



INSTITUTO
SUPERIOR DE
AGRONOMIA
Universidade de Lisboa

Departamento de Ciências e
Engenharia de Biosistemas

REGA E DRENAGEM

2.2. PROGRAMAÇÃO DA REGA

2.3. CONDUÇÃO DA REGA

- 2.3.1 Conceitos
- 2.3.2 Métodos de condução da rega

Baseados no solo

Baseados na planta

Balanço hídrico

Detecção remota

Combinação de métodos

2.2.1. CONCEITOS

Programação da rega = planeamento

- Projecto de rega
 - dimensionamento de reservatórios
 - dimensionamento do sistema de distribuição
 - dimensionamento do sistema rega

- Determinação das necessidades de rega anuais no início da campanha de rega
 - que culturas regar?
 - que áreas cultivar?

- Determinação das necessidades de ponta
 - Haverá caudais suficientes no período de ponta?

Séries climáticas

Séries climáticas
Previsões climáticas

2.3.1. CONCEITOS

Condução da rega = fornecer a água ao solo na **quantidade** e no **tempo** determinado para atingir o **objectivo** proposto
(quanto e quando)

estão interligados

Conjugação de informação da

- Solo – RU, RFU, capacidade de infiltração
- Clima – consumo (*ETc*)
- Planta – sistema radicular, sensibilidade ao stress
- Sistema de rega
- Mão de obra – só poder regar em certos dias, técnica da mão de obra disponível/requerida
- Disponibilidade de água do perímetro de rega (a pedido, rotação)

- Maximizar a produção
- Maximizar produção/unidade de água (= produtividade da água)
- Maximizar lucro

Quando regar – implica a definição de um limiar que desencadeia a rega

Quanto regar – depende do grau de esgotamento da RU admitido, do sistema de rega, ...

Rega a menos

Perdas de produção

- Stress hídrico
- Menor resistência a pragas e doenças

Perdas de qualidade

- Calibre
- Aspecto (rachaduras, forma, ...)
- Composição química

Rega a mais

Perdas de produção

- Encharcamento
- Perdas de nutrientes (nitratos)
- Problemas sanitários

Perdas de qualidade

- Composição química

Diminuição do lucro

- Maiores custos com água
- Maiores custos com bombagem
- Maiores custos com fertilizantes
- Maiores custos com mão de obra

Problemas ambientais

- Maior consumo de água
- Maior consumo de energia
- Poluição dos aquíferos e águas superficiais (drenagem, escoamento superficial)
- Erosão do solo

Opções comuns

1. Fixar a dotação (e variar o intervalo entre regas $\Rightarrow D/ETc^{(*)}$) – determinado pelo solo e sistema de rega
 - rega sob pressão: dotações de rega mais flexíveis
 - rega de superfície: não permite dotações de rega pequenas
2. Fixar o intervalo entre regas (e variar a dotação $\Rightarrow ETc \times \Delta t$)
 - perímetro de rega com fornecimento por rotação
 - limitações de mão de obra

(*) lembrar que, na ausência de outras fontes de água (precipitação, ascensão capilar, variação do armazenamento do solo) ou perdas de água (drenagem profunda, escoamento superficial), necessidades de rega = necessidades hídricas

2.3.2. MÉTODOS DE CONDUÇÃO DA REGA

- Baseados na observação da água do solo
- Baseados na planta
- Baseados no clima
- Baseados em detecção remota

Escolha do método a utilizar deve ter em conta factores

- científicos
- económicos
- pessoais



Tem que ser fácil de pôr em prática senão agricultor abandona o seu uso

2.3.2.1 MÉTODOS BASEADOS NA ÁGUA DO SOLO

Os métodos de condução da rega baseados na água do solo permitem também:

- determinar a quantidade de água de rega infiltrada
- determinar a quantidade de água retirada pelas raízes e o padrão de extracção de água
- determinar quando a rega deve cessar
- ajudar a manter o teor de água no solo dentro de limites adequados para as plantas

Permitem responder quer ao **quando** quer ao **quanto** regar

Problemas

Seleccção da localização da medição:

- dentro da parcela: variabilidade espacial das características do solo
- dentro da zona radicular: profundidade /localização que seja representativa

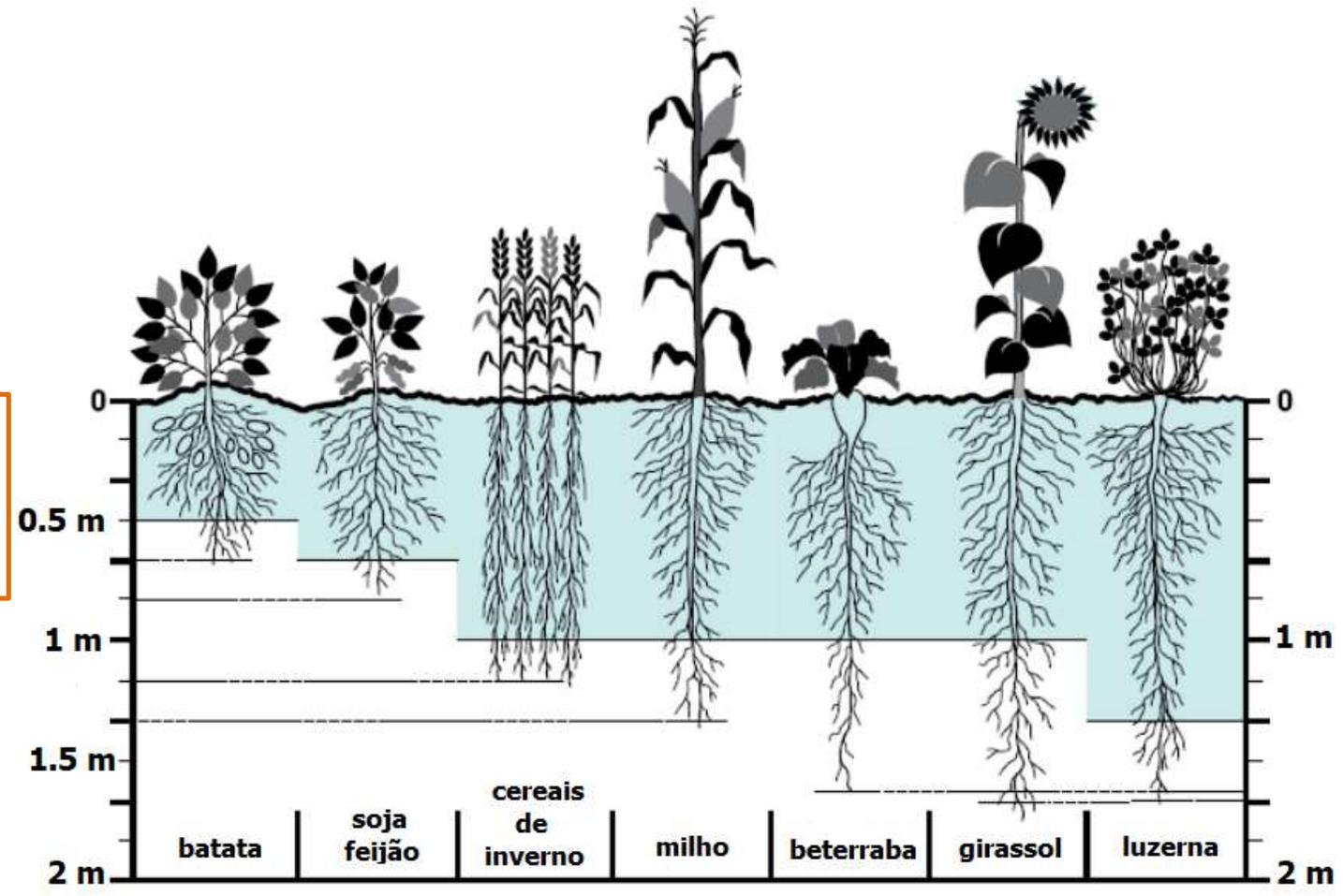
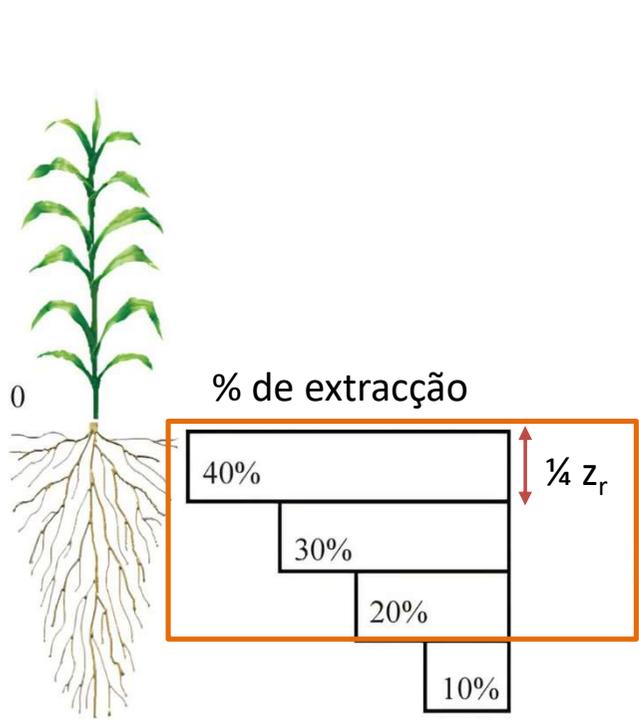
Profundidade radicular efectiva

Espessura da camada de solo donde as plantas extraem 80-90% das suas necessidades hídricas \Rightarrow é esta a profundidade de solo que deve ser considerada para a condução da rega e não a totalidade da espessura de solo explorada pelas raízes

É nesta camada que a densidade radicular é mais elevada

A profundidade radicular depende de:

- planta
- tipo de solo
- tipo de rega



Secção de Engenharia Rural

Aparência e consistência do solo



Também permite avaliar:

- a profundidade radicular
- a frente de humedecimento

Sandy loam and fine sandy loam soils



25-50% available moisture



50-75% available moisture



75-100% available moisture

Sandy clay loam, loam and silt loam soils



25-50% available moisture



50-75% available moisture



75-100% available moisture

Clay, clay loam



25-50% available moisture



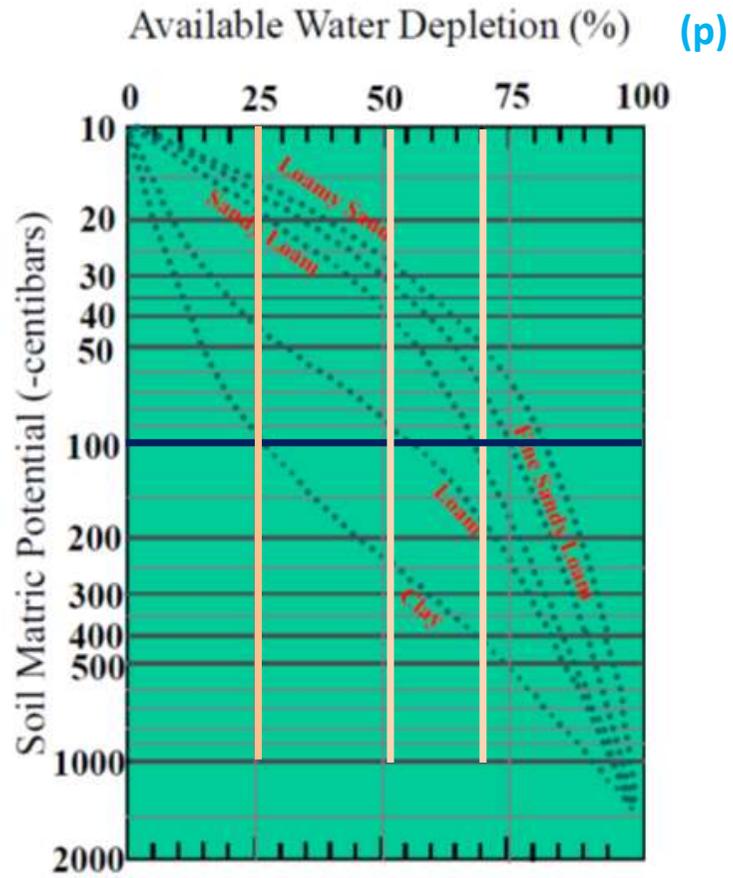
50-75% available moisture



75-100% available moisture

Medição da tensão de água no solo

- tensiómetros
- blocos de gesso / GMS (granular matrix sensors)



