

EFFIREM: EFICIENCIA HÍDRICA



Estaciones Agroclimáticas y
Balance de Agua



Samuel M. Espiga



ÍNDICE DE CONTENIDO

EVAPOTRANSPIRACION (ET) Y
CLIMA
3

CÁLCULO DE LA ET CON
ESTACIONES AGROCLIMÁTICAS
11

BALANCE DE AGUA
29

APLICACIONES Y
CONSIDERACIONES GENERALES
36

EVAPOTRANSPIRACION Y CLIMA



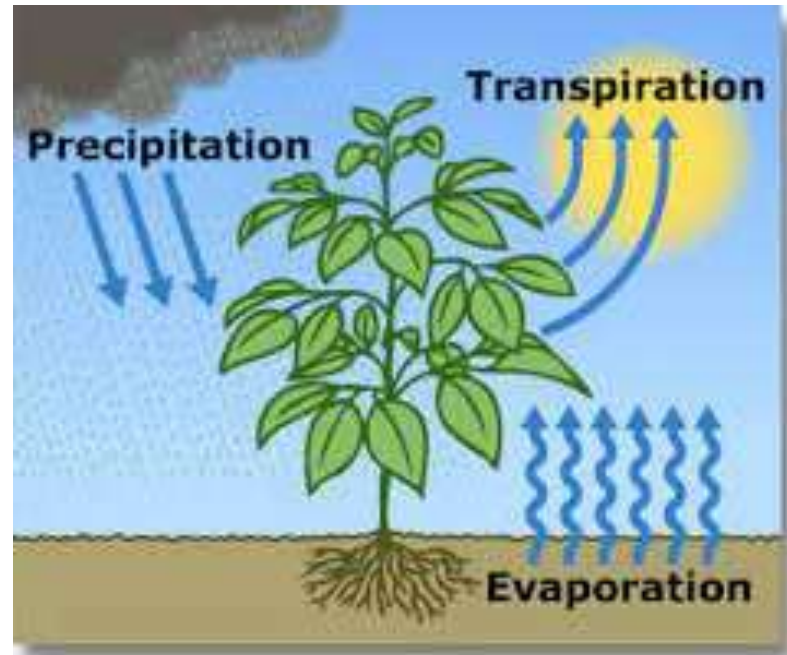
EVAPOTRANSPIRACIÓN (E+T)

=

EVAPORACIÓN
del suelo

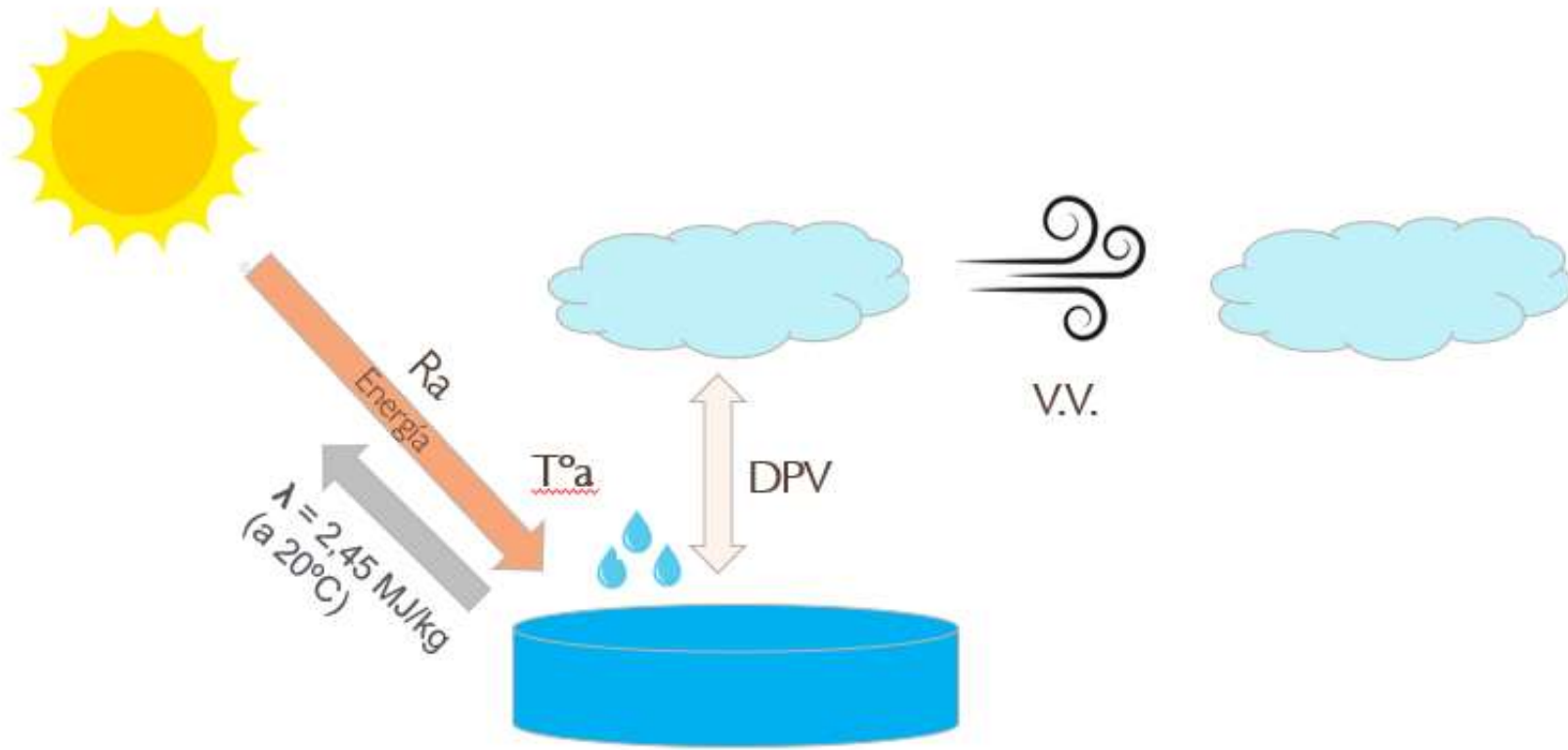
+

TRANSPIRACIÓN
del cultivo



EVAPORACIÓN

Vaporización del agua
+
Retirada del vapor de la superficie

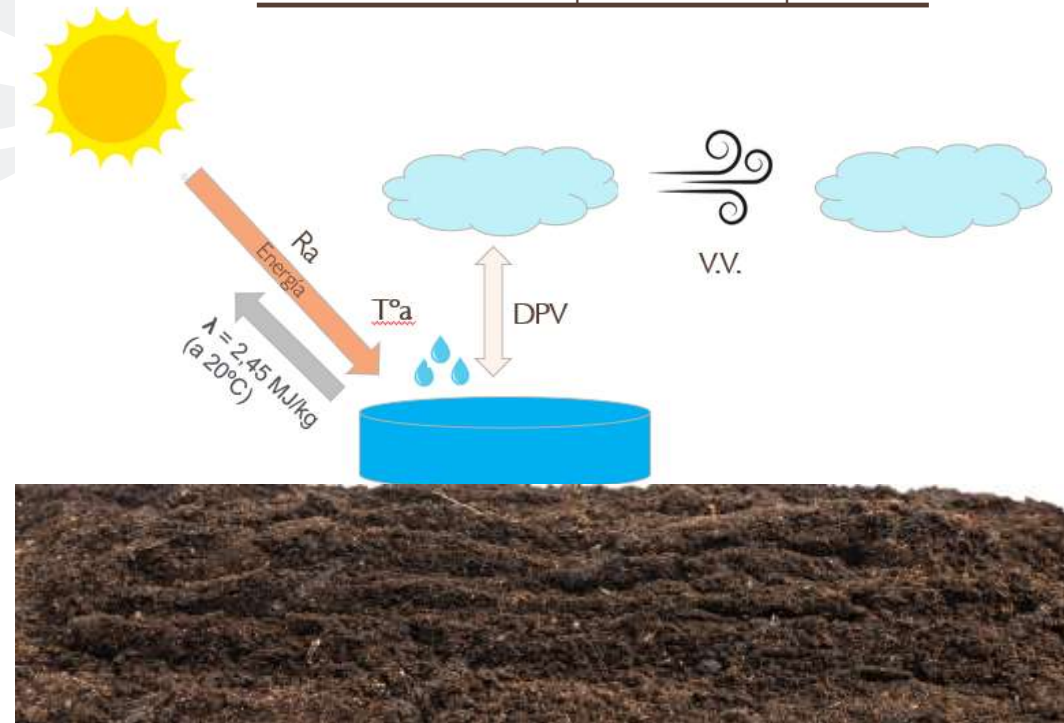


Variables climáticas implicadas:

- Radiación
- Temperatura
- Humedad ambiental
- Velocidad de viento

EVAPORACIÓN DEL SUELO

El suelo como superficie evaporante:



Si el agua no es limitante, en teoría solo influyen condiciones climáticas, pero cuando falta rápidamente se limita la evaporación...

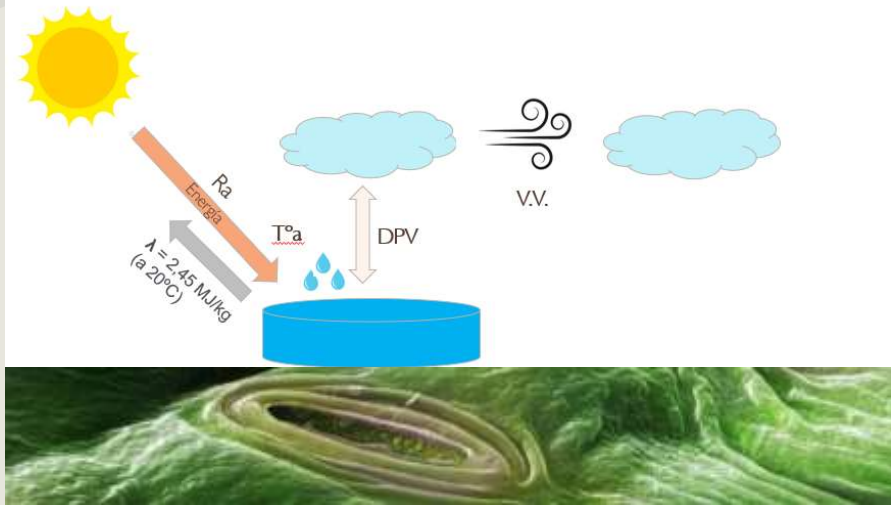
Además del clima, hay que tener en cuenta que el proceso está afectado por :

- ✓ El **grado de cobertura** (radiación incidente por sombreado del cultivo, uso de mulching con/sin barrera de vapor, etc.)
- ✓ La **cantidad de agua** disponible en la superficie evaporante (aporte de agua vía lluvias, riegos, y difusión capilar). Efecto del riego localizado (no moja toda la superficie).

