UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA

Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

4 - Agrometeorologia aplicada

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

4.1 - Introdução

→ Irrigação ⟶ fornecimento de água às culturas

↙ Condições Meteorológicas

↘ Disponibilidade de água no solo

↓

Principal fator condicionante da demanda atmosférica por vapor

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

4.2 - Participação da energia radiante em superfícies vegetadas e evapotranspiração

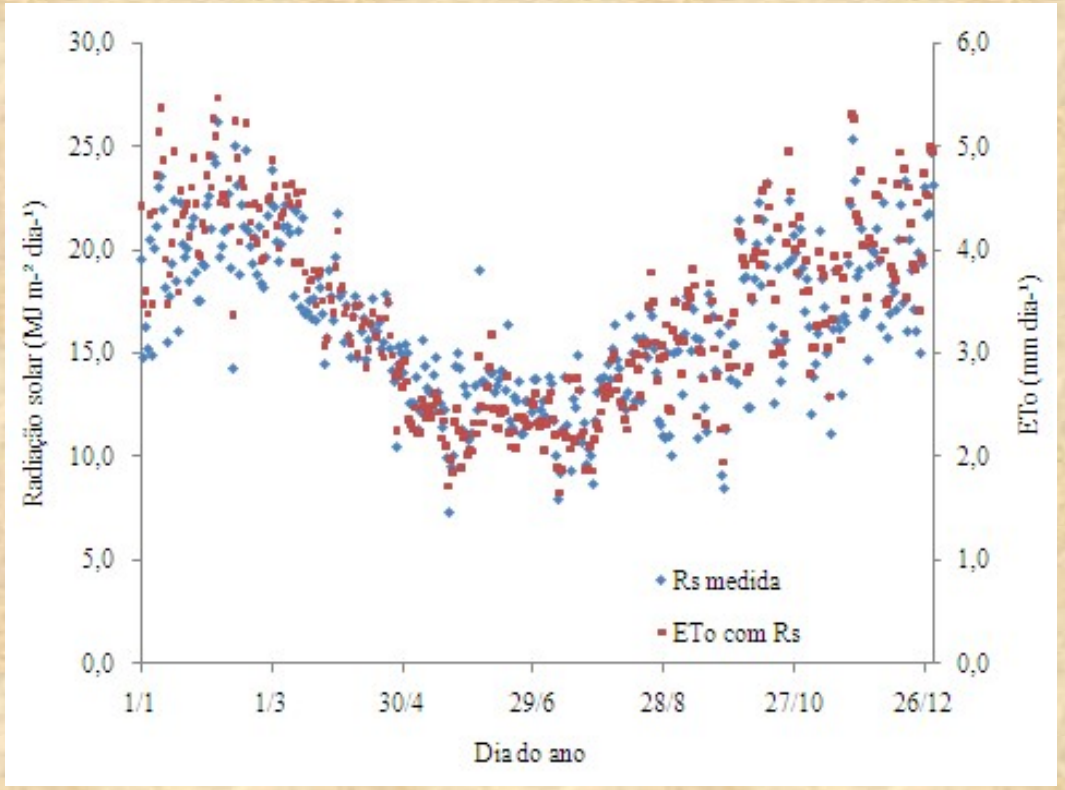
→ Radiação solar ⟶ fonte de energia primária de todos os processos físicos naturais

→ evapotranspiração (evaporação + transpiração) ⟶ radiação solar é o principal condicionador

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

Para Seropédica-RJ:



CARVALHO, D.F.; SILVA, D.G. ; SOUZA, A.P.; GOMES, D.P.; ROCHA, H.S. Coeficientes da equação de Angström-Prescott e sua influência na evapotranspiração de referência em Seropédica, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, p. 838-844, 2011.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

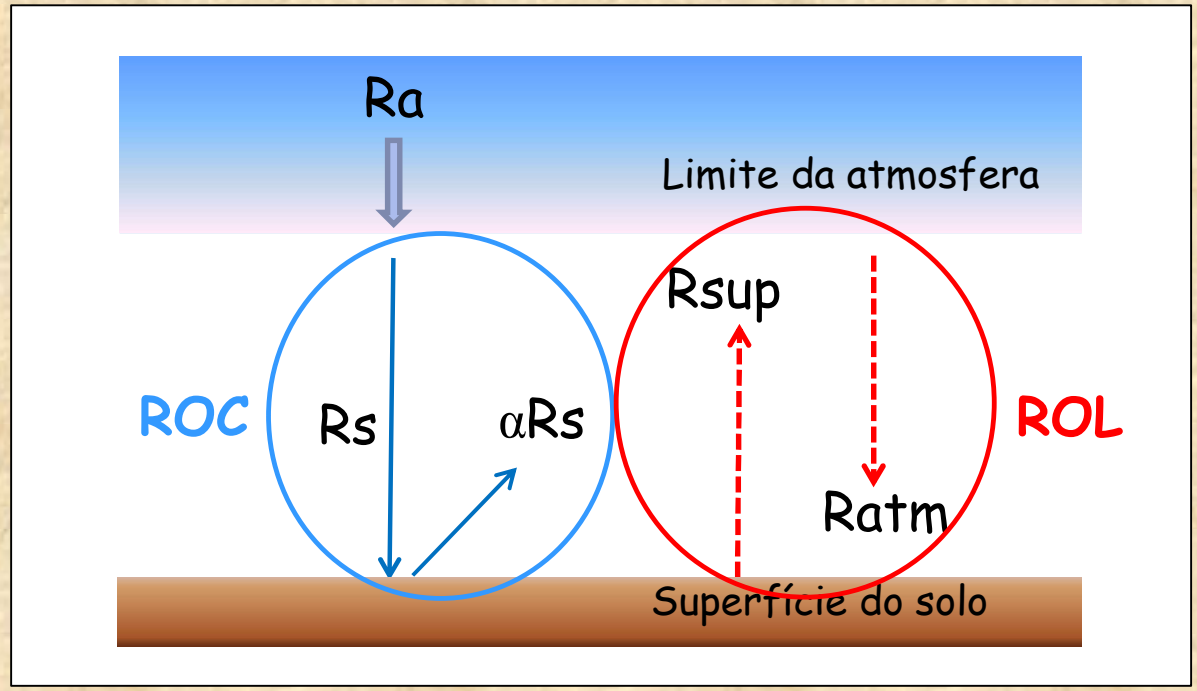
- A cada instante, há um balanço de radiação ocorrendo:

$$Rn = ROC + ROL$$

Rn → saldo de radiação ou radiação líquida
ROC → radiação de onda curta
ROL → radiação de onda longa

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho



α = albedo da superfície

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

- A cada instante, há um balanço de radiação (Rn) ocorrendo:

$$Rn = ROC + ROL$$

- Adotando-se valores positivos para os fluxos que entram no sistema e negativos para os que saem:

$$Rn = Rs(1-\alpha) + R_{atm} - R_{sup}$$

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

$$ROC = Rs(1-\alpha)$$ Medida



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

$$ROC = Rs(1-\alpha)$$ Estimada

$$Rs = \left(a + b\frac{n}{N}\right)Ra$$

- em que

a e b = coeficientes empíricos, específicos para cada localidade;

N = número máximo de horas com brilho solar (fotoperíodo);

n = insolação;

Ra = radiação no topo da atmosfera.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

$$ROC = Rs(1-\alpha)$$

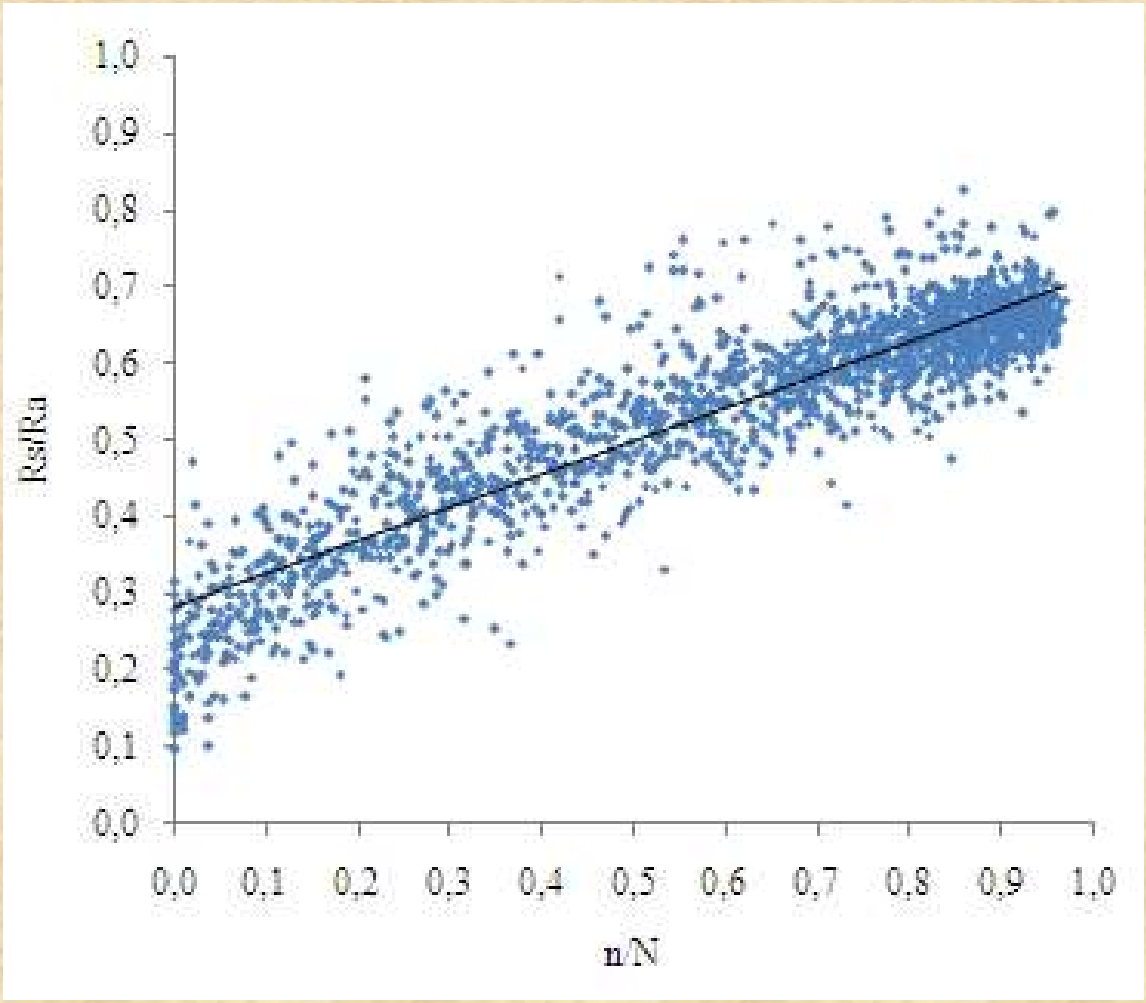


$$Rs = \left(a + b\frac{n}{N}\right)Ra$$

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

Para Seropédica-RJ:



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

Mês	a	b	R^2	R_s calculada	Rs medida
Janeiro	0,299 ± 0,031	0,430 ± 0,043	0,865	22,44 ± 1,09	22,09 ± 1,28
Fevereiro	0,266 ± 0,029	0,480 ± 0,048	0,834	22,51 ± 1,08	22,39 ± 1,08
Março	0,289 ± 0,036	0,427 ± 0,036	0,879	19,11 ± 0,91	19,17 ± 1,05
Abril	0,279 ± 0,027	0,397 ± 0,057	0,879	16,14 ± 0,66	16,04 ± 0,74
Maio	0,264 ± 0,043	0,441 ± 0,061	0,885	14,01 ± 0,66	13,75 ± 0,82
Junho	0,281 ± 0,038	0,428 ± 0,072	0,886	13,26 ± 0,48	13,71 ± 0,71
Julho	0,246 ± 0,070	0,455 ± 0,084	0,922	13,58 ± 0,61	13,48 ± 0,73
Agosto	0,232 ± 0,070	0,470 ± 0,085	0,888	15,02 ± 0,80	15,20 ± 0,77
Setembro	0,277 ± 0,054	0,468 ± 0,057	0,868	17,61 ± 1,04	16,83 ± 1,31
Outubro	0,277 ± 0,044	0,504 ± 0,045	0,881	20,94 ± 1,09	20,38 ± 1,13
Novembro	0,269 ± 0,035	0,489 ± 0,048	0,875	20,37 ± 1,07	19,54 ± 1,29
Dezembro	0,294 ± 0,047	0,495 ± 0,050	0,861	21,46 ± 1,15	21,67 ± 1,37
Anual	0,295 ± 0,038	0,417 ± 0,043	0,812	18,12 ± 0,33	18,19 ± 0,79
Geral	0,282	0,433	0,820	17,99 ± 0,29	18,05 ± 0,35

CARVALHO, D.F.; SILVA, D.G. ; SOUZA, A.P.; GOMES, D.P.; ROCHA, H.S. Coeficientes da equação de Angström-Prescott e sua influência na evapotranspiração de referência em Seropédica, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, p. 838-844, 2011.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

- o número máximo possível de horas de insolação para um dado local (N) :

$$N = \frac{24}{\pi}\omega_s$$

$$Rs = \left(a + b\frac{n}{N}\right)Ra$$

em que ωs é o ângulo horário do pôr-do-sol [rad].

$$Ra = 37{,}586\ d_r\ (\omega_s\ sen\varphi\ sen\delta_s + \cos\varphi\ \cos\delta_s\ \sin\omega_s)$$

em que

dr = distância relativa terra-sol [rad];
φ = latitude do lugar [rad]; e
δs = declinação solar [rad].

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

A determinação de "dr" é feita de acordo com a equação:

$$d_r = 1 + 0{,}033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right)$$

em que J é o número do dia do ano (dia Juliano).

Para valores mensais, J pode ser determinado como:

$$J = \text{inteiro}\,(30{,}42\,M - 15{,}23)$$

em que M é o número do mês.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

$$\omega_s = \arccos\left(-\tan\varphi \ \tan\delta_s\right)$$

Obs: para o hemisfério Norte, a latitude tem sinal positivo e para o hemisfério Sul, tem sinal negativo.

A declinação solar é determinada pela equação:

$$\delta_s = 0{,}4093 \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{365} J - 1{,}405\right)$$

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

- Na ausência de coeficientes medidos para uma dada região, pode-se utilizar a relação:

$$Rs = Ra\left[0{,}29\cos(\varphi) + 0{,}52\,(n/N)\right]$$

em que φ é a latitude do local, expressa em graus decimais.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

$$R_{ol} = -\sigma.\left(\frac{T_{max\,k}^{\,4} + T_{min\,k}^{\,4}}{2}\right).\left(0{,}34 - 0{,}14.\sqrt{e_a}\right).\left(1{,}35.\frac{R_s}{R_{so}} - 0{,}35\right)$$

em que

σ = constante de Stefan Boltzmann [4,903 x 10-9 MJ m^2 K^{-4} d^{-1}];

$T_{max\,k}$ = temperatura máxima diária [K];

$T_{min\,k}$ = temperatura mínima diária [K];

e_a = pressão parcial de vapor (kPa); e

R_{so} = radiação solar em dias claros (MJ m^2 d^{-1}).

$$R_{so} = (0{,}75 + 2.10^{-5}.z).R_a$$

em que z é a altitude do local, em metros.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

É justamente essa energia absorvida pelo ambiente, denominada saldo de radiação (Rn = ROC + ROL), a principal responsável pelo processo evapotranspirométrico em áreas irrigadas.

Analisando a partição do saldo de radiação, pode-se concluir que a diferença entre a energia que entra e a energia que sai de um sistema (Rn) é a energia captada ou utilizada por ele.

A partição do saldo de radiação (Rn) pode ser resumida nos seguintes processos:

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

$$Rn \approx H + LE + G$$

Em que:

- H é o fluxo convectivo de calor sensível;
- LE o fluxo de calor latente; e
- G o fluxo de calor do solo.

Portanto, a energia disponível no ambiente é distribuída entre os processos de aquecimento do ar e das plantas (H), de aquecimento do solo (G) e de evapotranspiração (LE).

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

4.3 - Evapotranspiração (terminologia e conceitos)

→ Condições básicas:

⟶ existência de uma fonte de energia que pode ser a radiação solar, calor sensível da atmosfera ou da superfície evaporante;

⟶ existência de um gradiente de concentração de vapor;

⟶ disponibilidade de água.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

→ Fatores climáticos intervenientes no processo:

⟶ Temperatura da superfície;

⟶ Temperatura e umidade do ar. Aumentando a temperatura do ar, “es” aumenta, diminuindo a umidade relativa (efeito indireto). Portanto, quanto > temperatura > “es” (maior a capacidade do ar conter água) e menor UR;

⟶ Vento.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

→ Evaporação ⟶ Processo físico no qual a água na fase líquida é convertida em vapor, e removida da superfície evaporante

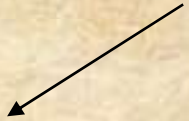
↓

Para a evaporação de 1 kg de água (20°C) são necessários 2,45 MJ.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

→ Transpiração ⟶ Processo pelo qual a água é convertida em vapor, pelas plantas, ...



... predominantemente pelas folhas, a partir das paredes celulares (estômatos). A água é conduzida até as folhas pelo sistema condutor, obedecendo um gradiente de potencial.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

→ Evapotranspiração ⟶ Processo simultâneo de transferência de água para atmosfera, por evaporação da água do solo e por transpiração das plantas.

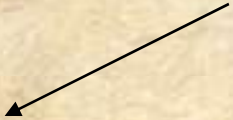
A partição entre evaporação e transpiração irá depender da radiação solar que atinge a superfície e também da cobertura vegetal (espaçamento e área foliar).

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

→ Evapotranspiração

⟶ Evapotranspiração de referência (ETo)



É a evapotranspiração que ocorre em uma superfície de referência, definida como: extensa superfície vegetada com grama (8 a 15 cm de altura), em crescimento ativo, cobrindo toda a extensão da área e bem suprida de água.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

→ Evapotranspiração

⟶ Evapotranspiração da cultura (ETc ou ET_m)

É a evapotranspiração que ocorre em uma cultura em qualquer fase de seu desenvolvimento, desde a semeadura/plantio até a maturação, sem a atuação de fatores que possam comprometer o seu desenvolvimento.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

→ Evapotranspiração

⟶ Evapotranspiração da cultura ajustada (ETc_{aj} ou ET_a)

É a evapotranspiração que ocorre em uma cultura sem que a mesma esteja sob condição padrão de cultivo.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

→ Fatores que afetam a evapotranspiração

⟶ Fatores climáticos (Rn, T, UR, U)

⟶ Fator planta (espécie, albedo, IAF, altura, prof. raiz)

⟶ Fatores de manejo e solo (espaçamento/densidade de plantio, tipo de solo, disponibilidade de água, impedimentos físicos/químicos)

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

→ Unidades

A taxa evapotranspiromética é normalmente expressa em lâmina por unidade de tempo (**mm dia^{-1}**). Sabendo que lâmina é a razão de volume por área, a evapotranspiração representa o volume de água transferido para a atmosfera em uma determinada área durante um determinado tempo.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