Tipo de solo	Limiar que desencadeia a rega
Arenoso	40 – 50 cbar
Franco arenoso	50 – 70 cbar
Franco	60 – 90 cbar
Argilo-limoso e argiloso	90 – 100 cbar

Table 13.5. Recommended soil moisture tensions for various crops (after Taylor, 1965)

Crop	Tension (centibars) *	Crop	Tension (centibars) *
Alfalfa	80–150	Corn (sweet)	50–80
Alfalfa seed		Deciduous tree	50–80
Pre-bloom	200	Grain (small)	
Bloom	400–800	Vegetative	40–50
Ripening	800–600	Ripening	70–80
Broccoli		Grapes	
Early	45–55	Early	40–50
Post-bud	60–70	Mature	100
Cabbage	60–70	Lettuce	40–60
Cantaloupe	35–40	Onion	45–65
Carrot	55–65	Potato	30–50
Cauliflower	60–70	Strawberry	20-30
Celery	20–30	Tomato	60-150
Citrus	50–70		

Medição da tensão de água



Vantagens

- baratos
- medem a tensão de água no solo → variável mais ligada à disponibilidade de água no solo para as plantas que o teor de água *per se*
- leitura rápida e simples
- causam perturbação mínima do perfil do solo
- podem ser ligados a *dataloggers*
- não são afectados pela salinidade
- resposta rápida

Desvantagens

- intervalo de funcionamento apenas dos 0 aos 80 cbar
→ mais adequados para solos ligeiros e médios que solos pesados
→ mais adequados a regas frequentes (localizada, pivot)
- cuidado na instalação (contacto com o solo)
- exigem manutenção (encher, retirar bolhas de ar ...)
- medição é pontual – só no local e profundidade a que estão instalados → é preciso vários para monitorizar toda a parcela / zona radicular

Preparação dum tensiómetro

- Saturar a cápsula



- Retirar o ar



- Encher a cana



Instalação dum tensiómetro

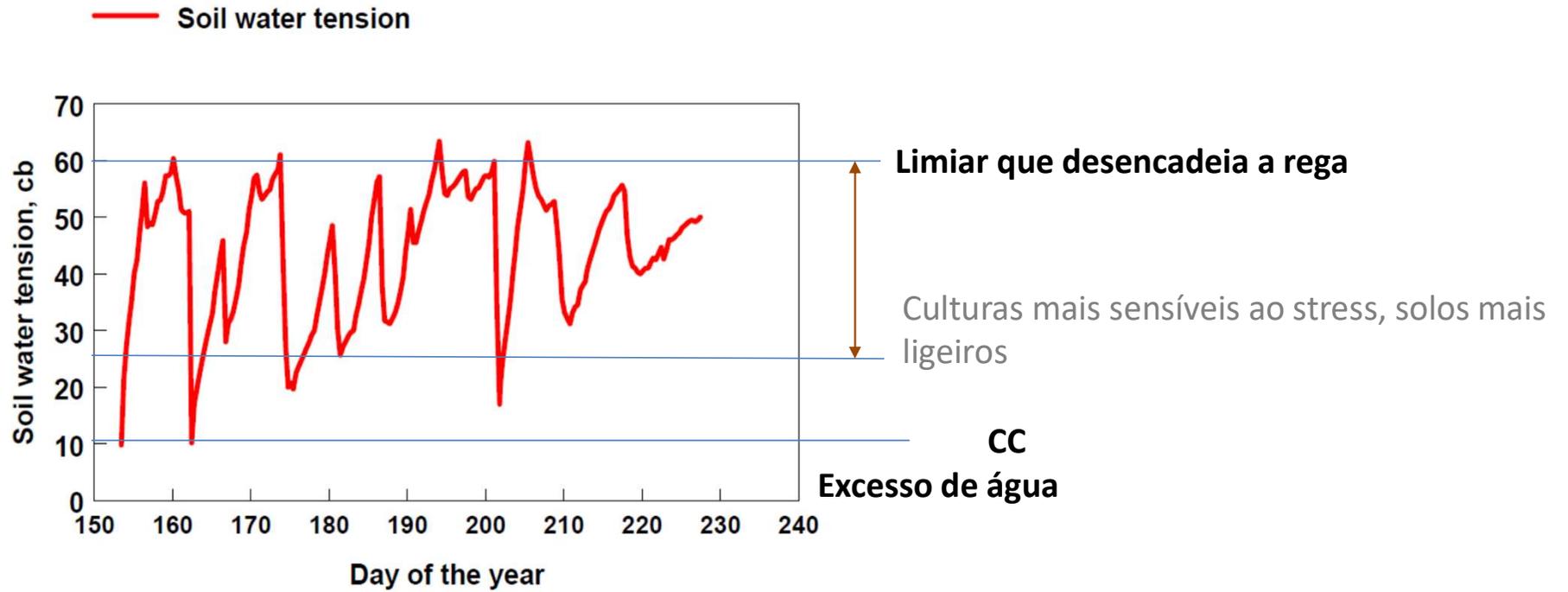
- Abrir um orifício



- Preparar e colocar um pouco de “papa” de solo antes da instalação



Condução da rega com tensiómetros



Medição da tensão de água no solo – blocos de gesso e Granular Matrix Sensors (Watermark)

Vantagens

- mais baratos que tensiómetros – pode-se usar mais sensores
- maior gama de leitura
- podem ligar-se a dataloggers (→ monitorização contínua, transmissão de dados)

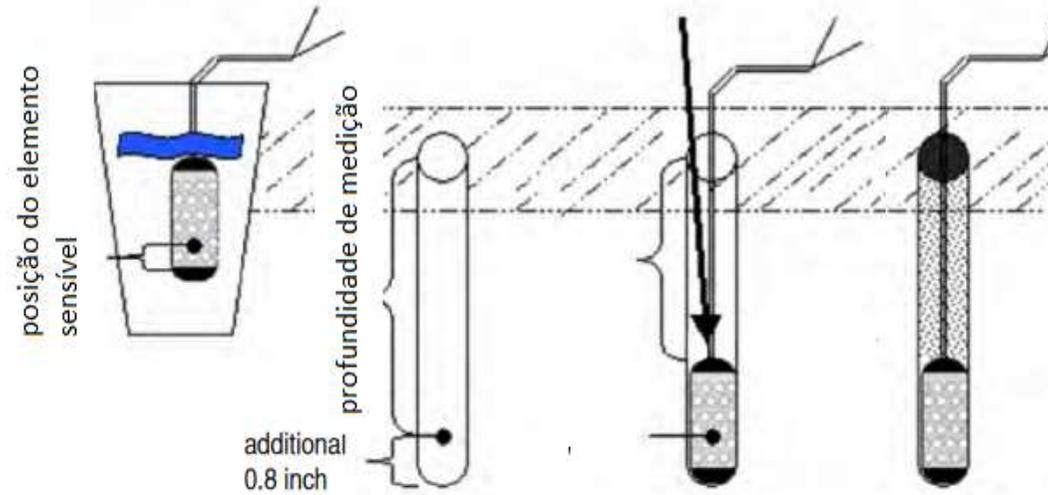


Desvantagens

- mais lentos na resposta
- pouco responsivos nas zonas de humidade mais elevada
- blocos de gesso têm vida útil reduzida (vão-se dissolvendo)
- salinidade elevada afecta os valores
- temperatura afecta os valores
- sujeitos a histerese
- medição pontual

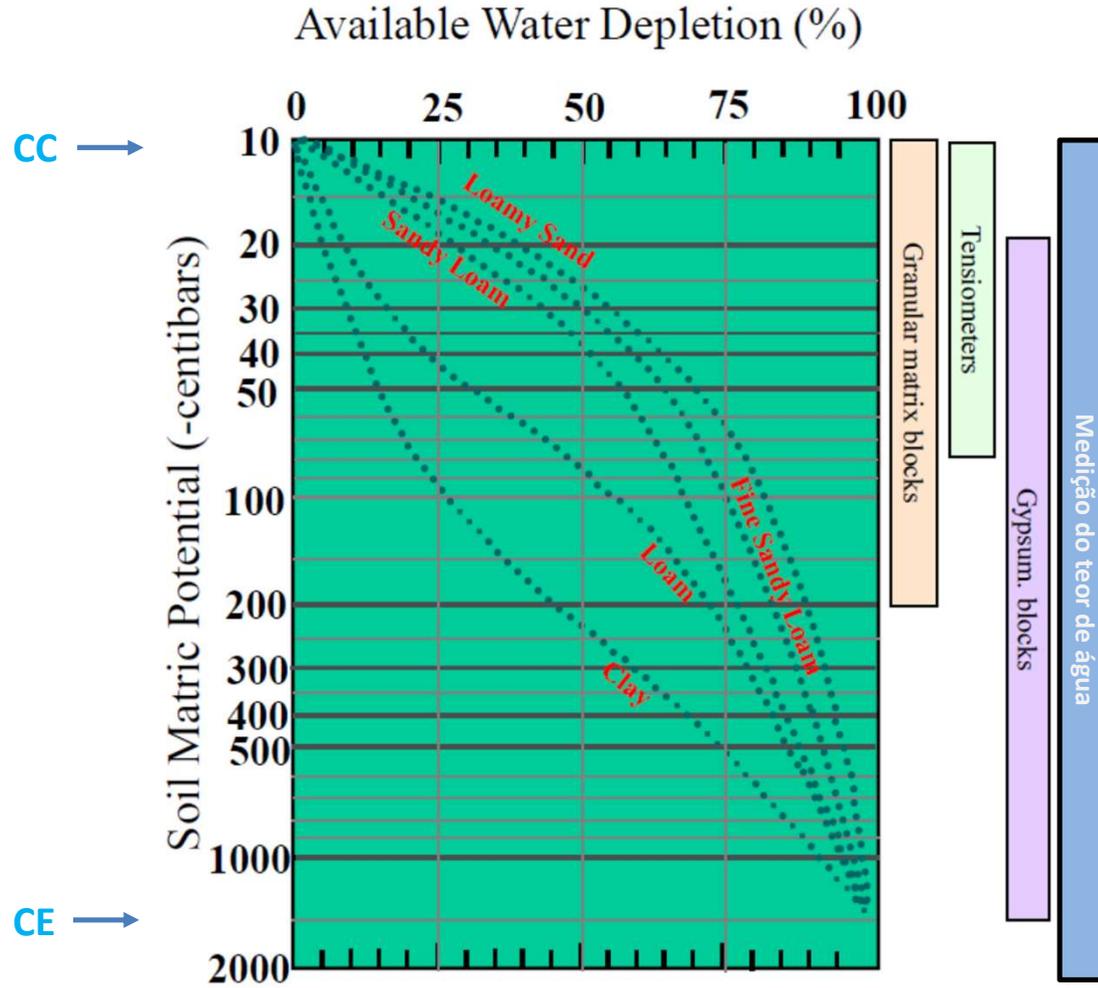


Preparação e instalação dum Watermark



1	2	3	4
colocar em água até atingir a saturação	abrir um buraco no solo com uma sonda até à profundidade desejada + distância do elemento sensível à extremidade	inserir o sensor no solo	recolocar o solo, evitando a formação de bolsas de ar