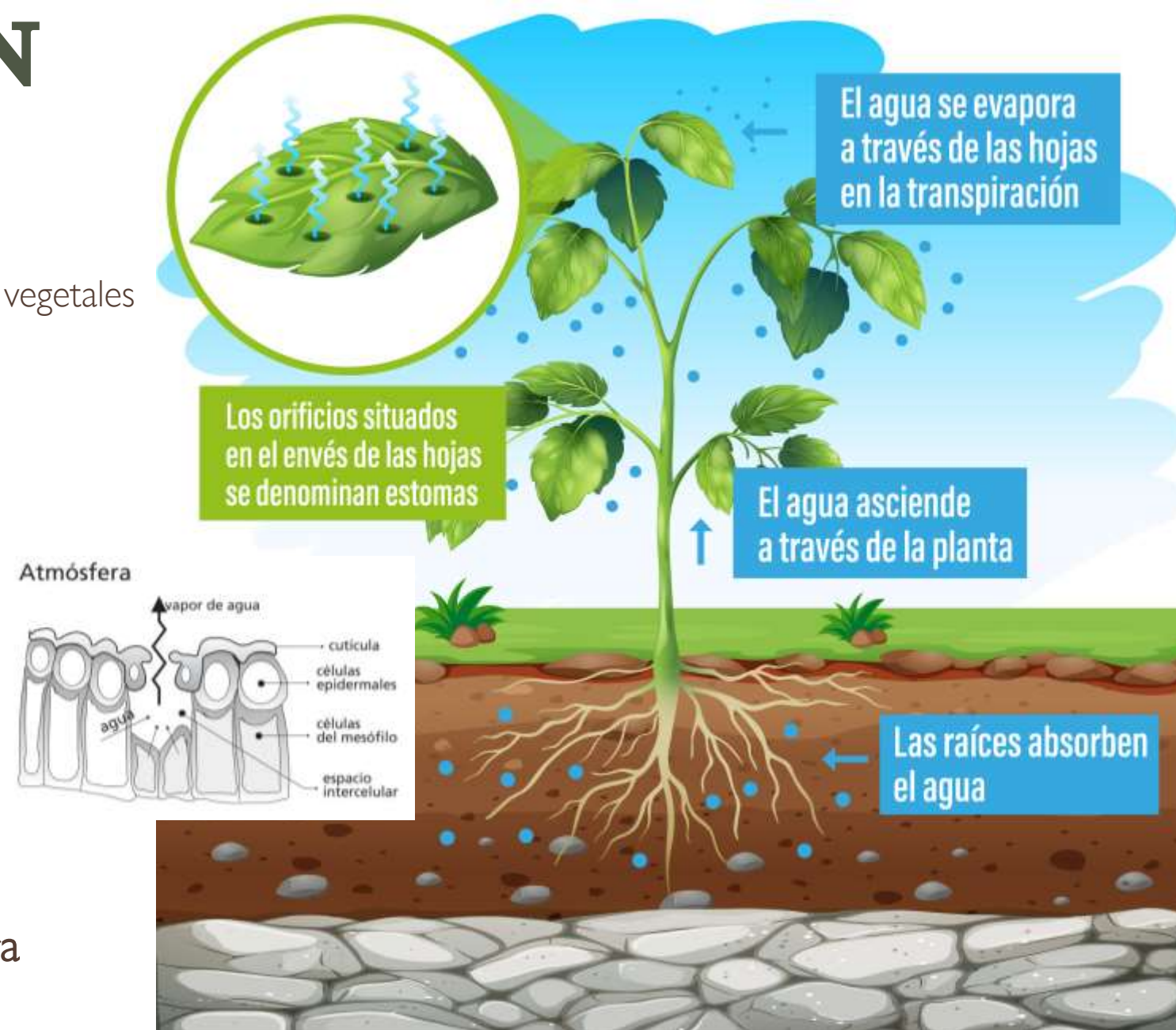
FRUTICULTURA: Monitoreo colocando sensores volumétricos a poca profundidad para cuantificar evaporación, manejo de cubiertas vegetales...

TRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO

Evaporación del agua líquida contenida en los tejidos vegetales

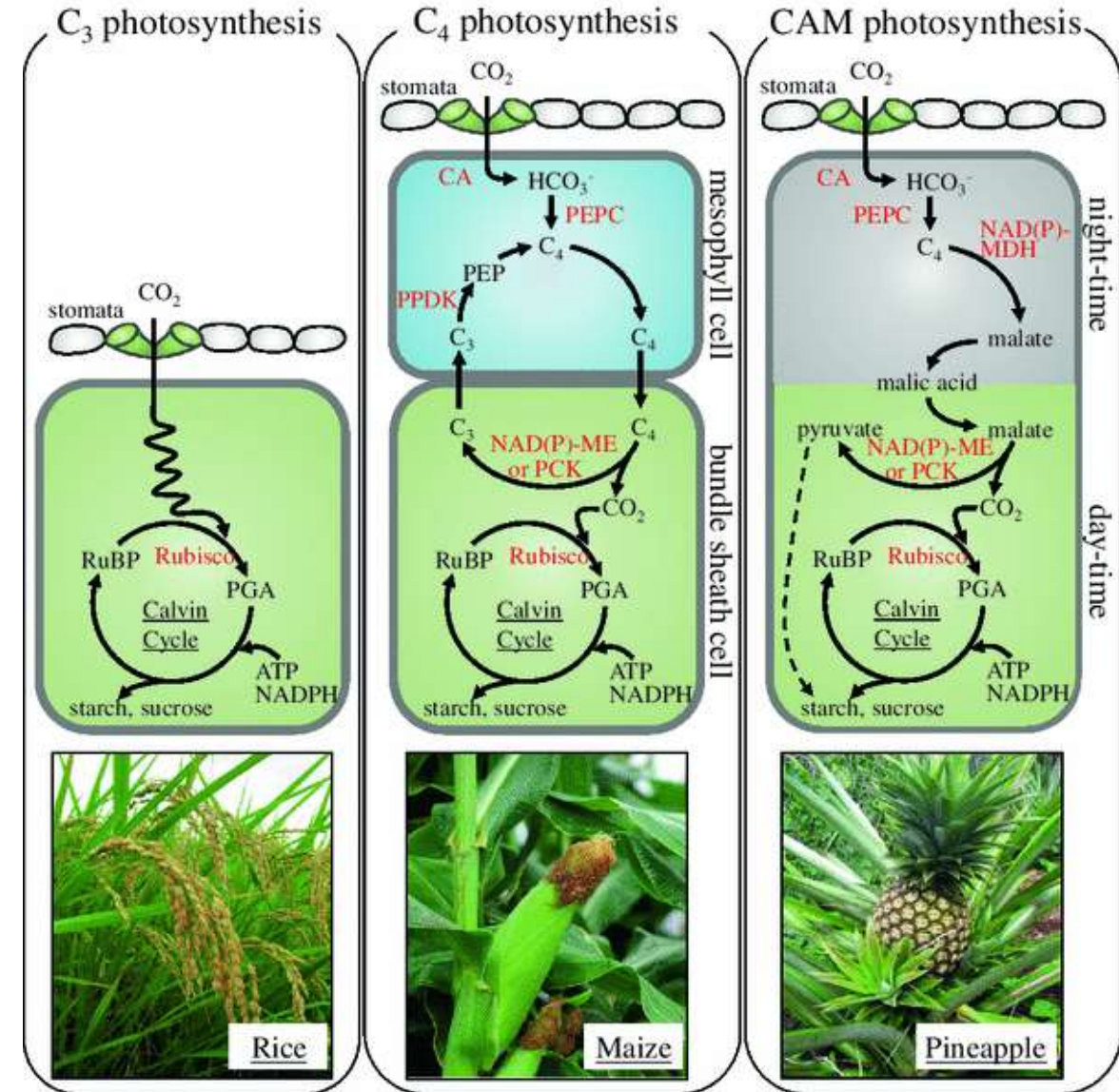
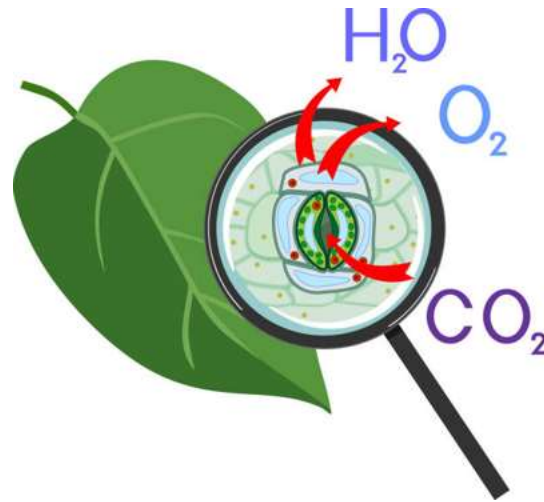


Además del clima,
proceso regulado por la **apertura estomática**



TRANSPIRACION DEL CULTIVO

- Del total de agua absorbida (300 a 600 Litros / kgMS), la planta transpira en torno al 95%.
- Sin embargo, debido a que el **intercambio gaseoso** se realiza en los estomas, relación bastante directa entre transpiración y fotosíntesis.
- Fotorrespiración y pérdida de eficiencia



TRANSPIRACION DEL CULTIVO

En perspectiva **macro**, además de las **CONDICIONES CLIMÁTICAS** en la superficie de la hoja y el grado de **APERTURA DE LOS ESTOMAS** (clima, potencial hídrico del suelo, estado cultivo...), el proceso está afectado por:

Factores generales característicos de cada especie,

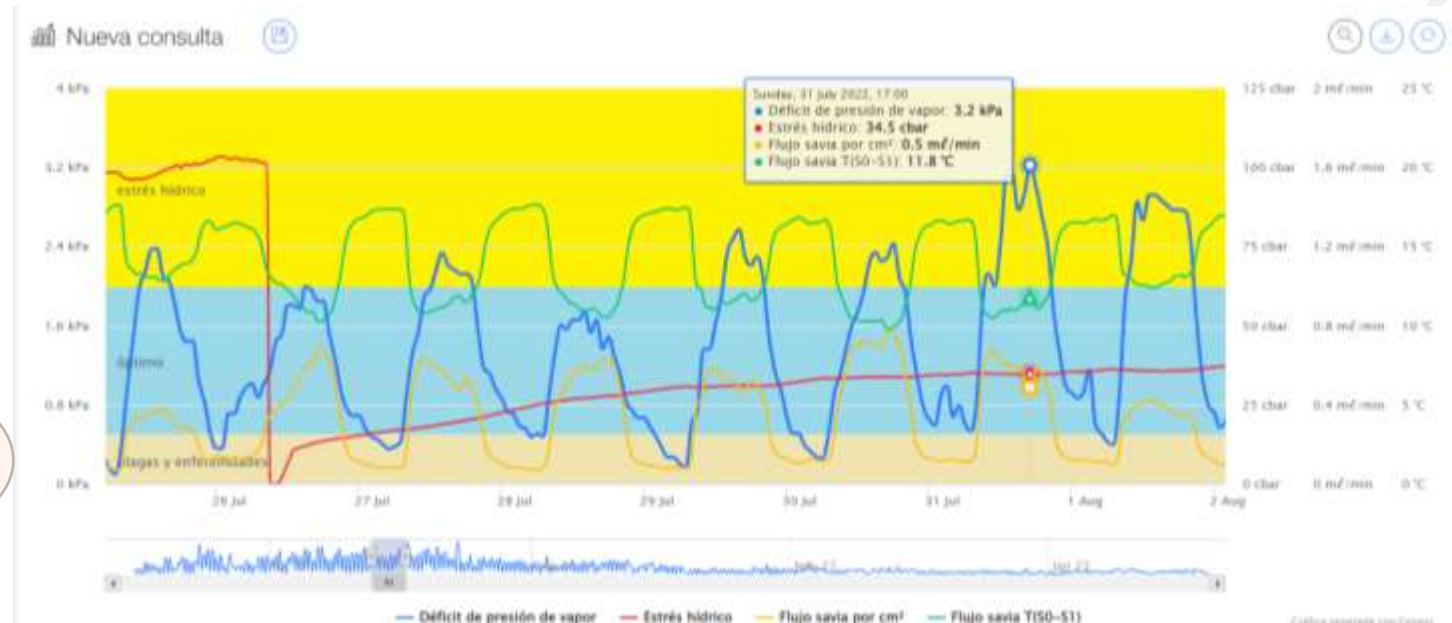
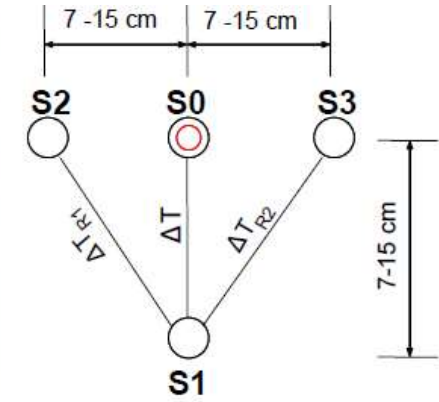
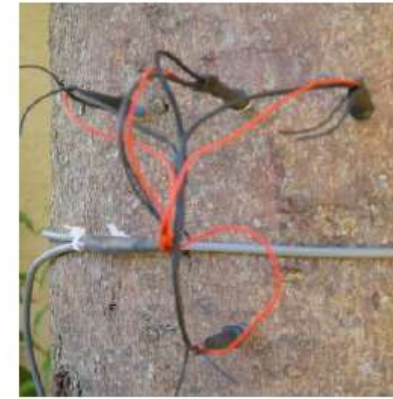
LAI

Microclima de cada hoja

...

