

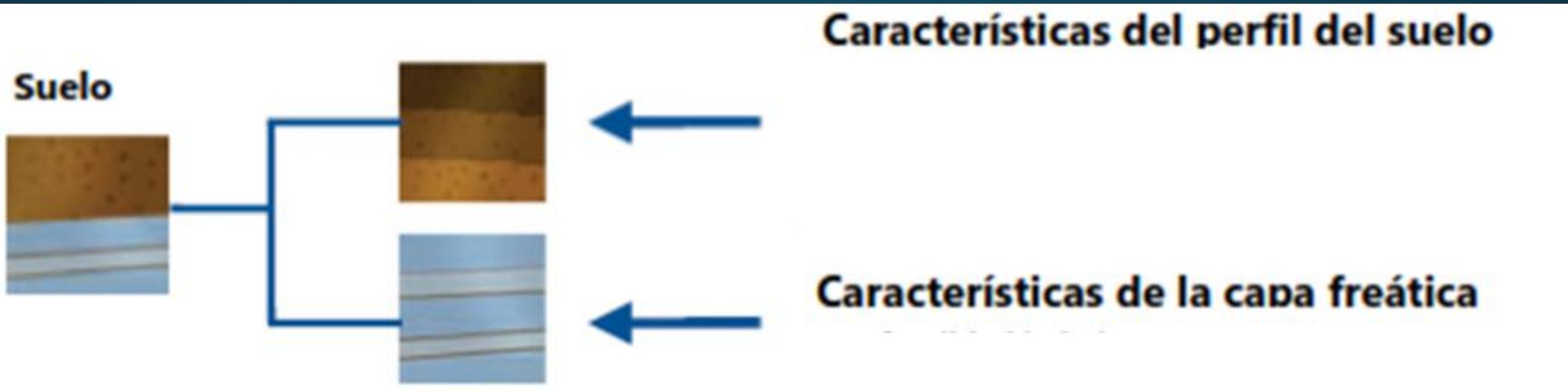
SUELO



M Sc Ing. Rocío Hernández

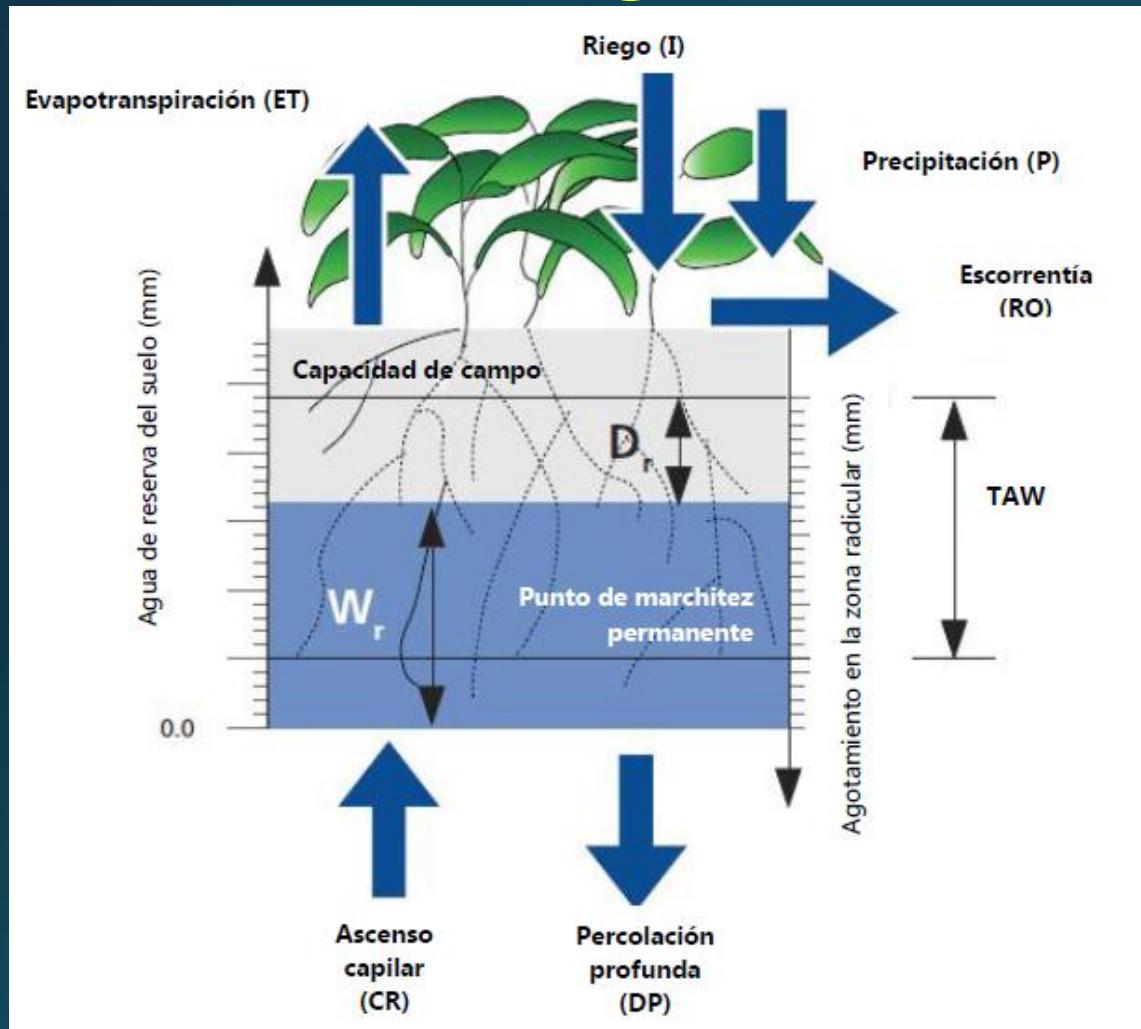
M Sc Ing. Leandro Martín

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO
MENDOZA - ARGENTINA



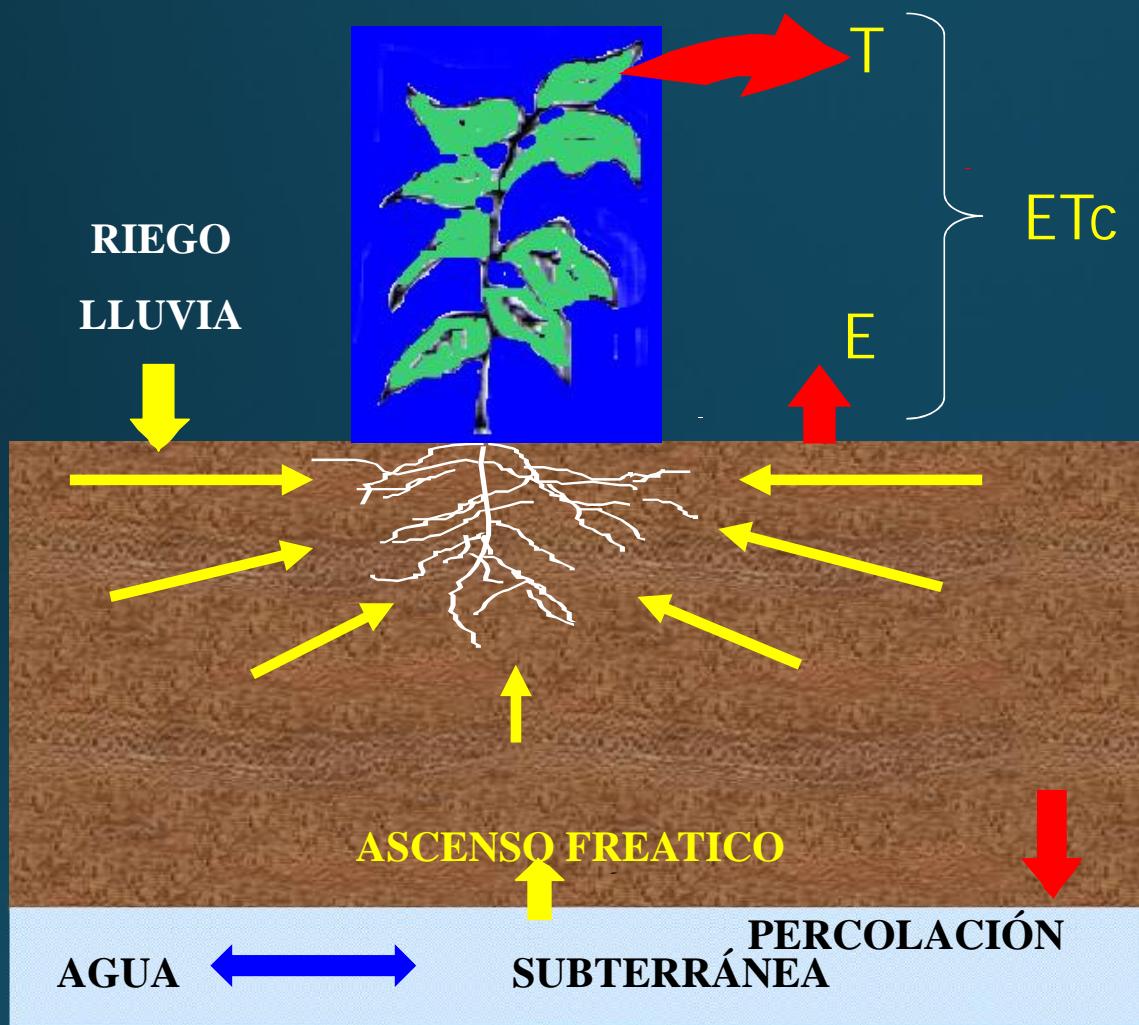
- **Características del perfil:** se refieren a los parámetros físicos requeridos para simular la retención y el movimiento del agua y la sal en el perfil del suelo.
- **Características de la capa freática:** presencia o ausencia, profundidad debajo de la superficie del suelo y salinidad.