Gamas de medição

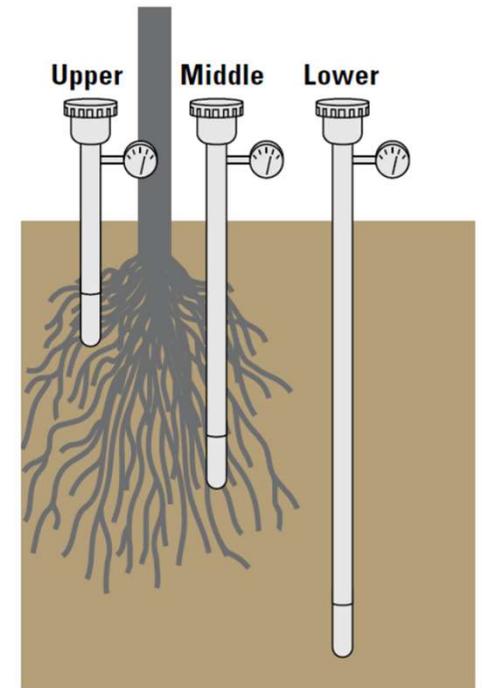
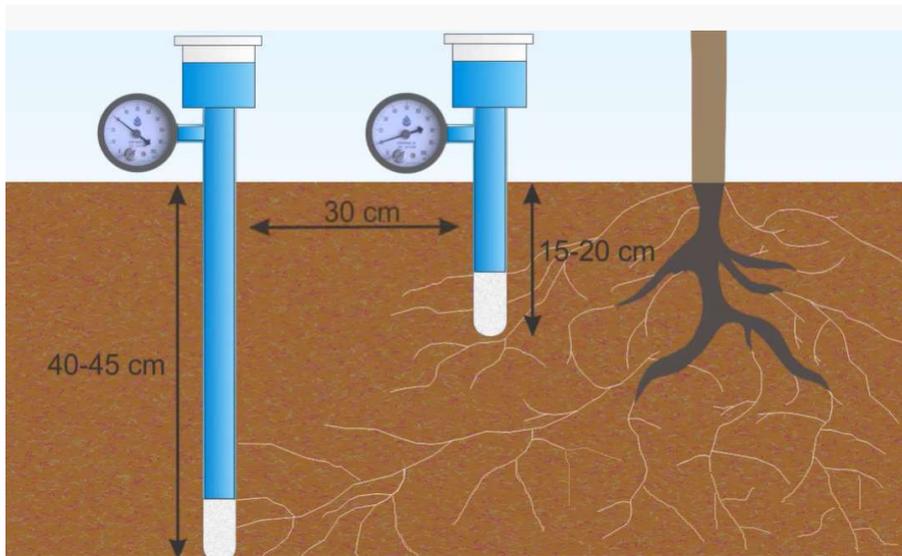


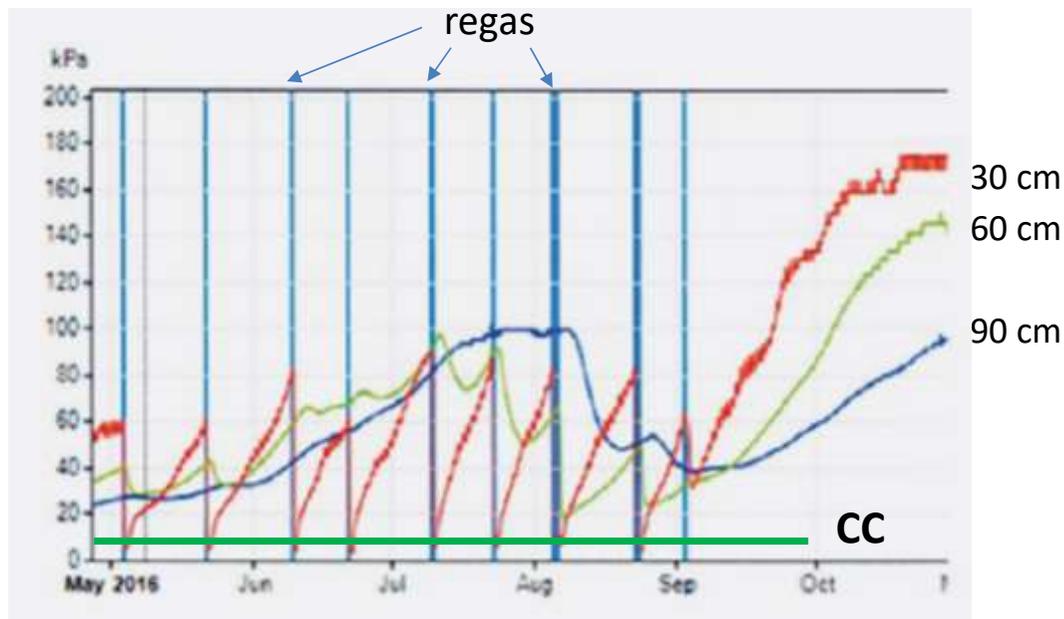
Seção de Engenharia Rural

Onde colocar os sensores?

3 profundidades

- Na camada superficial, onde há maior quantidade de raízes (0 – 30 cm) → desencadeia a rega, evolução do bolbo molhado
- Na camada inferior do sistema radicular → pára a rega
- Abaixo da zona radicular → permite ver se há drenagem (rega a mais) ou consumo (rega a menos)





Exemplo de condução da rega com Watermarks

- O sensor dos 30 cm respondeu à rega e mostra que a camada superficial foi levada à CC em todas as regas
- O sensor dos 60 cm acusou a rega mas a camada não foi preenchida até à CC (excepto com a rega no início de Agosto). Também existe uma tendência de aumento progressivo da tensão de água no solo
- O sensor dos 90 cm mostra que há extracção a essa profundidade e que não houve reposição de água até ao mês de Agosto

} **rega insuficiente**

Medição do teor de água no solo

Método gravimétrico

Amostra é seca em estufa a 105°C até peso constante

$$\theta_p = (\text{massa de solo húmido} - \text{massa de solo seco}) / \text{massa de solo seco}$$

Vantagens

- simples
- barato

Desvantagens

- trabalhoso
- resultados não são imediatos
- não permite medições sempre no mesmo local
- necessário conhecer d_{ap}

Métodos baseados na constante dielétrica do solo

	Constante dielétrica
Ar	1
Quartzo	3.8
Água	80



Medição do teor de água no solo com base nas propriedades dieléctricas

Tipos

- **Time domain reflectometry (TDR):** medem a velocidade de propagação de um impulso eléctrico no solo
- **Frequency domain reflectometry (FDR)** medem a frequência do impulso eléctrico alterado pelo meio dieléctrico
- **Sondas capacitivas:** medem o tempo que um condensador leva a carregar, servindo o solo como meio isolante. O tempo de carga é função da constante dieléctrica do solo (que por sua vez é função do teor de humidade)
- **Ground penetrating radar**

Vantagens

- resposta rápida
- boa resolução vertical, dada a pequena esfera de influência
- podem fazer medição em contínuo
- boa sensibilidade a pequenas mudanças de humidade
- não afectada pela salinidade (sondas capacitivas)

Desvantagens

- esfera de influência reduzida (3 cm)
- contacto entre o tubo/sensor deve ser perfeito, sem bolhas de ar
- leituras são influenciadas pela temperatura
- preço
- embora venham com curvas de calibração de fábrica, é sempre bom confirmar os valores/fazer calibração

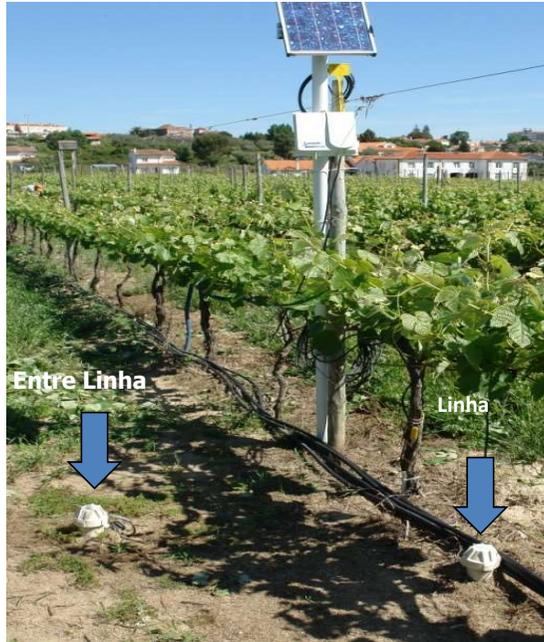
Sondas TDR

Os sensores são normalmente constituídos por 2 ou 3 guias metálicas paralelas, que funcionam como linhas de transmissão. Uma corrente eléctrica é gerada pelo sensor, desloca-se ao longo das sondas e quando chega à extremidade é reflectida de volta ao sensor. O tempo que a corrente demora a fazer o percurso (e, conseqüentemente a velocidade da corrente eléctrica ao longo da guia) é função do teor de humidade