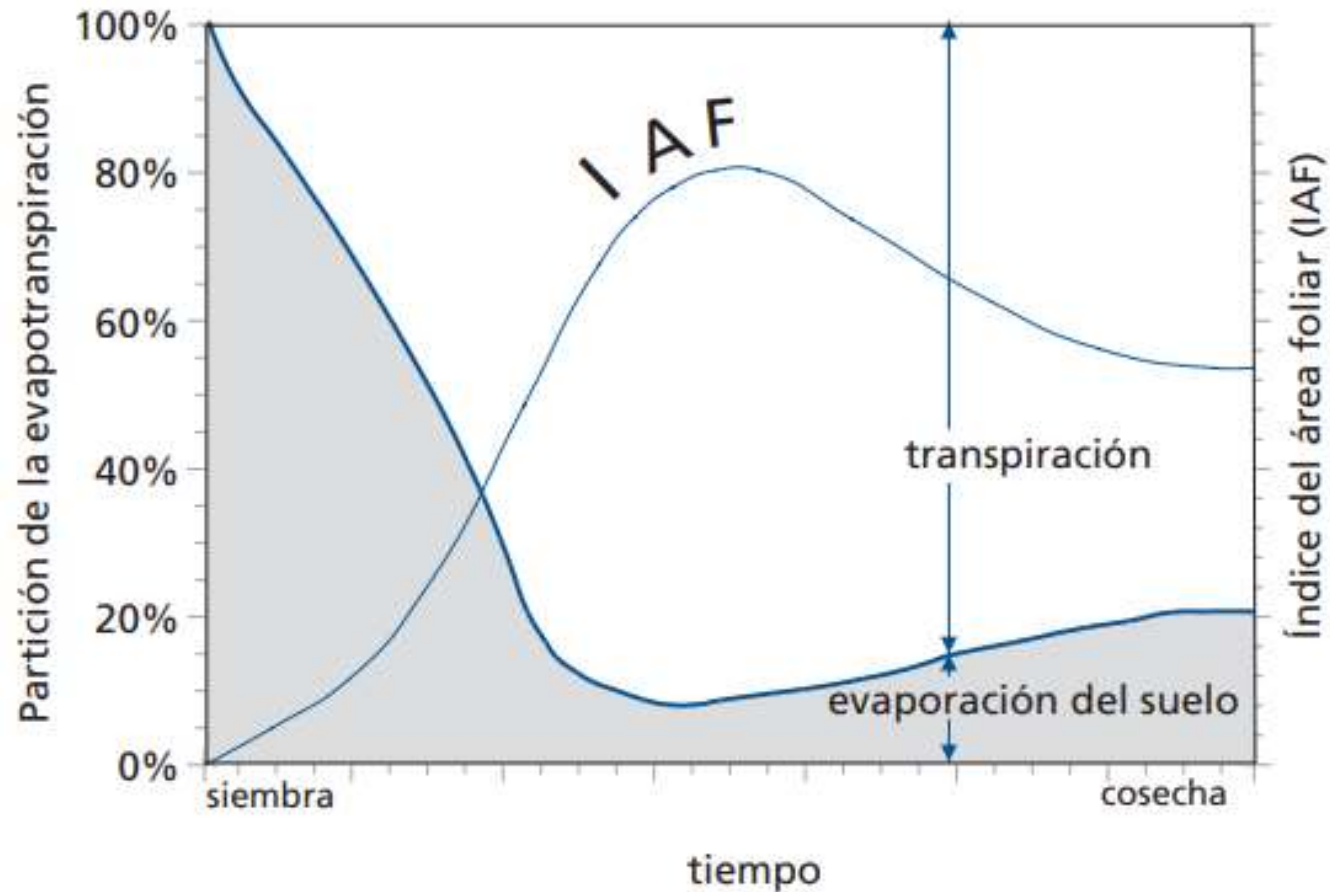
En realidad, es un **dato difícil de estimar** de forma precisa con métodos indirectos (fórmulas para inferir el efecto del ambiente)

Trabajo con **sensores de flujo de savia** (Ecomatik) en fruticultura para obtener esta medida directa



EVAPOTRANSPIRACIÓN (ET)

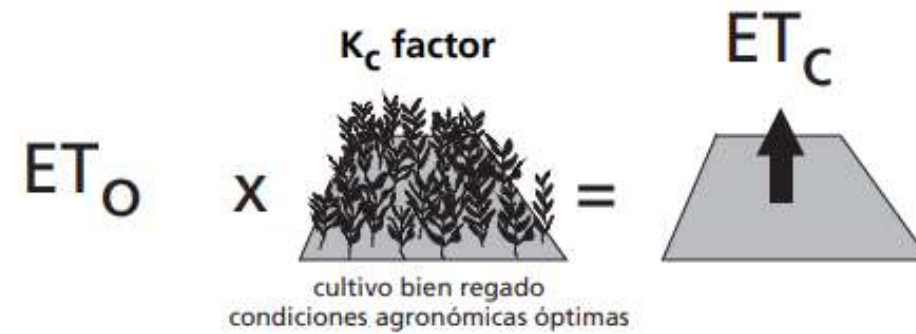
Repartición de la evapotranspiración en evaporación y transpiración durante el periodo de crecimiento de un cultivo anual



CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACION CON ESTACIONES AGROCLIMÁTICAS



MÉTODO FAO-56



ET_0

Inicialmente, en el documento n°24 de la Serie FAO Riego y Drenaje «Necesidades de agua de los cultivos», se contemplaban 4 métodos:

- ✓ BlaneyCriddle (solo con T° del aire)
- ✓ Radiación (zonas sin velocidad de viento ni HR)
- ✓ Penman modificado (más preciso pero sobreestima en más del 20%)
- ✓ Tanque de evaporación (convertirlo no es preciso)

1990 FAO unifica criterios y establece el método combinado de Penman-Monteith para calcular ET_0

$$\lambda ET_0 = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho c_p(e_a - e_d)/r_a}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_c}{r_a})}$$

λET_0 : Flujo de Calor Latente de Evaporación (kJ / m² y s)

R_n : Flujo de la radiación neta en superficie (kJ / m² y s)

G : Flujo térmico del suelo (kJ / m² y s)

ρ : Densidad atmosférica (kg /m³)

c_p : Calor específico del aire húmedo (kJ / kg y °C)

$e_a - e_d$: Déficit de Presión de Vapor (Kpa)

r_a : Resistencia aerodinámica (s/m)

r_c : Resistencia de la cubierta vegetal (s/m)

Δ : Pendiente de la Curva de Presión de Vapor (Kpa / °C)

γ : Constante psicrométrica (kPa/°C)

λ : Calor latente de vaporización (MJ/kg)

$$ET_0$$



$$ET_0 = \frac{0,408(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (DPV)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 u_2)}$$

Donde:

ET_0 : Flujo de Calor Latente de Evaporación (mm/día)

R_n : Radiación neta en superficie del cultivo (kJ / m² y s)

G : Flujo del calor de suelo (MJ / m² y s)

T : Temperatura media del aire a 2m de altura (°C)

DPV : déficit de presión de vapor (kPa)

u_2 : Velocidad del viento a 2 m de altura (m/s)

Δ : Pendiente de la Curva de Presión de Vapor (Kpa / °C)

γ : Constante psicrométrica (kPa/°C)



Superficie de referencia es hipotético pasto, con 12 cm de altura, resistencia sup. fija de 70 s /m y albedo de 0,23.



Posición de la estación (altura, encima de pasto, sin efectos microclimáticos...)

ET_0 : Viento

Consideraciones:

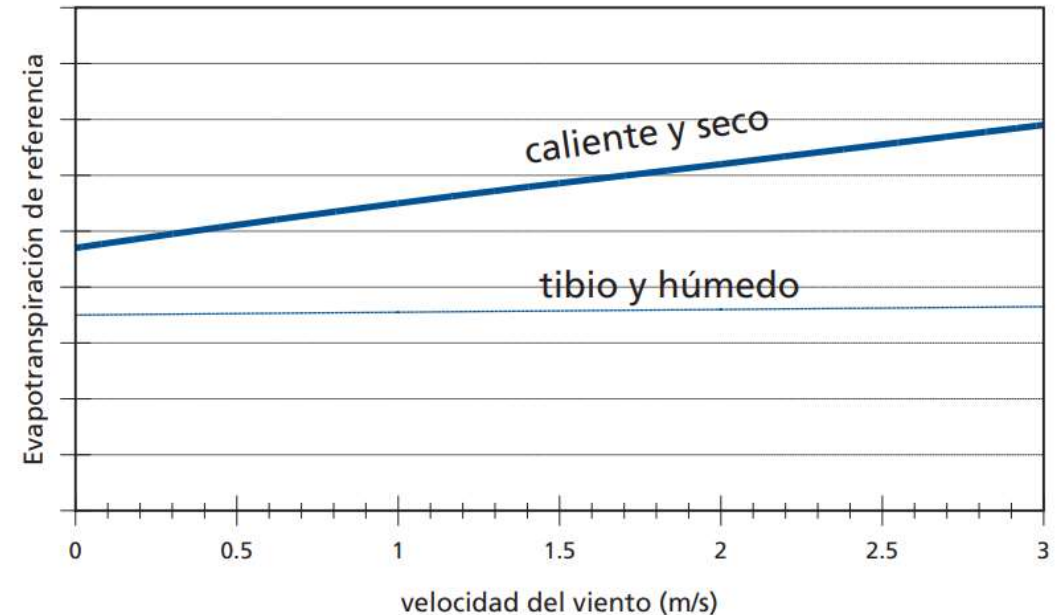
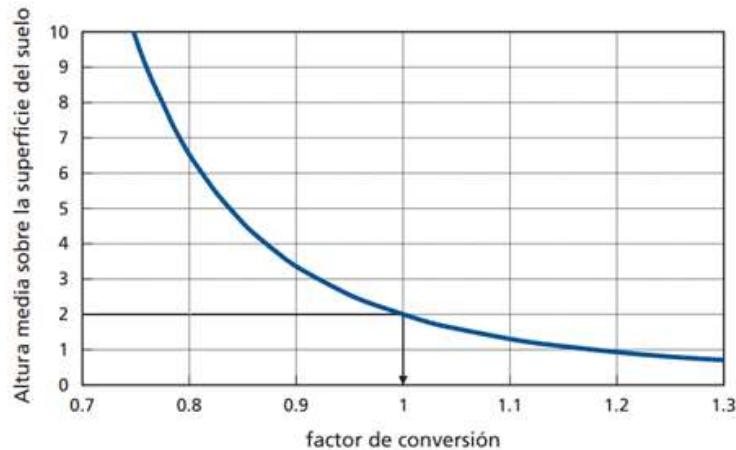
- ❖ Cuidado con barreras
- ❖ Se puede convertir a 2 m de altura si no está en esa posición
- ❖ Conviene aplicar una limitación de 0,5m/s (Min.)