→ Medida da evapotranspiração

→ Métodos diretos
- Lisímetros
- Balanço de água no solo

→ Métodos indiretos
- Evaporímetros
- Fórmulas matemáticas

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

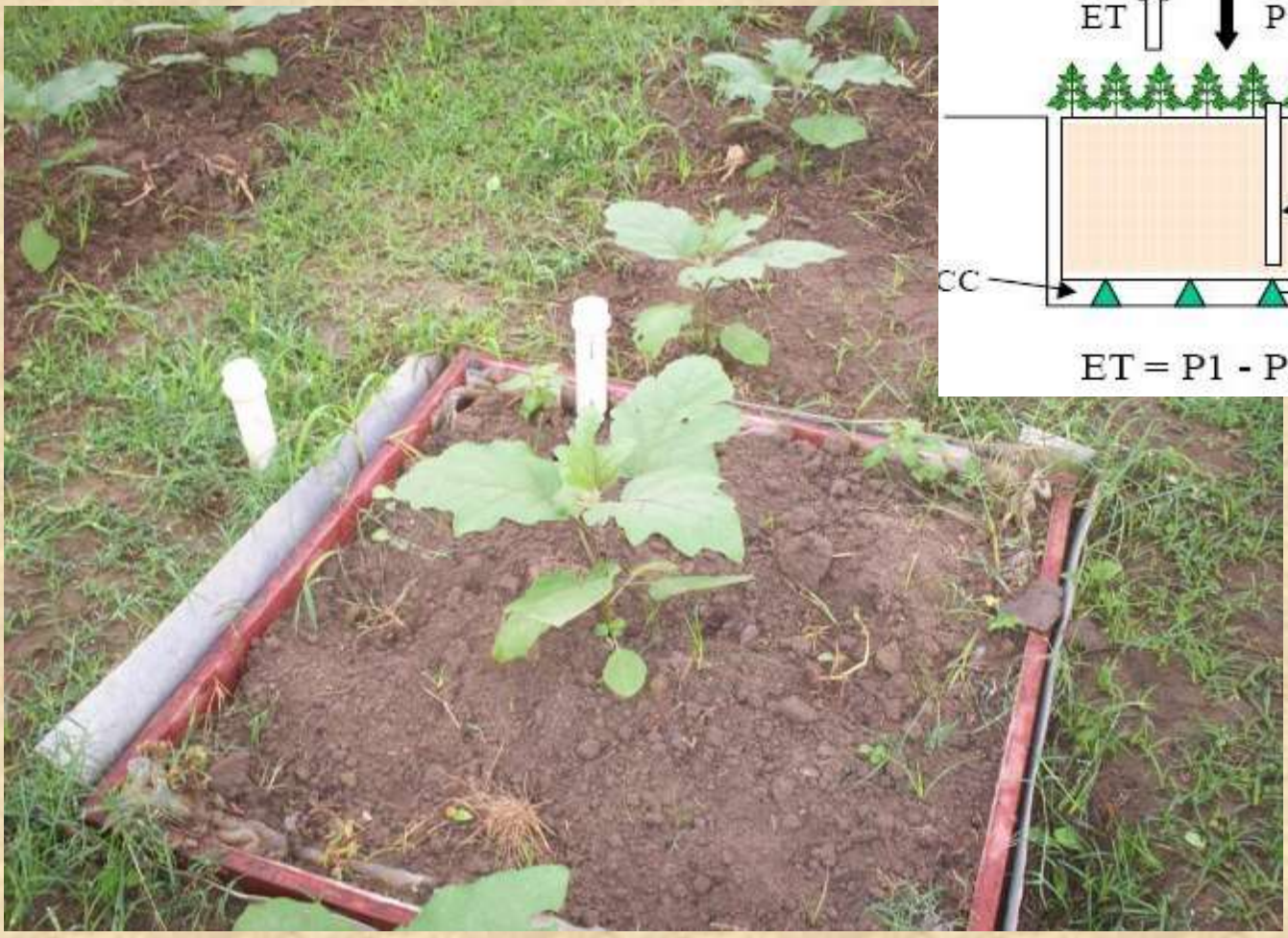
IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