Balance de agua en el suelo



$$Wr(t+1) \text{ (mm agua)} = Wr(t) + (I + P - RO) - (E + Tr + Dp)$$

- FC: Capacidad de campo (mm)
- PWP: Punto de marchitez permanente (mm)
- TAW: Agua disponible total en el suelo (mm)
- Dr (root zone depletion) : Agotamiento de la zona radicular (mm)
- Wr: Profundidad de agua equivalente (mm)



Potencial Agua

(Atm=Bar =100 kPa)

Aire con 50% HR: - 1200 / 120.000

Hoja: - 22 / 2.200

Cuello: - 19 / 1.900

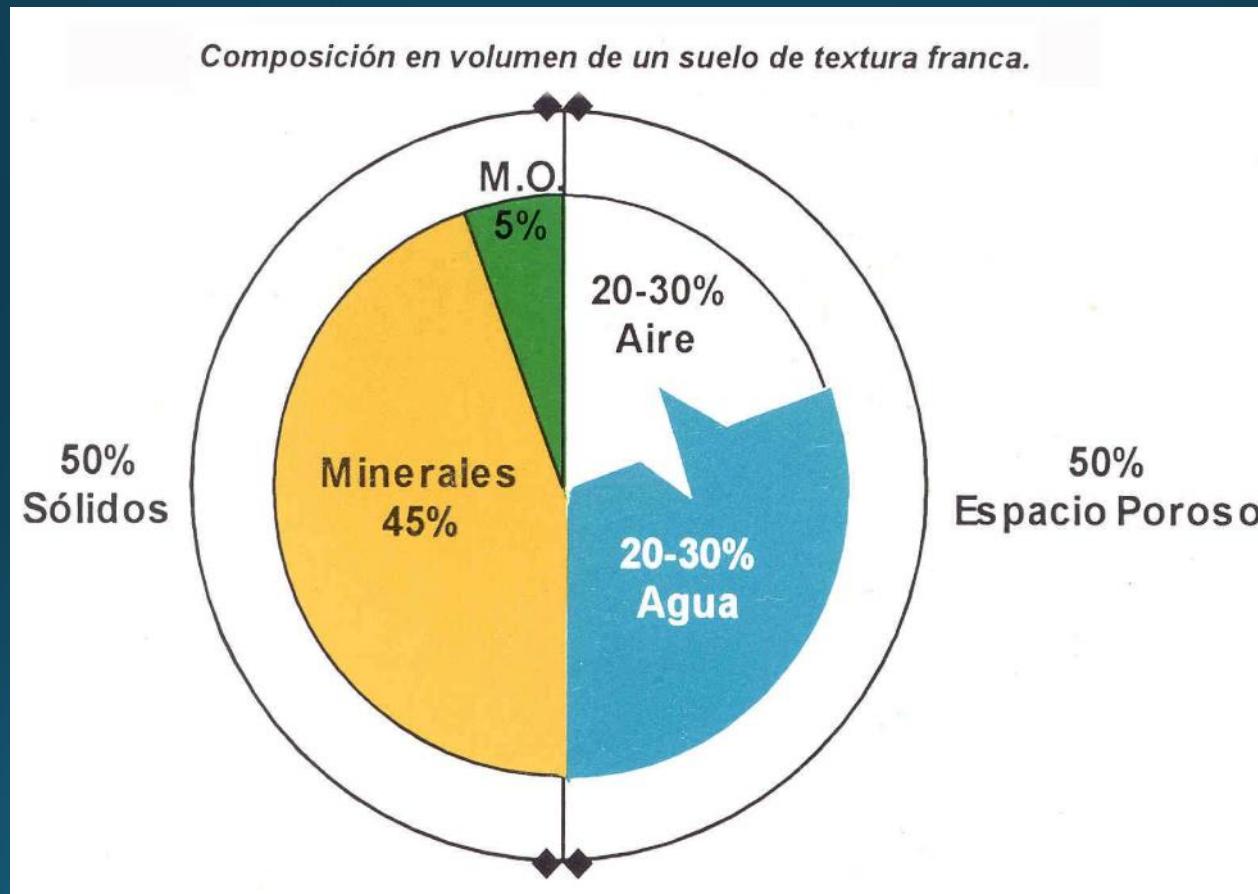
Raíz: - 17 / 1.700

Pelo raíz: - 14 / 1.400

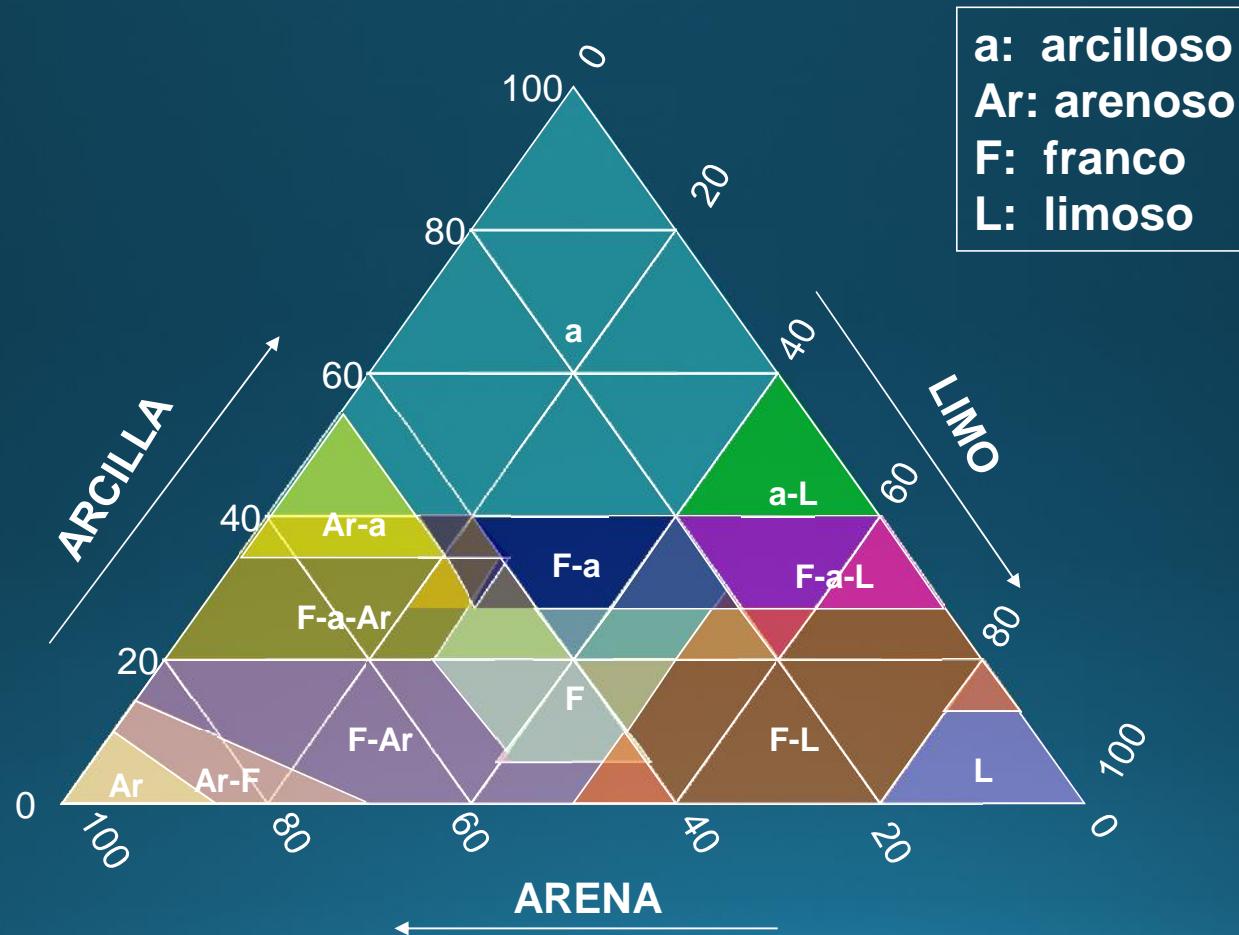
Suelo - 4 / 400

El suelo es un sistema polifásico heterogéneo

Composición en volumen de un suelo de textura Franca

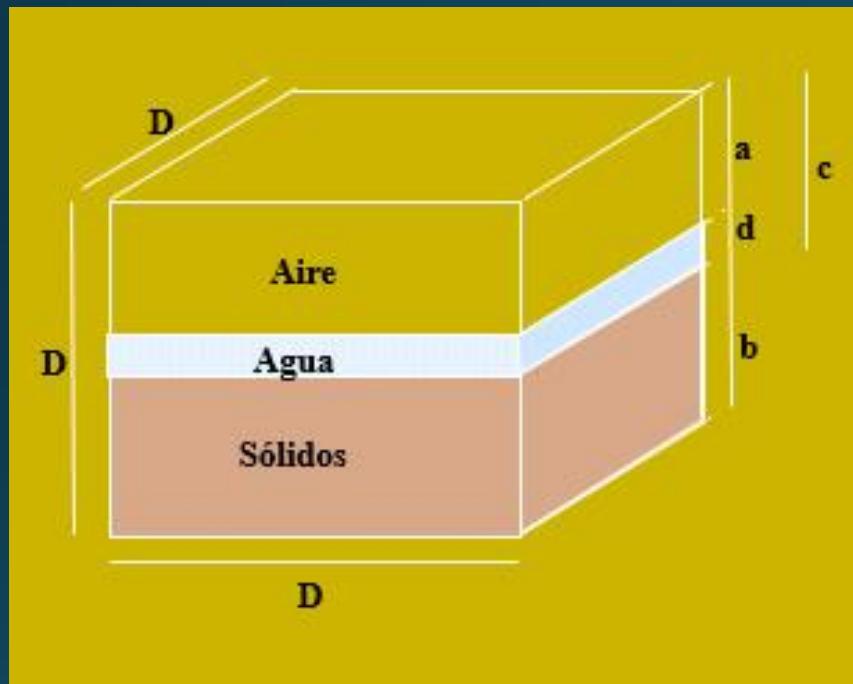


Triángulo de Textura



- Densidad Aparente

Método del cilindro



$$DAP = \frac{\text{masa de suelo seco}}{\text{volumen bruto}} = \frac{D^2 b \rho_p}{D^3}$$

