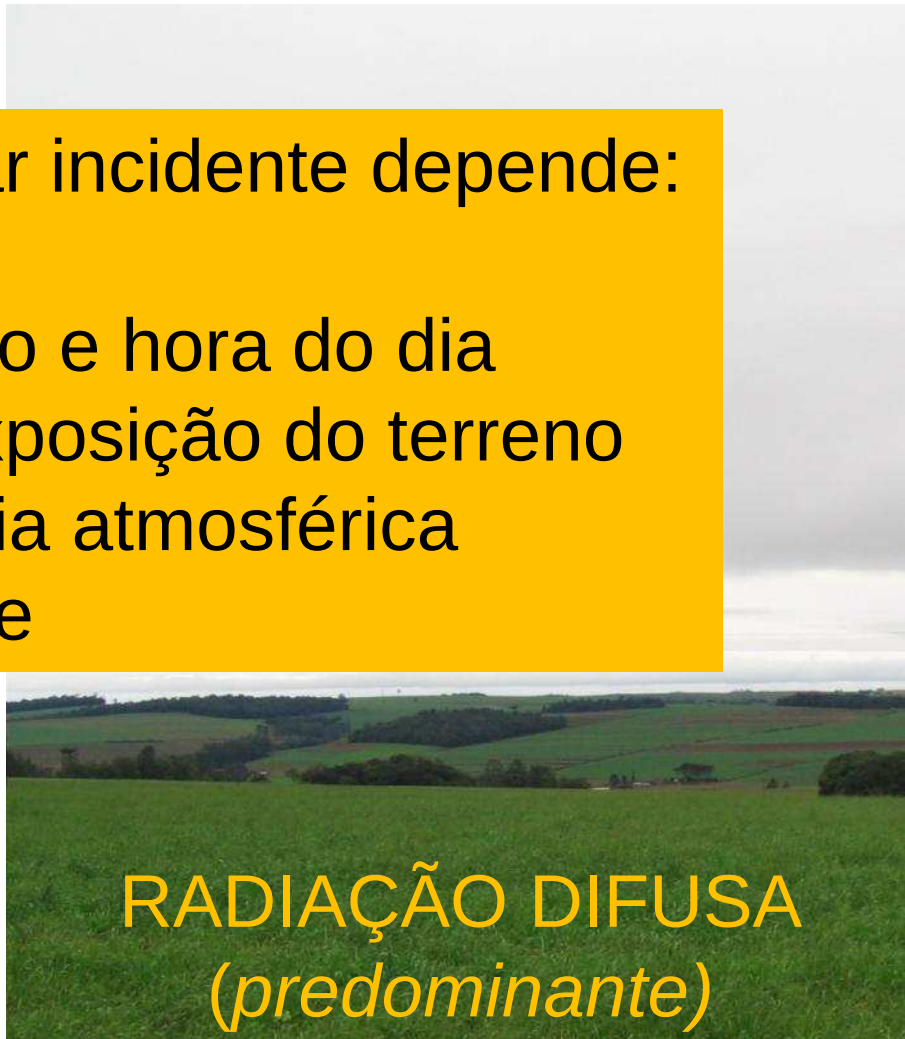
$$R_g = (R_D + R_d)$$

Radiação solar incidente depende:

- Latitude
- Época do ano e hora do dia
- Posição e exposição do terreno
- Transparência atmosférica
- Nebulosidade



RADIAÇÃO DIRETA
(predominante)



RADIAÇÃO DIFUSA
(predominante)

Instrumento de medida de componentes de ONDAS CURTAS

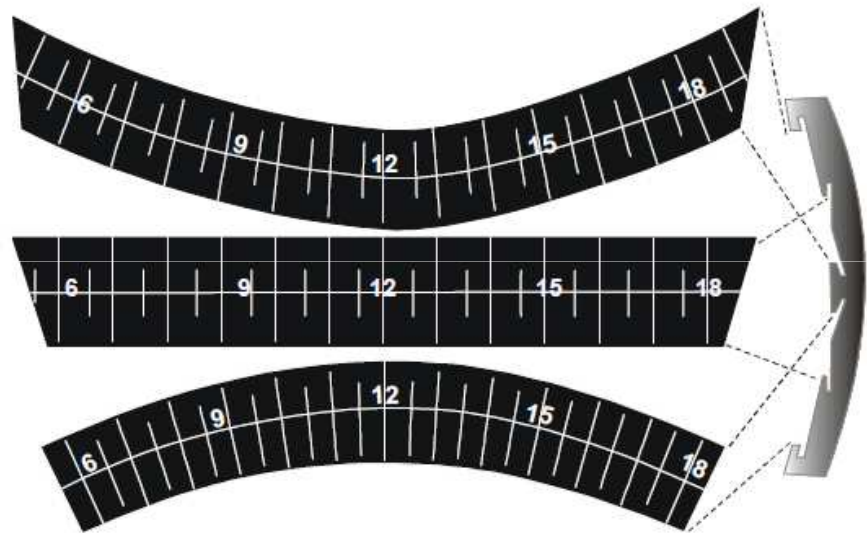
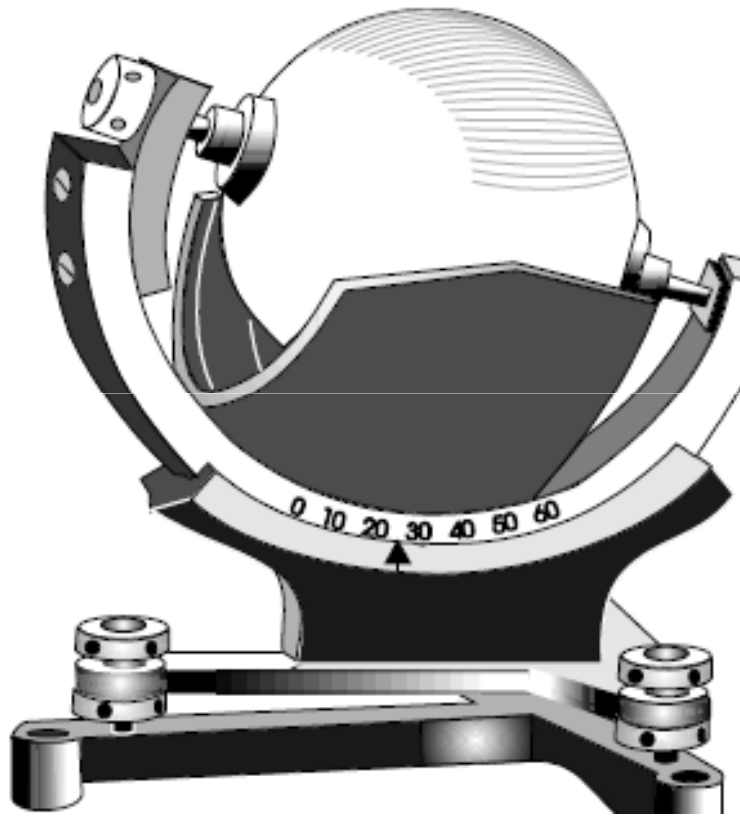


Rg - radiação solar global

Actinógrafo / Piranômetro

Instrumento operacional

Instrumento de medida de componentes de ONDAS CURTAS



n - insolação

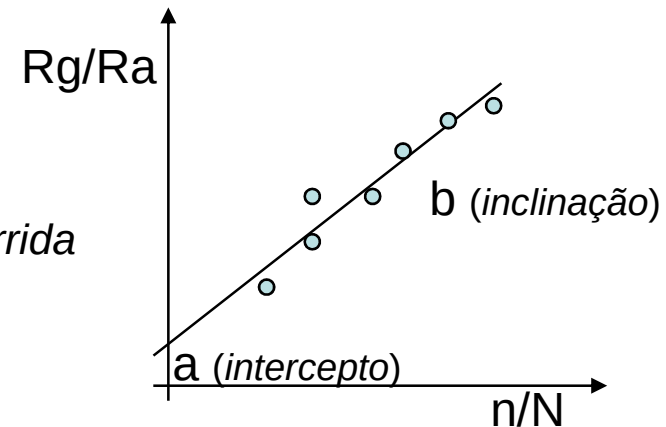
Heliógrafo

Instrumento operacional

Estimativa de R_g a partir de n

$$\frac{R_g}{R_a} = a + b\left(\frac{n}{N}\right) \quad \text{Equação de Angstron}$$

onde: R_g - radiação solar global
 R_a - radiação no topo da atmosfera
 n - insolação ou número de horas de sol ocorrida
 N - número máximo de horas de sol



$$R_g = R_a \left[0,22 + 0,44 \left(\frac{n}{N} \right) \right] \quad \text{Fontana et al., 1996 (21 estações meteorológicas)}$$

Para a estimativa de **R_g** é necessário:

n – medido (heliógrafo)

R_a – calculado

N - calculado

Estimativa de Ra:

$$Ra = \frac{S}{\pi} \left[\frac{\bar{d}}{d} \right]^2 \left[Wh \left(\frac{\pi}{180} \right) \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin Wh \right]$$

Estimativa de N:

$$N = \left(\frac{2Wh}{15} \right)$$

(dados em horas)

Ra e N podem ser encontrados em tabelas como função da:
LATITUDE E
ÉPOCA DO ANO

onde: S – constante solar;

$\left[\frac{\bar{d}}{d} \right]$ - razão entre a distância média e real do Sol a Terra (dia juliano);

φ - latitude;

δ - declinação solar (dia juliano)

Wh - ângulo horário (latitude e declinação)

No caso de estimativa:

$$Ra = S/\pi \left[\bar{d}/d \right]^2 \left[Wh \left(\pi/180 \right) \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin Wh \right]$$

Para resolução da equação é necessário:

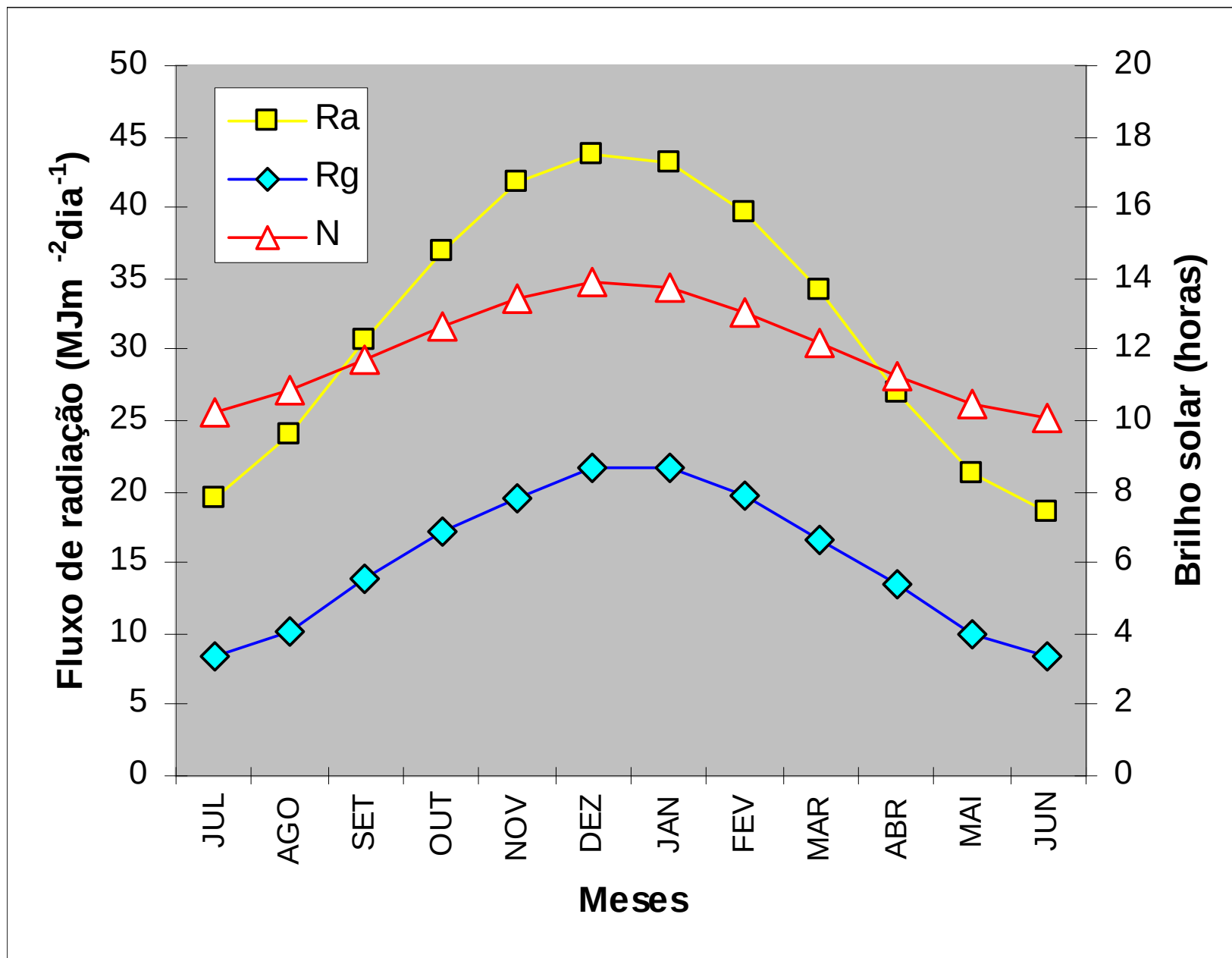
$$S = 118,1 \text{ MJm}^{-2}\text{dia}^{-1} \text{ (} 2,0 \text{ calcm}^{-2} \text{ min}^{-1} \times 1.440 = \text{calcm}^{-2}\text{dia}^{-1} \text{) ou (} 1.367 \text{ Wm}^{-2} \text{)}$$

$$\left[\bar{d}/d \right]^2 = 1 + 0,034 \cos \left(360D/365,25 \right)$$

sendo D o número do dia juliano

$$\cos Wh = -\tan \delta \tan \varphi$$

$$\delta = 0,3931 + 23,2577 \cos(0,9861D - 170,7) + 0,3906 \cos(1,9154D - 174,4)$$