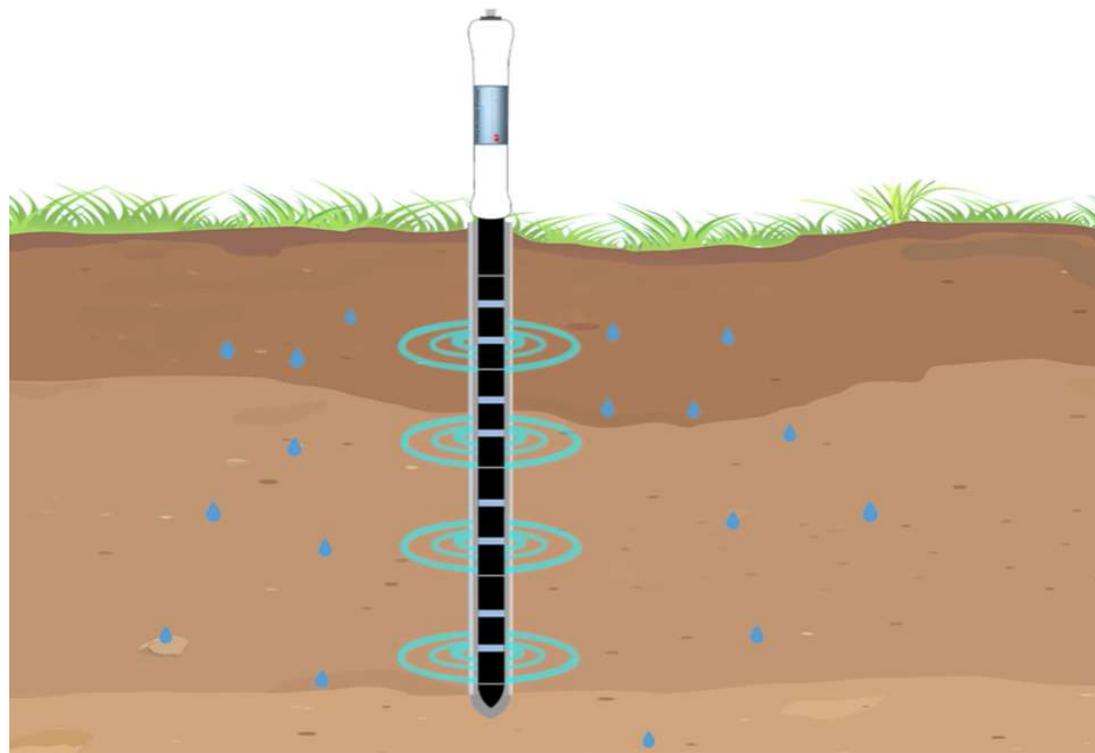
Sondas capacitivas

EnviroScan



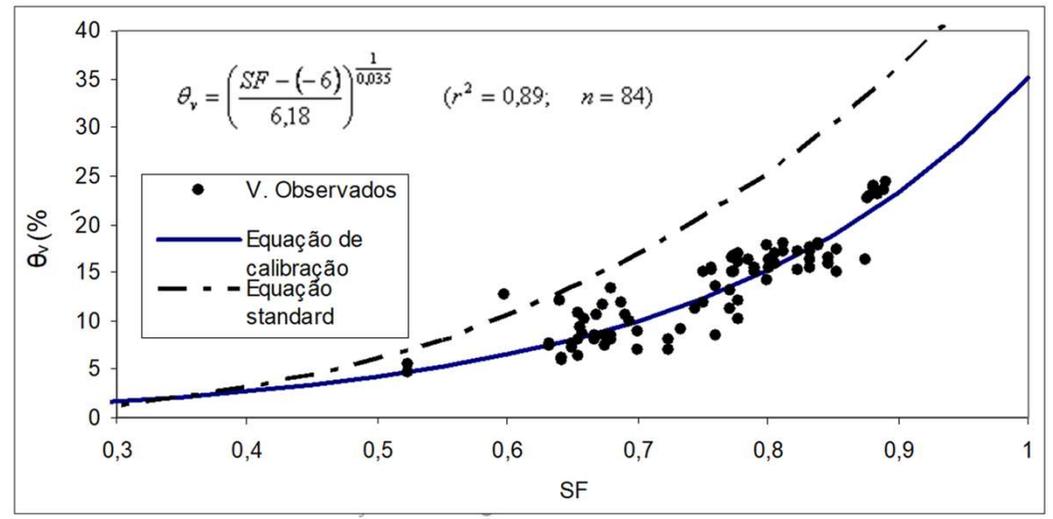
Diviner



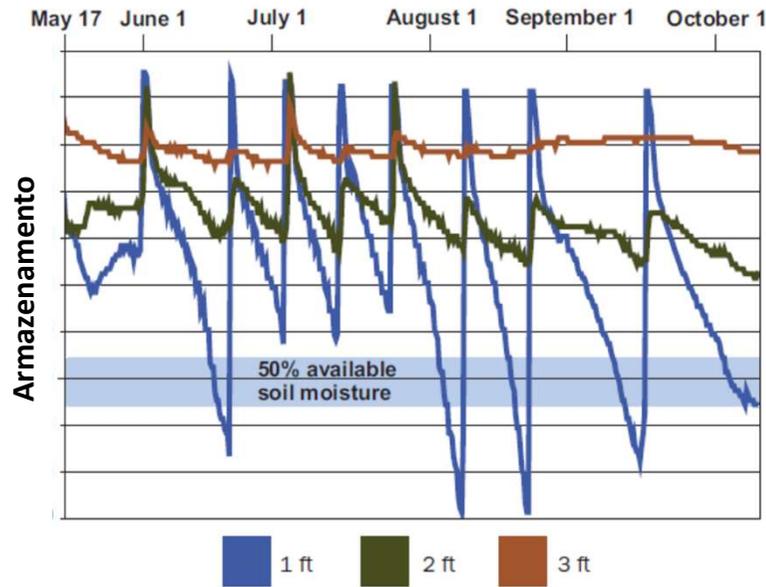


Secção de Engenharia Rural

Calibração da sonda capacitiva



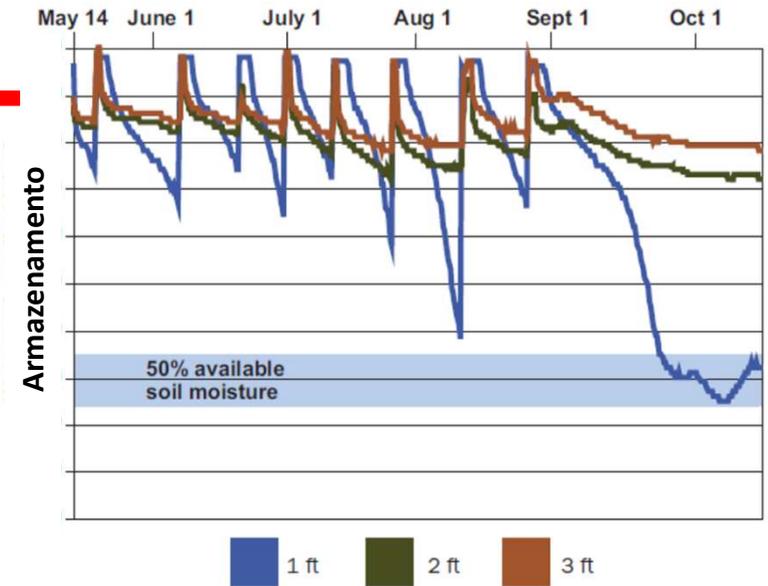
Utilização das leituras das sondas de humidade para monitorizar as regas

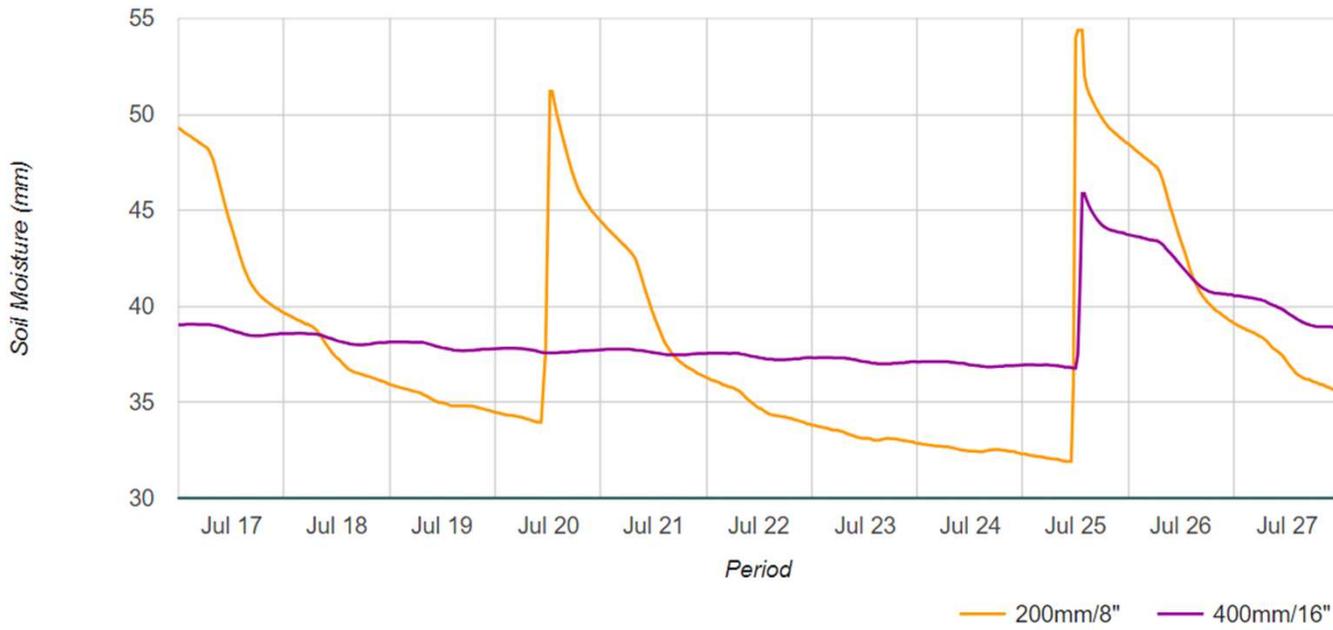
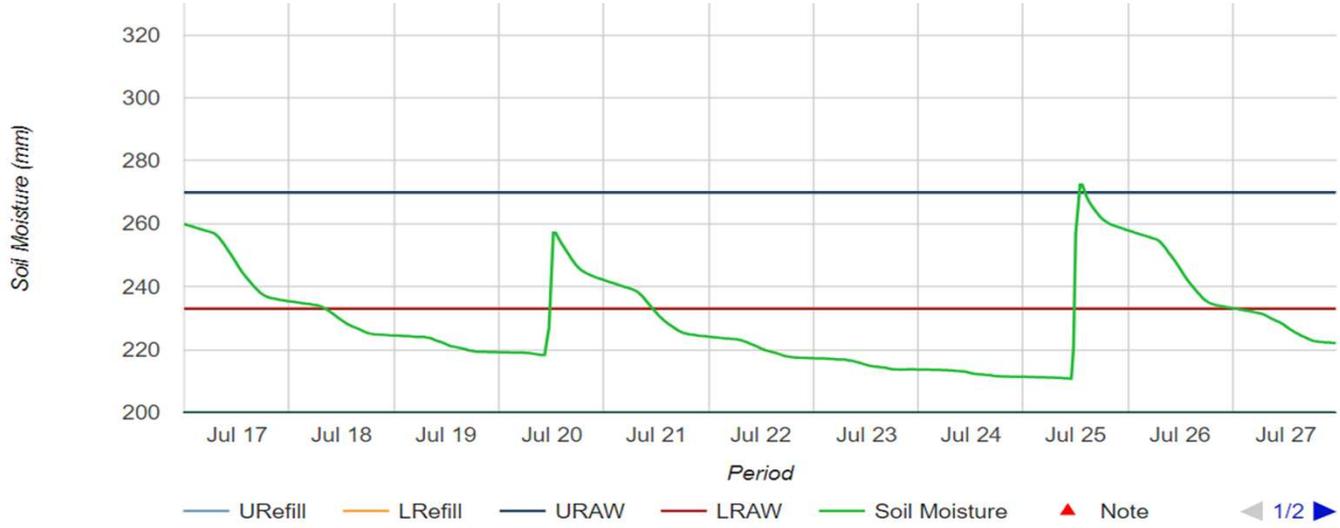


→ nível ± constante → quantidade de rega foi adequada

→ camada superficial secou muito mas havia água suficiente na camada seguinte

Rega a mais ←





Ground penetrating radar

Princípio de funcionamento: um emissor gera um sinal que:

- é transmitido através do solo, ou
- é reflectido pelo solo

até atingir um receptor. A onda recebida pelo receptor está relacionada com a constante dieléctrica do solo (= f(teor de água do solo)

Desvantagens

- menos preciso que através do solo
- só mede a humidade nos primeiros 10 cm de solo

Vantagens

- não requer contacto com o solo, podendo ser instalado em drone ou satélite
- permite medir vastas extensões de terreno