Densidad según textura

Arcilloso $1,20 \text{ g cm}^{-3}$

Franco $1,30 \text{ g cm}^{-3}$

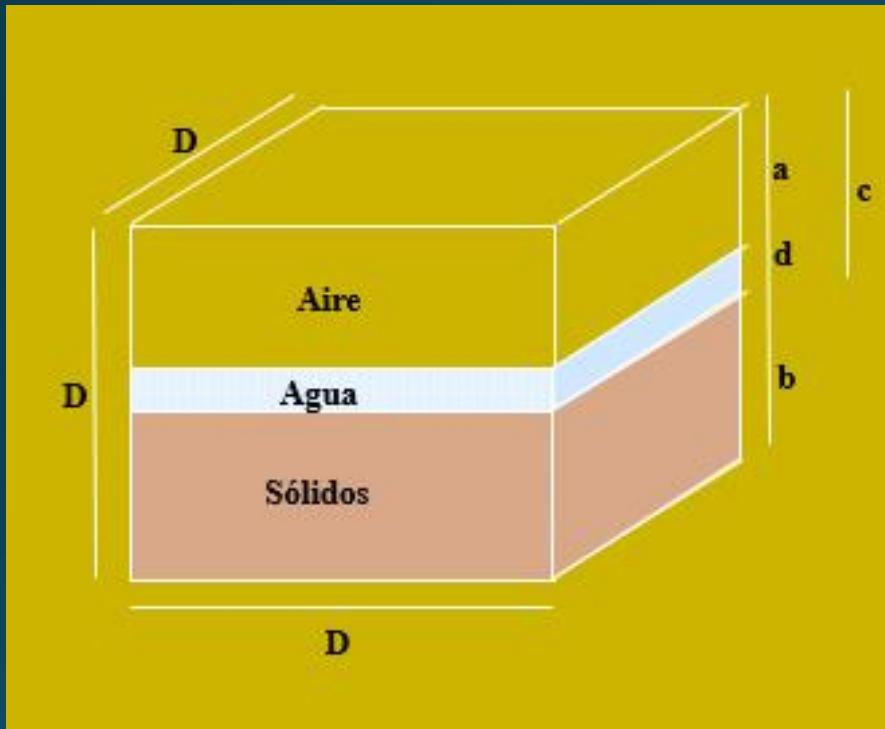
Arenoso $1,40 \text{ g cm}^{-3}$



Densidad Aparente



- Densidad Real



$$DR = \frac{\text{masa de sólidos}}{\text{volumen de sólidos}}$$

Densidades de suelos minerales

Feldespato = $2,50 - 2,60 \text{ g cm}^{-3}$

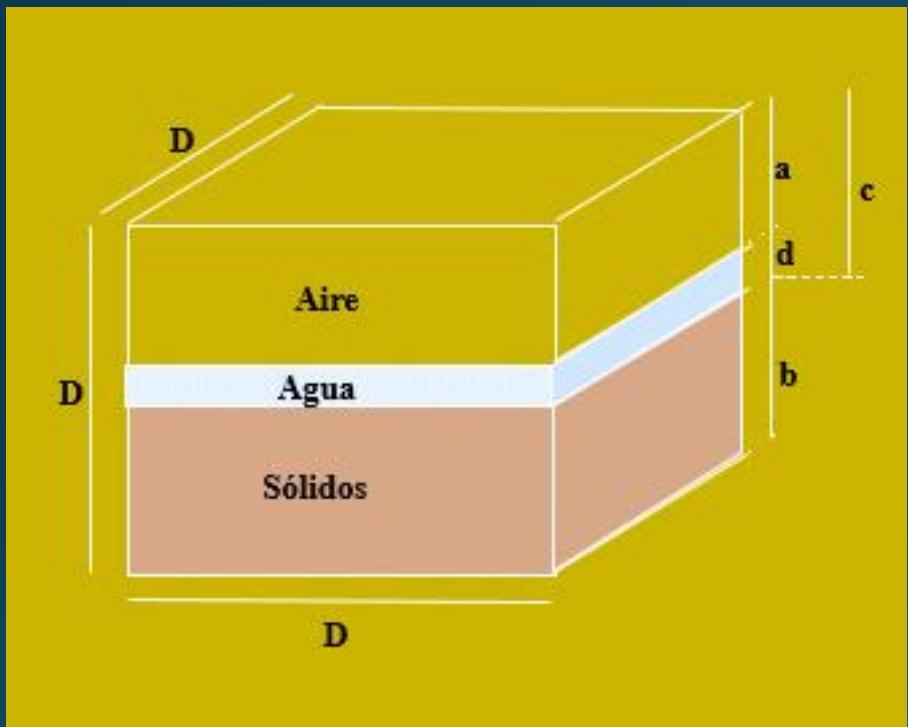
Mica = $2,70 - 3,00 \text{ g cm}^{-3}$

cuarzo = $2,50 - 2,80 \text{ g cm}^{-3}$

Miner. Arcilla = $2,20 - 2,60 \text{ g cm}^{-3}$

MEDIA = $2,65 \text{ g cm}^{-3}$

- Porosidad Total



$$P = \frac{\text{Volumen total de poros}}{\text{volumen bruto}}$$

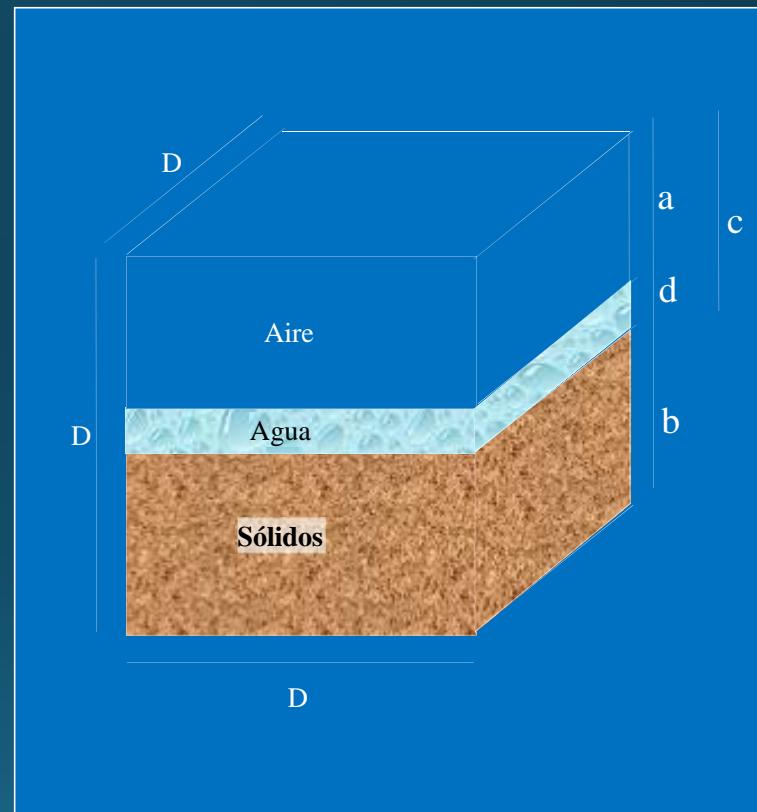
Macroporos > 30 micrones
Mesoporos 0,2 a 30 micrones
Microporos < 0,2 micrones

Lámina de agua: d

$$d = \frac{\text{volumen de agua}}{\text{area}} = \frac{D^2 d}{D^2}$$

$$d = \frac{w * \text{dap} * D}{100}$$

$$d = \frac{w_v * D}{100}$$

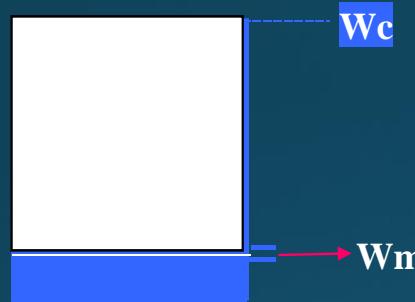


HUMEDADES CARACTERÍSTICAS DEL SUELO

Capacidad de campo (W_c)

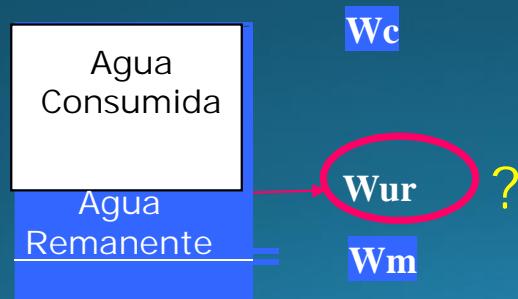
Capacidad de Marchitamiento Permanente (W_m)

Aqua Disponible (W_d)