Radiação solar incidente no topo da atmosfera (R_a), radiação solar global (R_g) e número máximo de horas de sol (N) em Porto Alegre, normal climatológica 1961-90 (Fonte de dados: 8ºDISME/INMET).

$$R_n = \text{BOC} + \text{BOL}$$

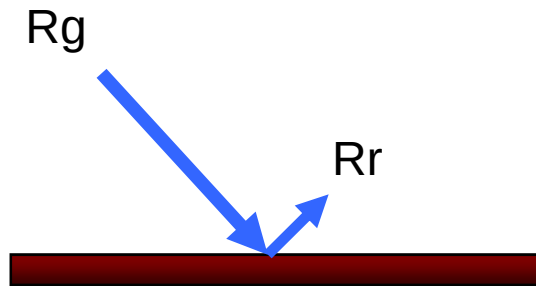
COMPONENTES DE ONDAS CURTAS

$$\text{BOC} = R_g - \underline{R_r}$$

Instrumento de medida de componentes de ONDAS CURTAS

$$a = \left(\frac{R_r}{R_g} \right)$$

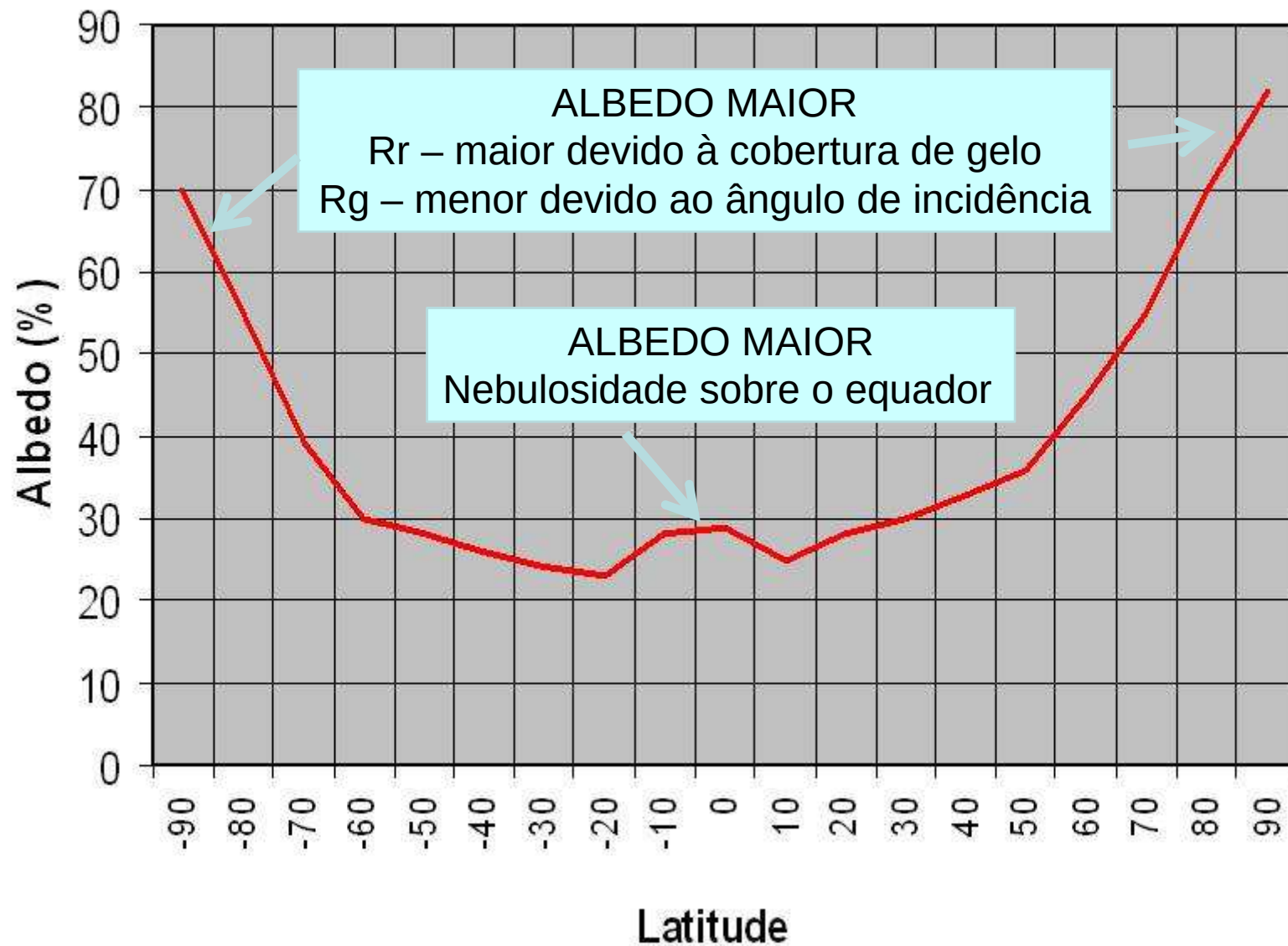
onde a é o albedo da superfície



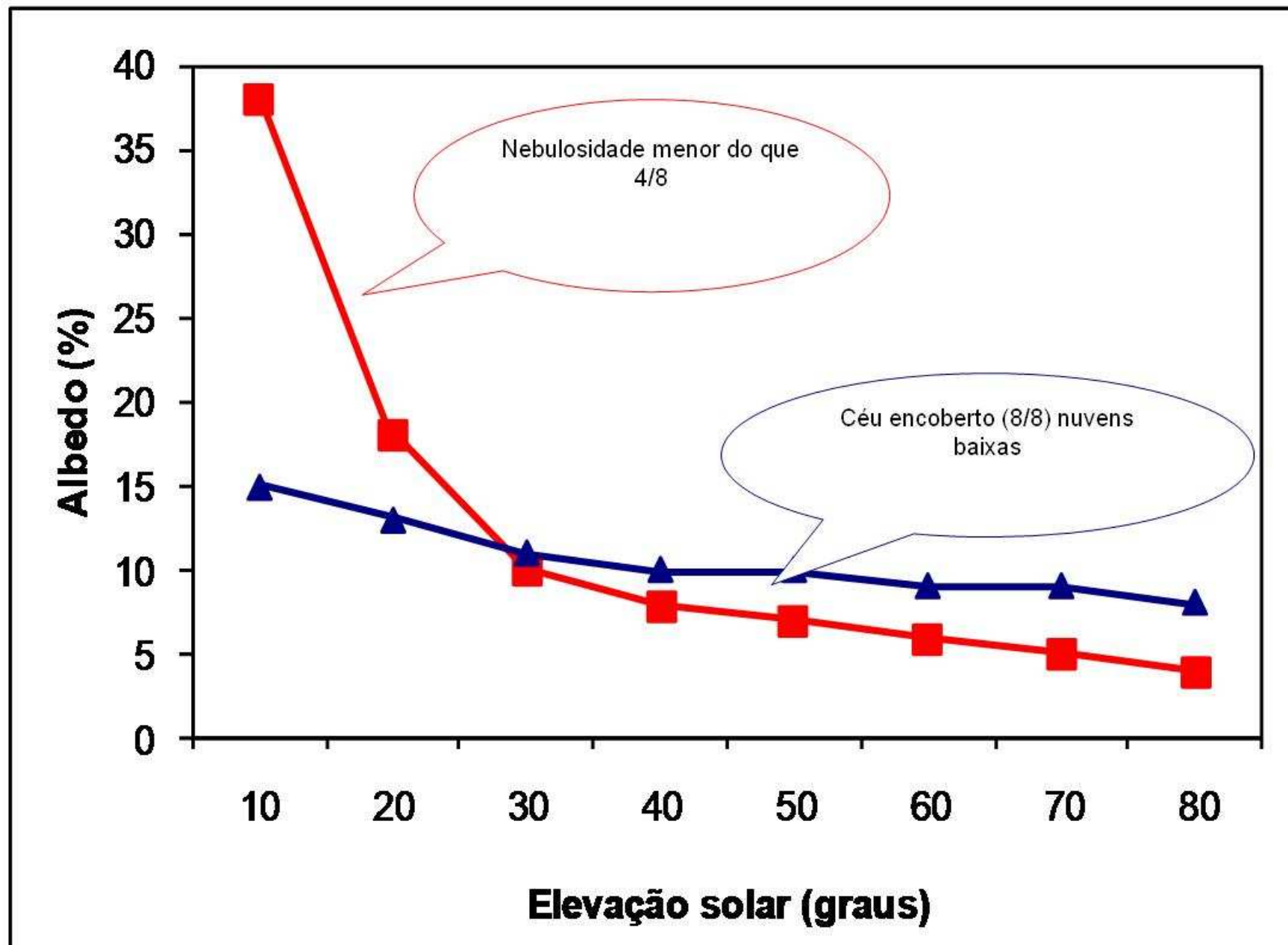
a - albedo

Albedômetro

Instrumento de pesquisa



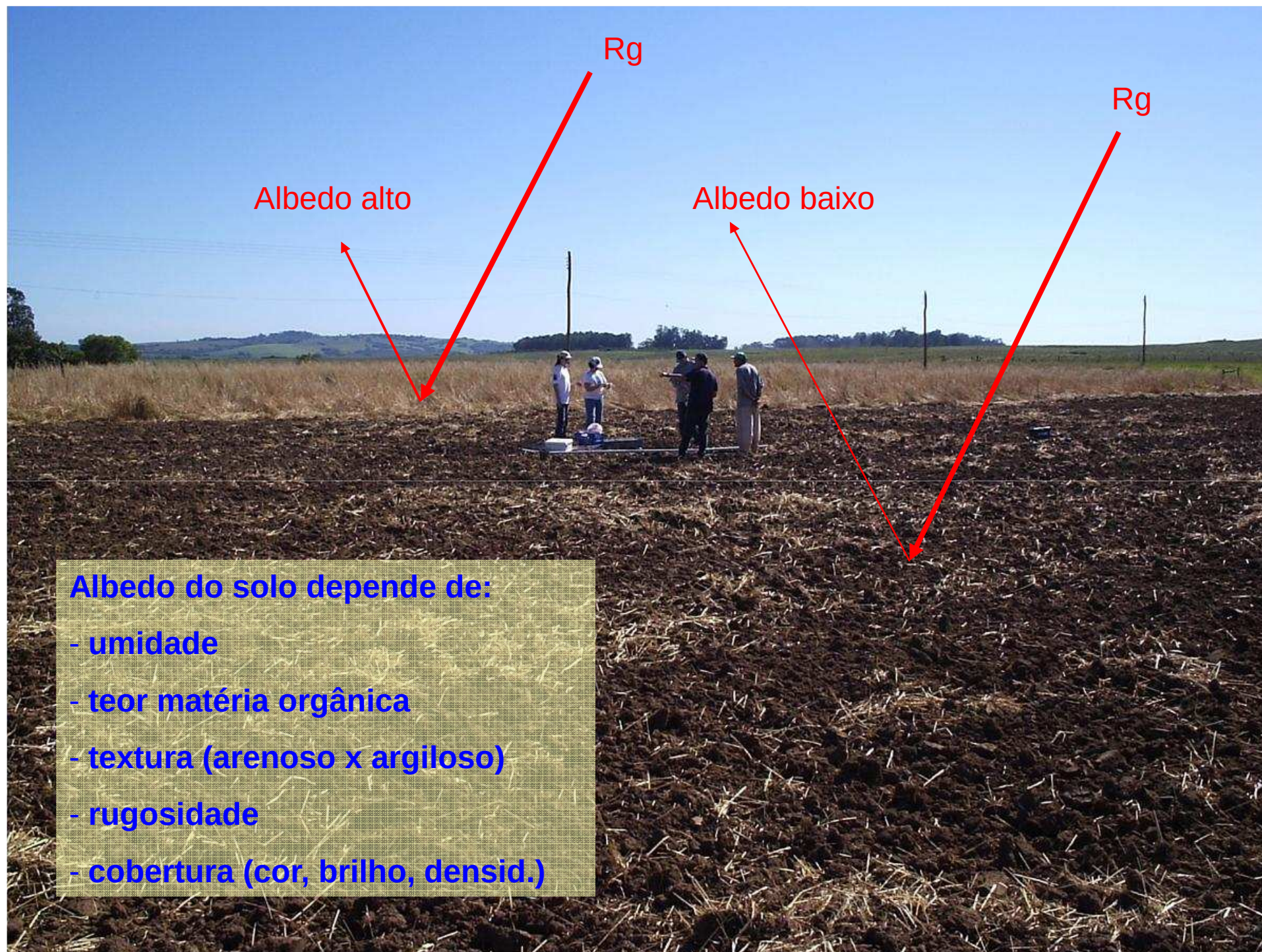
Albedo Planetário em função da latitude. Dados médios do período de junho de 1974 e fevereiro de 1978, conforme medições através de satélite (*Winston et al., 1979*).