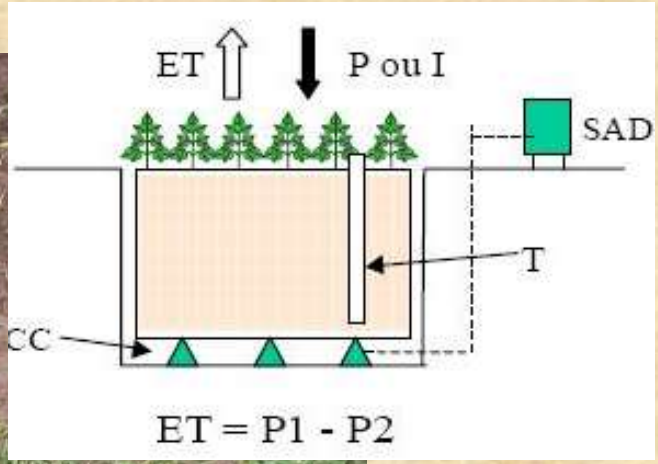


Lisímetro de drenagem

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho





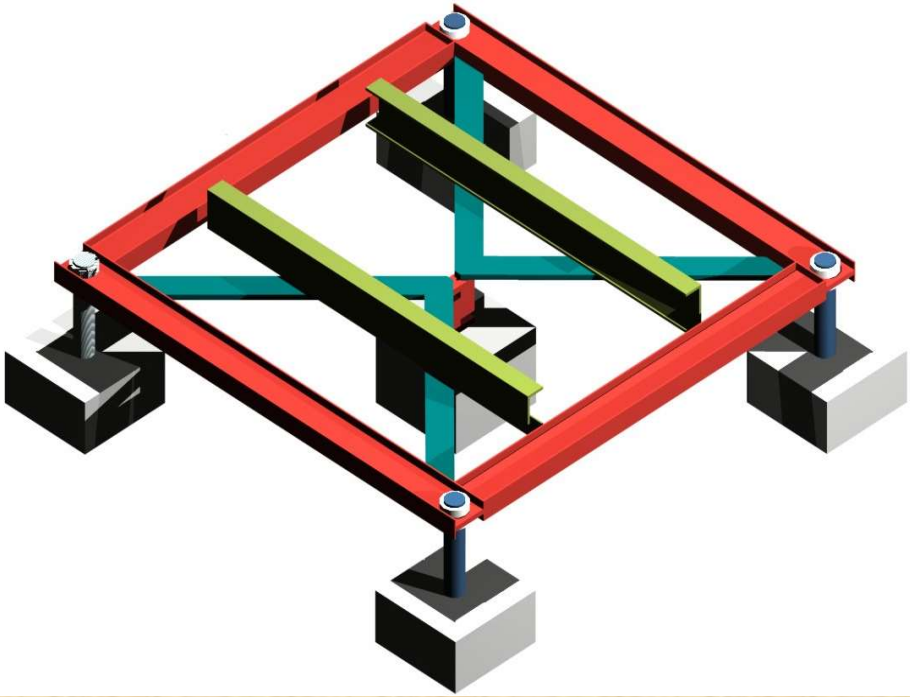
Lisímetro de pesagem



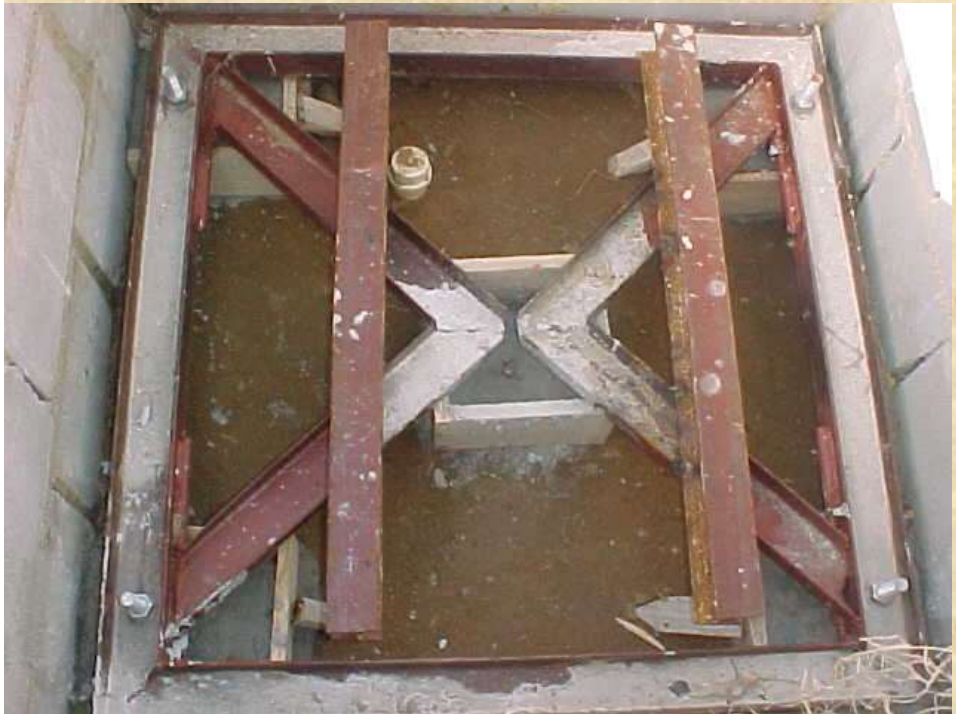












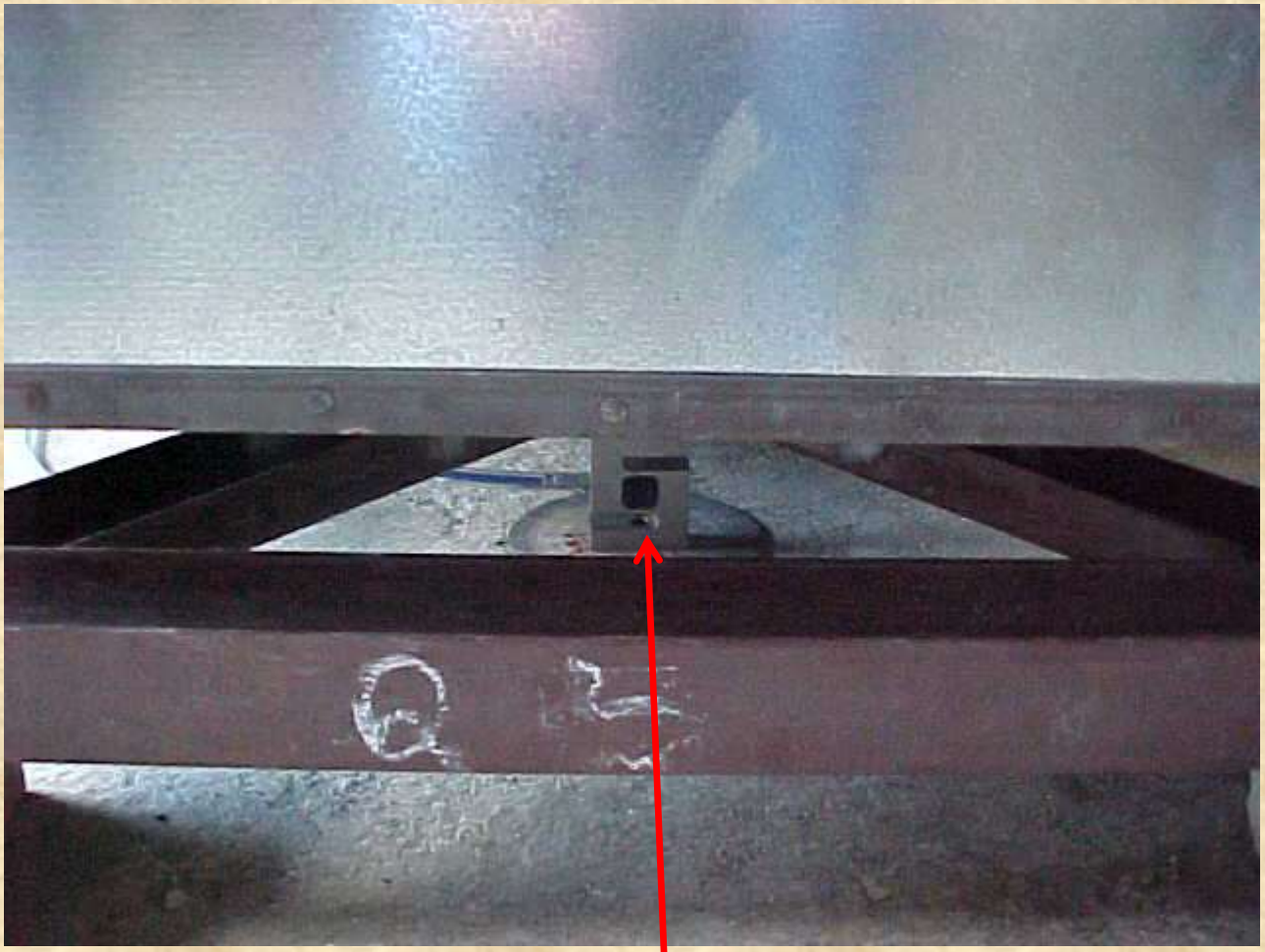







R4


R3



Célula de carga





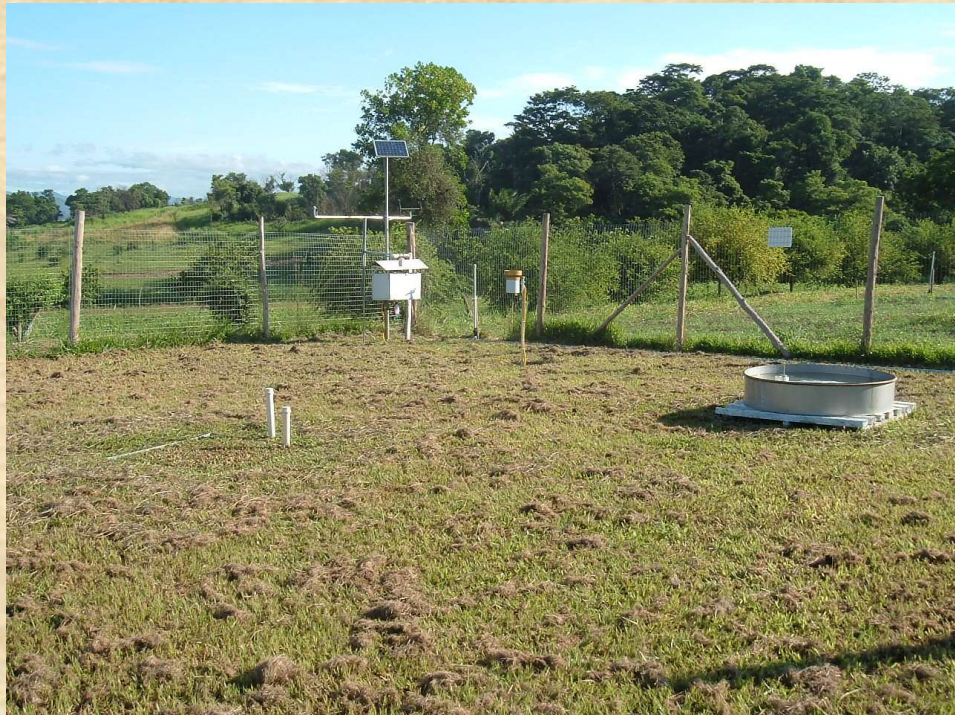












UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

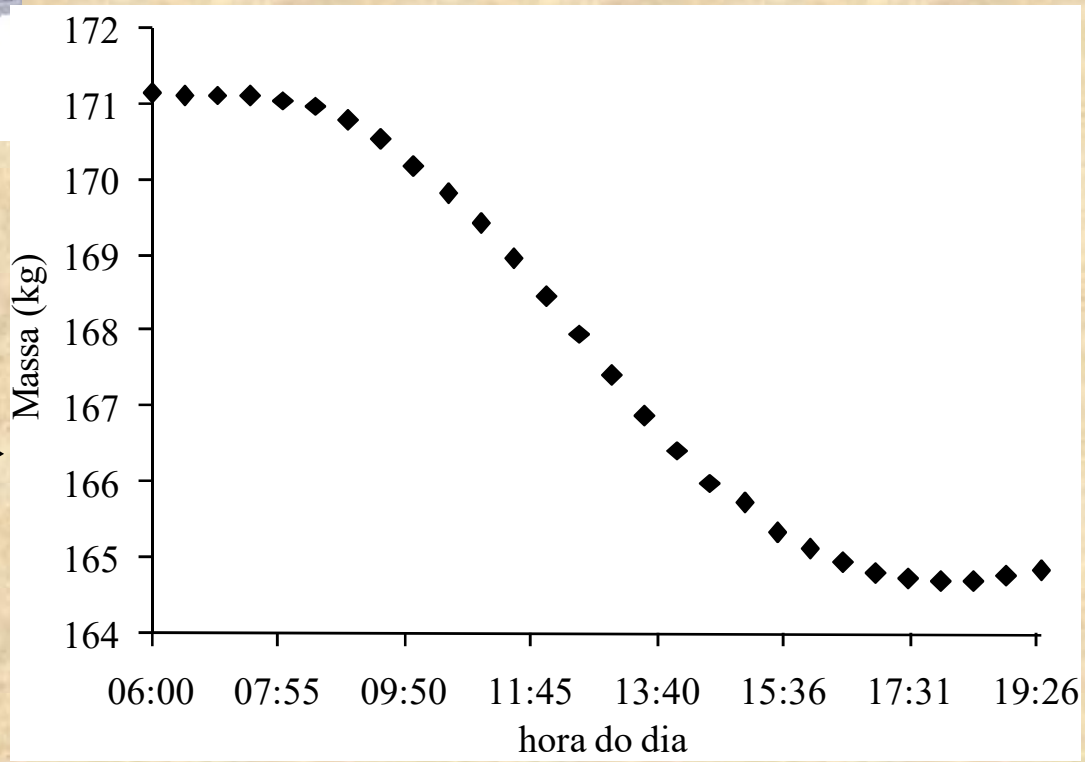
IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA

Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

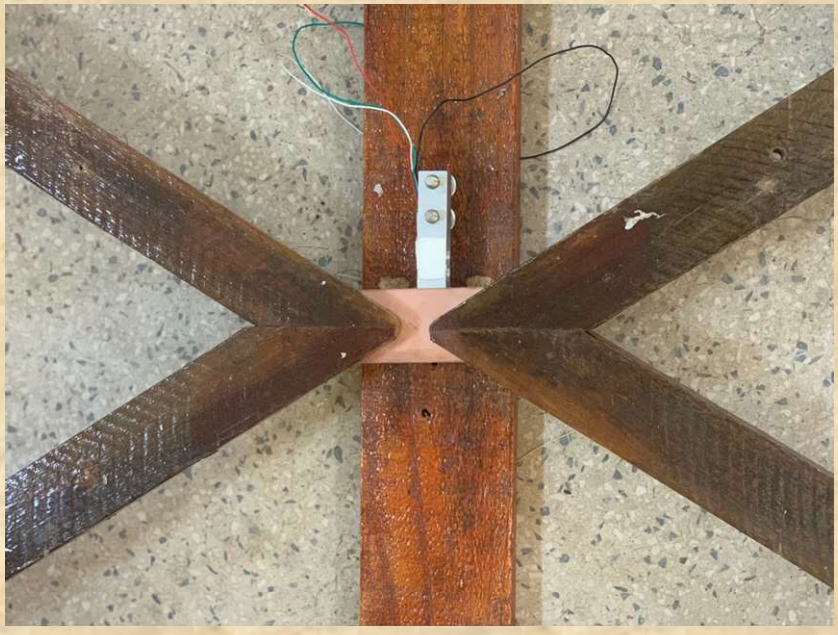


← Datalogger

Medida da ET em função da variação da massa do conjunto (caixa + solo) →



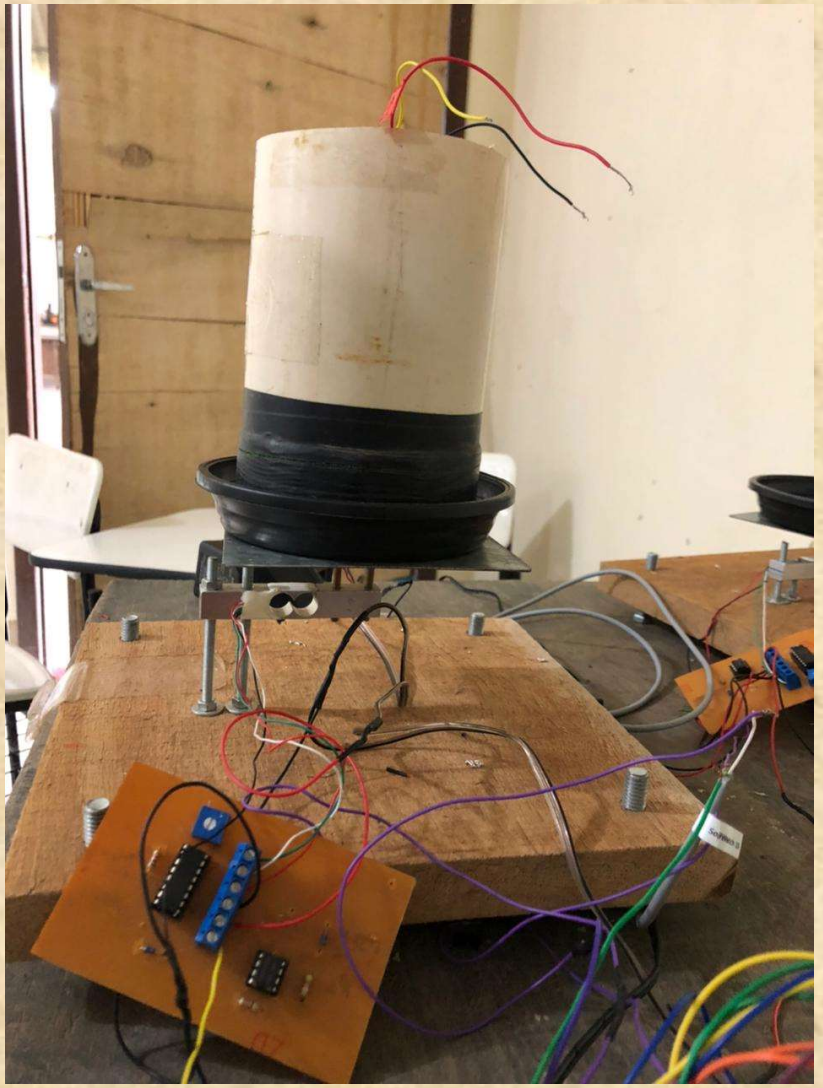








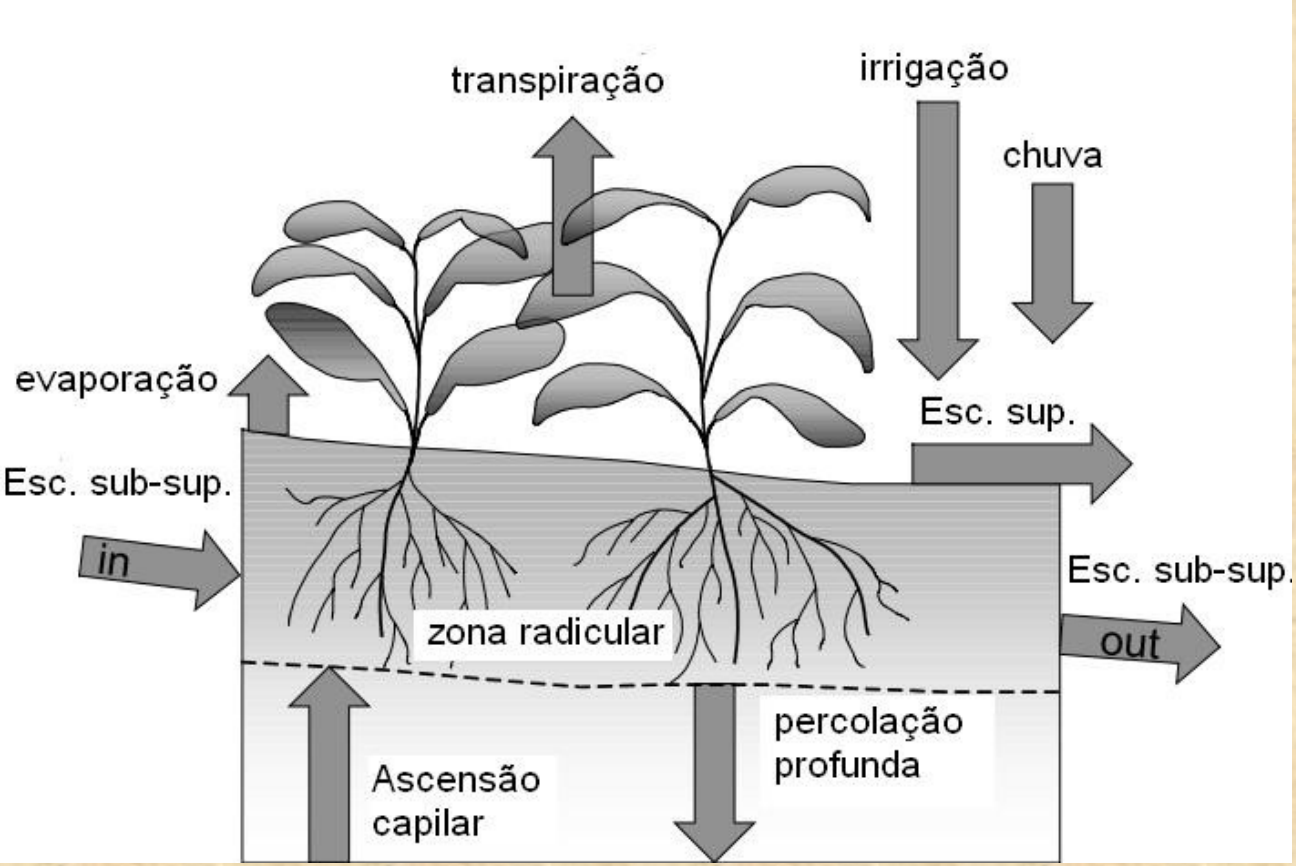




UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

→ Método direto → Balanço de água no solo



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

→ Método direto → Balanço de água no solo

O método consiste em monitorar os fluxos de entrada e saída de água na zona radicular, durante um determinado tempo. A irrigação (I) ou chuva (P) representam as entradas de água no sistema, sendo que parte dessa água pode escoar superficialmente para fora da área (ES) ou percolar abaixo da zona radicular (PP).

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

→ Método direto → Balanço de água no solo

Além disso, pode haver ascensão capilar (AC), representando entrada de água no sistema, e movimentação horizontal da água na região subsuperficial (ΔFS). Finalmente, após o monitoramente de todos os fluxos de água possíveis (entradas e saídas), a evapotranspiração (ET) pode ser avaliada em função da variação do conteúdo de água armazenado (ΔARM) durante o período de tempo. Assim:

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

⟶ Método direto ⟶ Balanço de água no solo

$$\pm \Delta ARM = I + P \pm ES - ET - PP + AC \pm \Delta FS$$

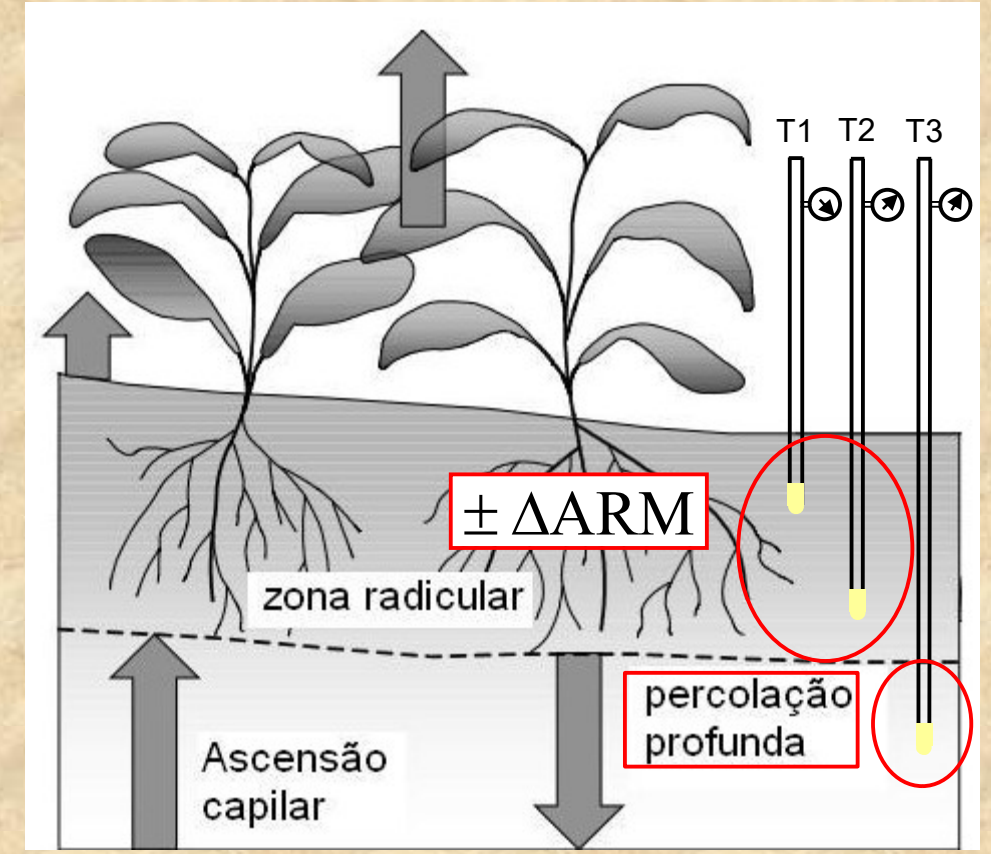
$$\pm \Delta ARM = I + P - ET - PP$$

Em condições de campo, normalmente ΔARM é medida por meio da determinação da umidade do solo. Em sistemas com turno de rega pequeno (1 ou 2 dias) e quando não há precipitação, a ΔARM representa a lâmina de irrigação e, consequentemente, a própria ETc.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

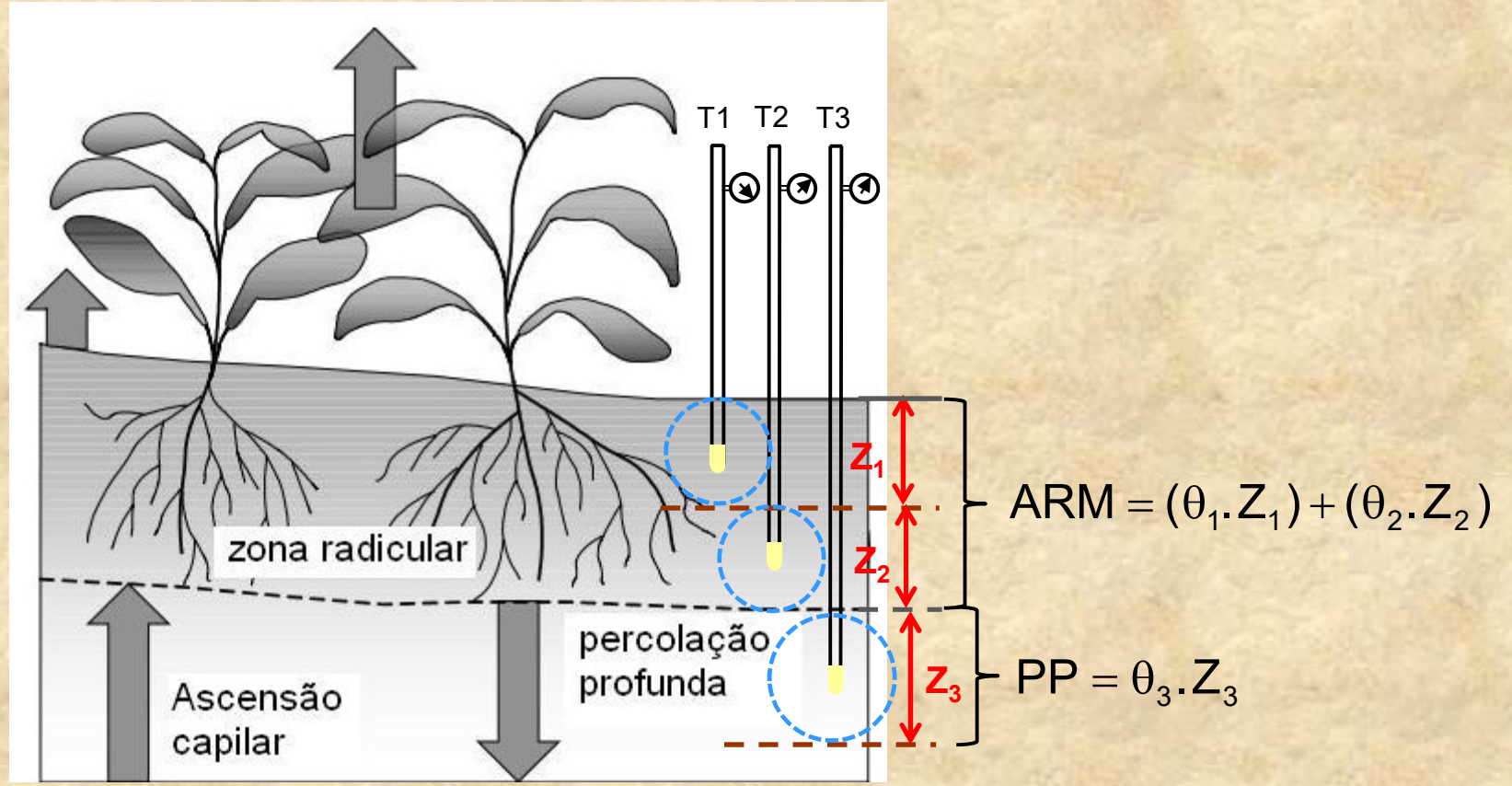
→ Método direto → Balanço de água no solo