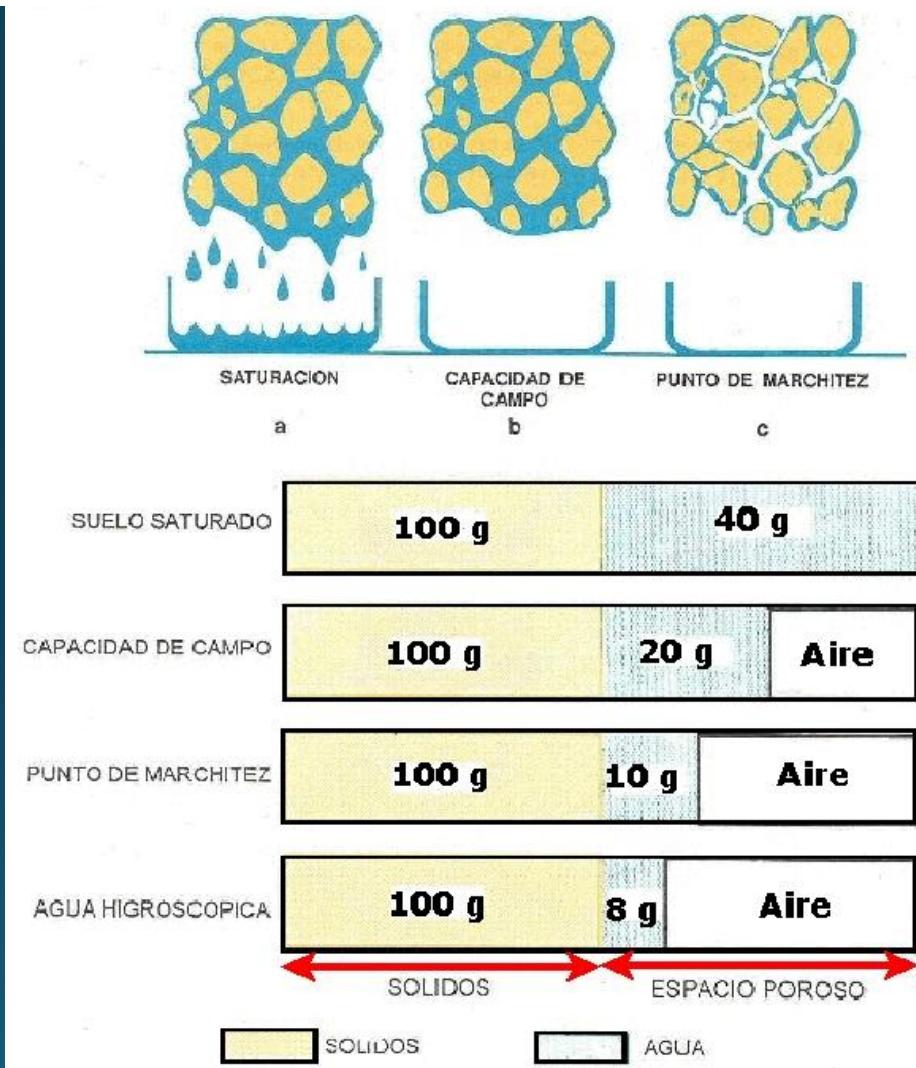


$$W_d = W_c - W_m$$

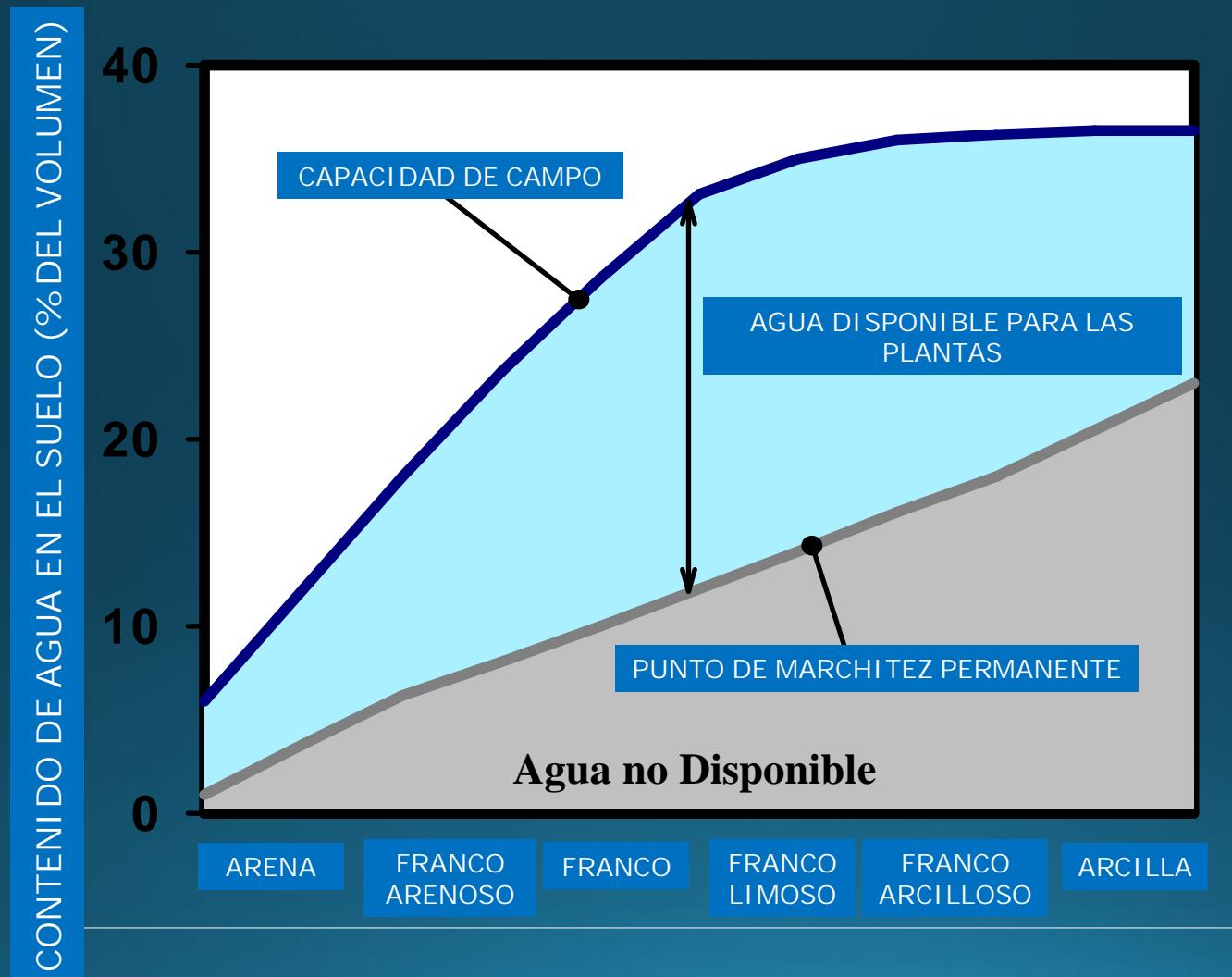
Capacidad en el umbral de riego (W_{ur})



Volúmenes de agua y aire asociados con 100 gr de suelo seco en tres situaciones o “puntos” de la escala de agua: Saturación, Capacidad de Campo y Punto de Marchitez.



AGUA DISPONIBLE TOTAL



HUMEDADES DE INTERÉS EN EL SUELO

Valores de referencia según textura

Ws = Saturación

Wc = Capacidad de campo

Wm = Marchitamiento Permanente

	Ws	Wc	Wm
Arenoso	20	10	5
Franco	40	20	10
Arcilloso	60	30	15

AGUA DISPONIBLE CONSUMIDA Y REMANENTE

$$W_{consumida} = W_c - W_{actual}$$

$$W_{remanente} = W_a - W_m$$

Porcentaje de agua disponible consumida (%Wdc)

$$\% W_{dc} = (W_c - W_{actual}) / Wd \times 100$$

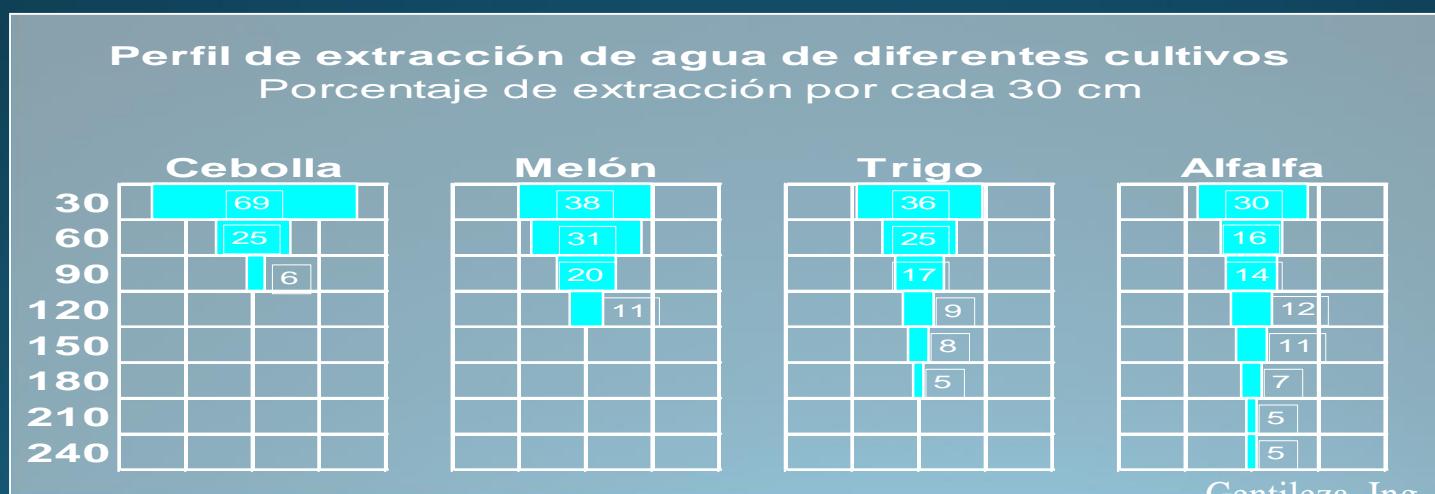
Porcentaje de agua disponible remanente (%Wdr)

$$\% W_{dr} = (W_a - W_m) / Wd \times 100$$

AGUA DISPONIBLE PARA VARIOS TIPOS DE SUELO

Tipo de suelo	Humedad disponible (mm m^{-1})	
	Rango	Promedio
Arena	40 a 80	60
Franco arenoso a	80 a 120	100
Franco arenoso fino		
Franco arenoso muy fino a	100 a 140	120
Franco arcillo limoso		
Arcillo limoso a arcilloso	120 a 200	160
Turbas y estiércoles	160 a 240	200