Relação entre albedo e ângulo de elevação solar em duas condições de nebulosidade
(Fonte: *Deacow, 1969*).

Valores típicos de albedo de superfícies naturais

Superfície	Albedo (%)
Água	5
Nuvens cumuliformes	70 – 90
Neve	75 – 95
Pele humana branca	43 – 45
Pele humana negra	16 – 22
Deserto	25 – 30
Floresta decídua	15 – 20
Floresta tropical úmida	13
Solo descoberto – argiloso úmido	10 – 20
Solo descoberto – argiloso seco	20 – 35
Solo descoberto – arenoso seco	35 - 45

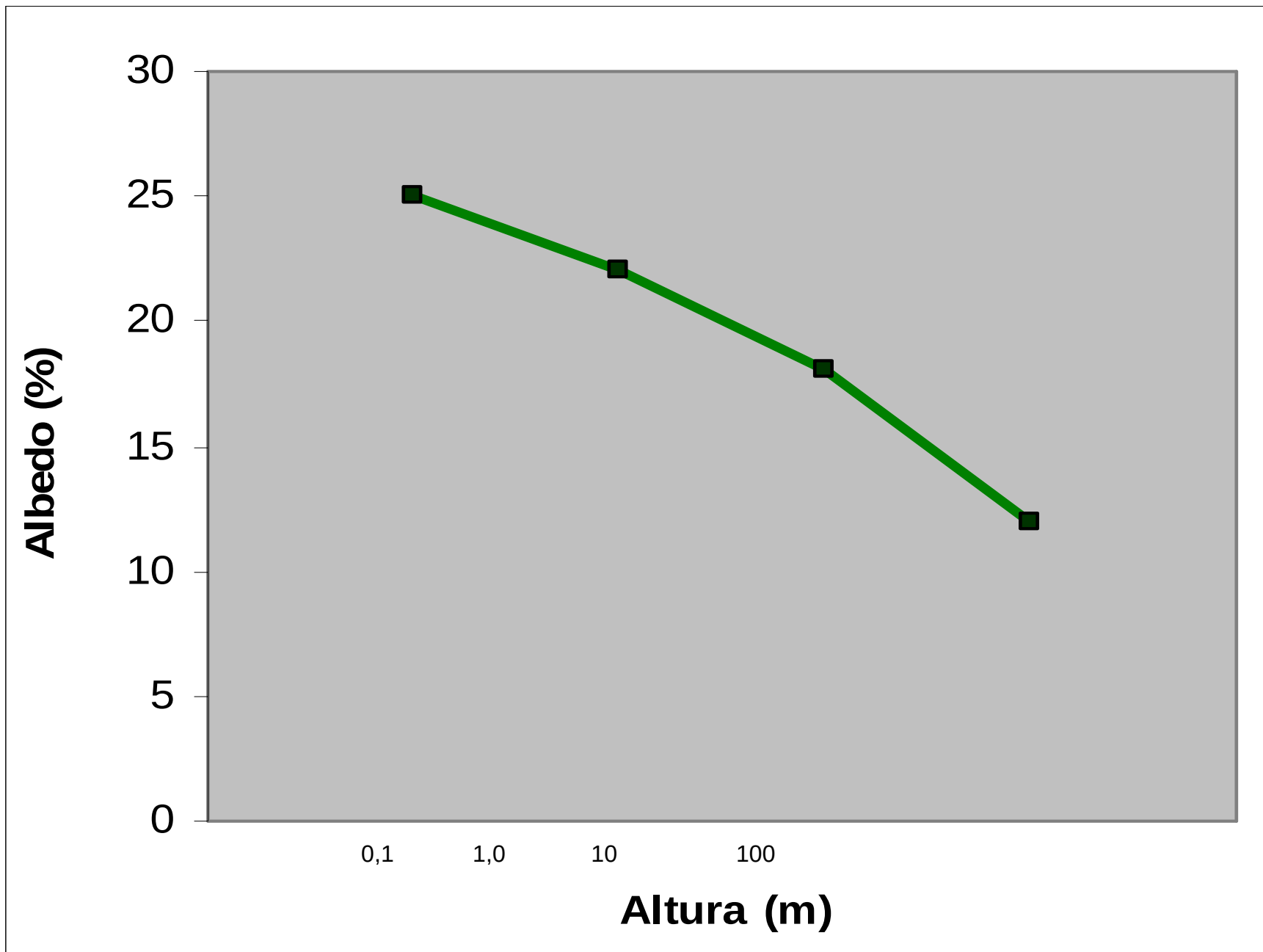


Albedo do solo depende de:

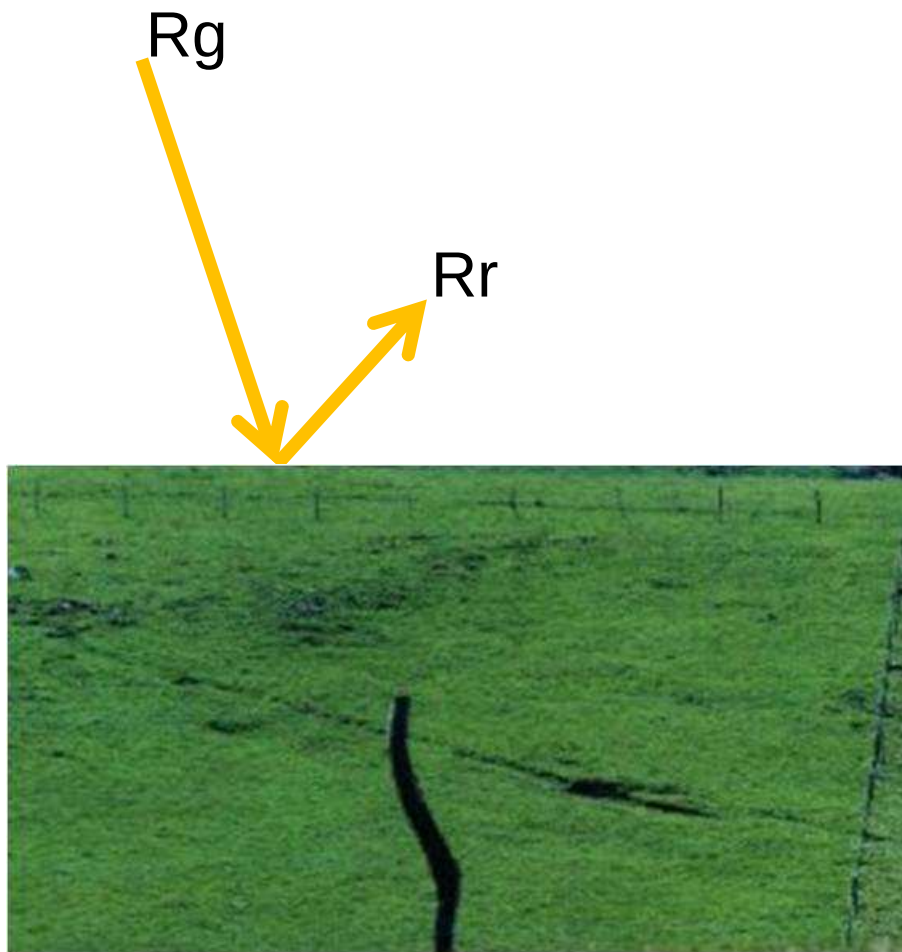
- umidade
- teor matéria orgânica
- textura (arenoso x argiloso)
- rugosidade
- cobertura (cor, brilho, densid.)

Valores típicos de albedo de plantas cultivadas

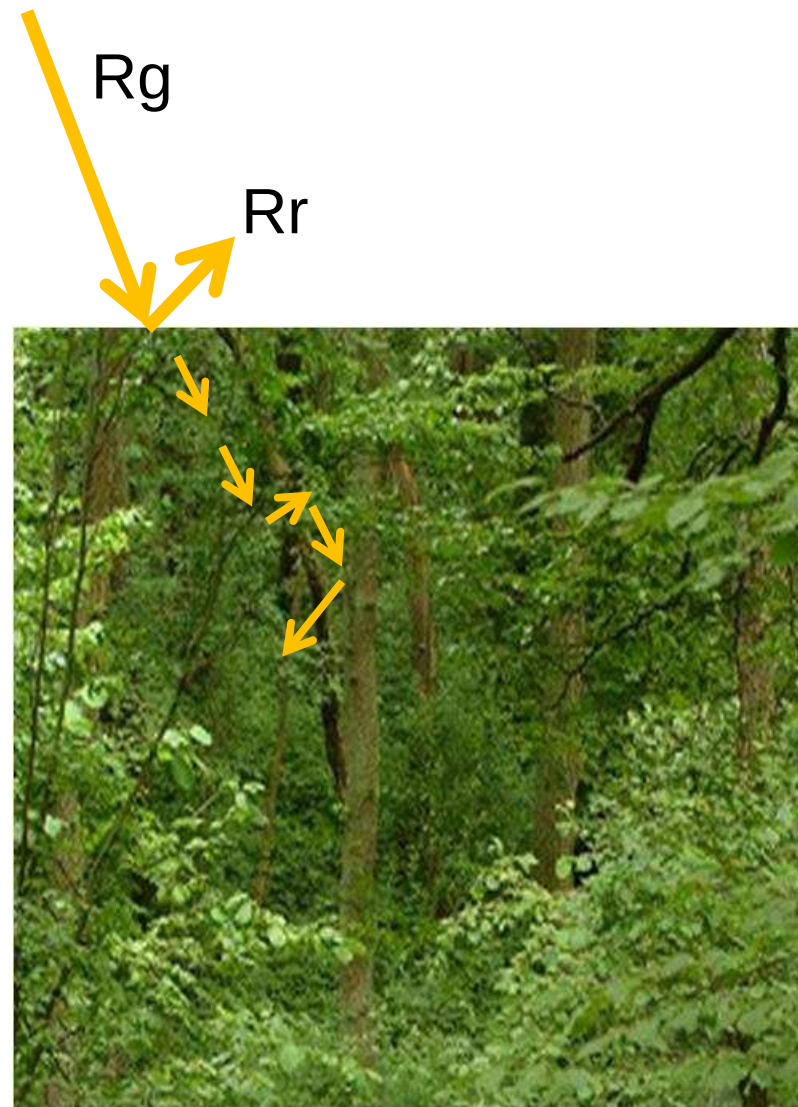
Planta (desenvolvimento)	Latitude	Albedo (%) (média diária)
Soja	21°	24
Milho	43°	22
Milho	7°	18
Trigo	52°	26
Trigo	43°	22
Cevada	52°	23
Sorgo	7°	20
Feijão	52°	24
Pastagem	32°	25
Fumo	43°	24
Fumo	7°	19
Cana-de-açúcar	7°	15
Algodão	7°	21
Tomate	43°	23
Beterraba açucareira	52°	26
Soja	30° S	26
Milho	30° S	24
Milheto	30° S	25
Alfafa	30° S	24
Girassol	30° S	24



Relação entre albedo médio e altura da vegetação (Fonte: *Stanhill, 1970*)



Albedo maior → menor absorção



Albedo menor → maior absorção
“aprisionamento da radiação”

Impactos no albedo em consequência do avanço da fronteira agrícola, na Amazônia¹



Figura 1 – Localização do ecossistema Florestal (A) e Soja (B)

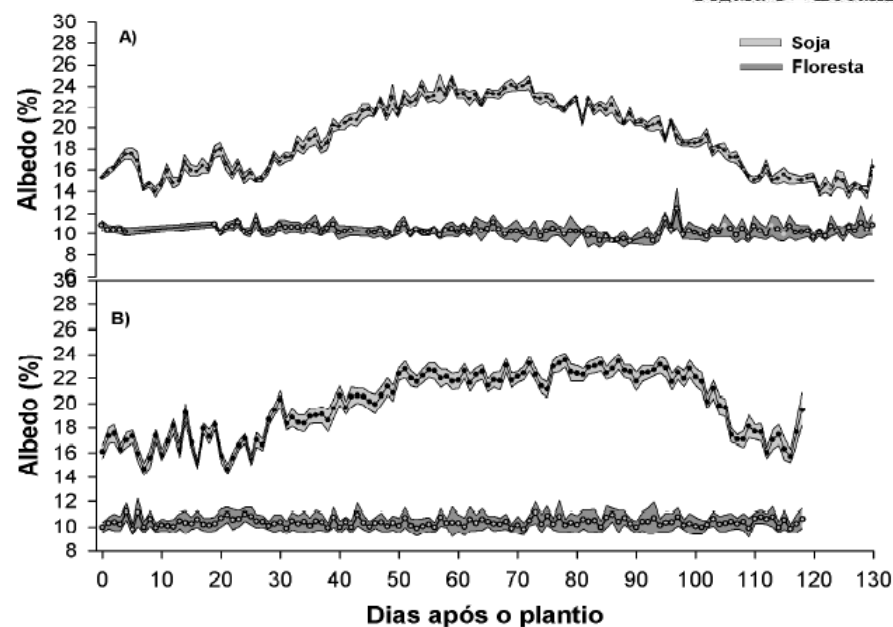


Figura 2 – Albedo médio diário da floresta e da soja, ao longo do ciclo, em 2006 (A) e 2007 (B) em Paragominas (PA). A área sombreada representa o intervalo de confiança a 95% de probabilidade.