Responsable de evacuar el aire saturado cercano a la superficie evaporativa



Ilustración del efecto de la velocidad del viento sobre la evapotranspiración en condiciones atmosféricas secas y caliente comparadas con condiciones húmedas y tibias

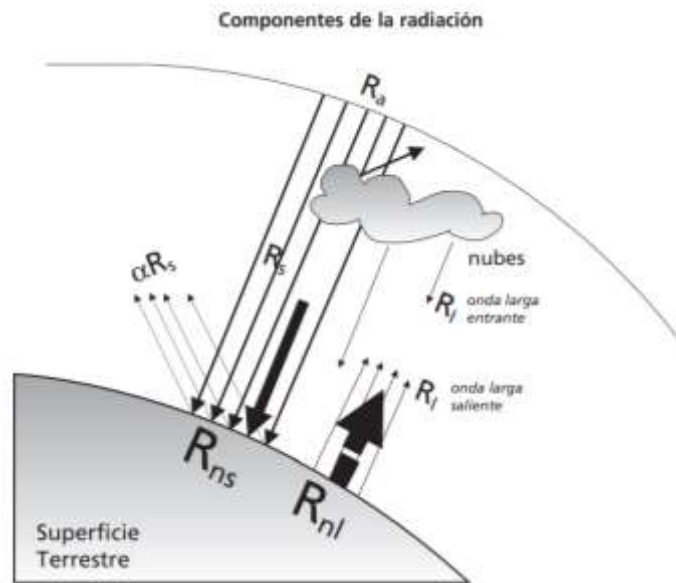
Factor de conversión para convertir la velocidad del viento medida en cierta altura sobre el nivel del suelo a la velocidad del viento en la altura estándar (2 m)



ET_0 : Radiación

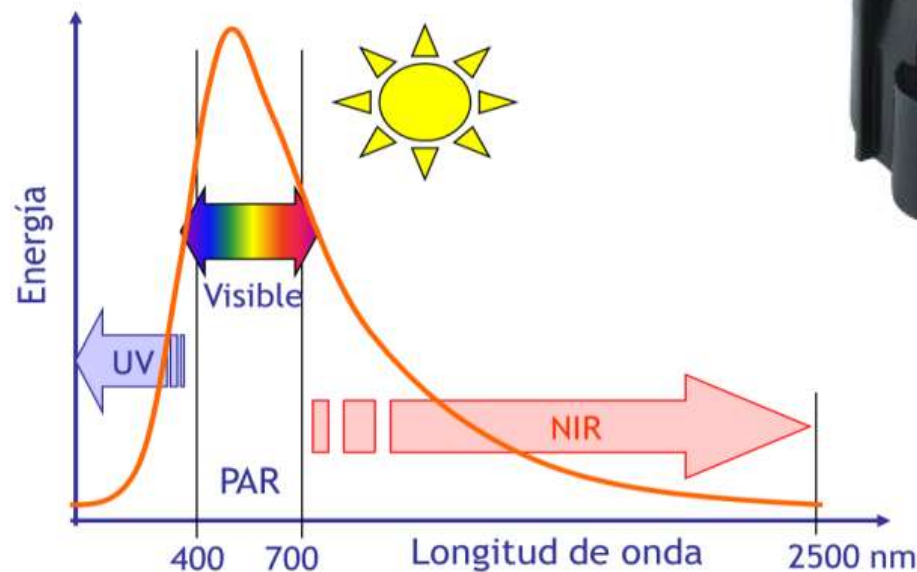
Principal fuente de energía del planeta, y aporta la mayoría de la energía en la evaporación (otra pequeña parte de radiación se va a calentar atmósfera y el suelo, además del albedo)

- ❖ G se desprecia para valores diarios (o decadiarios); en horario se considera como parte fija ($0,1R_n$)
- ❖ Radiación **directa** vs **difusa**
- ❖ ET_0 (formula) es **proporcional** en el primer término a la radiación (métodos de riego por radiación).



Piranómetro

Hacia abajo mide radiación de onda corta reflejada del suelo:
Albedómetro



ET_0 : Temperatura

Transferencia de calor sensible del aire circundante en el proceso de evaporar agua. Saturación del aire (presión de vapor) es función directa de su temperatura.

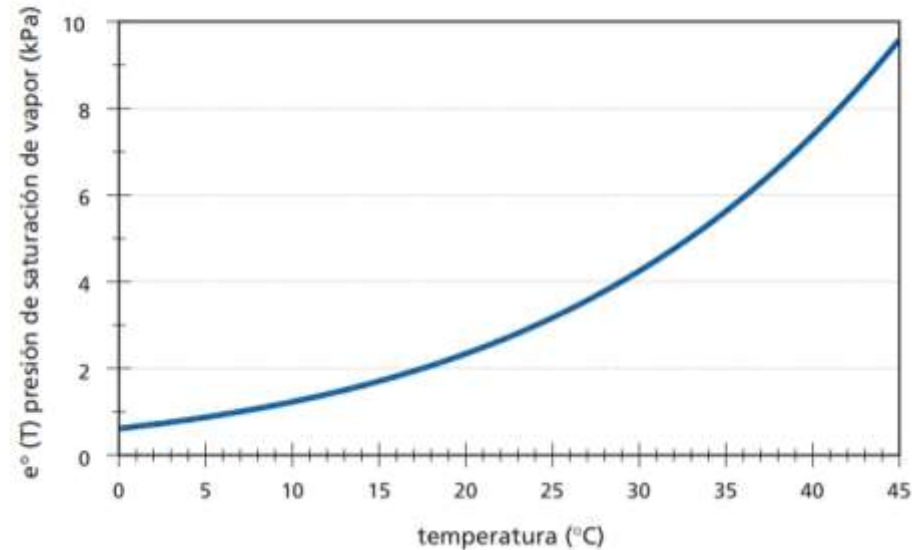
- ❖ Con un único dato medio diario, se puede esperar subestimación debido a la relación no lineal entre E_a y T°

TPH:

Colocar con “abrigo meteorológico” o protector de radiación



Presión de saturación de vapor (e°) en función de la temperatura: curva de $e^\circ(T)$



ET_0 : Humedad ambiental

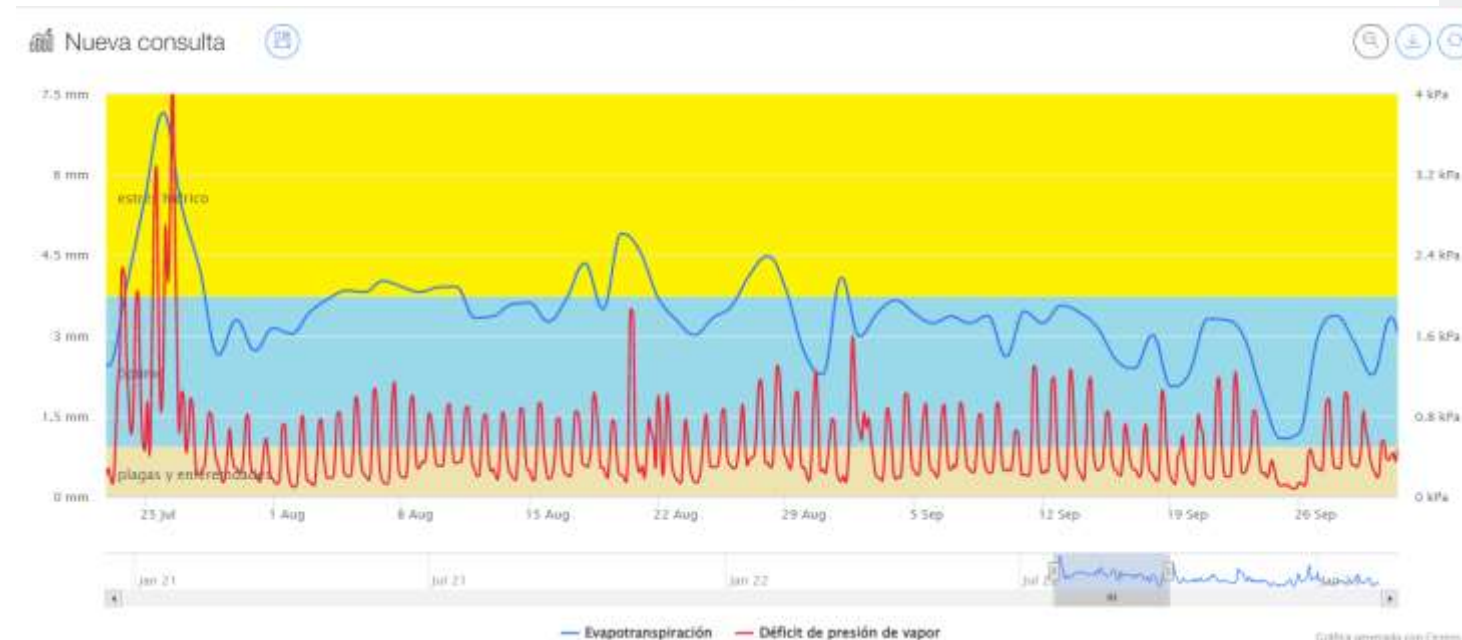
“Aidez” de la atmósfera por el Vapor de Agua

TPH:

Colocar con “abrigo meteorológico” o protector de radiación



- ❖ Variable dependiente de la T°
- ❖ HR fluctúa mucho (rango amplio), por lo que es mejor usar DPV para valores medios
- ❖ Buena correlación entre DPV y transpiración (hasta cierto límite)



ET_0 : Presión atmosférica

La constante psicrométrica es
función de la presión atmosférica
($\gamma = 0,00163 P/\lambda$)

- ❖ Se puede aproximar indirectamente con a.s.n.m.



TPH:

Colocar con “abrigo meteorológico” o protector de radiación



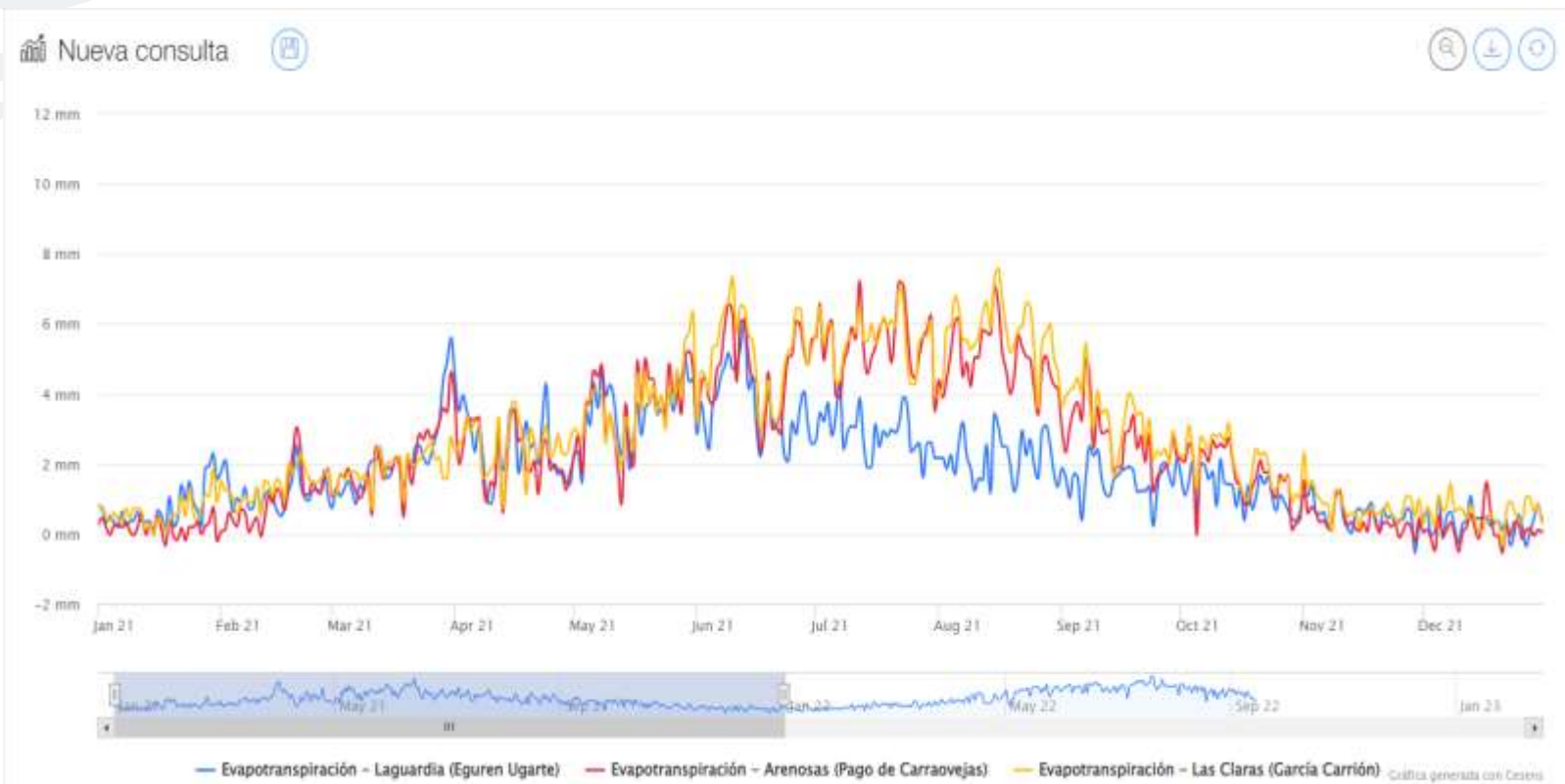
ET_0 : Datalogger

- ❖ FAO 56 ofrece métodos para estimar los datos faltantes en caso de que no se disponga de toda la sensorística
- ❖ En CESENS ofrecemos la posibilidad de importar información faltante con interpolaciones de datos de estaciones cercanas.
- ❖ ET_0 Se puede calcular con medias horarias, y diarias (puede haber pequeñas desviaciones).
- ❖ Unidades del SI



ET_0 : software

Parámetro exclusivamente climático, que utiliza una superficie de referencia, y sirve para **comparar localizaciones y épocas del año**



Regiones	Temperatura promedio durante el día °C		
	10°C	20°C	>30°C
Trópicos y subtrópicos			
Húmedos y subhúmedos	2-3	3-5	5-7
Áridos y semiáridos	2-4	4-6	6-8
Regiones templadas			
Húmedos y subhúmedos	1-2	2-4	4-7
Áridos y semiáridos	1-3	4-7	6-9

ET_c

$$ET_o \times K_c \text{ factor} = ET_c$$

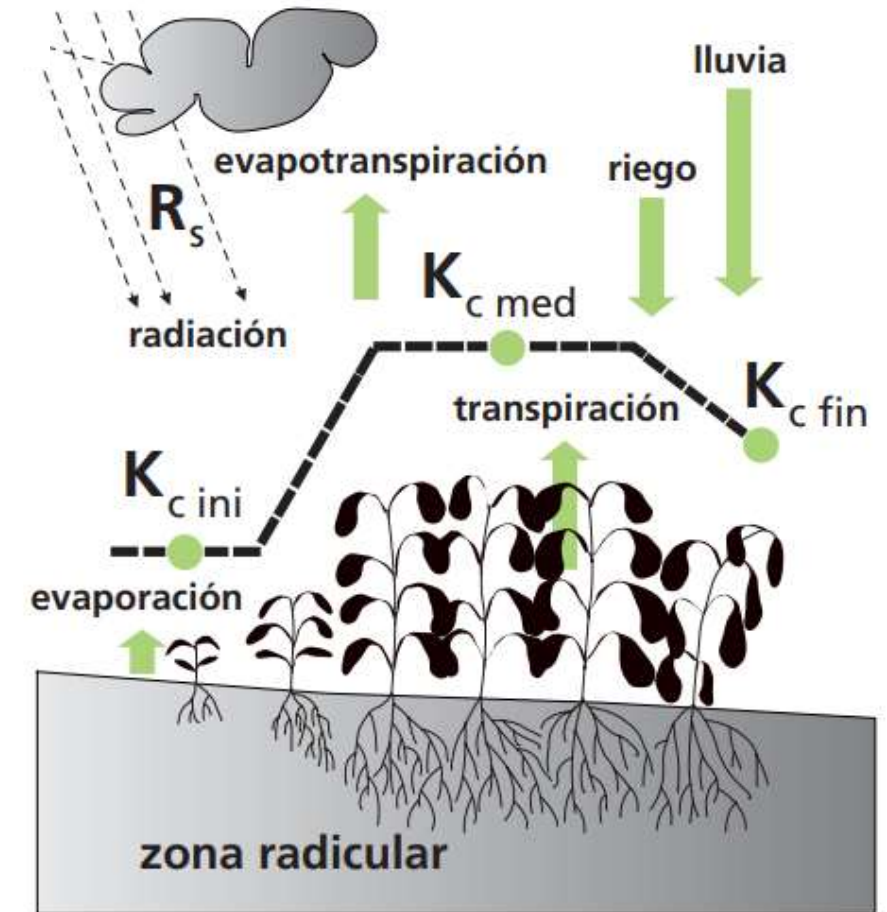
cultivo bien regado
condiciones agronómicas óptimas

ET característica de un **cultivo concreto**, en una fase de desarrollo determinada, en **ausencia** de otros **factores limitantes** (estrés hídrico, estrés salino, nutrición, plagas y enfermedades, etc.)

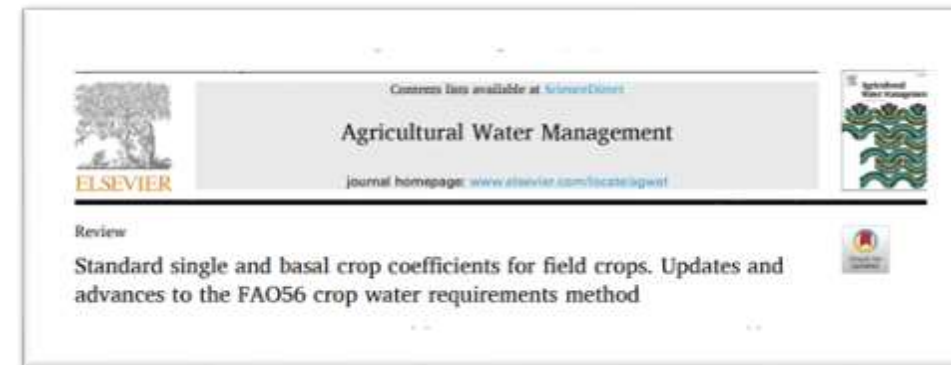
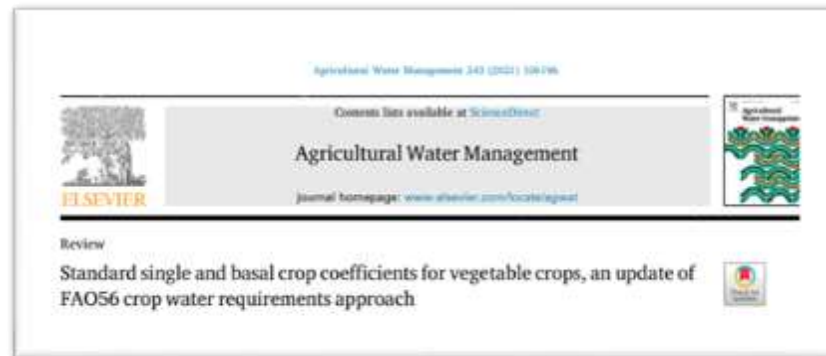
Factor de compensación de diferencias como:

- anatomía de las hojas
- características de los estomas
- propiedades aerodinámicas, albedo
- etc.

K_c (varía con fenología)



ET_c



- ❖ Tablas de referencia por cultivos (FAO 2021)
- ❖ Ajuste de pendiente K_c con fenología
- ❖ Son coeficientes genéricos y no suelen estar ajustados localmente
- ❖ Tablas de déficit hídrico controlado y K_c

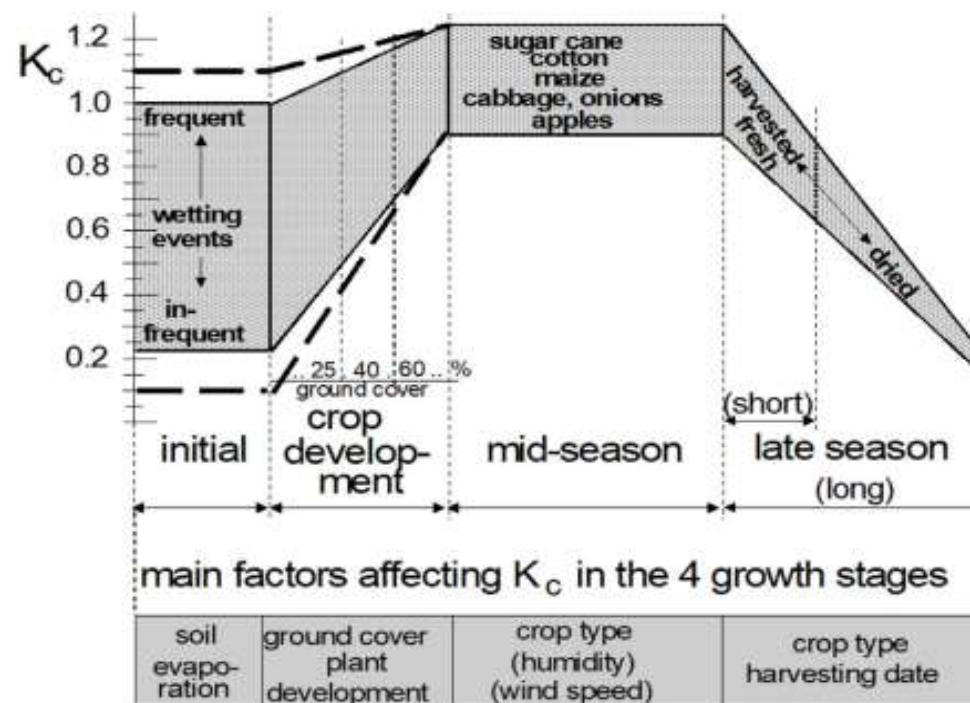


Table 12

Updated standard K_c and K_{cb} for fiber crops, oil crops and sugar crops.