PERFIL DE EXTRACCIÓN DE AGUA DE DIFERENTES CULTIVOS PORCENTAJE DE EXTRACCIÓN POR CADA 30 CM



$$\text{Lámina de agua disponible} = \frac{W_c - W_m}{100} * \text{PEA} * \text{prof.raíces}$$

Determinar
en campo

$$\text{Lámina de agua consumible} = \frac{W_c - W_a}{100} * \text{PEA} * \text{prof.raíces}$$

$$\text{Lámina de agua remanente} = \frac{W_a - W_m}{100} * \text{PEA} * \text{prof.raíces}$$



Valores críticos vid:
- densidad aparente
 $1,5 \text{ g cm}^{-3}$
- resistencia a la
penetración
 $2 \text{ Mpa} = 2000 \text{ kPa}$

LÁMINAS DE RIEGO

LAMINA TOTAL DE AGUA DISPONIBLE (dt)

*LAMINA CONSUMIDA o LAMINA DE REPOSICIÓN o
LAMINA NETA (dc = dn)*

LAMINA REMANENTE (dr)

LAMINA DE RIEGO OPTIMA (dn opt)

LAMINA BRUTA (db)

$$dt = \left(\frac{Wc - Wm}{100} \right) * PEA * D$$

$$dc = dn = \left(\frac{Wc - Wa}{100} \right) * PEA * D$$

$$dr = \left(\frac{Wa - Wm}{100} \right) * PEA * D$$

$$dn_{opt} = \left(\frac{Wc - Wm}{100} \right) * PEA * D * p$$

$$db = \left(\frac{Q * tap}{Sup} \right)$$

Wc = capacidad de campo (gr % gr suelo seco)

Wa = contenido humedad en momento de riego (gr % gr de suelo seco)

Wm = punto de marchitamiento permanente (gr % gr suelo seco)

PEA= peso específico aparente (gr/cm³)