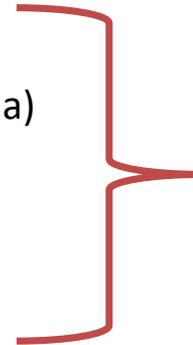


2.3.2.2 MÉTODOS BASEADOS NAS PLANTAS

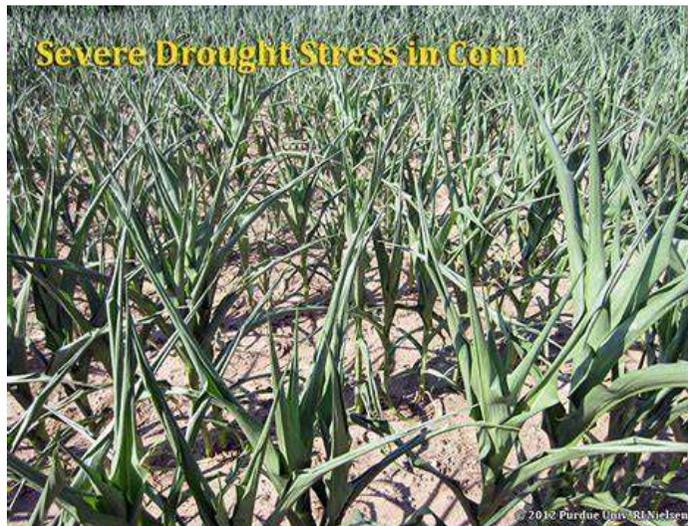
- ❑ O objectivo primário da rega é fornecer água de modo a cobrir as necessidades hídricas das plantas
- ❑ A monitorização das plantas é o método mais directo de condução da rega
- ❑ A resposta das plantas reflecte a disponibilidade de água no solo e a demanda evaporativa da atmosfera
- ❑ É preciso relacionar os valores obtidos nas plantas como teor de água no solo para determinar o **quanto** regar

Métodos baseados nas plantas – aparência

- aparência
- condutância estomática (porometria)
- potencial hídrico (foliar, do ramo; de base, ao meio dia)
- fluxo de seiva (ET)
- variação do diâmetro (do tronco, dos frutos)
- turgescência
- temperatura do coberto



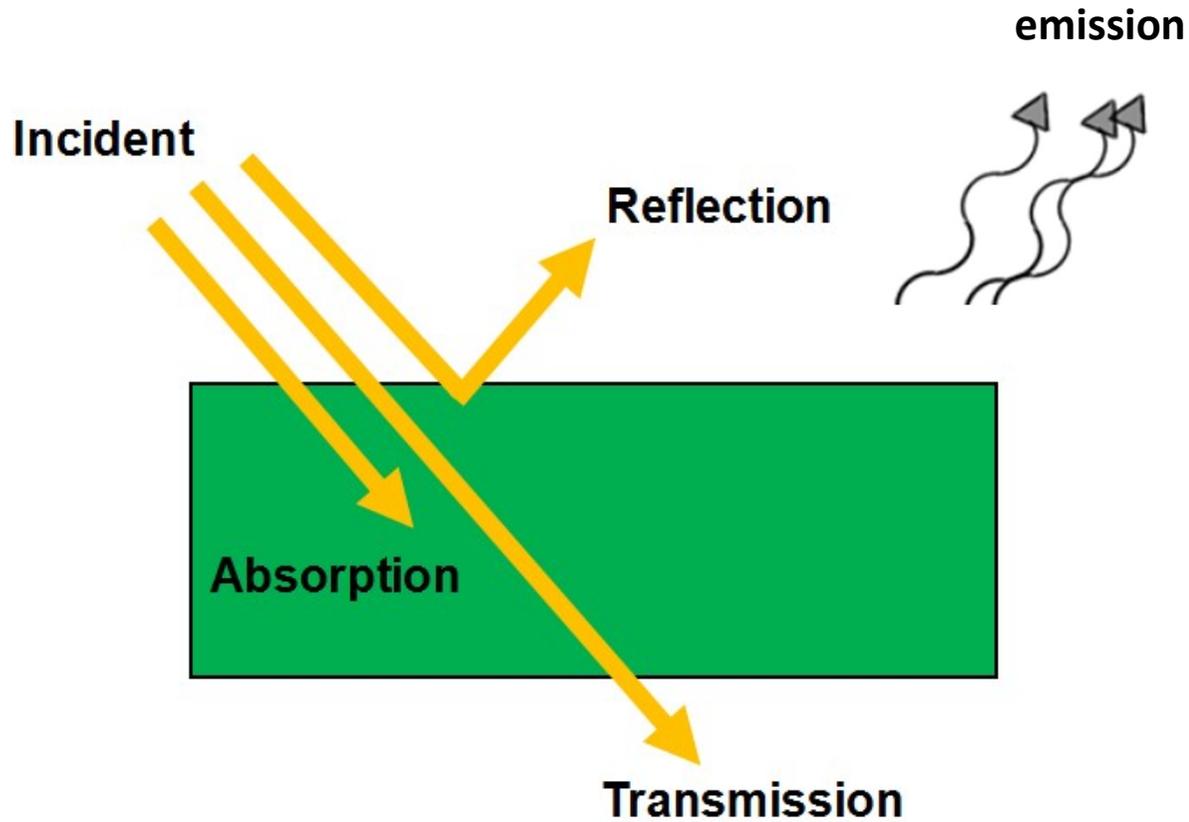
Prof^a TP



Métodos baseados nas plantas – aparência

- cor
 - enrolamento das folhas
 - emurchecimento
- ❑ método fácil e rápido mas
 - ❑ quando os sinais de stress se tornam evidentes, o nível de stress hídrico é já demasiado elevado e a perda de produção é inevitável

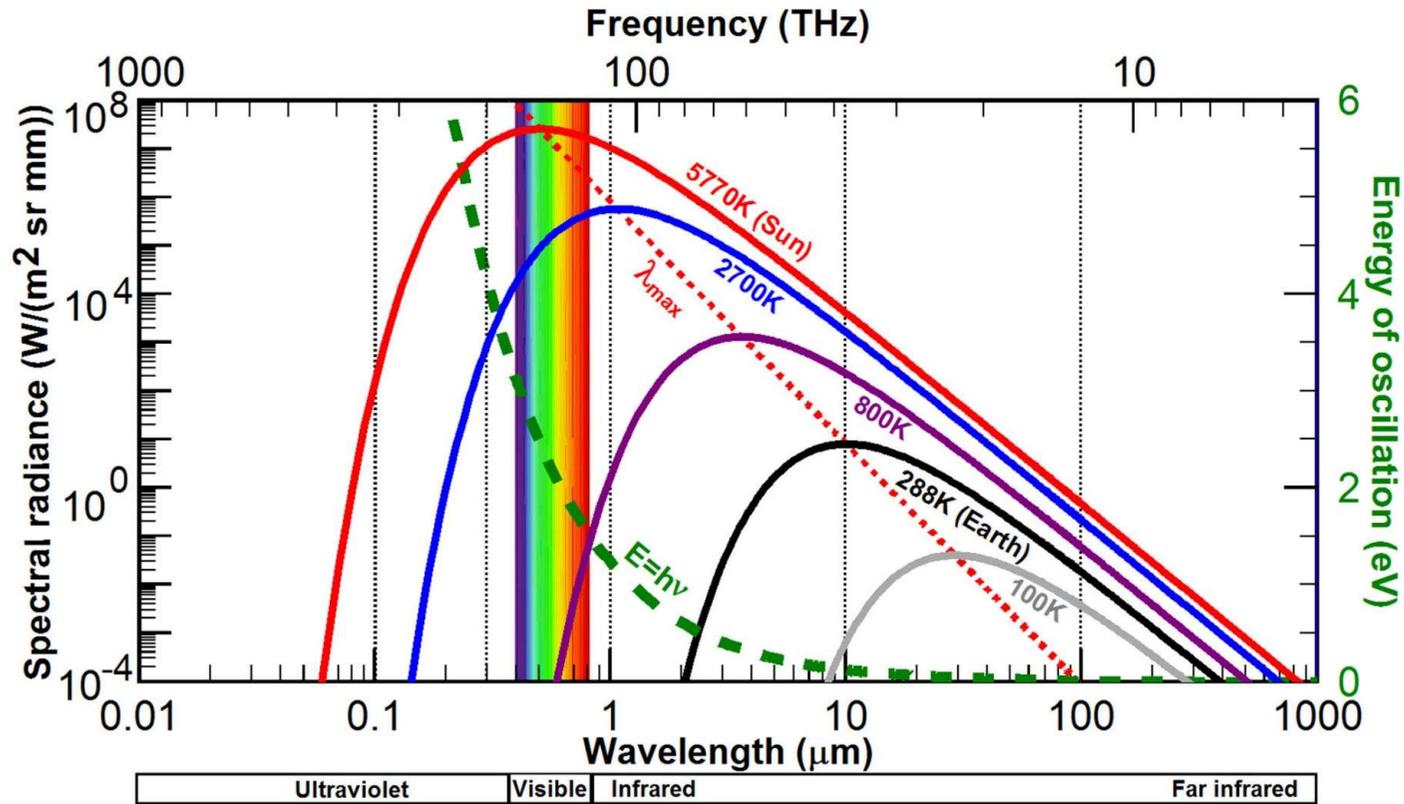
Métodos baseados nas plantas – temperatura do coberto



$$\alpha + r + \tau = 1$$

$$\alpha = \varepsilon$$

$$\varepsilon = 1 \rightarrow \text{corpo negro}$$

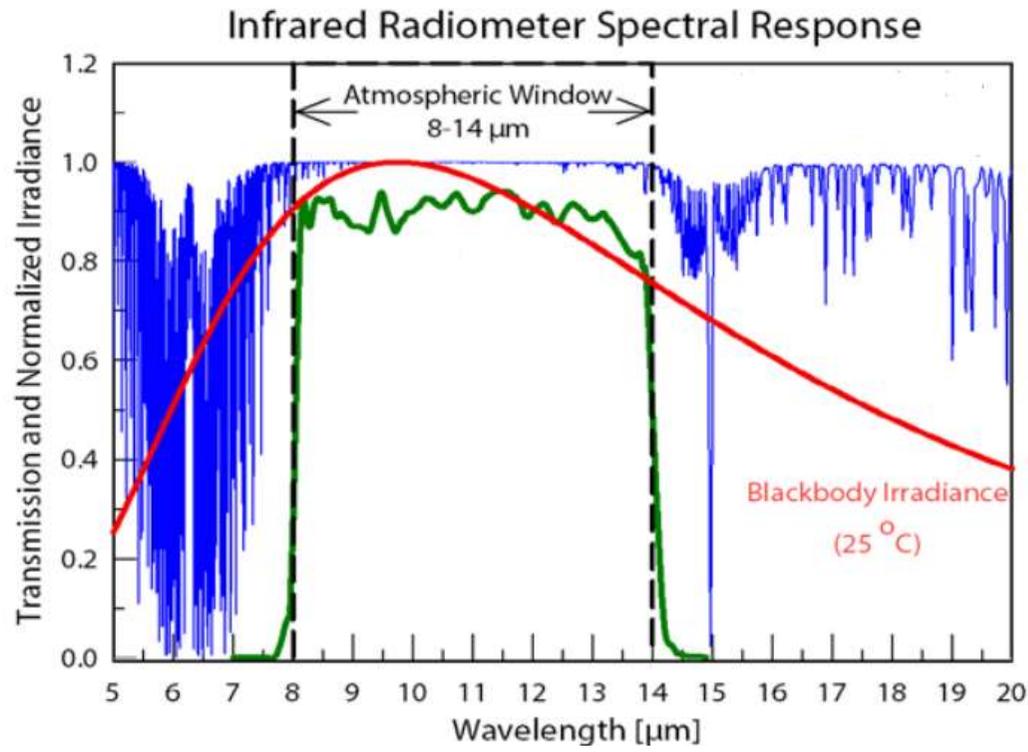


BLACKBODY RADIATION

$$E(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

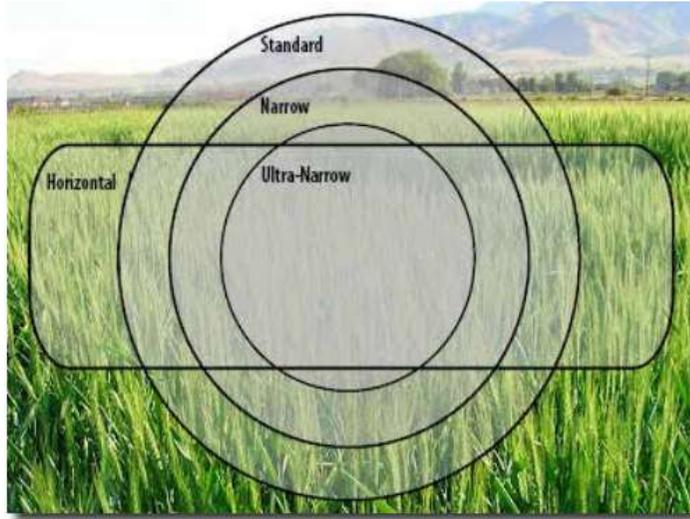
$$T = \frac{2.9 \times 10^{-3}}{\lambda_{max}}$$