Conclusões

O monocultivo da soja, na Amazônia, ocasiona uma mudança brusca na interação entre a radiação e o ecossistema, tendo como consequência uma redução na energia disponível para o ambiente, devido ao aumento na reflexão da superfície. A grande questão em relação ao uso da terra para fins agrícolas é que existe uma mudança constante no albedo ao longo do ciclo da cultura, tendo como consequência um impacto muito maior nos processos de troca entre superfície e atmosfera durante um único período do ano, ao contrário do que acontece na pastagem, em que o seu albedo não apresenta um ciclo sazonal regular.



Maior absorção – menor albedo

Menor absorção – maior albedo

Albedo da vegetação depende:

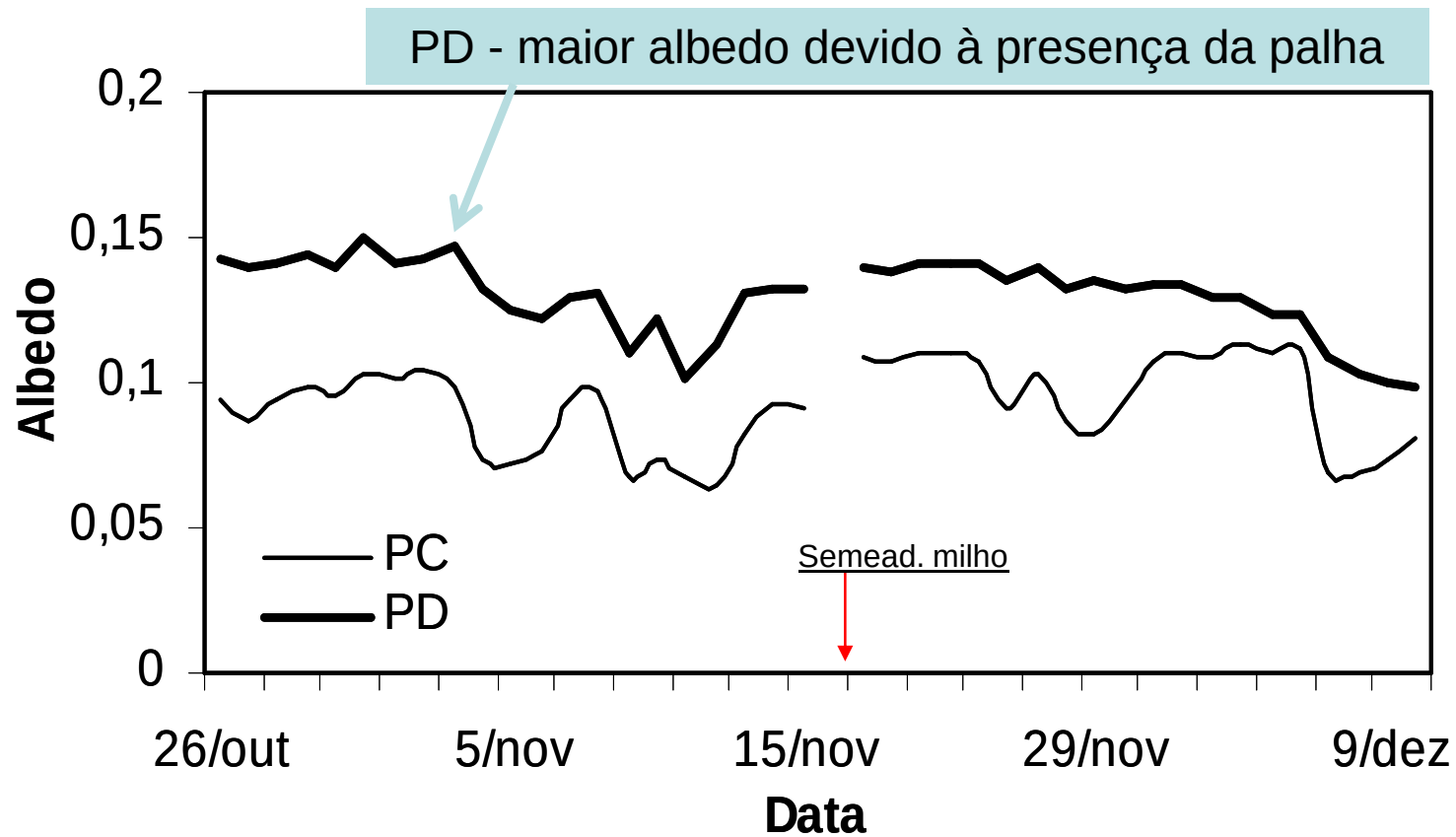
- Tipo de dossel
- Altura do dossel
- Condição hídrica das plantas
- Tipo de Manejo

Albedo médio = 25%



Milho irrigado x não-irrigado





Média diária de albedo da superfície em sistemas de plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), antes e depois da semeadura do milho. EEA/FRGS, Eldorado do Sul, RS, 2004 (Heckler et al, 2005).

$$R_n = \text{BOC} + \text{BOL}$$

COMPONENTES DE ONDAS LONGAS

$$\text{BOL} = \text{OL} \downarrow - \text{OL} \uparrow$$

Instrumento de medida de componentes de ONDAS LONGAS



Pirgeômetro

Estimativa dos componentes de ONDAS LONGAS

Pela lei de Stefan-Boltzman:

$$OL \uparrow = \varepsilon_s \sigma T_s^4 \quad \text{energia emitida pelo solo}$$

$$OL \downarrow = \varepsilon_a \sigma T_a^4 \quad \text{energia emitida pela atmosfera}$$

onde ε é a emissividade; σ é a constante de Stefan-Boltzman ($4,9 \times 10^{-9} \text{MJm}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1} \cdot \text{K}^{-4}$);
 T é a temperatura (K); s e a são referentes ao solo e ar, respectivamente.

Assumindo que : temperatura do solo $\approx$ temperatura do ar (período de 24h)
emissividade do solo $\approx 1,0$ (CN)

$$BOL = -\sigma T^4 \left(0,325 - 0,139 \sqrt{e} \right) \left(0,1 + 0,9 \frac{n}{N} \right)$$

onde e é a pressão real de vapor (kPa)

SALDO DE RADIAÇÃO

$$R_n = BOC + BOL$$

ESTIMATIVA DO SALDO DE RADIAÇÃO (Equação de Brunt-Penman):

$$Rn = Rg(1 - a) - \sigma T^4 \left(0,325 - 0,139\sqrt{e} \right) \left(0,1 + 0,9 \frac{n}{N} \right)$$

$Rn, Rg \rightarrow \text{MJm}^{-2}.\text{dia}^{-1};$

$e \rightarrow \text{kPa};$

$T \rightarrow \text{K};$

$\sigma = 4,9 \times 10^{-9} \text{MJm}^{-2}.\text{dia}^{-1}.\text{K}^{-4}$

$$Rn = Rg(1 - a) - 1440\sigma T^4 \left(0,56 - 0,092\sqrt{e} \right) \left(0,1 + 0,9 \frac{n}{N} \right)$$

$Rn, Rg \rightarrow \text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1};$

$e \rightarrow \text{mmHg};$

$T \rightarrow \text{K};$

$\sigma = 8,17 \times 10^{-11} \text{cal.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}.\text{K}^{-4}$

Observação: $UR = (e/es)$ e $es = f(T)$

ESTIMATIVA DO SALDO DE RADIAÇÃO (R_n) A PARTIR DA RADIAÇÃO GLOBAL (R_g)

TIPO DE SUPERFÍCIE	EQUAÇÃO	UNIDADE	FONTE
Solo gramado	$R_n = -18,81 + 0,69 R_g$	cal.cm ⁻² .min ⁻¹	Bergamaschi et al. (2003)
Solo nu (prep. convencional)	$R_n = -14,25 + 0,67 R_g$	W.m ⁻²	Comiran et al. (2005)
Solo sob palha (plantio direto)	$R_n = 6,05 + 0,51 R_g$	W.m ⁻²	Comiran et al. (2005)
Soja (elevada área foliar)	$R_n = -0,68 + 0,67 R_g$	MJ.m ⁻² . dia ⁻¹	Fontana et al. (1988)
Milho (elevada área foliar)	$R_n = 0,11 + 0,67 R_g$	MJ.m ⁻² . dia ⁻¹	Cunha et al. (1989)
Feijão (elevada área foliar)	$R_n = 9,51 + 0,62 R_g$	cal.cm ⁻² .min ⁻¹	Bergamaschi et al. (1988)

Saldo de radiação vs latitude e época do ano

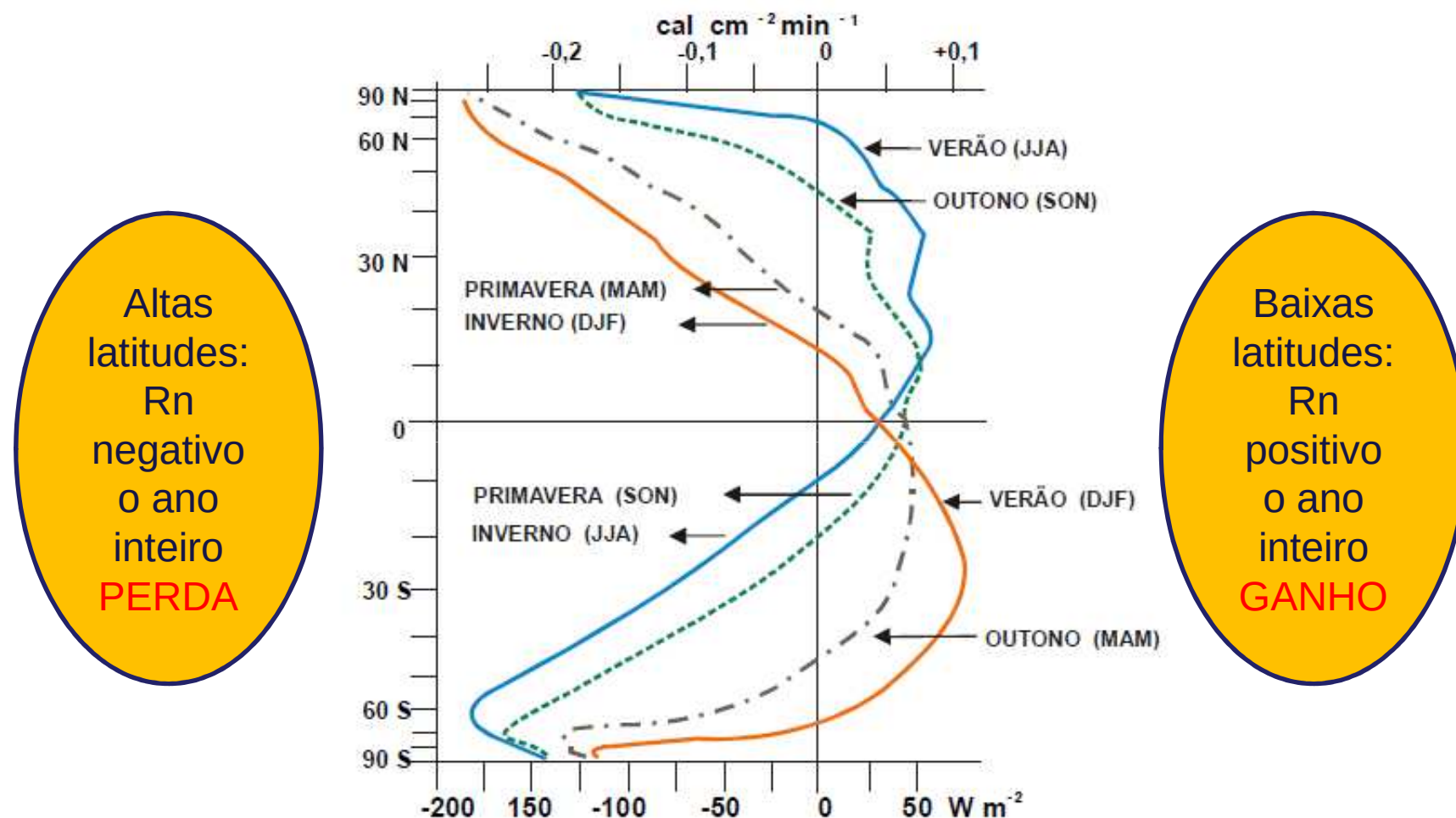
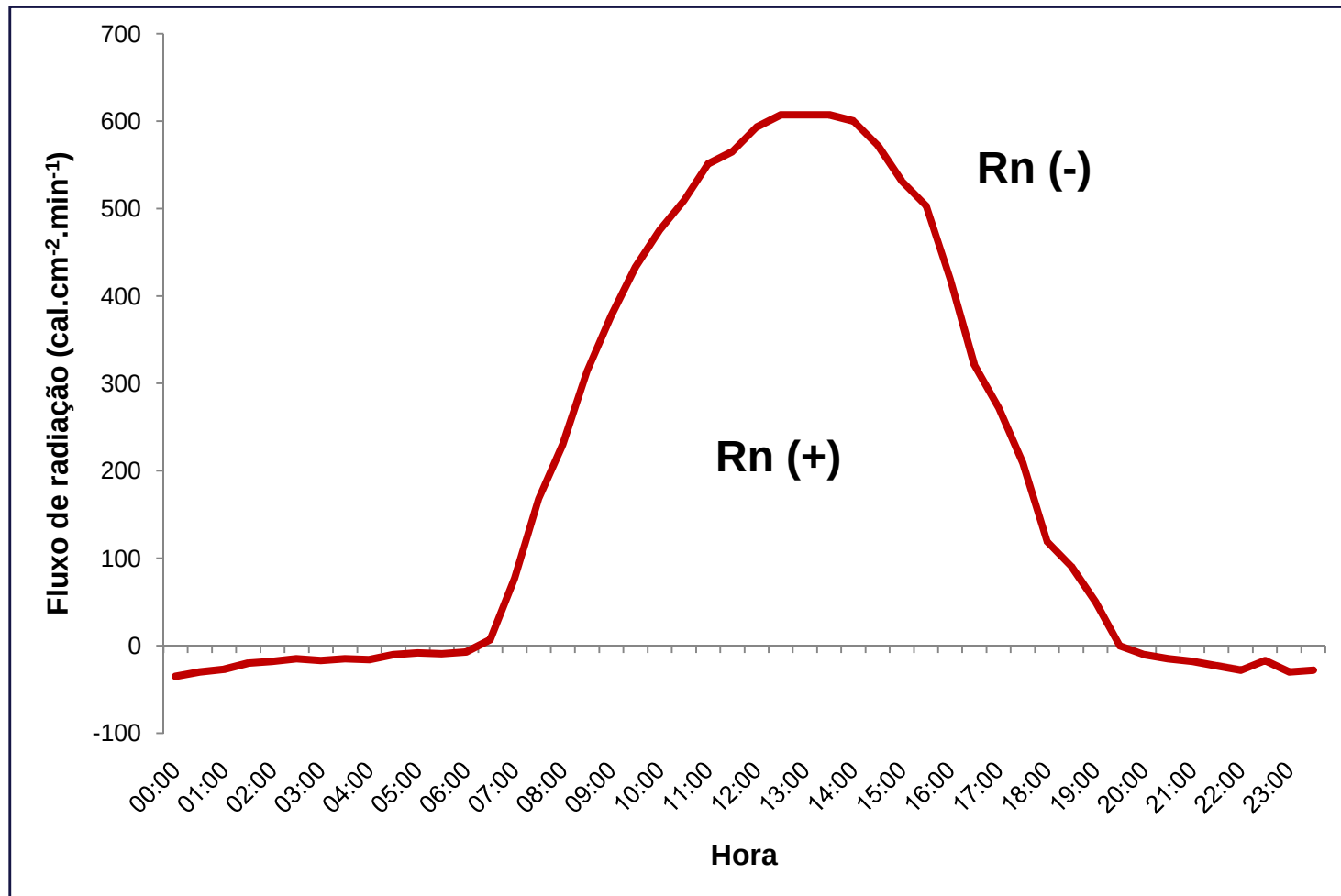