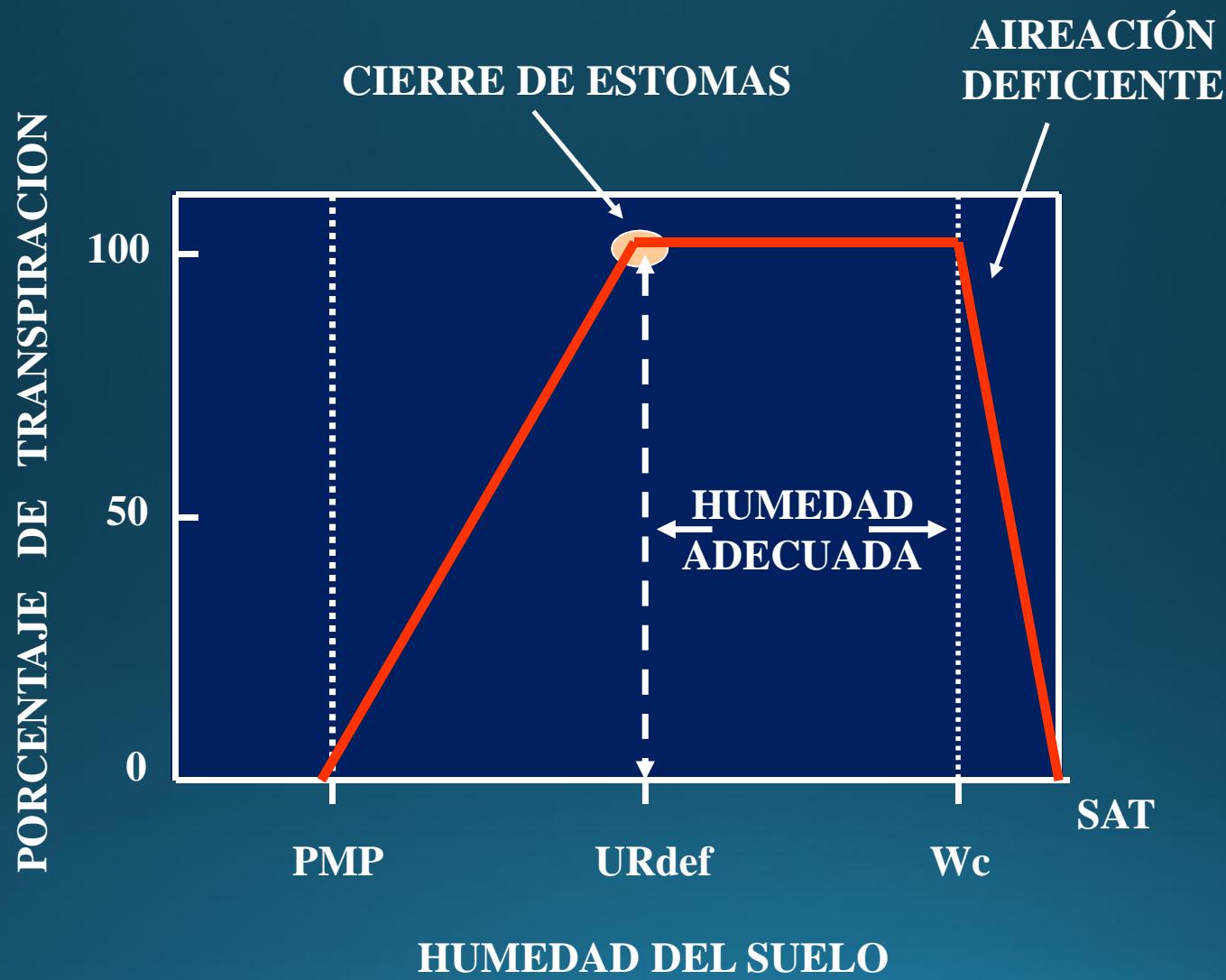
D = profundidad efectiva de raíces

p = coeficiente de agotamiento de agua en el suelo (depende del cultivo y de la evapotranspiración) (p = 1 - UR)

Q = caudal

Tap = tiempo de aplicación o de corte

Sup = superficie regada



Umbral de riego UR = 1 - p

Grupo Cultivos de acuerdo con el coeficiente de agotamiento del agua del suelo

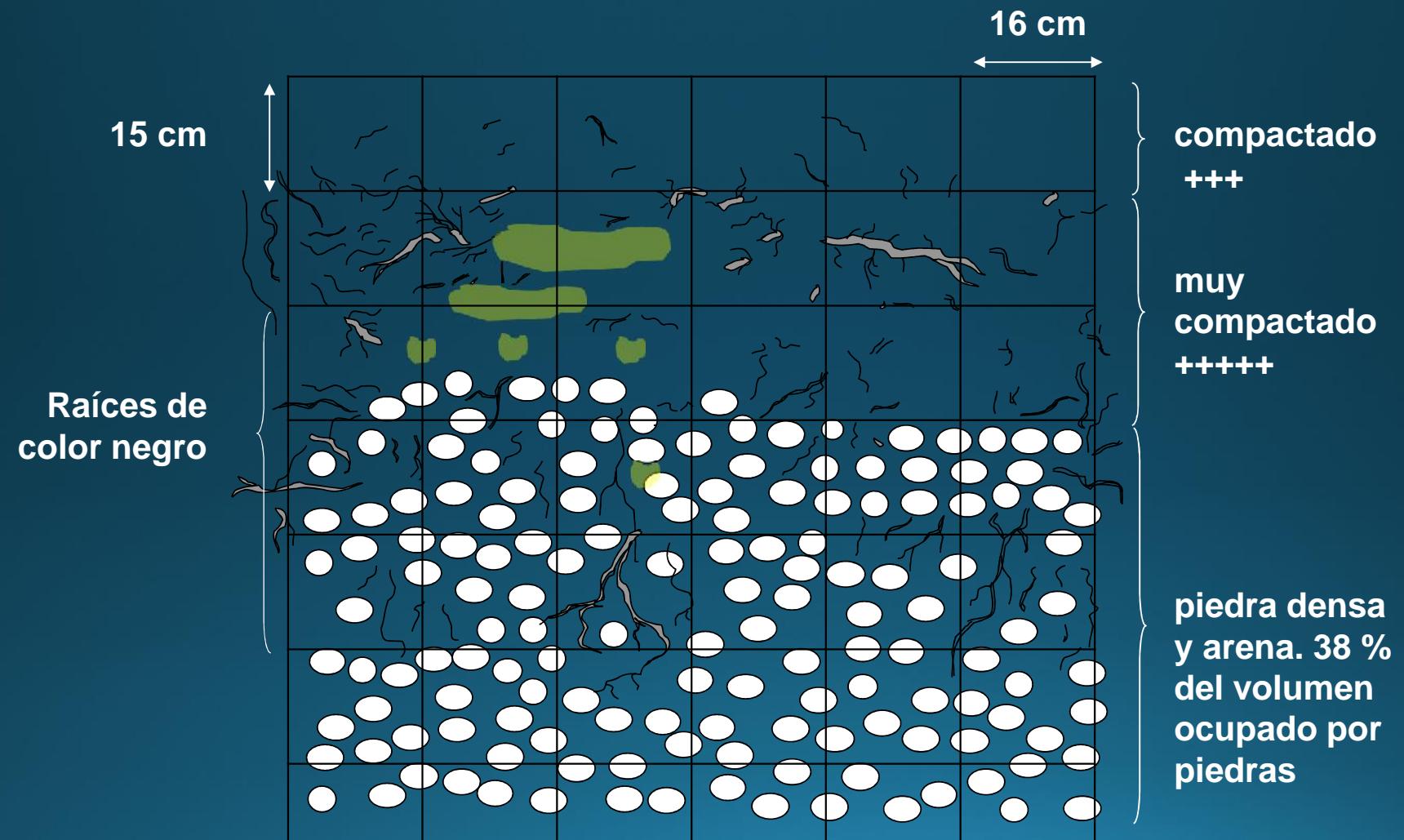
- 1 Cebolla, pimiento, papa
- 2 Banana, coliflor, vid, haba, tomate
- 3 Alfalfa, poroto, cítricos, maní, girasol, sandía, trigo
- 4 Algodón, olivo, cártamo, sorgo, soja, remolacha , azucarera, caña de azúcar

Fracción de agotamiento del agua del suelo (p) para grupos de cultivos y evapotranspiración máxima (Etm)

Grupo	Etm (mm/día)									
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	0.500	0.425	0.350	0.30	0.25	0.225	0.200	0.200	0.175	
2	0.675	0.575	0.475	0.40	0.35	0.325	0.275	0.250	0.225	
3	0.800	0.700	0.600	0.50	0.45	0.425	0.375	0.350	0.300	
4	0.875	0.800	0.700	0.60	0.55	0.500	0.450	0.425	0.400	