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

→ Método direto → Balanço de água no solo



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

→ Exemplo

Um lisímetro de drenagem, com área de 1,2 m^2 e 0,45 m de profundidade, está cultivado com grama, sem nenhuma restrição hídrica. Dentro dele é realizado periodicamente o monitoramento de umidade do solo, sendo obtidos os seguintes valores médios de θ (%) para os dias 01/09 e 08/09:

Camada (m)	01/setembro	08/setembro
0 – 0,15	32,5	26,7
0,15 – 0,30	33,4	28,8
0,30 – 0,45	34,1	29,3

Sabendo que neste intervalo, houve uma irrigação de 10,0 mm, uma precipitação de 6,5 mm e uma drenagem de 13,0 L, calcule a evapotranspiração no período.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

→ Métodos indiretos → Evaporímetros

Tanque Classe A

- Área de 1,15 m^2, instalado sobre a superfície, em um estrado de madeira
- Facilidade de manuseio, mas grande dependência de fatores meteorológicos (radiação e vento)

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA

Prof. Daniel Fonseca de Carvalho





→ Métodos indiretos → Evaporímetros

Tanque Classe A

- Área de 1,15 m^2, instalado sobre a superfície, em um estrado de madeira
- Facilidade de manuseio, mas grande dependência de fatores meteorológicos (radiação e vento)

→ $ETo = EV.Kt$

$$kt = 0{,}108 - 0{,}0286.u_2 + 0{,}0422.\ln(B) + 0{,}1434.\ln(UR_{med}) - 0{,}000631.[\ln(B)]^2.\ln(UR_{med})$$

u_2 = velocidade do vento a 2,0 m (m s^{-1}); B = bordadura do tanque (m);
UR_{med} = umidade relativa do ar média (%)

Velocidade do vento ($m.s^{-1}$)	Bordadura (m)	Caso A: superfície verde (grama)			Caso B: superfície sem cobertura		
		Umidade relativa média (%)					
		Baixa < 40	Média 40 – 70	Alta > 70	Baixa < 40	Média 40 – 70	Alta > 70
Leve < 2	1	0,55	0,65	0,75	0,70	0,80	0,85
	10	0,65	0,75	0,85	0,60	0,70	0,80
	100	0,70	0,80	0,85	0,55	0,65	0,75
	1000	0,75	0,85	0,85	0,50	0,60	0,70
Moderado 2 – 5	1	0,50	0,60	0,65	0,65	0,75	0,80
	10	0,60	0,70	0,75	0,55	0,65	0,70
	100	0,65	0,75	0,80	0,50	0,60	0,65
	1000	0,70	0,80	0,80	0,45	0,55	0,60
Forte 5 – 8	1	0,45	0,50	0,60	0,60	0,65	0,70
	10	0,55	0,60	0,65	0,50	0,55	0,65
	100	0,60	0,65	0,75	0,45	0,50	0,60
	1000	0,65	0,70	0,75	0,40	0,45	0,55
Muito forte > 8	1	0,40	0,45	0,50	0,50	0,60	0,65
	10	0,45	0,55	0,60	0,45	0,50	0,55
	100	0,50	0,60	0,65	0,40	0,45	0,50
	1000	0,55	0,60	0,65	0,35	0,40	0,45

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

⟶ Exemplo de aplicação

Estimar a ETo a partir dos seguinte dados:

- evaporação medida pelo tanque Classe A: 5,1 mm d^{-1};
- velocidade do vento: 190 $km.d^{-1}$ → 2,2 m s^{-1};
- umidade relativa do ar média: 60%; e
- tanque circundado por grama: R = 10 m.

$$Kt = 0{,}108 - 0{,}0286.2{,}2 + 0{,}0422.\ln(10) + 0{,}1434.\ln(60) - 0{,}000631.[\ln(10)]^2.\ln(60)$$

$$Kt = 0{,}71$$

$$ETo = 5{,}1\,.\,0{,}71 = 3{,}62\ mm.d^{-1}$$

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

⟶ Métodos indiretos ⟶ Fórmulas matemáticas

- Hargreaves

$$ET_o = 0{,}408.0{,}0023.(T_{med} + 17{,}8)\sqrt{T_{max} - T_{min}}.Ra$$

- Penman-Monteith - FAO

$$ET_o = \frac{0{,}408.\Delta.(Rn - G) + \gamma.\frac{900}{T + 273}u_2.(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma\,(1 + 0{,}34.u_2)}$$

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

ET_o = evapotranspiração de referência (mm dia^{-1});
Rn = radiação líquida na superfície da planta (MJ m^{-2} dia^{-1});
G = densidade de fluxo de calor no solo (MJ m^{-2} dia^{-1});
T = temperatura média do ar a 2 metros de altura (°C);
u_2 = velocidade do vento a 2 metros de altura (m s^{-1});
e_s = pressão de saturação de vapor (kPa);
e_a = pressão atual de vapor (kPa);
Δ = declividade da curva de pressão de vapor (kPa $°C^{-1}$); e
γ = constante psicrométrica (kPa $°C^{-1}$).

Agrometeorologia Aplicada

Evapotranspiração de referência

- Penman-Monteith/FAO

$$ET_o = \frac{0{,}408.\Delta.(Rn - G) + \gamma.\frac{900}{T + 273}u_2.(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma\,(1 + 0{,}34.u_2)} \qquad (1)$$

em que:

ET_o – evapotranspiração de referência ($mm.dia^{-1}$);

R_n – radiação líquida na superfície da planta ($MJ.m^{-2}.dia^{-1}$);

G – densidade de fluxo de calor no solo ($MJ.m^{-2}.dia^{-1}$);

T – temperatura média do ar a 2 metros de altura (°C);

u_2 – velocidade do vento a 2 metros de altura ($m.s^{-1}$);

e_s – pressão de saturação de vapor (kPa);

e_a – pressão atual de vapor (kPa);

Δ – declividade da curva de pressão de vapor ($kPa.°C^{-1}$);

γ – constante psicrométrica ($kPa.°C^{-1}$); e

0,408 – fator de conversão para o termo (Rn - G), de $MJ.m^{-2}.dia^{-1}$ para $mm.dia^{-1}$.

- Procedimento de cálculo

O procedimento de cálculo se baseia nos seguintes passos:

- cálculo dos parâmetros atmosféricos (fatores climáticos) a partir da temperatura diária máxima (T_{max}) e mínima (T_{min}), altitude do local (z) e velocidade média do vento (u_2);

- cálculo do déficit de pressão de vapor: a pressão de saturação (e_s) é derivada de T_{max} e T_{min}, enquanto a pressão atual de vapor (e_a) pode ser obtida a partir da temperatura do ponto de orvalho, das umidades relativas máxima (UR_{Max}) e mínima (UR_{min}) ou da umidade relativa média (UR_{med}).

- determinação da radiação líquida (Rn) pela diferença entre radiação líquida de onda curta (R_{oc}) e a radiação líquida de onda longa (R_{ol}). Para cálculos diários, o fluxo de calor no solo (G) é desprezado.

A seguir será listada a sequência de equações a serem utilizadas no cálculo da ETo.

- parâmetros atmosféricos

A pressão atmosférica representa a pressão que a atmosfera exerce sobre a superfície terrestre. Caso não exista medidor instalado na estação meteorológica, pode ser utilizada a equação 2.

$$P = 101{,}3.\left(\frac{293 - 0{,}0065.z}{293}\right)^{5{,}26} \qquad (2)$$

em que:

P – pressão atmosférica (kPa); e

z – altitude (m).

O calor latente de vaporização (λ) representa a quantidade de energia necessária para a transformação de uma unidade de massa de água líquida para o estado de vapor, a uma determinada condição de pressão e temperatura constantes. Como λ apresenta pequena variação na faixa de temperatura em torno de 20°C, o calor de 2,45 $MJ.kg^{-1}$ é considerado na equação de Penamn-Monteith FAO.

A constante psicrométrica (γ) é dada por:

$$\gamma = \frac{c_p.P}{\varepsilon.\lambda} = \frac{1{,}013\ 10^{-3}.P}{0{,}622.2{,}45} = 0{,}665.10^{-3}.P \qquad (3)$$

em que ε é a taxa entre o peso molecular do vapor d'água em relação ao ar seco. As demais variáveis envolvidas já foram anteriormente conceituadas.