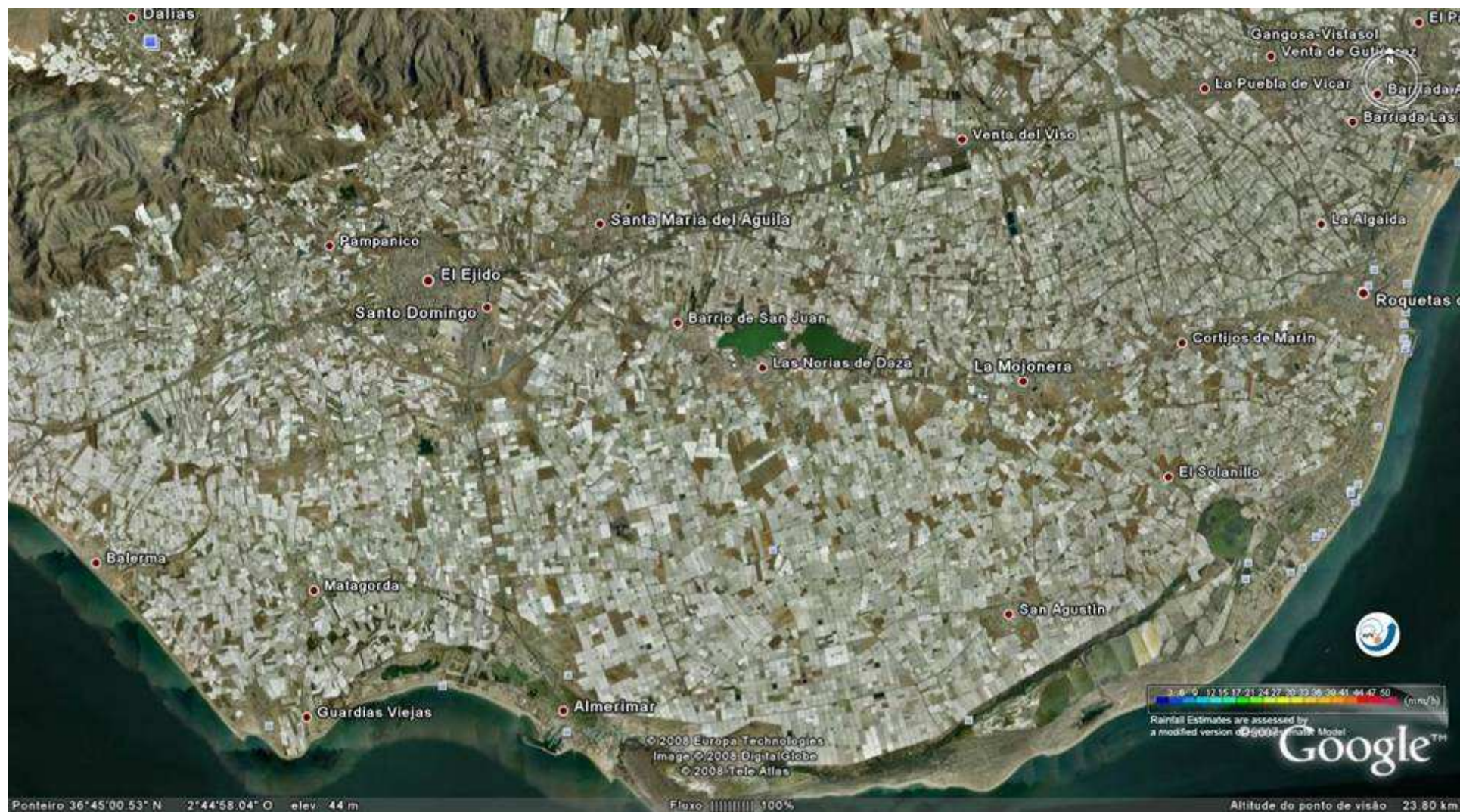
Fig. V.18 - Perfis do saldo de radiação obtidos por Gruber (1978), entre junho de 1974 e maio de 1975, usando dados fornecidos por satélites da série NOAA. Estão indicadas as estações e respectivos meses. A escala vertical é proporcional à porção da superfície da Terra situada entre os paralelos indicados.

Saldo de radiação vs hora do dia



ALTERAÇÕES NO BALANÇO DE RADIAÇÃO (microclima)

Fluxos acima da superfície
(ex. cultivos protegidos)



Grande redução

Pequena redução
(20 a 25% de Rg)





Cultivo a céu aberto
(Uvas viníferas, F. Cunha, RS)

Plástico tipo ráfia
(1/3 de redução de RFA)



Cobertura anti-granizo
Macieira, Vacaria, RS

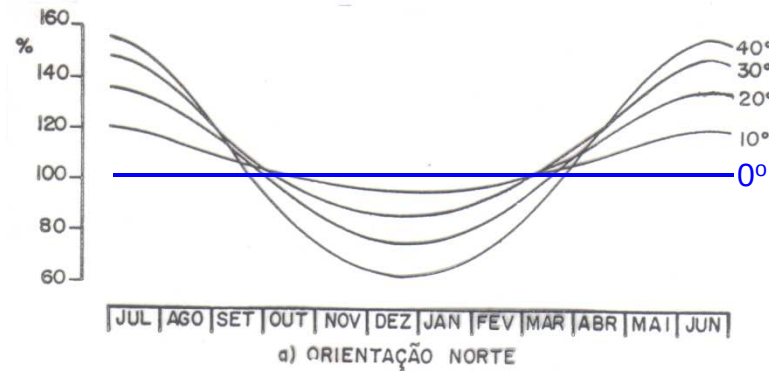


Sem granizo
Menos RFA ($\pm 20\%$)
Menos vento

RADIAÇÃO
EM
SUPERFÍCIES
INCLINADAS

Radiação solar em superfícies inclinadas

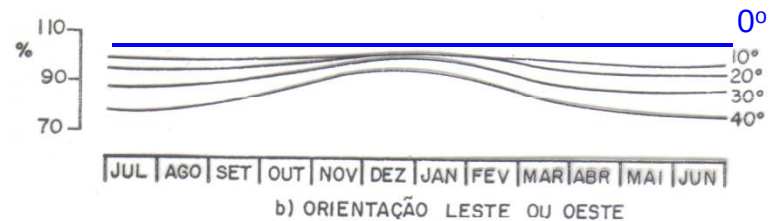
NORTE



Rg (inclinada)

Rg (horizontal)

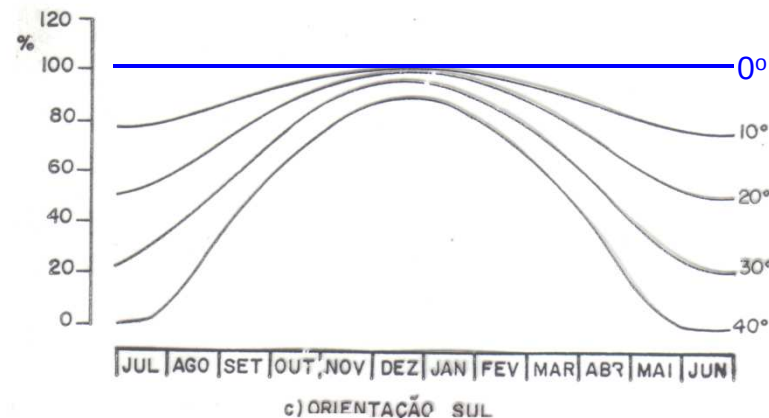
**LESTE
OESTE**



NORTE E SUL

Recebem energia como se fossem horizontais em outra latitude, dependendo da inclinação;

SUL



LESTE E OESTE

A variação diária é devido ao adiantamento ou atraso no por-do-sol e nascer do sol

Variação anual da relação percentual entre a Rg sobre superfície inclinada e horizontal para latitude de 20°S

Radiação solar diária em superfície horizontal no topo da atmosfera (calcm⁻²dia⁻¹)

Latitude	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
10 °N	782	844	925	760	915	902	904	913	903	859	797	760
8°N	804	861	908	922	904	888	891	906	905	872	816	783
6°N	826	875	913	916	892	871	876	898	907	882	836	806
4°N	846	890	919	911	878	855	861	889	907	913	855	829
2°N	866	903	922	904	864	836	844	878	906	902	872	850
0°	886	914	924	896	848	817	828	868	904	910	889	871
2°S	903	926	925	888	832	798	809	856	901	917	905	891
4°S	920	936	925	877	815	777	791	842	897	924	920	909
6°S	936	944	924	866	797	757	771	829	892	929	933	928
8°S	952	953	922	855	778	735	$\frac{R_g \text{ (inclinada)}}{R_g \text{ (horizontal)}} = \frac{777}{594} = 1,31$					
10°S	965	959	919	841	759	712						
12°S	978	964	913	828	738	690						
14°S	990	969	908	812	716	666	684	763	860	937	977	991
16°S	1001	972	902	797	695	641	662	744	849	936	986	1003
18°S	1011	974	894	779	672	616	637	725	838	934	993	1015
20°S	1020	975	886	762	648	594	613	705	825	932	1000	1027
22°S	1028	975	875	743	625	565	588	684	811	928	1005	1037
24°S	1034	974	864	724	600	538	562	662	797	923	1008	1046
26°S	1040	971	853	703	575	511	$\frac{R_g \text{ (inclinada)}}{R_g \text{ (horizontal)}} = \frac{372}{594} = 0,63$					
28°S	1044	968	839	682	549	483						
30°S	1048	964	825	660	523	456	482	593	747	901	1015	1067
32°S	1050	958	810	637	496	429	456	569	729	891	1015	1072
34°S	1053	952	794	614	469	400	428	543	709	880	1014	1076
36°S	1054	944	777	591	441	372	400	518	690	870	1012	1079
38°S	1053	935	759	566	413	344	372	492	669	858	1009	1081
40°S	1051	926	740	540	385	315	344	466	750	844	1005	1083