Crop	Observed, standard K _c and K _{cb}		FAO56 tabulated K _c and K _{cb}		Updated standard K _c and K _{cb}	
	K _c mid (std)	K _c end (std)	K _c mid	K _c end	K _c mid	K _c end
Single crop coefficient						
Fiber crops						
Cotton (<i>Gossypium hirsutum</i>)	0.88–1.22	0.20–0.75	1.15–1.20	0.70–0.50	1.10	0.50
Flax (Linseed) (<i>Linum usitatissimum</i>)	n/r	n/r	1.10	0.25	1.05	0.25
Sisal (<i>Agave sisalana</i>)	n/r	n/r	0.40–0.70	0.40–0.70	0.55	0.55
Oil crops						
Camelina (<i>Camelina sativa</i>)	1.12	0.47	n/r	n/r	1.10	0.45
Canola (<i>Brassica napus</i>)	1.15	0.35	1.00–1.15	0.35	1.10	0.35
Castorbean (<i>Ricinus communis</i>)	1.09	0.82	1.15	0.55	1.10	0.55
Linseed (Flax) (<i>Linum usitatissimum</i>)	0.95–0.97	0.20–0.26	n/r	n/r	0.95	0.25
Mustard (<i>Brassica juncea</i>)	1.00–1.17	0.35–0.45	n/r	n/r	1.10	0.40
Safflower (<i>Carthamus tinctorius</i>)	1.04–1.22	0.22–0.30	1.00–1.15	0.25	1.10	0.25
Sesame (<i>Sesamum indicum</i>)	1.00	n/r	1.10	0.25	1.05	0.25
Sunflower (<i>Helianthus annuus</i>)	1.07–1.20	0.10–0.36	1.00–1.15	0.35	1.15	0.30
Sugar crops						
Sugar beet (<i>Beta vulgaris</i>)	0.96–1.11	0.82–0.83	1.20	0.70	1.05	0.75
Sugar cane (<i>Saccharum officinarum</i>)	1.03–1.23	0.56–0.83	1.25	0.75	1.15	0.80
Basal crop coefficient						
	K _{cb} mid (std)	K _{cb} end (std)	K _{cb} mid	K _{cb} end	K _{cb} mid	K _{cb} end
Fiber crops						
Cotton (<i>Gossypium hirsutum</i>)	1.02–1.21	0.15–0.56	1.10–1.15	0.50–0.40	1.05	0.40
Flax (Linseed) (<i>Linum usitatissimum</i>)	n/r	n/r	1.05	0.20	1.00	0.20
Sisal (<i>Agave sisalana</i>)	n/r	n/r	0.40–0.70	0.40–0.70	0.50	0.50
Oil crops						
Camelina (<i>Camelina sativa</i>)	1.09–1.10	0.37–0.47	n/r	n/r	1.05	0.40
Canola (<i>Brassica napus</i>)	0.94–1.11	0.20	0.95–1.10	0.25	1.05	0.25
Castorbean (<i>Ricinus communis</i>)	n/r	n/r	1.10	0.45	1.05	0.45
Linseed (Flax) (<i>Linum usitatissimum</i>)	0.92	0.18	n/r	n/r	0.90	0.20
Mustard (<i>Brassica juncea</i>)	n/r	n/r	n/r	n/r	1.05	0.35
Safflower (<i>Carthamus tinctorius</i>)	n/r	n/r	0.95–1.10	0.20	1.05	0.20
Sesame (<i>Sesamum indicum</i>)	n/r	n/r	1.05	0.20	1.00	0.20
Sunflower (<i>Helianthus annuus</i>)	1.10–1.16	0.20–0.25	0.95–1.10	0.25	1.10	0.25
Sugar crops						
Sugar beet (<i>Beta vulgaris</i>)	1.11	n/r	1.15	0.50	1.00	0.65
Sugar cane (<i>Saccharum officinarum</i>)	n/r	n/r	1.20	0.70	1.10	0.70

- Estaciones
- Tiempo real
- Suelo
- Consultas avanzadas
- Consultas avanzadas PRO
- Fincas
- Alertas
- Informes
- Post Venta



Desde 01/03/2022 Hasta 01/10/2022

Activar Windows
Últimos
Ve a Configuración para activar Windows.

$ET_{c aj}$

$$ET_o \times \begin{array}{c} K_s \times K_c \text{ ajustado} \\ \text{estres h\u00eddrico y ambiental} \end{array} = ET_{c aj}$$


ET característica del cultivo bajo **condiciones no estandarizadas** (propias de cada explotación agrícola).

Efecto de otros factores limitantes como la nutrición, la sanidad vegetal, el potencial h\u00eddrico del suelo, etc.

T\u00e9cnicas de precisi\u00f3n (uso en investigaci\u00f3n) basadas en medidas directas:

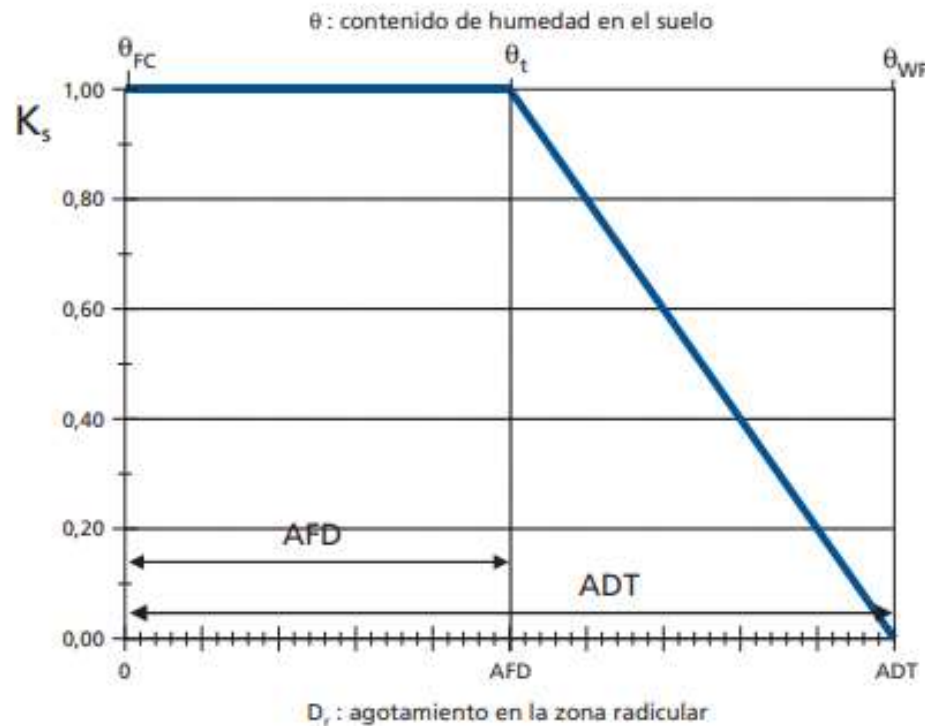
- Balance de energ\u00eda: $Rn = H + G + ET$
- Balance de agua: $ET = R + P - ES - D + C \pm \Delta FS \pm \Delta SW$



$ET_{c aj}$

Otros métodos de ajustar K_c a cada caso particular:

Incorporar el efecto del **estrés hídrico** debido a la disponibilidad de agua en el suelo
 K_s (o sumándolo a K_c)



Técnicas de **teledetección** para incorporar parámetros como mapas de vigor, etc.



ET_{caj}

Otros métodos de cuantificar el **estrés hídrico** con los que estamos trabajando:



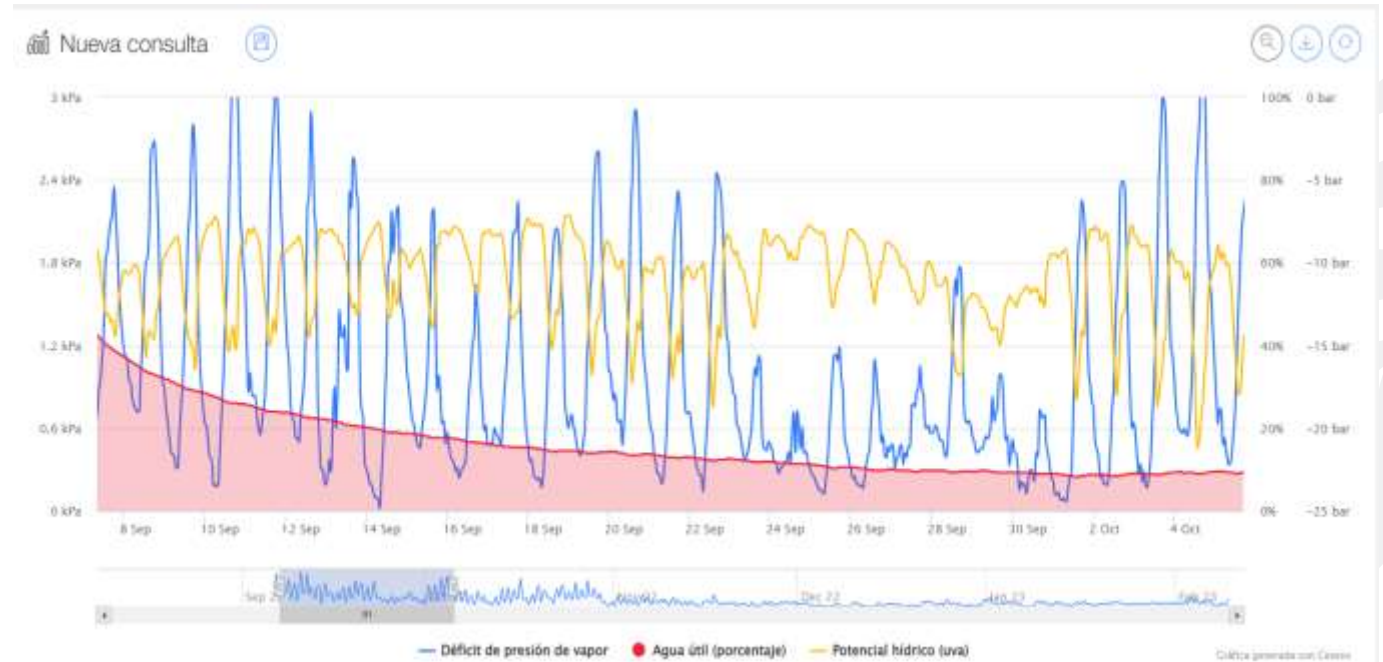
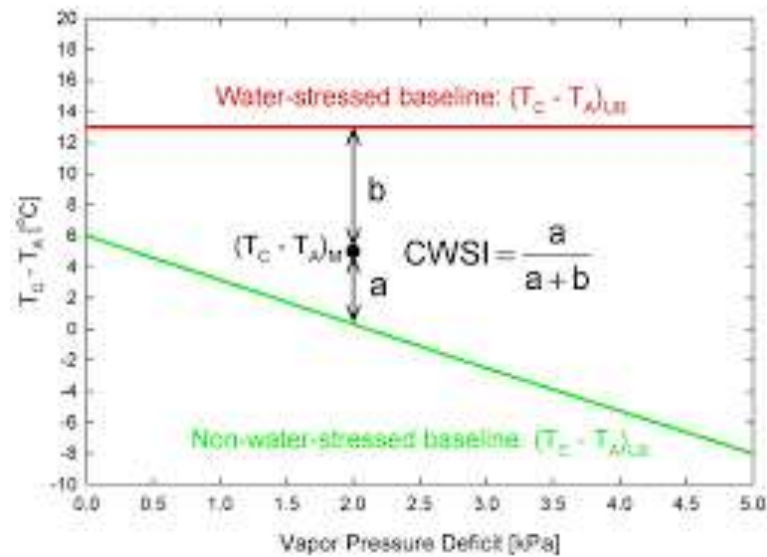
CWSI