- Temperatura do ar e umidade relativa

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

→ Rede meteorológica

- INMET

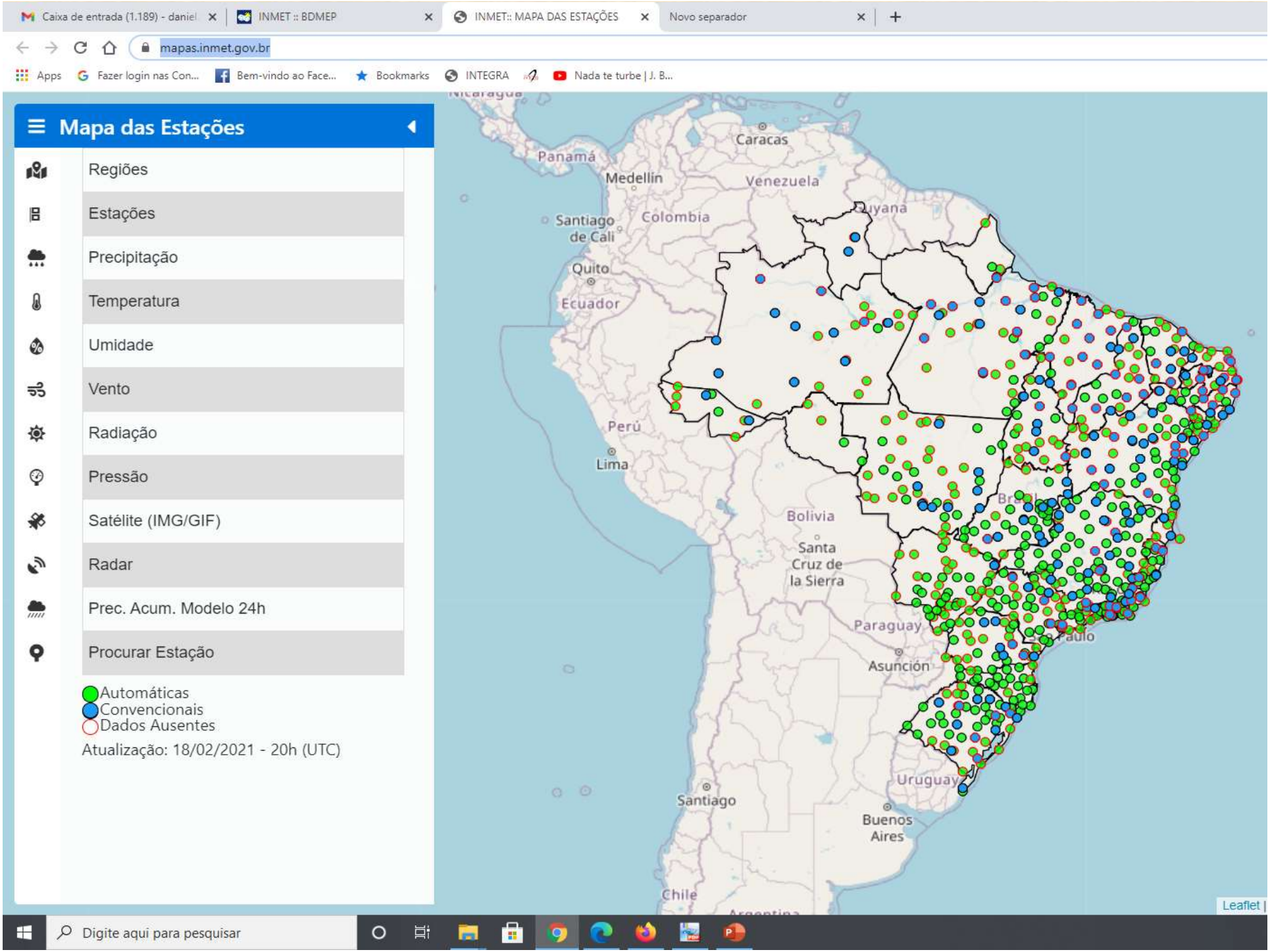
(https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inmet)

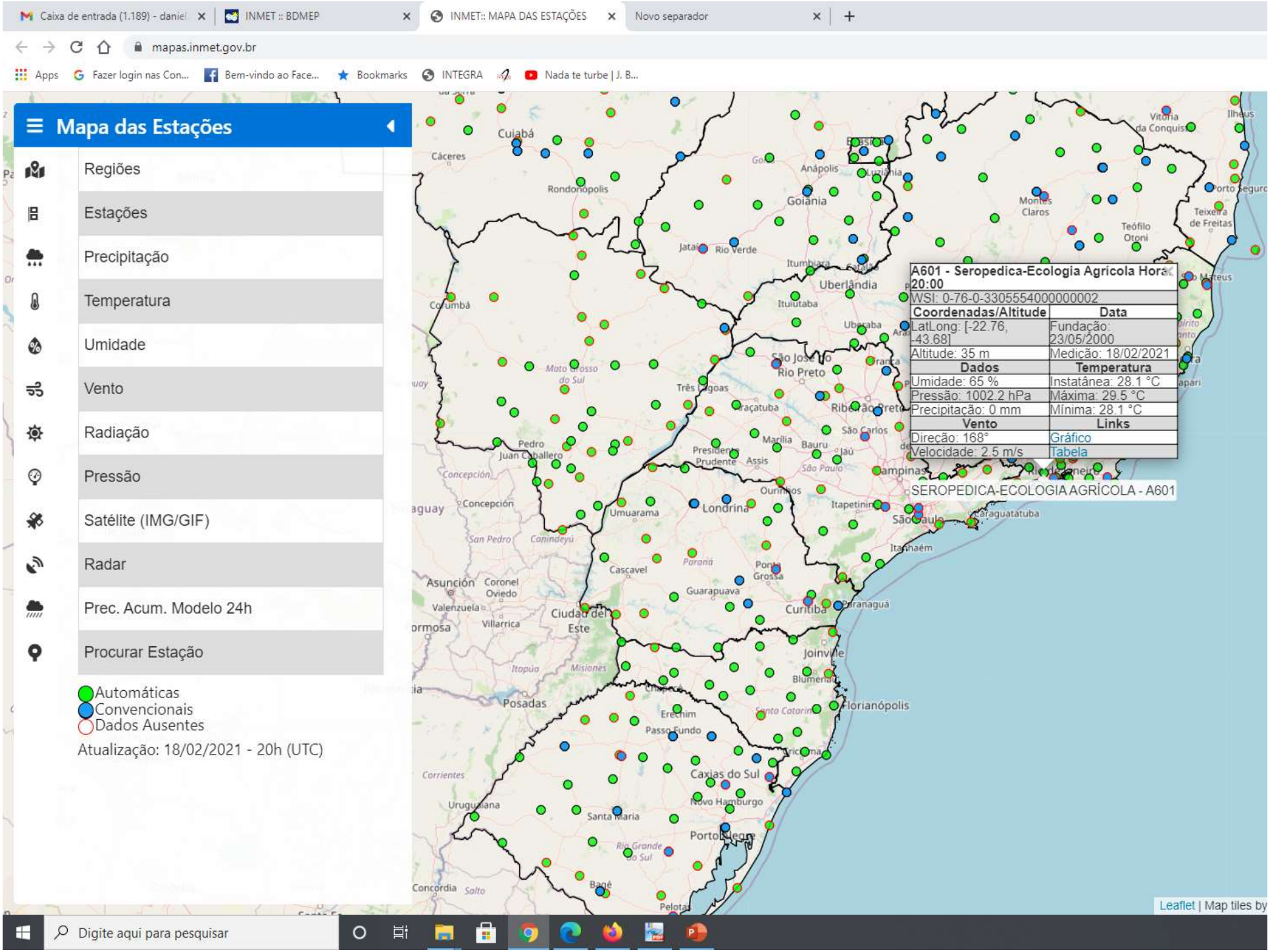
(https://mapas.inmet.gov.br/)

(https://bdmep.inmet.gov.br/)

- CPTEC - INPE

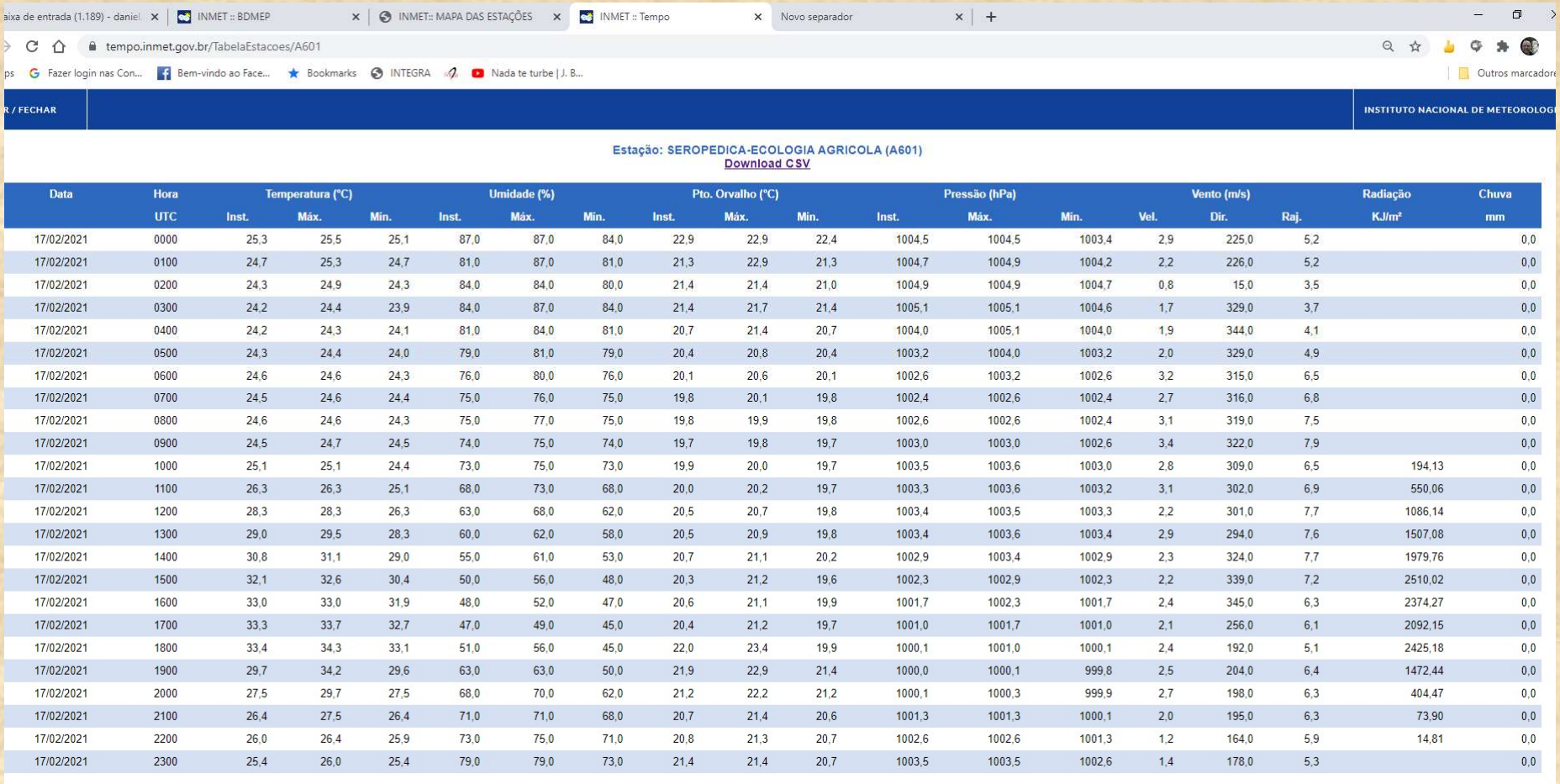
(http://sinda.crn2.inpe.br/PCD/SITE/novo/site/historico/index.php)