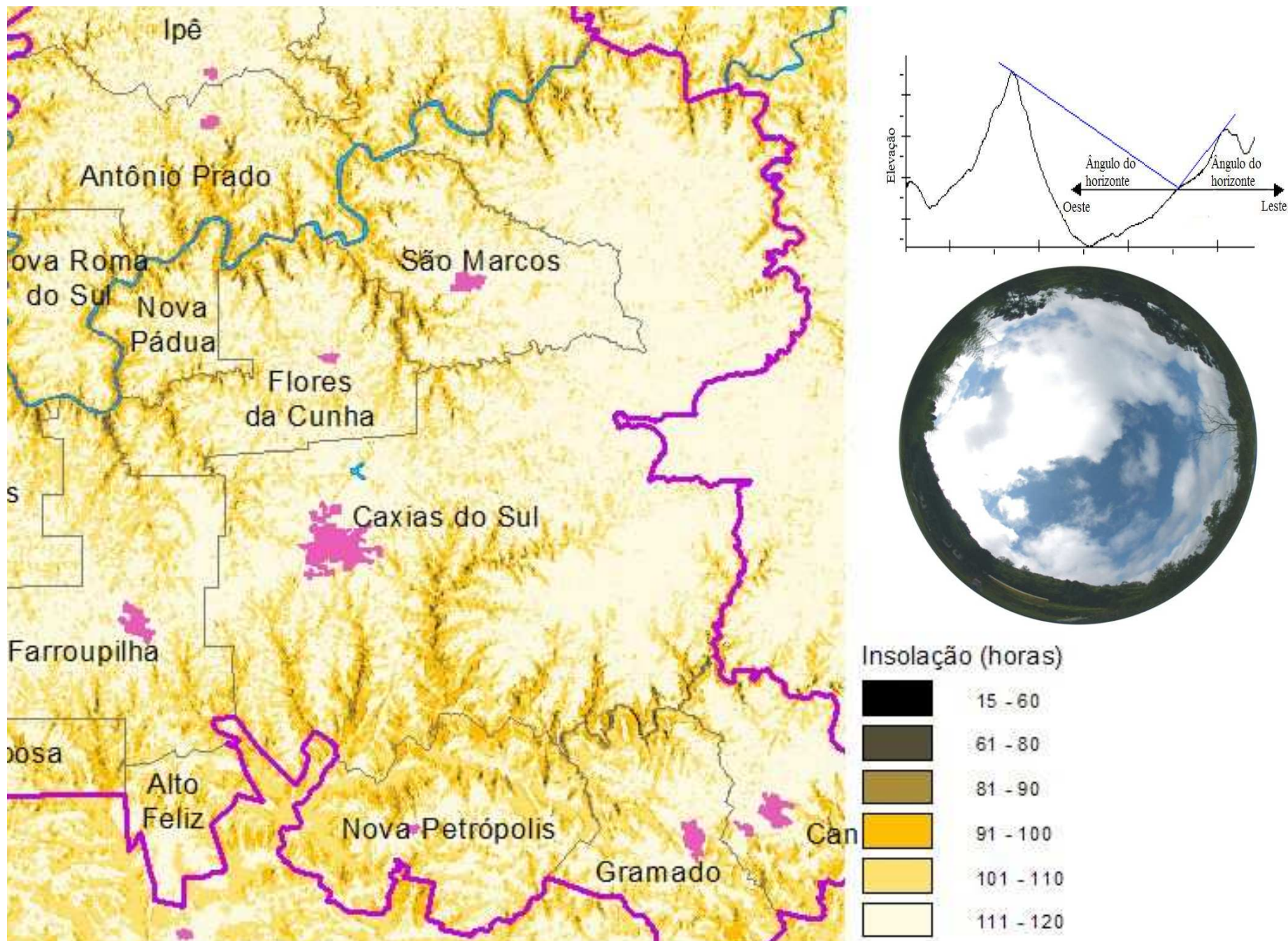
Exemplo: latitude 20°S e inclinação 16° Norte

Exemplo: latitude 20°S e inclinação 16° Sul

$$20^\circ\text{S} - 16^\circ = 4^\circ\text{S}$$

$$20^\circ\text{S} + 16^\circ = 36^\circ\text{S}$$

Weber et al (2009) Modelagem da insolação com SIG na região do Vale dos Vinhedos)



BALANÇO DE ENERGIA DA SUPERFÍCIE

“partição do saldo de radiação na superfície
entre os consumidores e/ou fornecedores”

BALANÇO DE ENERGIA NA SUPERFÍCIE

$$R_n = LE + H + S + \text{outros}$$

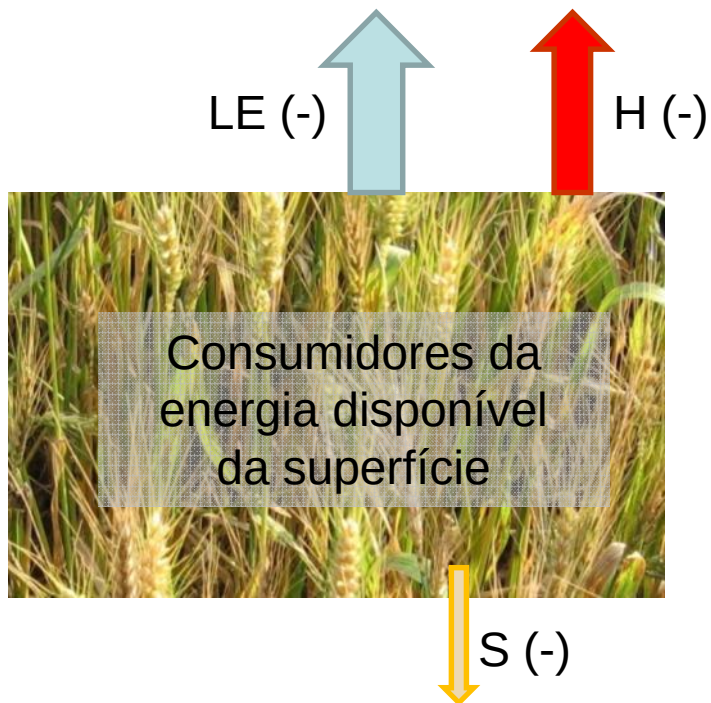
R_n – saldo de radiação

LE – fluxo de calor latente de evapotranspiração

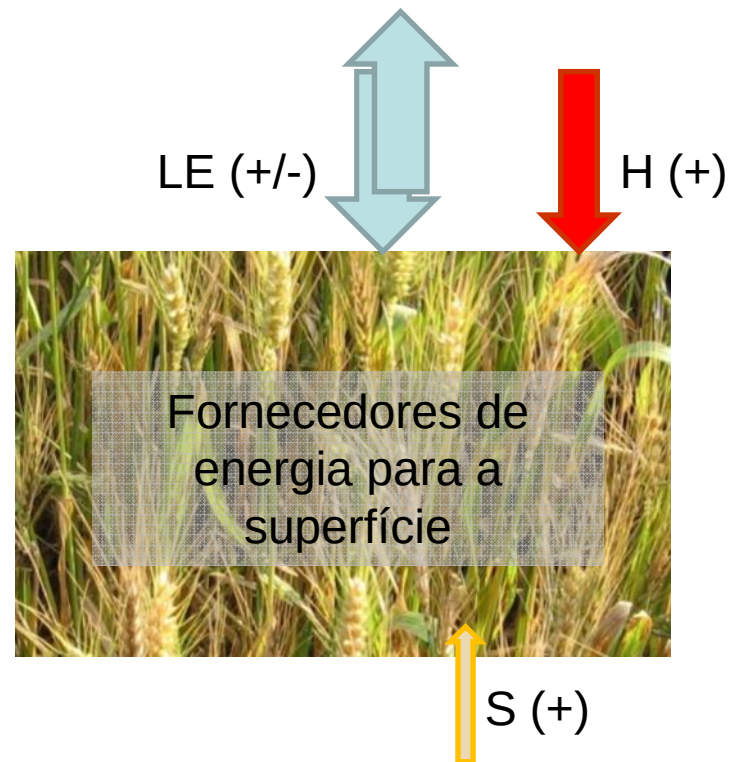
H – fluxo de calor sensível para o ar

S – fluxo de calor sensível para o solo

Durante o dia $\rightarrow R_n (+)$



Durante a noite $\rightarrow R_n (-)$



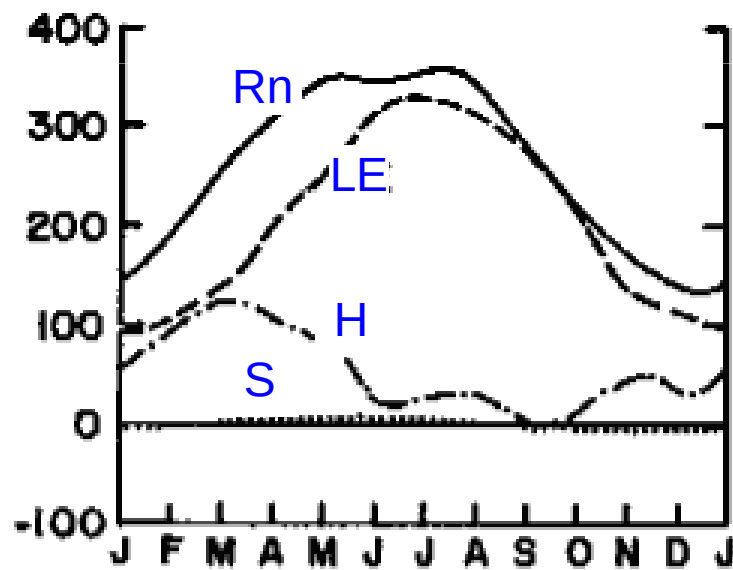
Com advecção de energia:

$$R_n + A = LE + H + S = \text{outros}$$

BALANÇO DE ENERGIA NA SUPERFÍCIE



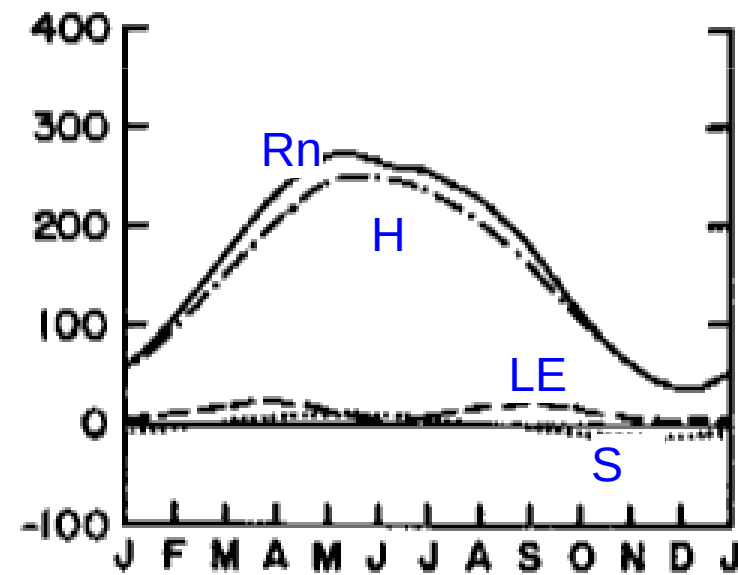
West Palm Beach, Florida (26,7°N)



Clima úmido



Yuma, Arizona (32,7°N)