Dendometría



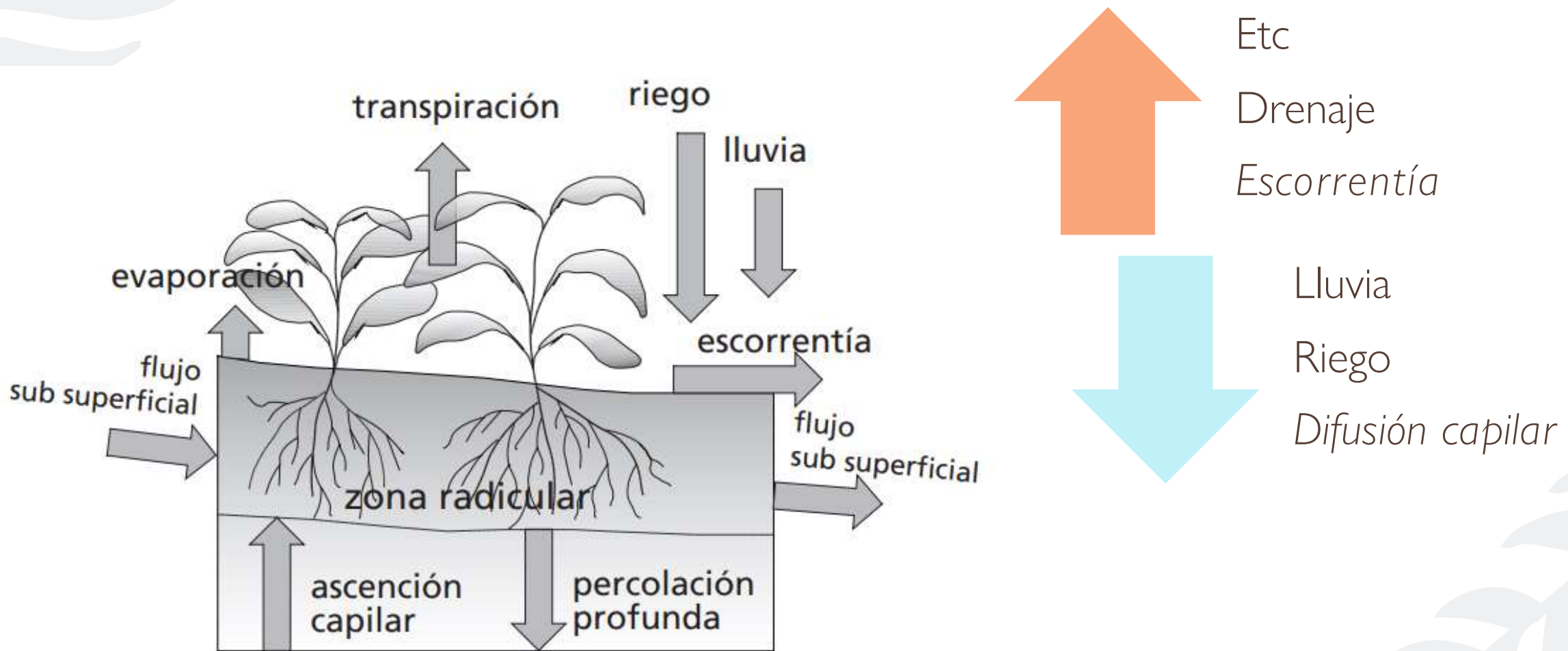
Potencial hídrico en planta



BALANCE HÍDRICO



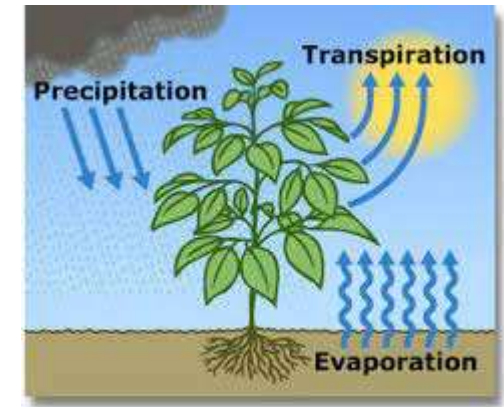
BALANCE HÍDRICO



BALANCE HÍDRICO

NECESIDADES HÍDRICAS NETAS:

$$NHN = E_{tc} - P_{ef}$$



Precipitación efectiva con tablas de referencia

Porcentaje Fijo

$$P_e = a \cdot P_t \quad a = (0,7 - 0,9)$$

Precipitación Fiable

$$P_e = 0.6 P_t - 10 \quad \text{para } P_t < 70 \text{ mm}$$

$$P_e = 0.8 P_t - 24 \quad \text{para } P_t > 70 \text{ mm}$$

Fórmula Empírica

$$P_e = a P_t + b \quad \text{para } P_t < z \text{ mm}$$

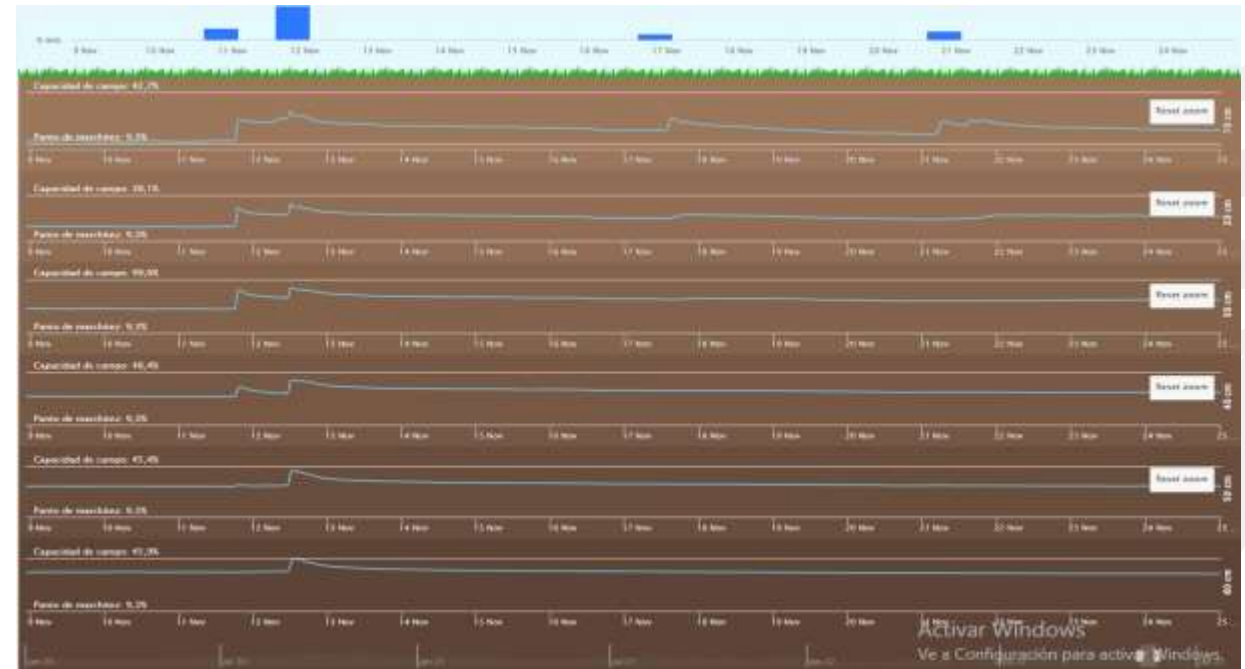
$$P_e = c P_t + d \quad \text{para } P_t > z \text{ mm}$$

USDA SCS

$$P_e = P_t (125 - 0.2 P_t / 125) \quad \text{para } P_t < 250 \text{ mm}$$

$$P_e = 125 + 0.1 P_t \quad \text{para } P_t > 250 \text{ mm}$$

Precipitación efectiva con sensores de humedad



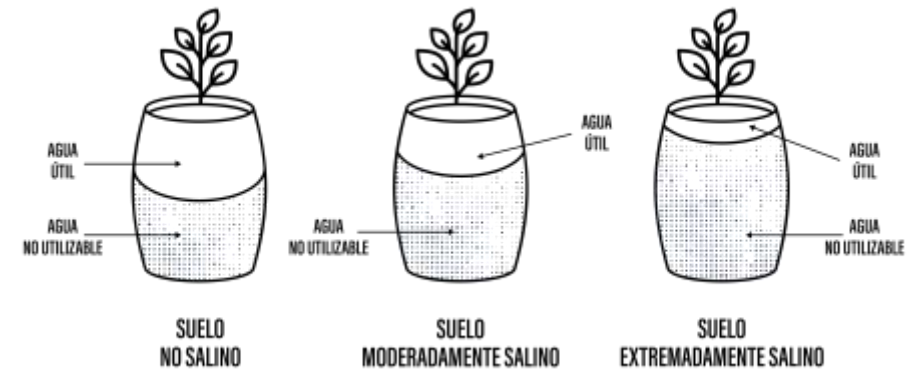
BALANCE HÍDRICO

NECESIDADES HÍDRICAS BRUTAS:

$$NHN = NHN / (1 - FL) \times (Ea)$$

Eficiencia del sistema de riego (Ea)	
Superficie	60
Aspersión	75
Gotero	90
Subterráneo	95

Martin et al. (1990)



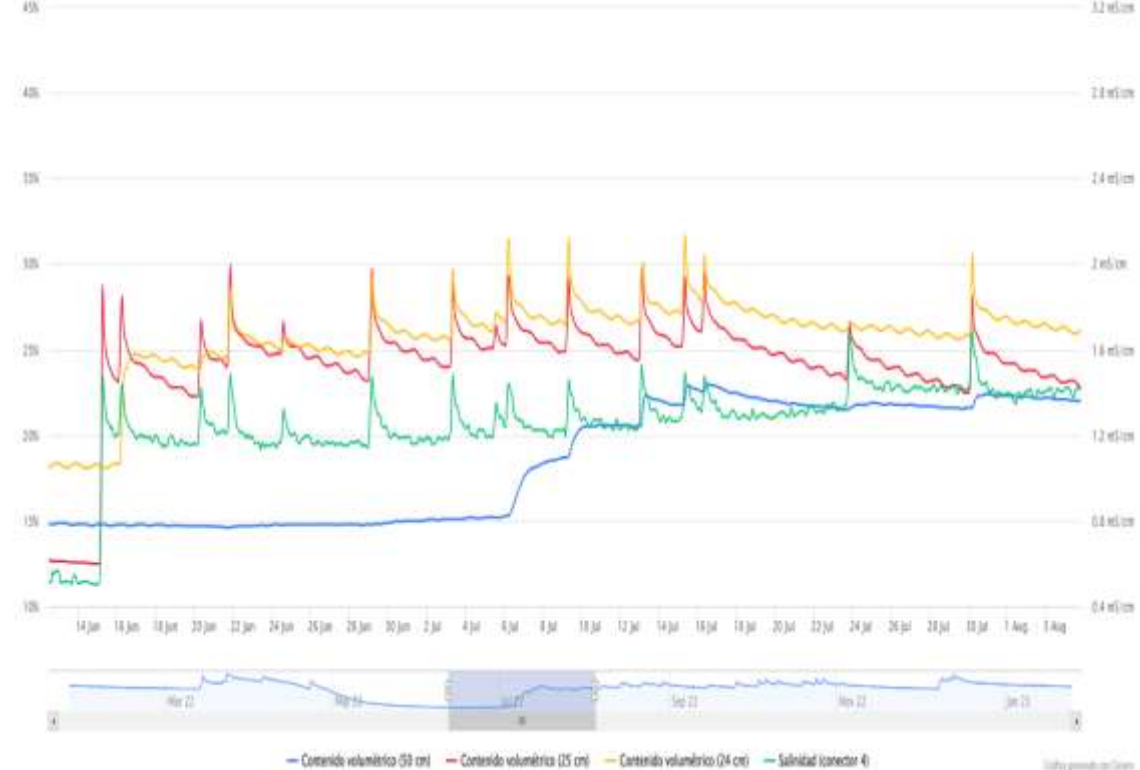
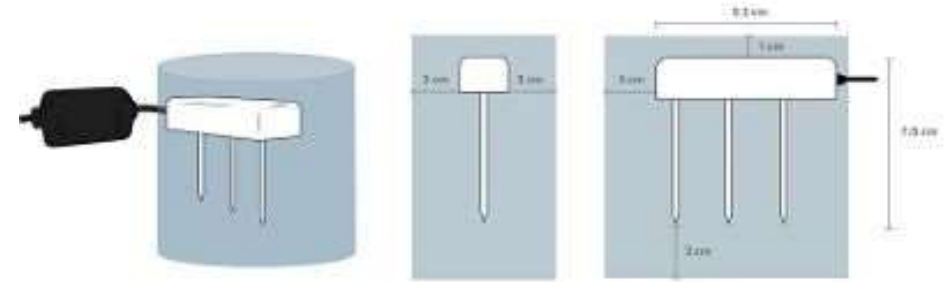
CROP TOLERANCE AND YIELD POTENTIAL OF SELECTED CROPS AS INFLUENCED BY IRRIGATION WATER SALINITY (EC_w) OR SOIL SALINITY (EC_e)¹ YIELD POTENTIAL². Fuente: Adapted from Maas and Hoffman (1977) and Maas (1984).