$$\frac{P}{A} = e\sigma T^4$$

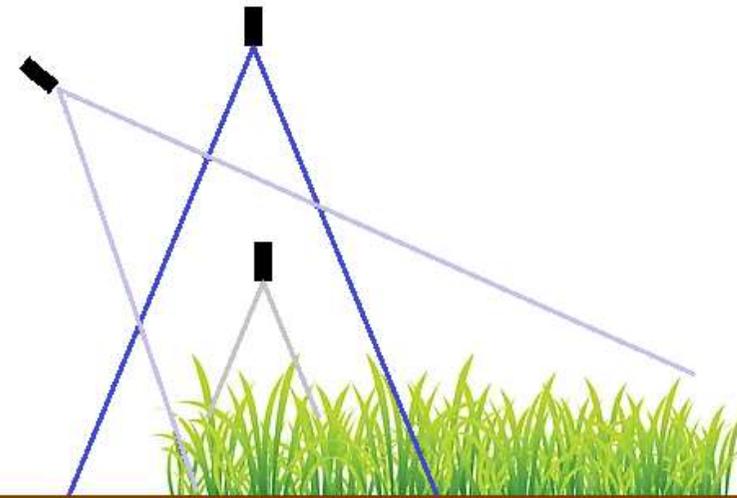
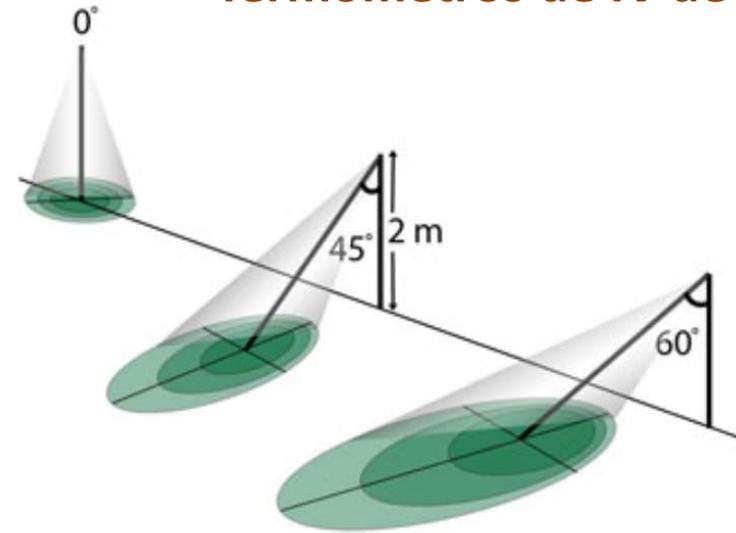


Seção de Engenharia Rural





Termómetros de IV de uso agrícola



Secção de En

Vantagens

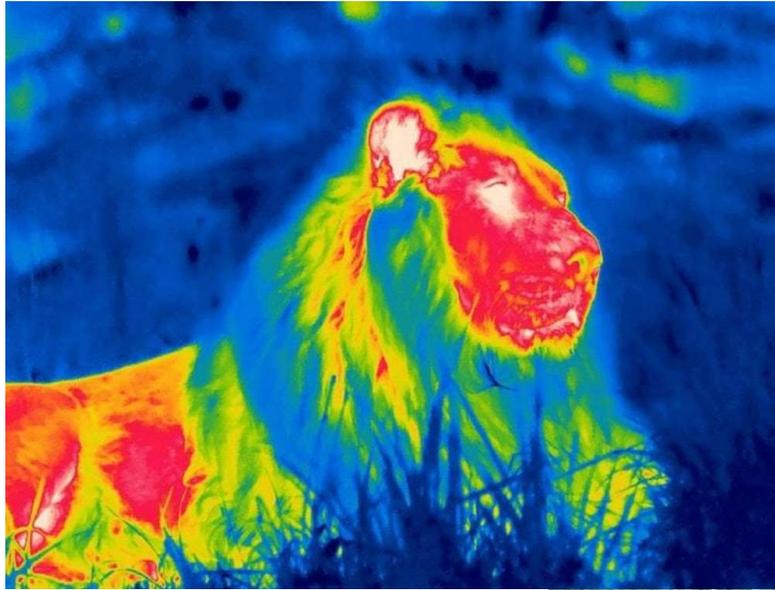
- uso remoto e registo contínuo
- permite monitorizar grandes áreas
- medição inclui várias plantas



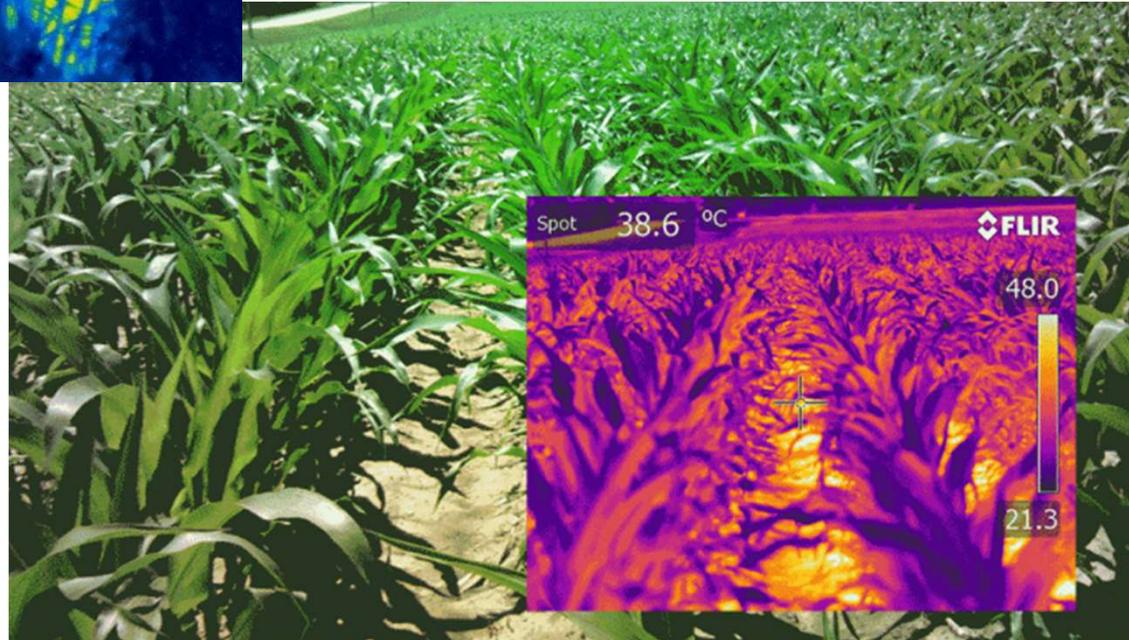
Desvantagens

- temperatura depende também de factores ambientais
- necessário garantir que o aparelho só mede a temperatura das folhas transpirantes (evitar solo, bandeiras do milho)



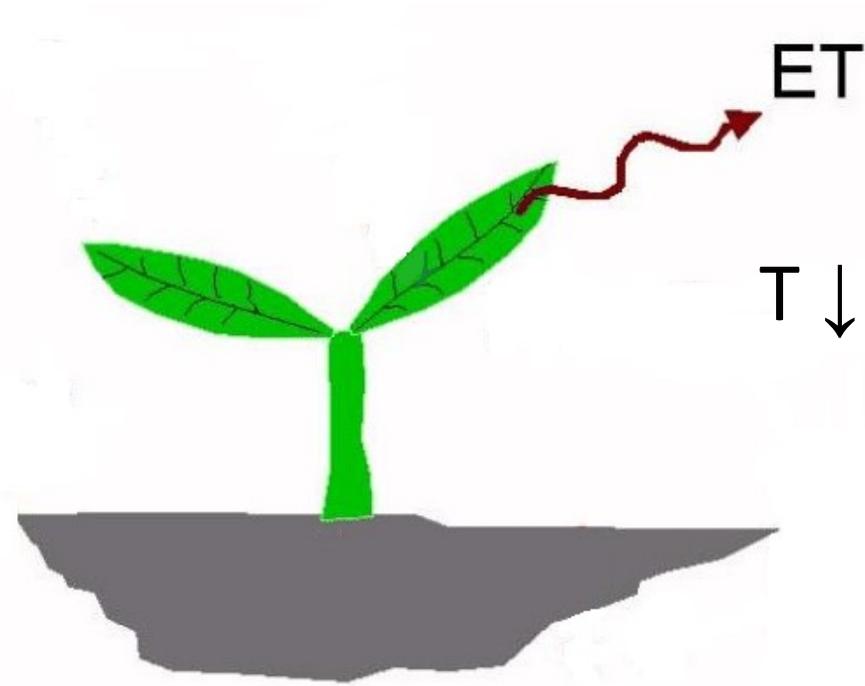


Câmaras térmicas



Índices de stress hídrico

- **Stress Degree Day (SDD)**
- **Canopy Temperature Variability (CTV)**
- **Temperature Stress Day (TSD)**
- **Time Temperature Threshold (TTT)**
- **Crop Water Stress Index (CWSI)**



Índices de stress hídrico

- **Stress Degree Day (SDD)**

$$\text{SDD} = T_c - T_a$$

- Simples
- Diferença depende das condições climáticas, podendo mesmo ser > 0 para taxas de transpiração pequenas