Influencia del volumen de piedras en el suelo sobre el agua total disponible

Cultivo: vid. variedad Syrah – Mendoza



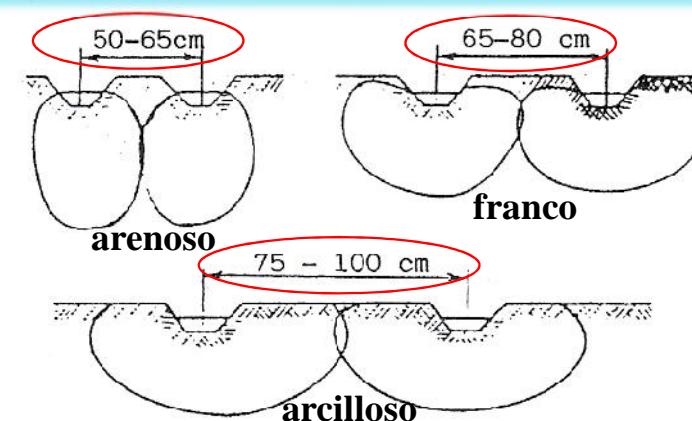
Fracción de la superficie del suelo humedecida por el riego

CUADRO 20

Valores comunes de la fracción f_w de la superficie humedecida del suelo por riego o lluvia

Evento de humedecimiento	f_w
Precipitación	1,0
Riego por aspersión	1,0
Riego por pozas	1,0
Riego por melgas	1,0
Riego por surcos (cada surco), camas estrechas	0,6 ... 1,0
Riego por surcos (cada surco), camas anchas	0,4 ... 0,6
Riego por surcos (surcos alternados)	0,3 ... 0,5
Riego por goteo	0,3 ... 0,4

Humedecimiento del suelo



RIEGO LOCALIZADO

CULTIVO	PORCENTAJE DE SUELO MOJADO (%)
VIDES	30 – 35
FRUTALES	45 – 55
HORTALIZAS	55 – 70



PORCENTAJE DE SUELO MOJADO Y PRESENCIA DE PIEDRAS EN EL SUELO CORRECCION DE LAS LÁMINAS DE RIEGO

LAMINA TOTAL DE AGUA DISPONIBLE (dt)

$$dt = \left(\frac{Wc - Wm}{100} \right) * PEA * D$$

LAMINA TOTAL DE AGUA DISPONIBLE
CORREGIDA POR PORCENTAJE DE SUELO
MOJADO Y PRESENCIA DE PIEDRAS (dt)

$$dt = \left(\frac{Wc - Wm}{100} \right) * PEA * D * P_{SM} * (1 - Piedras)$$

LAMINA DE RIEGO OPTIMA (dn_{opt})

$$dn_{opt} = \left(\frac{Wc - Wm}{100} \right) * PEA * D * P_{SM} * (1 - Piedras) * p$$

Wc = capacidad de campo (gr % gr suelo seco)

Wm = punto marchitamiento permanente (gr % gr suelo seco)

PEA = peso específico aparente (gr/cm³)

D = profundidad efectiva de raíces

p = coef. agot. de agua en el suelo (depende del cultivo y de la evapotranspiración) ($p = 1 - UR$)

P_{MS} = porcentaje de suelo mojado

Piedras = porcentaje piedras del perfil en volumen (%)

11. LAMINAS DE RIEGO (ejemplos)

LAMINA TOTAL DE AGUA DISPONIBLE (dt)

$$h_t = d_t = \left(\frac{Wc - Wm}{100} \right) * PEA * D * (1 - P_v) * (PM / 100)$$

LAMINA DE RIEGO OPTIMA (dn opt)

$$h_{opt} = d_{opt} = \left(\frac{Wc - Wm}{100} \right) * PEA * D * (1 - P_v) * (PM / 100) * p$$

Capacidad de campo Cc (gr%gr) =	22	22	22	22
Punto marchitez permanente Pm (gr%gr) =	10	10	10	10
Densidad aparente da (gr/cm ³) =	1,4	1,4	1,4	1,4
Fracción facilmente disponible (p) =	1	0,5	0,5	0,5
Porcentaje piedras del perfil volumen P (%) =	0	0	25	25
Profundidad radical D (m) =	1	1	1	1
Porcentaje de suelo mojado Psm (%) =	100	100	100	30
h ó d: Altura de agua a disponible (mm) =	168	84	63	19
PS % de Sombreado (%) =	100	100	100	100
Nn (mm/día) =	-	6	6	6
Intervalo riego = dopt(mm)/Nn(mm/día)=	-	14,0	10,5	3,2

Estructura del Suelo: La organización de las partículas de arena, limo y arcilla para formar agregados de mayor tamaño



Suelo no compactado
Baja densidad aparente



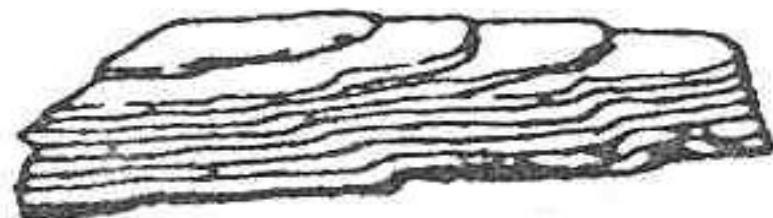
← →
4 mm

Suelo compactado
Alta densidad aparente

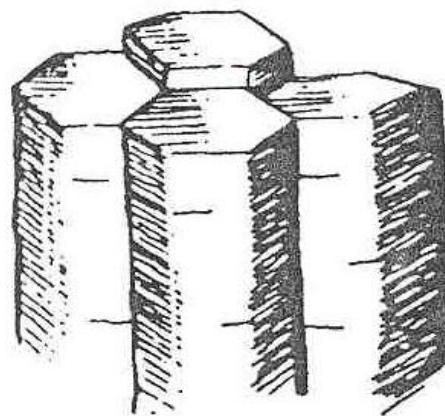


← →
4 mm

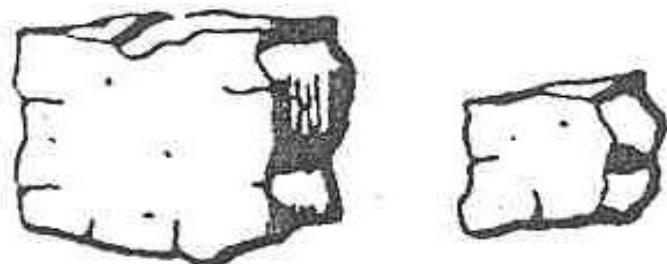
Estas partículas elementales (arena, limo y arcilla) se agrupan entre si constituyendo agregados, lo que corresponde a la estructura del suelo.