VEGETABLE CROPS	100%		90%		75%		50%		0% Maximum		dS m ⁻¹	
	EC _e	EC _w	EC _e	EC _w	EC _e	EC _w	EC _e	EC _w	EC _e	EC _w		
Squash, zucchini (courgette) (<i>Cucurbita pepo melopepo</i>)	4.7	3.1	5.8	3.8	7.4	4.9	10	6.7	15	10	> 2	HALOFITAS
Beet, red (<i>Beta vulgaris</i>) ²	4.7	2.7	5.1	3.4	6.8	4.5	9.6	6.4	15	10		
Squash, scallop (<i>Cucurbita pepo melopepo</i>)	3.2	2.1	3.8	2.6	4.8	3.2	6.3	4.2	9.4	6.3		
Broccoli (<i>Brassica oleracea botrytis</i>)	2.8	1.9	3.9	2.6	5.5	3.7	8.2	5.5	14	9.1	> 2	INTERMEDIAS
Tomato (<i>Lycopersicon esculentum</i>)	2.5	1.7	3.5	2.3	5.0	3.4	7.6	5.0	13	8.4		
Cucumber (<i>Cucumis sativus</i>)	2.5	1.7	3.3	2.2	4.4	2.9	6.3	4.2	10	6.8		
Spinach (<i>Spinacia oleracea</i>)	2.0	1.3	3.3	2.2	5.3	3.5	8.6	5.7	15	10	< 1	GLUCOFITAS
Celery (<i>Apium graveolens</i>)	1.8	1.2	3.4	2.3	5.8	3.9	9.9	6.6	18	12		
Cabbage (<i>Brassica oleracea capitata</i>)	1.8	1.2	2.8	1.9	4.4	2.9	7.0	4.6	12	8.1		
Potato (<i>Solanum tuberosum</i>)	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10	6.7	< 1	GLUCOFITAS
Corn, sweet (maize) (<i>Zea mays</i>)	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10	6.7		
Sweet potato (<i>Ipomoea batatas</i>)	1.5	1.0	2.4	1.6	3.8	2.5	6.0	4.0	11	7.1		
Pepper (<i>Capsicum annuum</i>)	1.5	1.0	2.2	1.5	3.2	2.2	5.4	3.4	8.6	5.8	< 1	GLUCOFITAS
Lettuce (<i>Lactuca sativa</i>)	1.5	0.9	2.1	1.4	3.2	2.1	5.4	3.4	9.0	5.8		
Radish (<i>Raphanus sativus</i>)	1.2	0.8	2.0	1.3	3.1	2.1	5.4	3.4	9.0	5.8		
Onion (<i>Allium cepa</i>)	1.2	0.8	1.8	1.2	2.8	1.8	4.3	3.0	8.1	5.4	< 1	GLUCOFITAS
Carrot (<i>Daucus carota</i>)	1.0	0.7	1.7	1.1	2.8	1.9	4.6	3.0	8.1	5.4		

BALANCE HÍDRICO



Manejo de la Fracción de Lavado con sodas de humedad y CE



BALANCE HÍDRICO

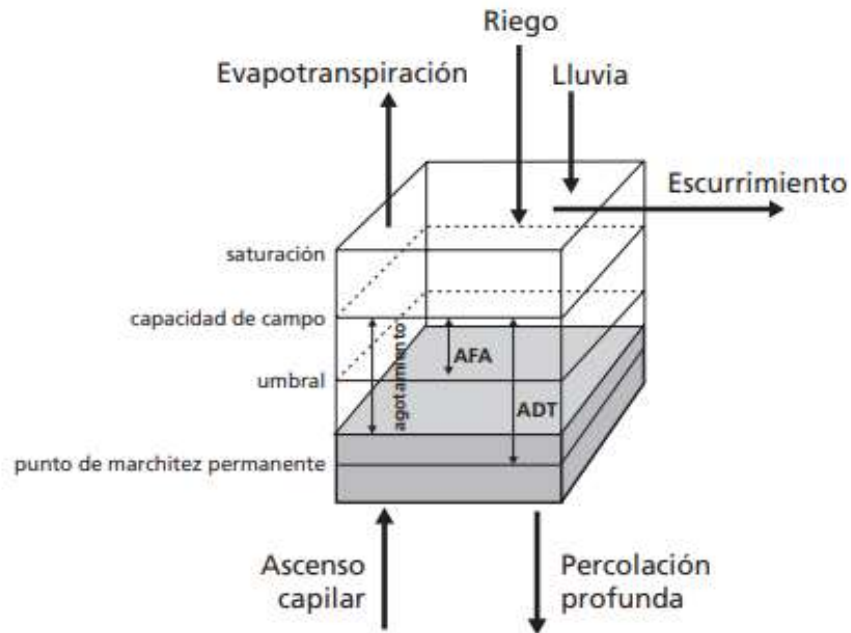
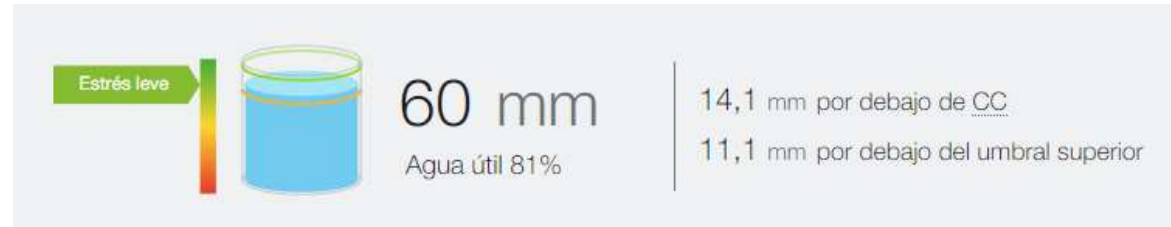


Balance hídrico a nivel general



BALANCE HÍDRICO

Balance hídrico a nivel radicular:



APLICACIONES Y CONSIDERACIONES GENERALES



Aplicaciones y consideraciones generales

Avances tecnológicos permiten mejorar la precisión de los cálculos de ET al disponer de datos procesados a nivel de parcela

CONCEPTO: Etc es un límite termodinámico superior de consumo de agua .
Representa el potencial de transpiración del cultivo para unas condiciones concretas de clima, pero muestra la realidad al ser un cálculo indirecto.

Se pueden obtener diferentes índices de manejo comparando el agua aportada (caudalímetros) y los registros de producción con estos valores para evaluar el **uso del agua**:

- ☐ $K_x = R/Etc$
- ☐ Relative Irrigation Supply (RIS) = R/NHN
- ☐ Relative Water Supply (RWS) = $(R+P_{ef})/Etc$
- ☐ Eficiencia y Productividad del uso de agua (L/kg y €/m³)
- ☐ Impacto del uso a nivel de cuenca
- ☐ Grado de estrés (E_t/Etc Y_a/Y_{max})

Aplicaciones y consideraciones generales

UTILIDADES:

Cálculos generales:

- Estudios de viabilidad de cultivos en determinadas localizaciones
- Dimensionamiento de sistemas de irrigación
- Planificación en comunidades de regantes
- Comparaciones entre cultivos y campañas

Riego:

Etc sirve como volumen de referencia a aplicar (escala diaria, semanal, etc.).

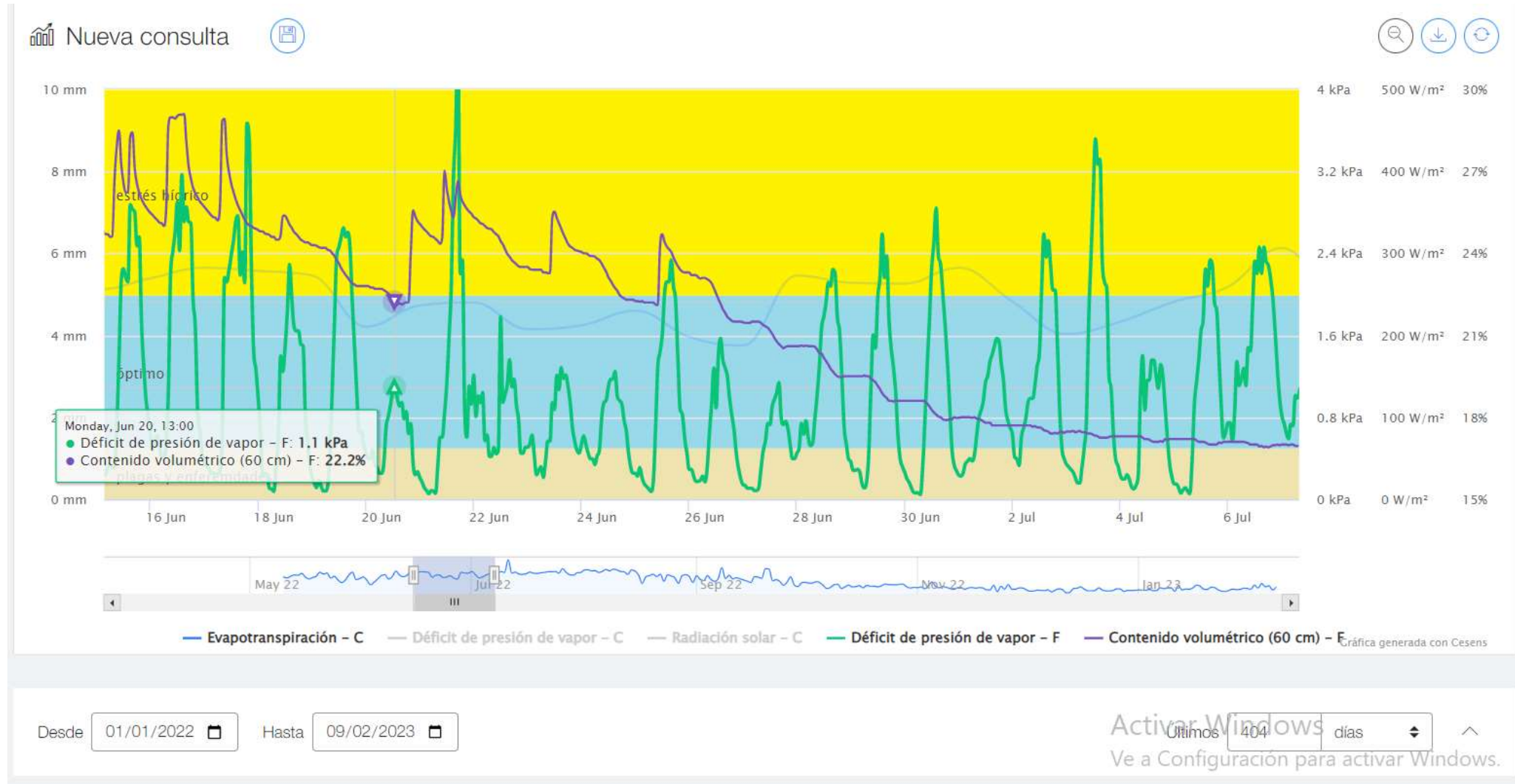
Utilizar las recomendaciones de NHB que dan los Siars o las estaciones agroclimáticas habitualmente supone un mejora sustancial en los hábitos de riego.

DISTRIBUCIÓN DEL VOLUMEN DE APOORTE HÍDRICO??

➤ Dosis y frecuencias de riego basadas en sondas de humedad de suelo (+ fraccionamiento = + disponibilidad - lavado). Otros sensores de estrés hídrico en planta??

➤ $R < ET_c$

Aplicaciones y consideraciones generales



Samuel M. Espiga

samuel@cesens.com

662513428

Muchas Gracias
por su Atención!!