- **Canopy Temperature Variability (CTV)**

Variabilidade da temperatura entre plantas aumenta à medida que se esgota a RFU

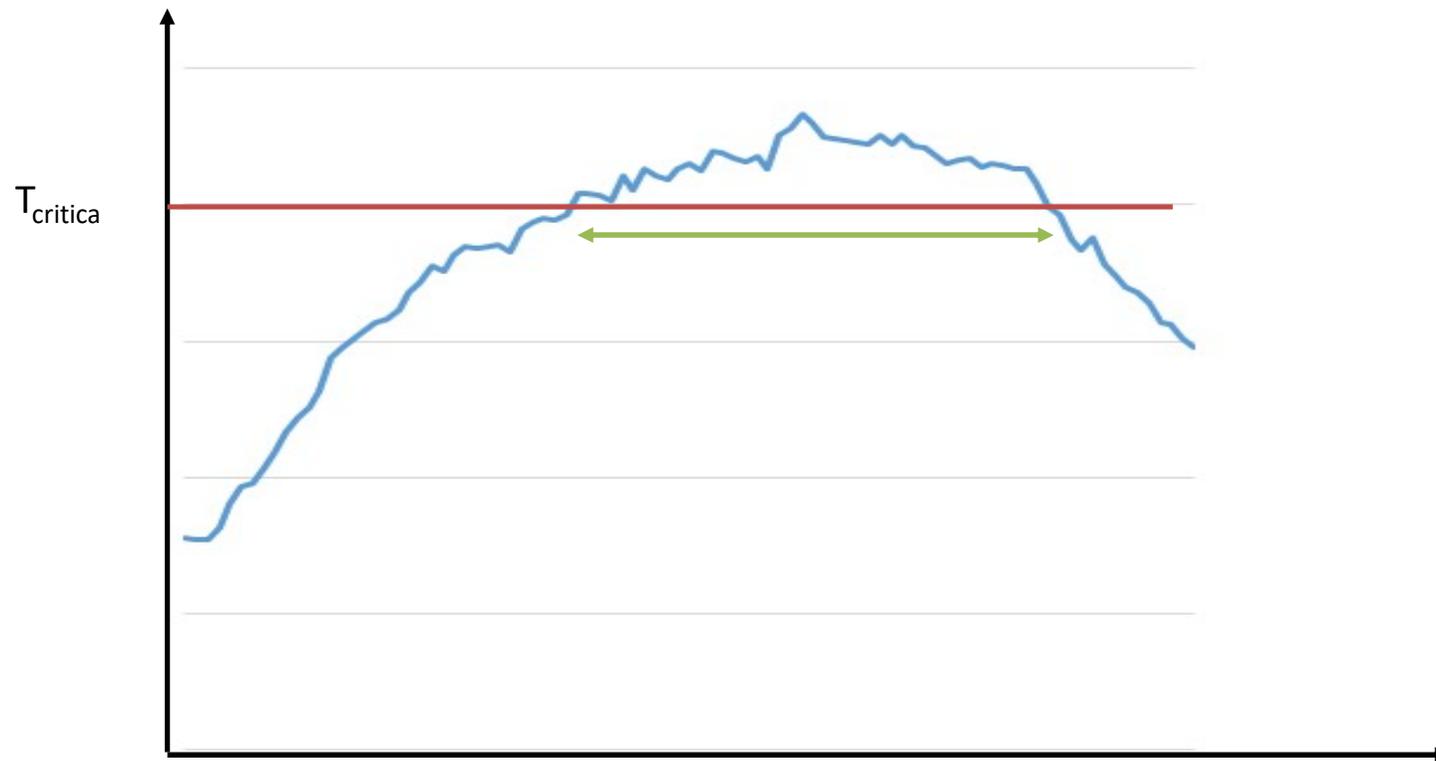
- **Temperature Stress Day (TSD)**

$$\text{TSD} = T_c - T_{c \text{ cult bem regada}}$$

Índices de stress hídrico

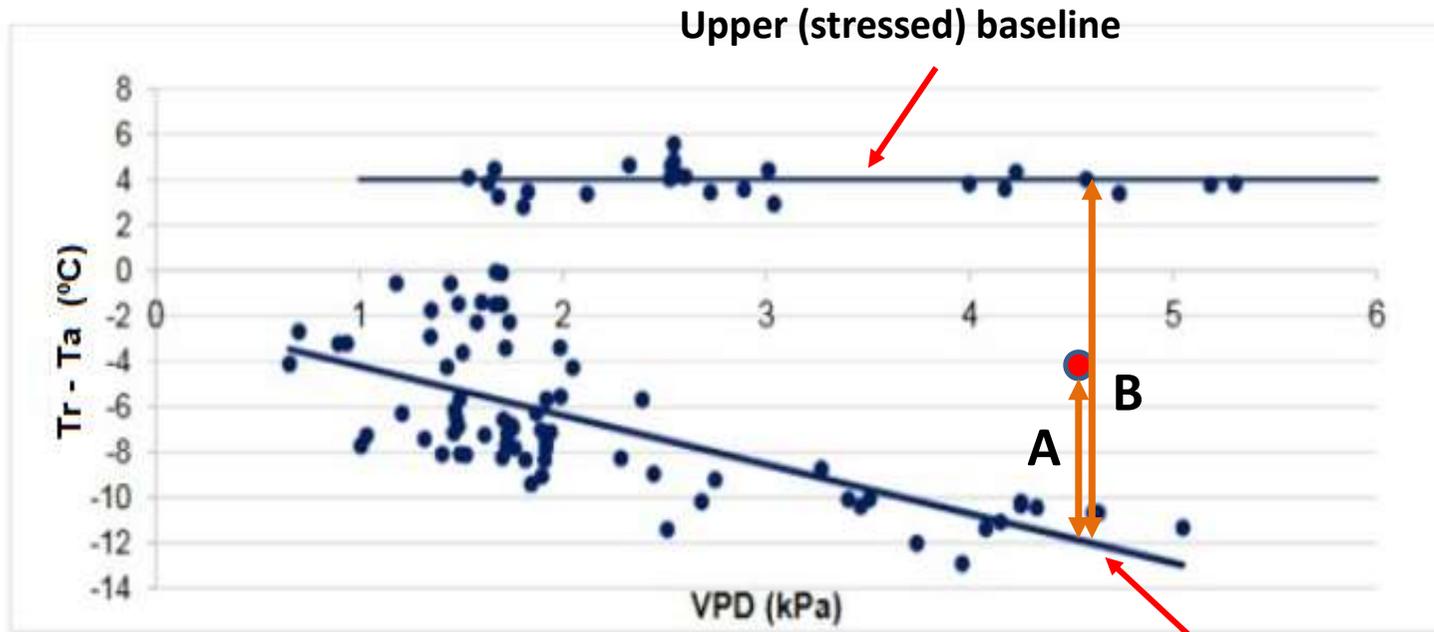
- Time Temperature Threshold (TTT)

tempo acumulado quando a T_c ultrapassa o valor crítico



Índices de stress hídrico

- Crop Water Stress Index (CWSI)



Baselines são f (Rn, vento)



- quando determinados empiricamente só devem ser usados no local e hora a que foram determinados
- variam com o grau de cobertura do solo
- variam ao longo do ciclo

$$CWSI = \frac{A}{B} = 1 - \frac{ET}{ET_c}$$

2.3.2.3 MÉTODOS BASEADOS NA METEOROLOGIA/BH

SOIL WATER BALANCE SHEET

Crop Corn Field name SW 23 Emergence date 5/15/18

Table 4 → Pumping capacity 6.0 gpm/ac App. efficiency 85 % Net irrig. 0.27 in/day

Table 2 → Root zone depth 3 ft. AWC in root zone 4.1 in. 50% of AWC 2.05 in.

Alfalfa cut dates: 1st _____ 2nd _____ 3rd _____

Week after emergence	Date	Maximum air temperature	Add		Subtract		Soil water deficit
			Crop water use	Rainfall	Irrigation		
							0.0
5	6/12	72	0.12				0.12
	13	79	0.12				0.24
	14	86	0.15				0.39
	15	85	0.15				0.54
	16	75	0.12	0.19			0.47
	17	70	0.14				0.61
	18	75	0.14				0.75
	19	78	0.14				0.89
6	20	79	0.14				1.03
	21	84	0.19				1.22
	22	86	0.19	0.20			1.20
	23	78	0.14				1.35
	24	76	0.17	0.35			1.17
	25	78	0.17				1.34
	26	82	0.22				1.56
	27	85	0.22				1.78
7	28	89	0.22				2.00
	29	80	0.22	0.47			1.75
	30	76	0.17		0.75		1.17
	7/1	81	0.24		X		1.41
	2	83	0.24		X		1.65
	3	83	0.24	0.42			1.47
	4	77	0.19	0.48			1.18
	5	77	0.19				1.37
8	6	82	0.24	0.43			1.18
	7	92	0.30				1.48
	8	84	0.25	0.11			1.62
	9	82	0.25				1.87
	10	86	0.25	4.93			0.0
	11	85	0.25				0.25
	12	81	0.25				0.50
	13	87	0.25				0.75
9	14	89	0.25				1.00
	7/15	77	0.19				1.19
	16	80	0.24				1.43
	17	82	0.24				1.67
	18	84	0.24				1.91
	19	80	0.24	0.52			1.41
	20	78	0.19				1.33
	21	77	0.19				1.52
10	22	81	0.23				1.75
	23	78	0.18				1.93
	24	81	0.23		1.0		1.16
	25	74	0.18		X		1.34
	26	70	0.18		X		1.52
	27	75	0.18		X		1.70
	28	78	0.18				1.88
	29	79	0.17		1.0		1.05
11	30	82	0.22		X		1.27
	31	89	0.22		X		1.49
	8/1	67	0.13		X		1.62
	2	80	0.22				1.84
	3	88	0.22		1.0		1.32
	4	89	0.22		X		1.54
	5	80	0.21		X		1.75
	6	79	0.17		X		1.92
12	7	88	0.21		1.0		1.13
	8	88	0.21		X		1.34
	9	88	0.21		X		1.55
	10	91	0.26		X		1.81
	11	93	0.26		1.0		1.07
	12	99	0.25		X		1.32
	13	84	0.20		X		1.52
	14	71	0.16		X		1.68
13	15	81	0.20				1.88
	16						
	17						
	18						

Balanço hídrico

Entradas:

- ET_o
- P
- θ_{CC} θ_{CE} e z
- K_c
- regas

Dá-nos o quando e o quanto regar

Week after emergence → 5

Add 0.61 to 0.14 to get 0.75

Maximum daily air temp is recorded and estimated crop water use is taken from Table 6

Rain amount exceeds previous days deficit plus today's crop water use

Irrigation is started so deficit does not exceed 50% of AWC. The pivot timer is set to apply 0.75 inches in 3 days

0.70
Soil water deficit is corrected by probing the field using the soil feel method (Table 5)

2.1
Rain and Irrigation are subtracted from previous days deficit

Checkbook is up to date

Determinação de *ET_o* – estações meteorológicas



- radiação solar
- temperatura do ar
- humidade relativa
- velocidade e direcção do vento
- precipitação