Clima seco

BALANÇO DE RADIACÃO E DE ENERGIA DA SUPERFÍCIE

EXPERIMENTOS AGROMETEOROLÓGICO

Gradientes temper. e
umidade do ar

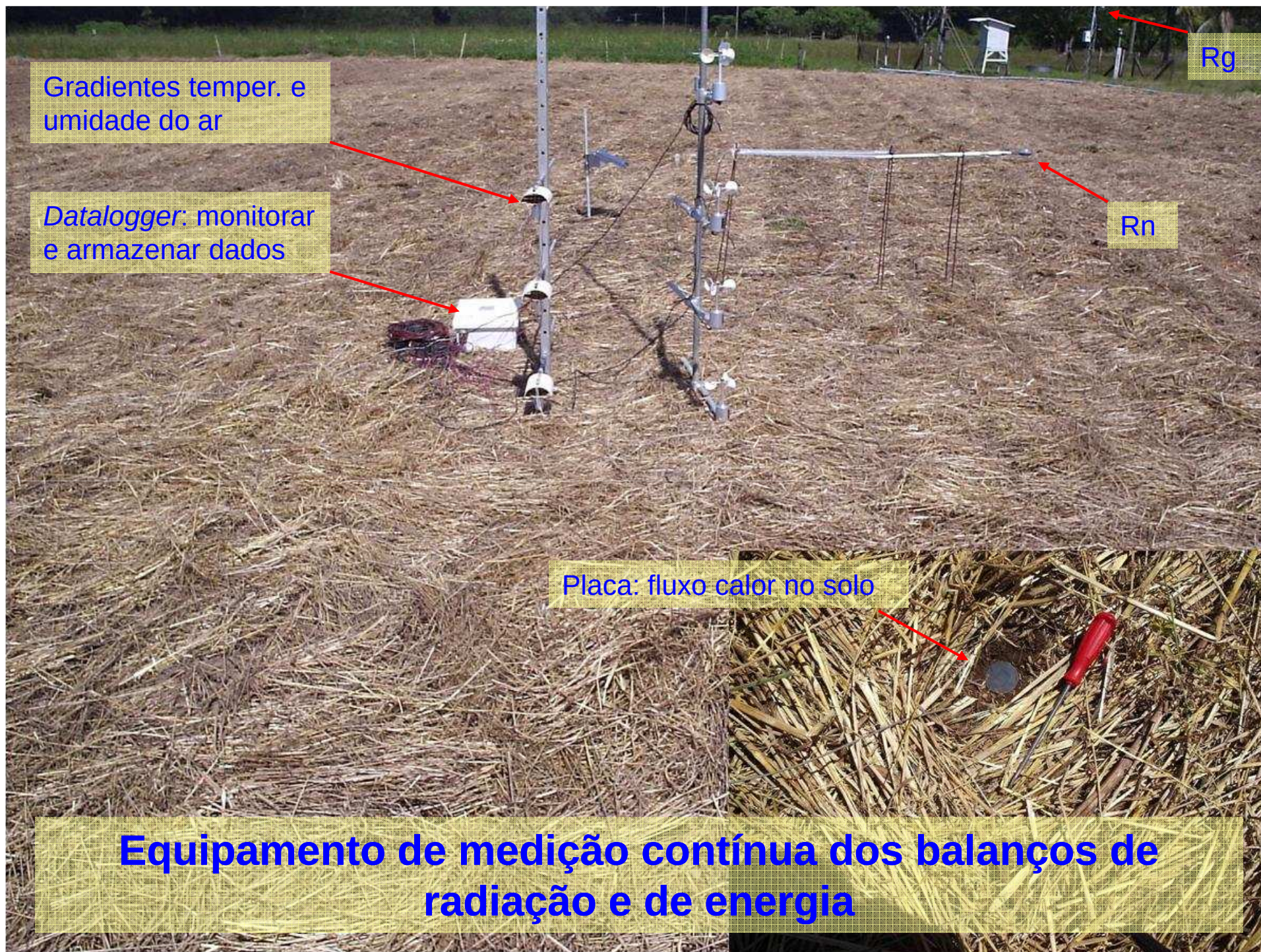
Datalogger: monitorar
e armazenar dados

R_g

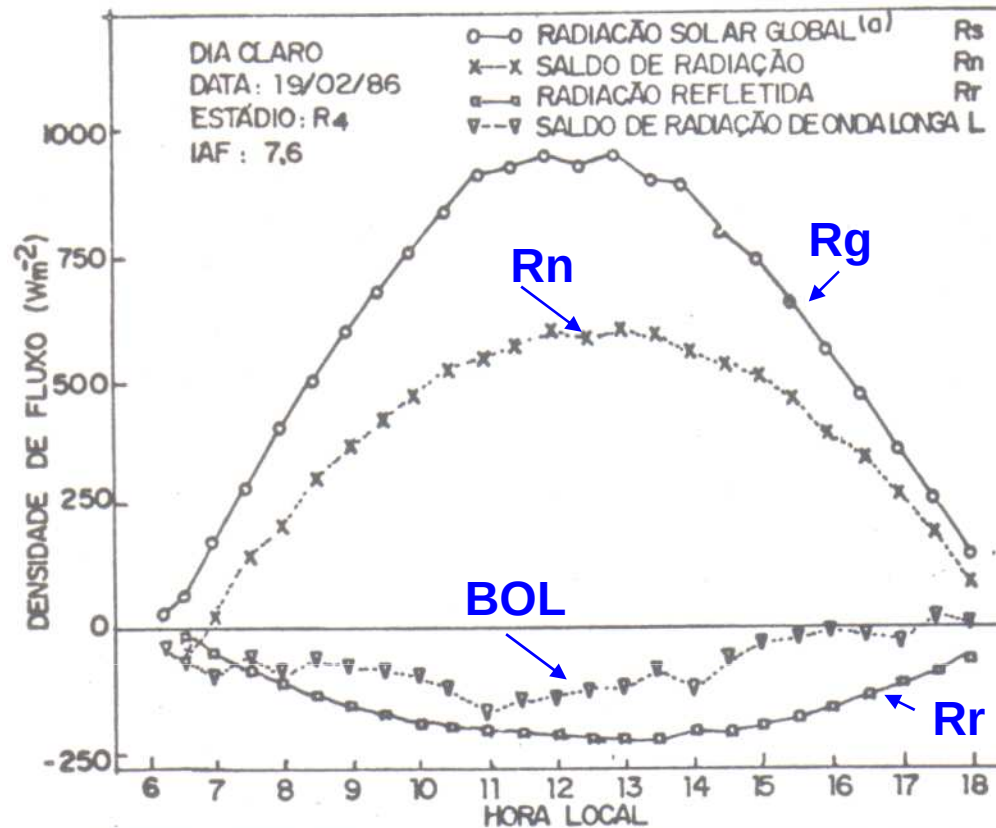
R_n

Placa: fluxo calor no solo

**Equipamento de medição contínua dos balanços de
radiação e de energia**



Balanço de radiação

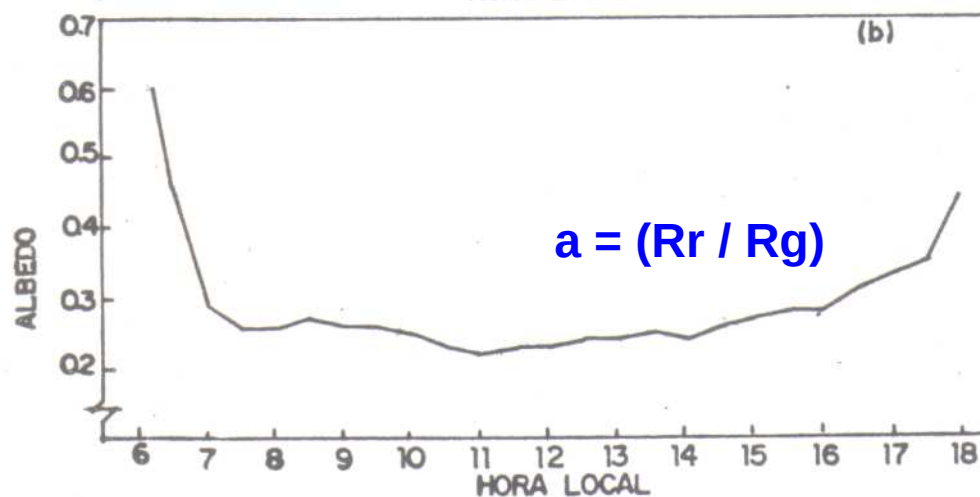


$R_g = 100\%$ ($26,5 MJm^{-2}dia^{-1}$)

$R_n = 66\%$

$R_r = 27\%$

BOL = 7%

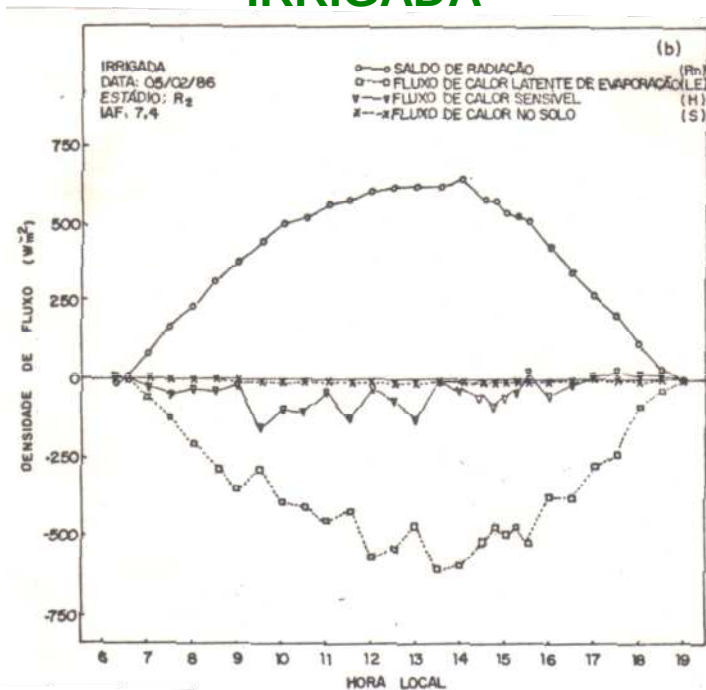


Componentes do balanço de radiação
em **SOJA** irrigada, cv. Brag em
Taquari, RS, 19/02/1986.

Fonte: Fontana et al. (1986)