Caixa de entrada (1.189) - daniel
INMET :: BDMEP
INMET:: MAPA DAS ESTAÇÕES
Novo separador
mapas.inmet.gov.br
Apps
Fazer login nas Con...
Bem-vindo ao Face...
Bookmarks
INTEGRA
Nada te turbe | J. B...
Mapa das Estações
Regiões
Estações
Precipitação
Temperatura
Umidade
Vento
Radiação
Pressão
Satélite (IMG/GIF)
Radar
Prec. Acum. Modelo 24h
Procurar Estação
Automáticas
Convencionais
Dados Ausentes
Atualização: 18/02/2021 - 20h (UTC)
Caracas
Panamá
Medellín
Venezuela
Guyana
Santiago de Cali
Colombia
Quito
Ecuador
Perú
Lima
Bolivia
Santa Cruz de la Sierra
Paraguay
Asunción
Uruguay
Santiago
Buenos Aires
Chile
Leaflet |
Digite aqui para pesquisar


Caixa de entrada (1.189) - daniel
INMET :: BDMEP
INMET:: MAPA DAS ESTAÇÕES
Novo separador
mapas.inmet.gov.br
Apps
Fazer login nas Con...
Bem-vindo ao Face...
Bookmarks
INTEGRA
Nada te turbe | J. B...
Mapa das Estações
Regiões
Estações
Precipitação
Temperatura
Umidade
Vento
Radiação
Pressão
Satélite (IMG/GIF)
Radar
Prec. Acum. Modelo 24h
Procurar Estação
Automáticas
Convencionais
Dados Ausentes
Atualização: 18/02/2021 - 20h (UTC)
A601 - Seropedica-Ecologia Agricola Hora 20:00
WSI: 0-76-0-3305554000000002
Coordenadas/Altitude
Data
LatLong: [-22.76, -43.68]
Fundação: 23/05/2000
Altitude: 35 m
Medição: 18/02/2021
Dados
Temperatura
Umidade: 65 %
Instatânea: 28.1 °C
Pressão: 1002.2 hPa
Máxima: 29.5 °C
Precipitação: 0 mm
Mínima: 28.1 °C
Vento
Links
Direção: 168°
Gráfico
Velocidade: 2.5 m/s
Tabela
SEROPEDICA-ECOLOGIA AGRÍCOLA - A601
Leaflet | Map tiles by
Digite aqui para pesquisar

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

IT 199 – SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho



caixa de entrada (1.189) - daniel | INMET :: BDMEP | INMET:: MAPA DAS ESTAÇÕES | INMET :: Tempo | Novo separador

tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/A601

Fazer login nas Con... | Bem-vindo ao Face... | Bookmarks | INTEGRA | Nada te turbe | J. B... | Outros marcadore

R / FECHAR | INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGI

Estação: SEROPEDICA-ECOLOGIA AGRICOLA (A601)
Download CSV

Data	Hora	Temperatura (°C)			Umidade (%)			Pto. Orvalho (°C)			Pressão (hPa)			Vento (m/s)			Radiação	Chuva
	UTC	Inst.	Máx.	Min.	Inst.	Máx.	Min.	Inst.	Máx.	Min.	Inst.	Máx.	Min.	Vel.	Dir.	Raj.	KJ/m²	mm
17/02/2021	0000	25,3	25,5	25,1	87,0	87,0	84,0	22,9	22,9	22,4	1004,5	1004,5	1003,4	2,9	225,0	5,2		0,0
17/02/2021	0100	24,7	25,3	24,7	81,0	87,0	81,0	21,3	22,9	21,3	1004,7	1004,9	1004,2	2,2	226,0	5,2		0,0
17/02/2021	0200	24,3	24,9	24,3	84,0	84,0	80,0	21,4	21,4	21,0	1004,9	1004,9	1004,7	0,8	15,0	3,5		0,0
17/02/2021	0300	24,2	24,4	23,9	84,0	87,0	84,0	21,4	21,7	21,4	1005,1	1005,1	1004,6	1,7	329,0	3,7		0,0
17/02/2021	0400	24,2	24,3	24,1	81,0	84,0	81,0	20,7	21,4	20,7	1004,0	1005,1	1004,0	1,9	344,0	4,1		0,0
17/02/2021	0500	24,3	24,4	24,0	79,0	81,0	79,0	20,4	20,8	20,4	1003,2	1004,0	1003,2	2,0	329,0	4,9		0,0
17/02/2021	0600	24,6	24,6	24,3	76,0	80,0	76,0	20,1	20,6	20,1	1002,6	1003,2	1002,6	3,2	315,0	6,5		0,0
17/02/2021	0700	24,5	24,6	24,4	75,0	76,0	75,0	19,8	20,1	19,8	1002,4	1002,6	1002,4	2,7	316,0	6,8		0,0
17/02/2021	0800	24,6	24,6	24,3	75,0	77,0	75,0	19,8	19,9	19,8	1002,6	1002,6	1002,4	3,1	319,0	7,5		0,0
17/02/2021	0900	24,5	24,7	24,5	74,0	75,0	74,0	19,7	19,8	19,7	1003,0	1003,0	1002,6	3,4	322,0	7,9		0,0
17/02/2021	1000	25,1	25,1	24,4	73,0	75,0	73,0	19,9	20,0	19,7	1003,5	1003,6	1003,0	2,8	309,0	6,5	194,13	0,0
17/02/2021	1100	26,3	26,3	25,1	68,0	73,0	68,0	20,0	20,2	19,7	1003,3	1003,6	1003,2	3,1	302,0	6,9	550,06	0,0
17/02/2021	1200	28,3	28,3	26,3	63,0	68,0	62,0	20,5	20,7	19,8	1003,4	1003,5	1003,3	2,2	301,0	7,7	1086,14	0,0
17/02/2021	1300	29,0	29,5	28,3	60,0	62,0	58,0	20,5	20,9	19,8	1003,4	1003,6	1003,4	2,9	294,0	7,6	1507,08	0,0
17/02/2021	1400	30,8	31,1	29,0	55,0	61,0	53,0	20,7	21,1	20,2	1002,9	1003,4	1002,9	2,3	324,0	7,7	1979,76	0,0
17/02/2021	1500	32,1	32,6	30,4	50,0	56,0	48,0	20,3	21,2	19,6	1002,3	1002,9	1002,3	2,2	339,0	7,2	2510,02	0,0
17/02/2021	1600	33,0	33,0	31,9	48,0	52,0	47,0	20,6	21,1	19,9	1001,7	1002,3	1001,7	2,4	345,0	6,3	2374,27	0,0
17/02/2021	1700	33,3	33,7	32,7	47,0	49,0	45,0	20,4	21,2	19,7	1001,0	1001,7	1001,0	2,1	256,0	6,1	2092,15	0,0
17/02/2021	1800	33,4	34,3	33,1	51,0	56,0	45,0	22,0	23,4	19,9	1000,1	1001,0	1000,1	2,4	192,0	5,1	2425,18	0,0
17/02/2021	1900	29,7	34,2	29,6	63,0	63,0	50,0	21,9	22,9	21,4	1000,0	1000,1	999,8	2,5	204,0	6,4	1472,44	0,0
17/02/2021	2000	27,5	29,7	27,5	68,0	70,0	62,0	21,2	22,2	21,2	1000,1	1000,3	999,9	2,7	198,0	6,3	404,47	0,0
17/02/2021	2100	26,4	27,5	26,4	71,0	71,0	68,0	20,7	21,4	20,6	1001,3	1001,3	1000,1	2,0	195,0	6,3	73,90	0,0
17/02/2021	2200	26,0	26,4	25,9	73,0	75,0	71,0	20,8	21,3	20,7	1002,6	1002,6	1001,3	1,2	164,0	5,9	14,81	0,0
17/02/2021	2300	25,4	26,0	25,4	79,0	79,0	73,0	21,4	21,4	20,7	1003,5	1003,5	1002,6	1,4	178,0	5,3		0,0

Obs: os dados devem ser preparados antes do cálculo da ETo; assim, deve-se buscar nas colunas de Max. e Min. os valores máximos e mínimos de T, UR, T_{po} e P. Para vel. vento, considera-se o valor médio e para Rs, a soma dos valores ao longo do dia.

Boletim Agrometeorológico Semanal



Grupo de Pesquisa Água e Solo em Sistemas Agrícolas - GPASSA
UFRRJ/Instituto de Tecnologia/Departamento de Engenharia
contato: carvalho@ufrrj.br

Fonte: Estação meteorológica do INMET (www.inmet.gov.br)
Localização: Seropédica/RJ **Latitude**: 22°48' S **Altitude**: 34,0 m

Data	T_{max}	T_{min}	UR_{med}	Rs	Vv	Ppt	ETo
	(°C)		(%)	($MJ.m^{-2}.dia^{-1}$)	($m.s^{-1}$)	(mm)	($mm.dia^{-1}$)
12/03/18	35.8	21.1	59.5	25.51	1.9	0.0	5.8
13/03/18	30.0	23.8	76.0	11.72	1.3	0.0	2.9
14/03/18	36.9	22.6	66.0	24.25	1.9	0.0	5.7
15/03/18	35.2	23.8	70.0	21.47	2.6	20.8	5.2
16/03/18	32.2	26.2	72.5	12.63	2.8	0.0	3.7
17/03/18	29.2	23.8	79.0	8.55	1.2	0.4	2.2
18/03/18	32.8	22.9	70.5	20.22	1.4	0.0	4.4

T_{max} - temperatura máxima; T_{min} - temperatura mínima; UR_{med} - umidade relativa média; Rs - radiação solar
Vv - velocidade do vento; Ppt - precipitação; ETo - evapotranspiração de referência (Penman-Monteith FAO 56)