Equação de
Penman-Monteith

Secção de Engenharia Rural



Determinação de ET_o – tinas evaporimétricas e evaporímetros



Tina classe A



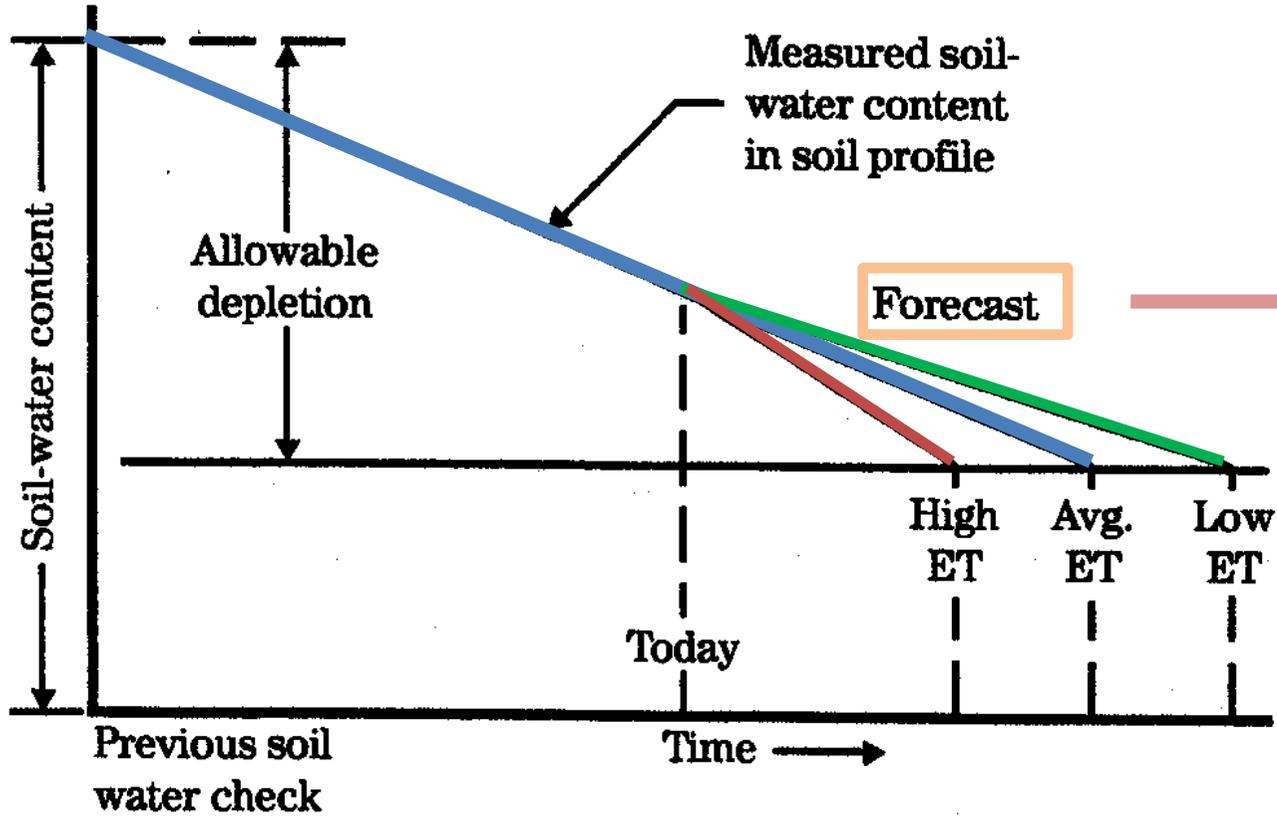
evaporímetro

$$ET_o = E_{tina} \times K_{tina}$$

Medição da precipitação



Previsão do dia de rega com base no teor de água no solo (medido / estimado com o balanço hídrico)



- Extrapolação
- Dados históricos de ET_o / ET_c
- Previsão meteorológica

Vantagens

- fácil aplicação
- permite determinar o quando e o quanto contínuo
- permite prever o dia de rega
- pode ser aplicado a várias parcelas simultaneamente

Desvantagens

- necessita de valores adequados de ETo, Kc, precipitação
- erros são cumulativos pelo que deve ser feita correção através de leituras periódicas da água do solo
- Em rega localizada é necessário uma rede de sensores que monitorize toda a zona radicular dada a variabilidade horizontal do teor de água

Principais causas de erro

- Erro no valor do Kc escolhido (pomares, culturas esparsas, culturas em condições não óptimas)
- Precipitação mal ou não medida
- Valores incorrectos/variabilidade espacial de θ_{CC} e θ_{CE} e z
- Dotações de rega / eficiência de rega mal medidos/avaliados
- Fontes de água não contabilizadas (AC, condensação nocturna)

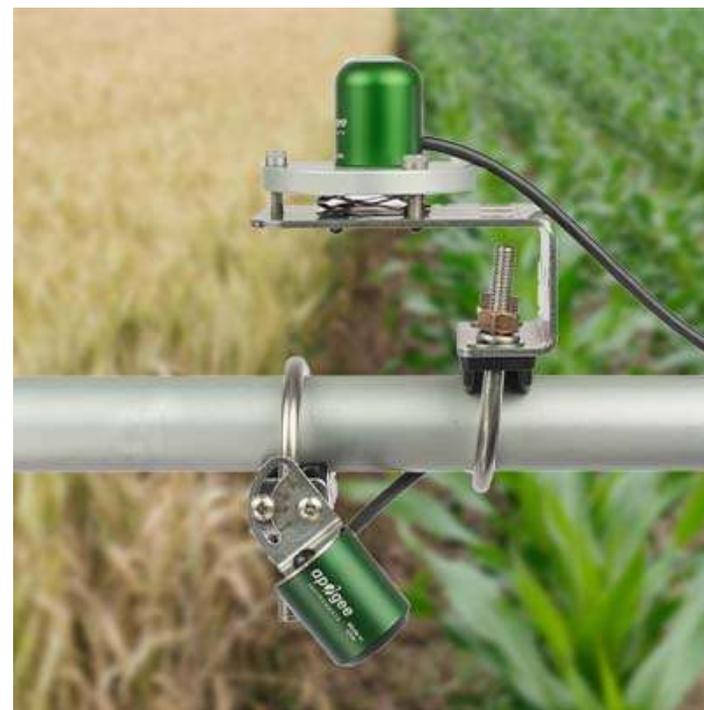
2.3.2.4 MÉTODOS BASEADOS EM DETECÇÃO REMOTA/ÍNDICES ESPECTRAIS

NDVI (*normalized difference vegetation index*) – calculado a partir da reflectância no vermelho e infravermelho próximo

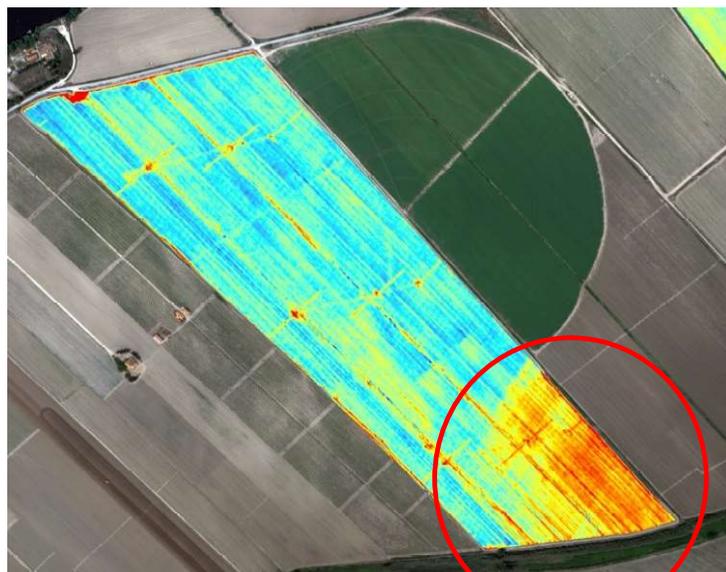
Dá uma estimativa da cobertura do solo (→ Kc)

PRI (*photochemical reflectance index*) – calculado a partir da reflectância no verde e no amarelo.

Dá uma estimativa da actividade fotossintética



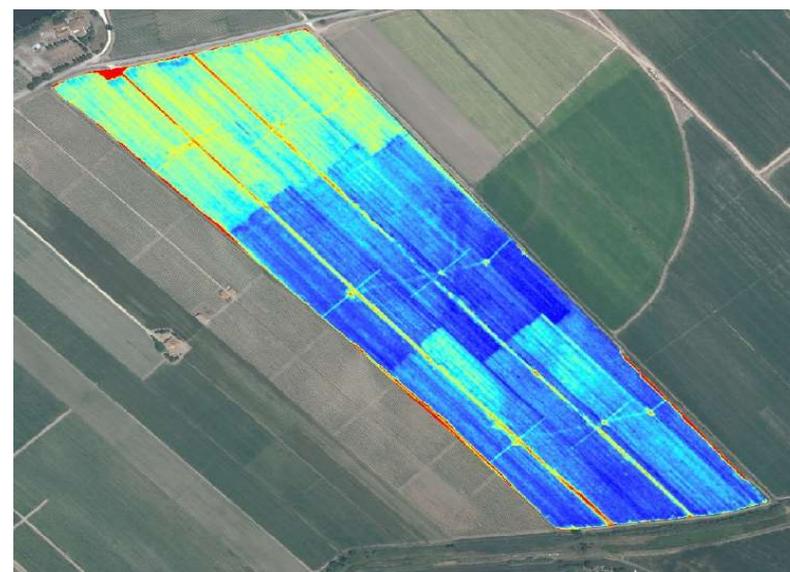
NDVI



alagamento

40 dias após transplantação

Diferentes sectores de rega



72 dias após transplantação

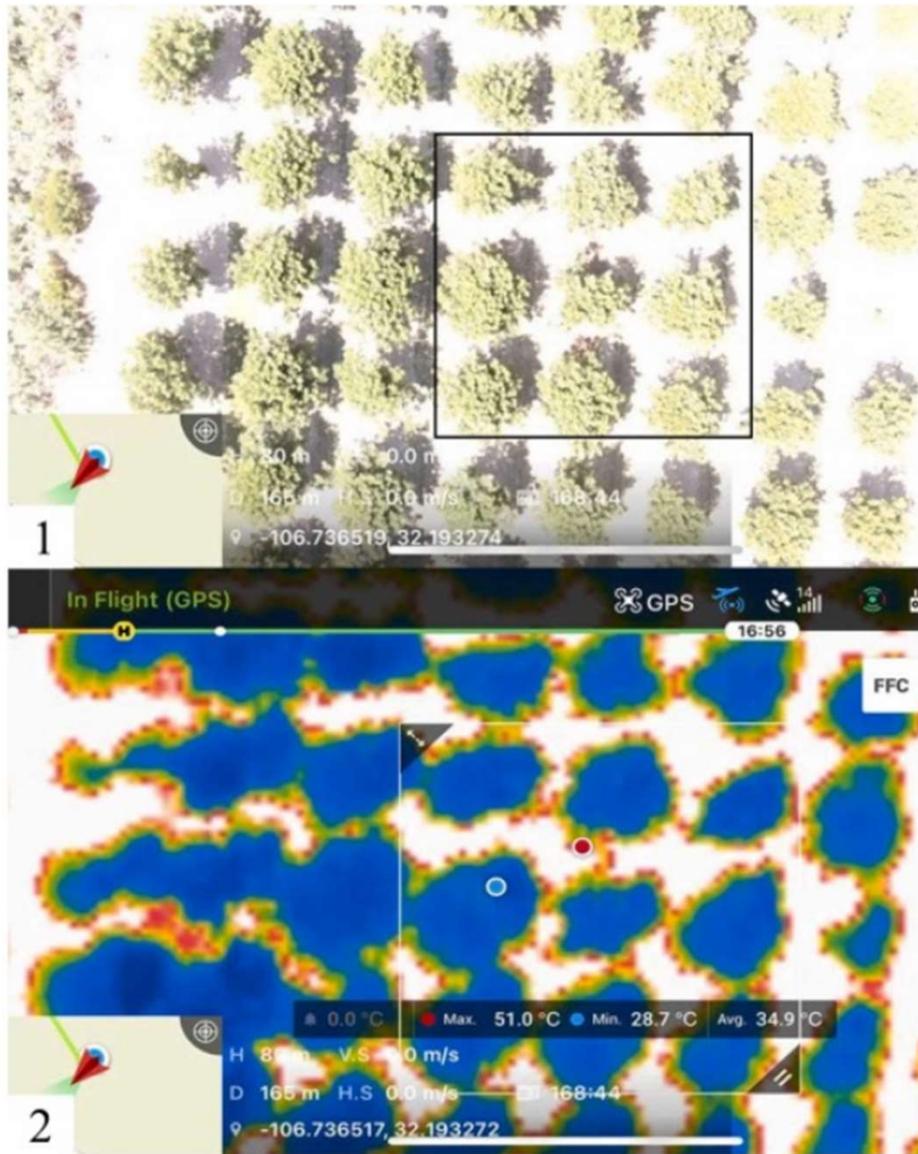


Imagem visível e térmica
tirada a partir de drone



- Índices térmicos (T_{IV})
- Modelos de estimação da *ETc*

CONDUÇÃO DA REGA – COMBINAÇÃO DE MÉTODOS

Métodos baseados nas plantas



Timing adequado

Balanço hídrico



Previsão do dia da rega

Métodos baseados no solo



Correcção das estimativas
Determinação da dotação de rega