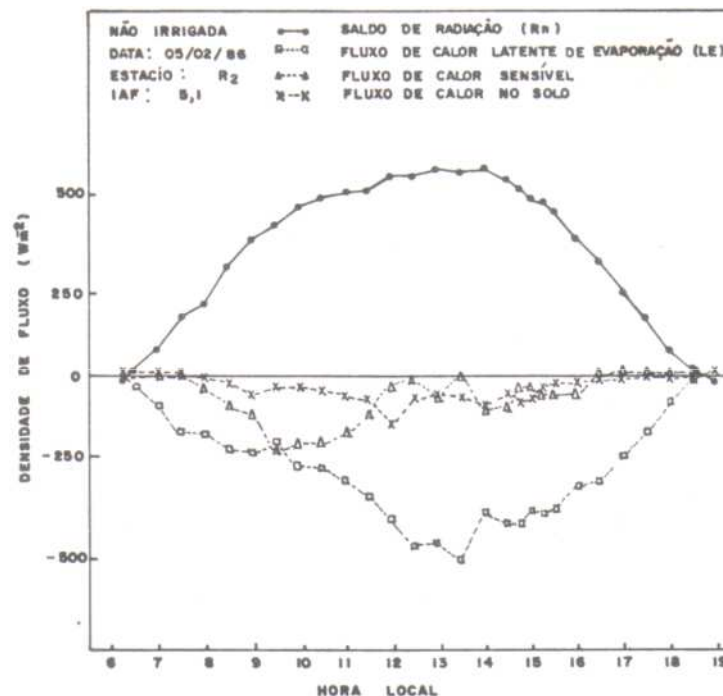
Balanço de energia - SOJA

IRRIGADA



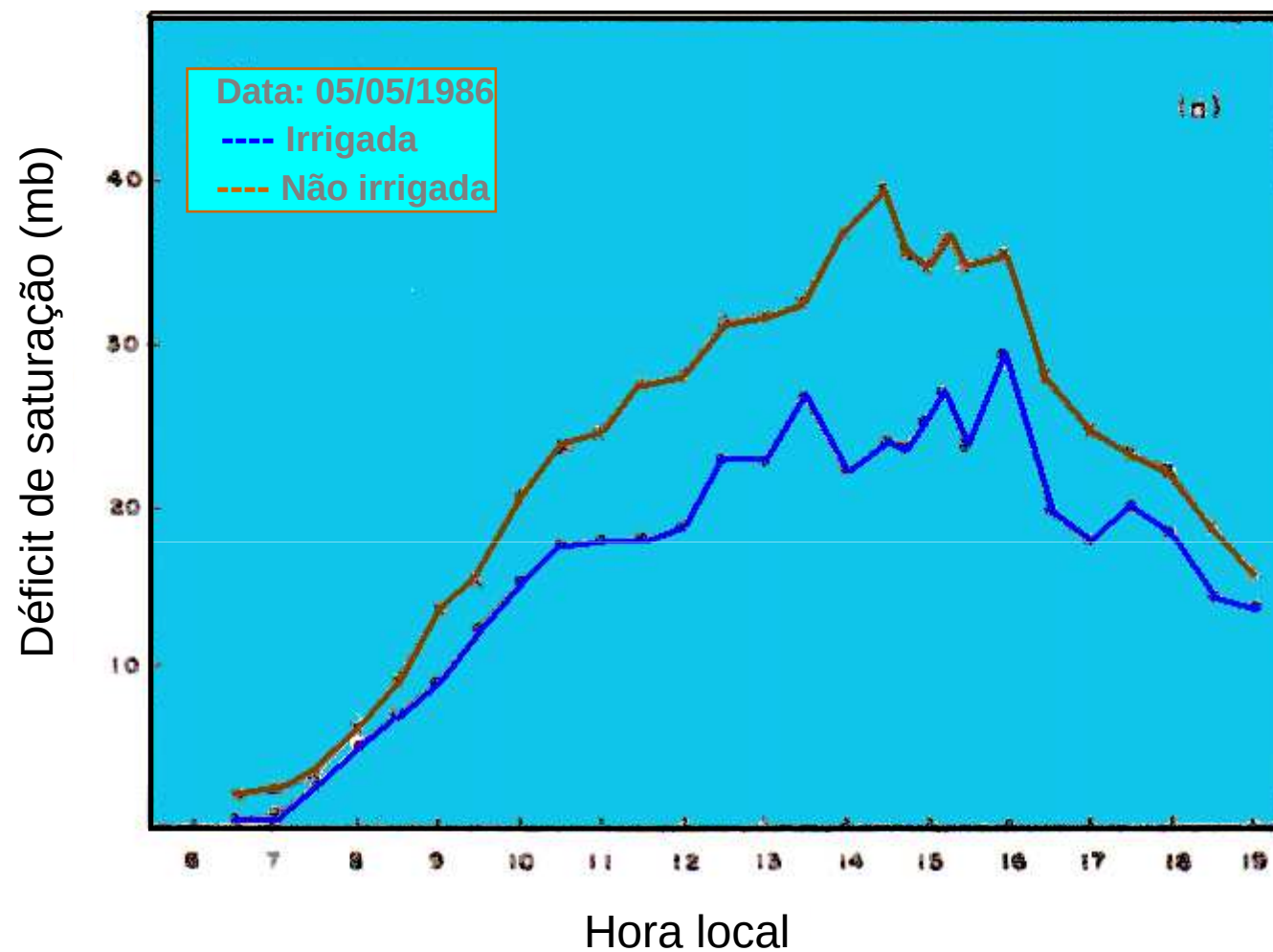
Rn = 100%
LE = 89%
H = 9%
S = 2%

NÃO IRRIGADA

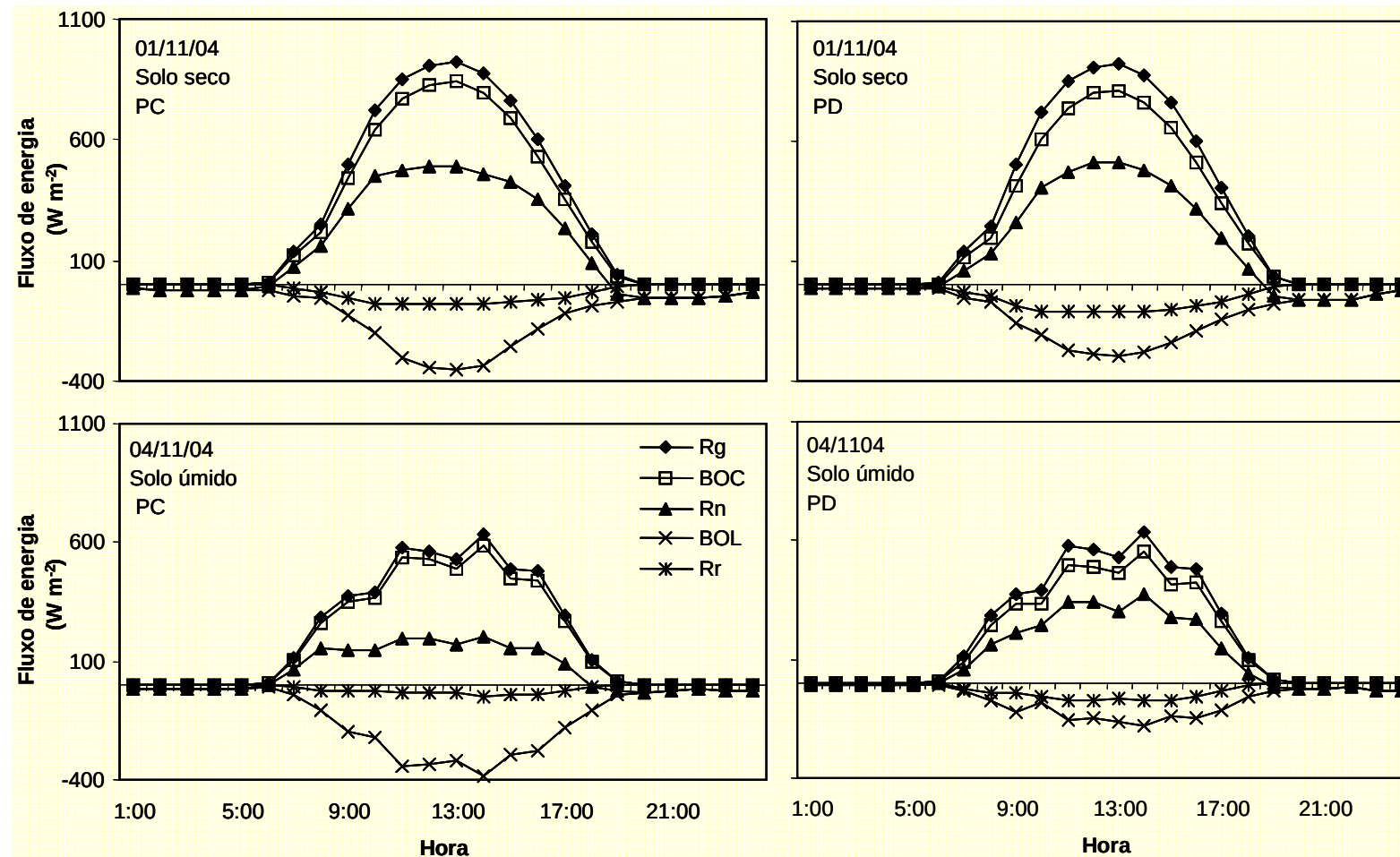


Rn = 100%
LE = 73%
H = 17%
S = 10%

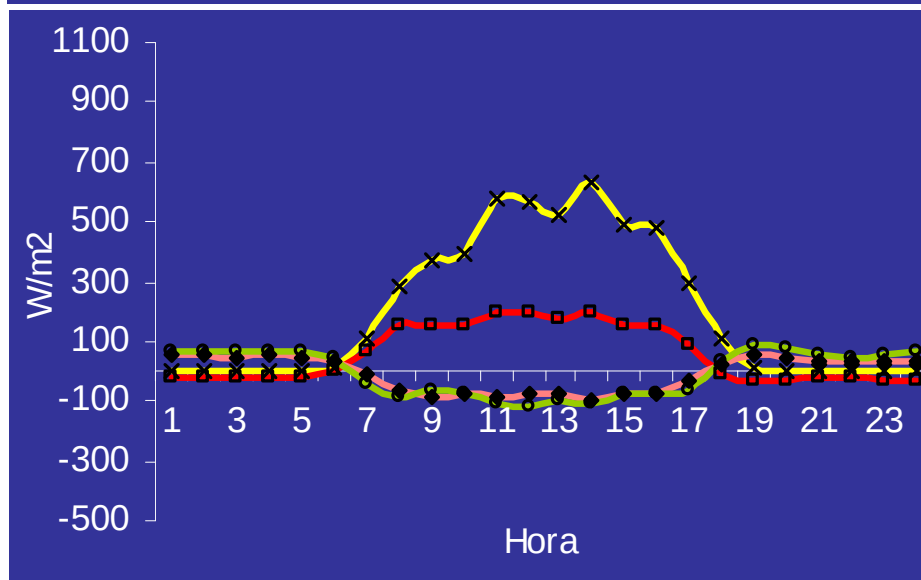
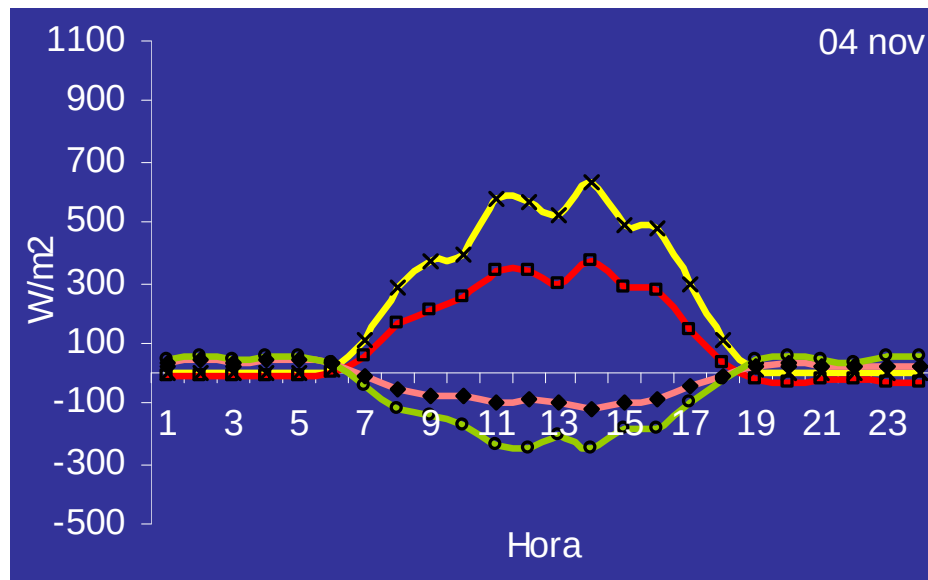
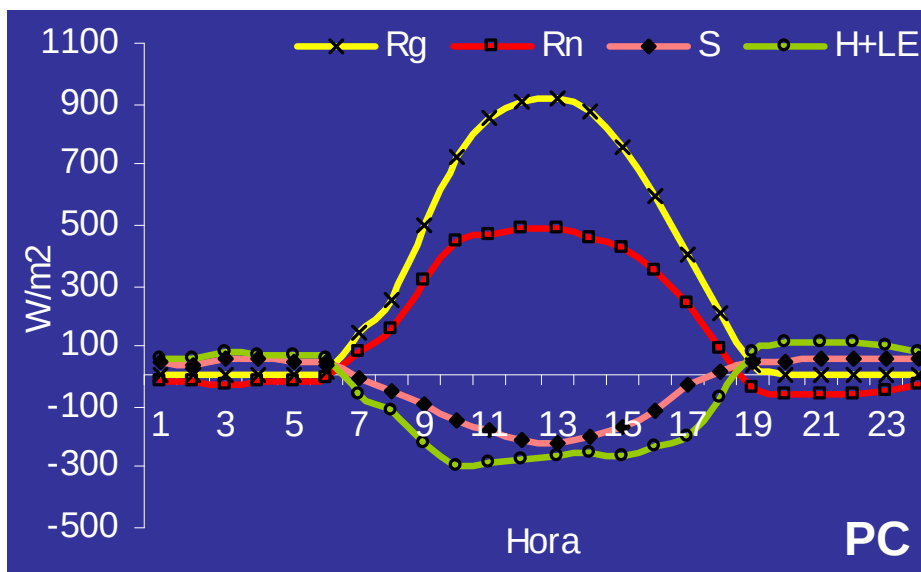
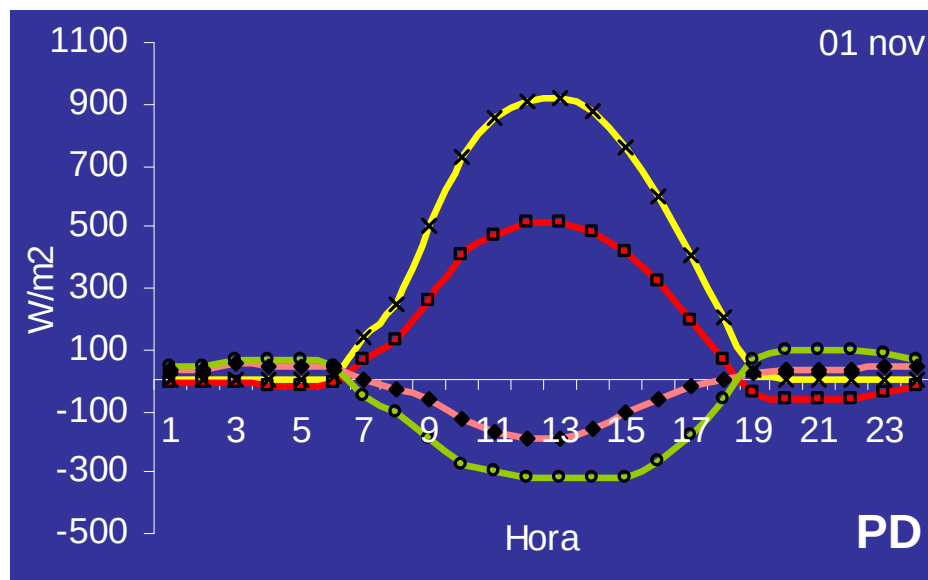
Componentes do balanço de energia da soja, Taquari, em 05/02/1986.



Déficit de saturação do vapor d'água do ar em parcela de soja irrigada e não irrigada, 05/02/1986, Taquari, RS.



Componentes do balanço de radiação (W m^{-2}) na superfície do solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC): radiação solar global incidente (R_g), balanço de ondas curtas (BOC), saldo de radiação (R_n), balanço de ondas longas (BOL) e radiação refletida (R_r), medido nos dias 01/11 e 04/11. EEA/FRGS, Eldorado do Sul, RS, 2004 (Heckler et al, 2005)



Balanço de energia em dias ensolarados e em condições de solo seco (01 e 26/nov) e úmido (04/nov e 05/dez), em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), em W/m². Eldorado do Sul, RS, Brasil, 2004. (COMIRAN et al., 2005)

Até a semana que vem