Laminar



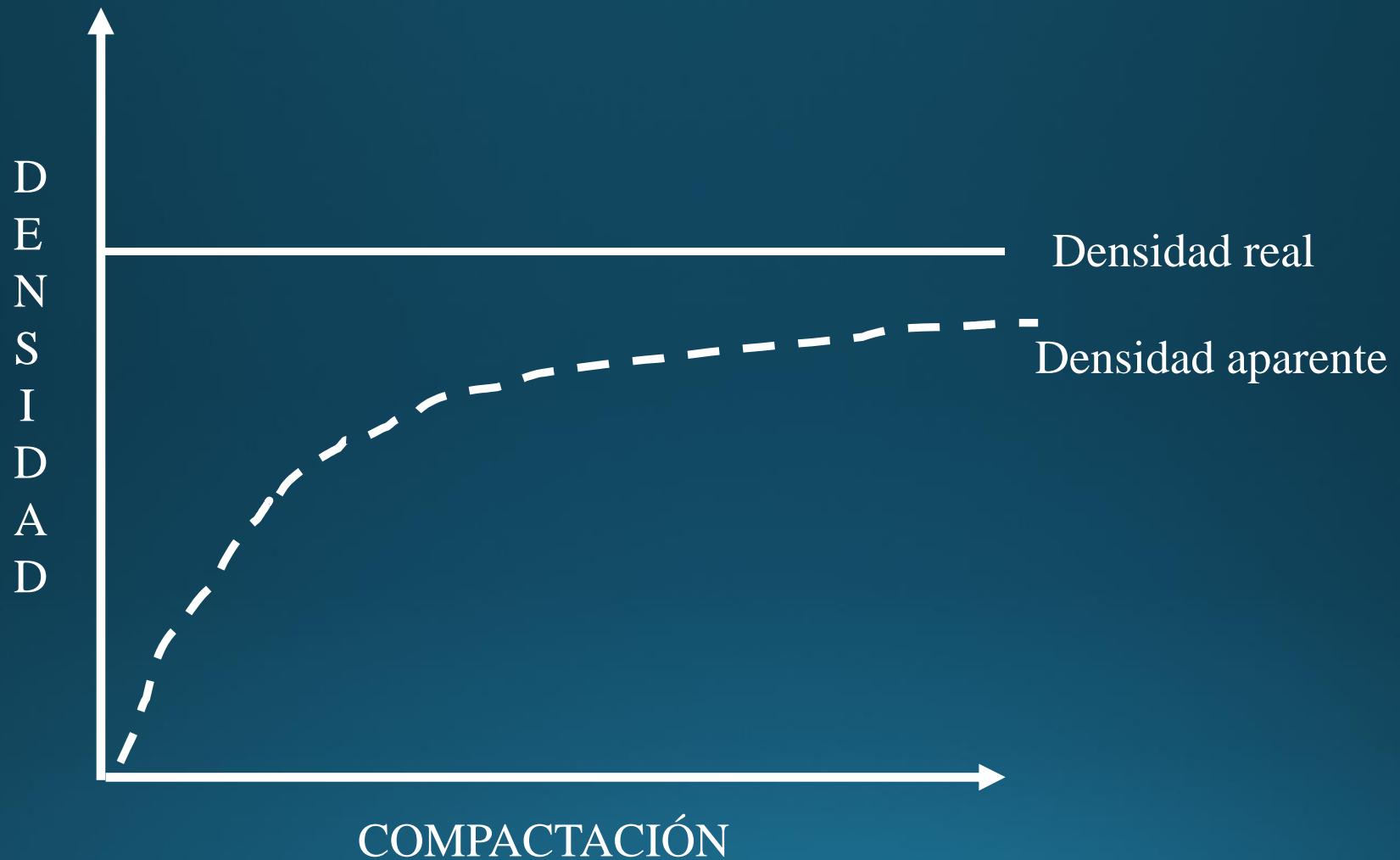
Prismática



De bloques



Granular

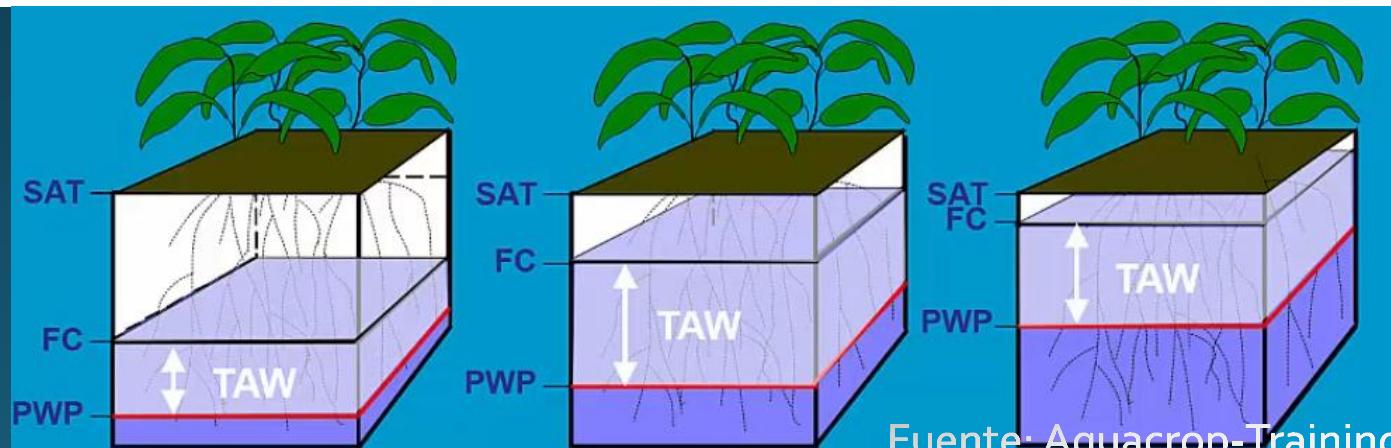


Soil texture	Ideal bulk densities kg.m⁻³	Bulk densities that may affect root growth kg.m⁻³	Bulk densities that restrict root growth kg.m⁻³
Sand	1.60	1.69	> 1.80
Loamy sand	1.60	1.69	> 1.80
Sandy loam	1.40	1.63	> 1.80
Loam	1.40	1.63	> 1.80
Sandy clay loam	1.40	1.60	> 1.75
Clay loam	1.40	1.60	> 1.75
Silt	1.30	1.60	> 1.75
Silt loam	1.30	1.60	> 1.75
Silty clay loam	1.40	1.55	> 1.65
Sandy clay	1.10	1.49	> 1.58
Silty clay	1.10	1.49	> 1.58
Clay	1.10	1.39	> 1.47

Reference: USDA, 1999. Soil quality test kit guide. USDA Soil quality institute, Washington, D.C.

Propiedades físicas del suelo

Textura de suelo							Humedad Disponible		
	Infiltración básica mm/hora	Espacio poroso %	Peso específico aparente gr% cm ⁻³	Capacidad de campo gr% gr	Marchitez permanente gr% gr	Peso seco en gr% gr	Volumen gr% gr	mm agua cada 10 cm de suelo	
Ib	N	PEA	Wc	Wm	Wc-Wm	(Wc-Wm). _a	D=(Wd/100).PEA.D		
Arenoso	50 (25-250)	38 (32-42)	1,65 (1,55-1,8)	9 (6-12)	4 (2-6)	5 (4-6)	8 (6-10)	8,2 (6,2-10,8)	
Franco arenoso	25 (13-75)	43 (40-47)	1,50 (1,40-1,60)	14 (10-18)	6 (4-8)	8 (6-10)	12 (9-15)	12 (8,4-16)	
Franco	12,5 (7,5-20)	47 (43-49)	1,4 (1,35-1,50)	22 (18-26)	10 (8-12)	12 (10-24)	17 (14-20)	16,8 (13,5-21)	
Franco arcilloso	7,5 (7,5-20)	49 (47-51)	1,35 (1,30-1,40)	27 (23-31)	13 (11-15)	14 (12-16)	19 (16-22)	18,9 (15,6-22,4)	
Arcilloso limoso	2 (2-15)	51 (49-53)	1,3 (1,25-1,35)	31 (27-35)	15 (13-17)	16 (14-18)	21 (18-23)	20,8 (17,5-24,3)	
Arcilloso	0,5 (0,1-1)	53 (51-55)	1,25 (1,20-1,30)	35 (31-39)	17 (15-19)	18 (16-20)	23 (20-25)	22,5 (19,2-26)	



Fuente: Aquacrop-Training module, FAO (2016)

Valores medios de **Capacidad de aire de los suelos (CA)**: pueden variar con la compactación, materia orgánica, etc.

$$CA = \text{Espacio poroso} - (W_c * PEA)$$

$$CA_{franco} = 47 - (22 * 1,4) = 16,2 \%$$

TEXTURA	P%	CA %
Arenoso	38	23,15
F-arenoso	43	22
Franco	47	16,2
F-arcilloso	49	12,55
Arcillo-arenoso	51	10,7
Arcilloso	53	9,25

Resistencia mecánica del suelo: la resistencia mecánica del suelo es función de los contactos de partículas por unidad de volumen de suelo.

- Las raíces penetraran al suelo solo si la fuerza que ellas ejercen es superior a la resistencia mecánica que opone el suelo.
- Se mide en unidades de presión (MPa, kPa).
- Cuando la resistencia a la penetración es > 1 Mpa (1000 kPa) se dificulta el desarrollo de las raíces.

Valores críticos para vid:

- densidad aparente $1,5 \text{ g cm}^{-3}$
- resistencia a la penetración :
 $2 \text{ Mpa} = 2000 \text{ kPa}$



Potencial de agua en el suelo

El agua se mueve en el suelo porque posee cierta cantidad de energía (cinética y potencial). La energía cinética es casi nula por lo que la dinámica del agua depende de la energía “**POTENCIAL**”

POTENCIAL: cantidad de trabajo que debe ser efectuado por unidad de masa de agua, con el objeto de transportar, reversible e isotérmicamente una cantidad infinitesimal de agua desde un reservorio de agua pura, situado a una elevación específica y bajo presión atmosférica, hasta un cierto punto del suelo.

$$\mathbb{E} = \mathbb{E}_g + \mathbb{E}_m + \mathbb{E}_a + \mathbb{E}_o$$

Suelo insaturado

\mathbb{E} potencial total

\mathbb{E}_g potencial gravitatorio, si la unidad de masa está arriba del plano de referencia es +

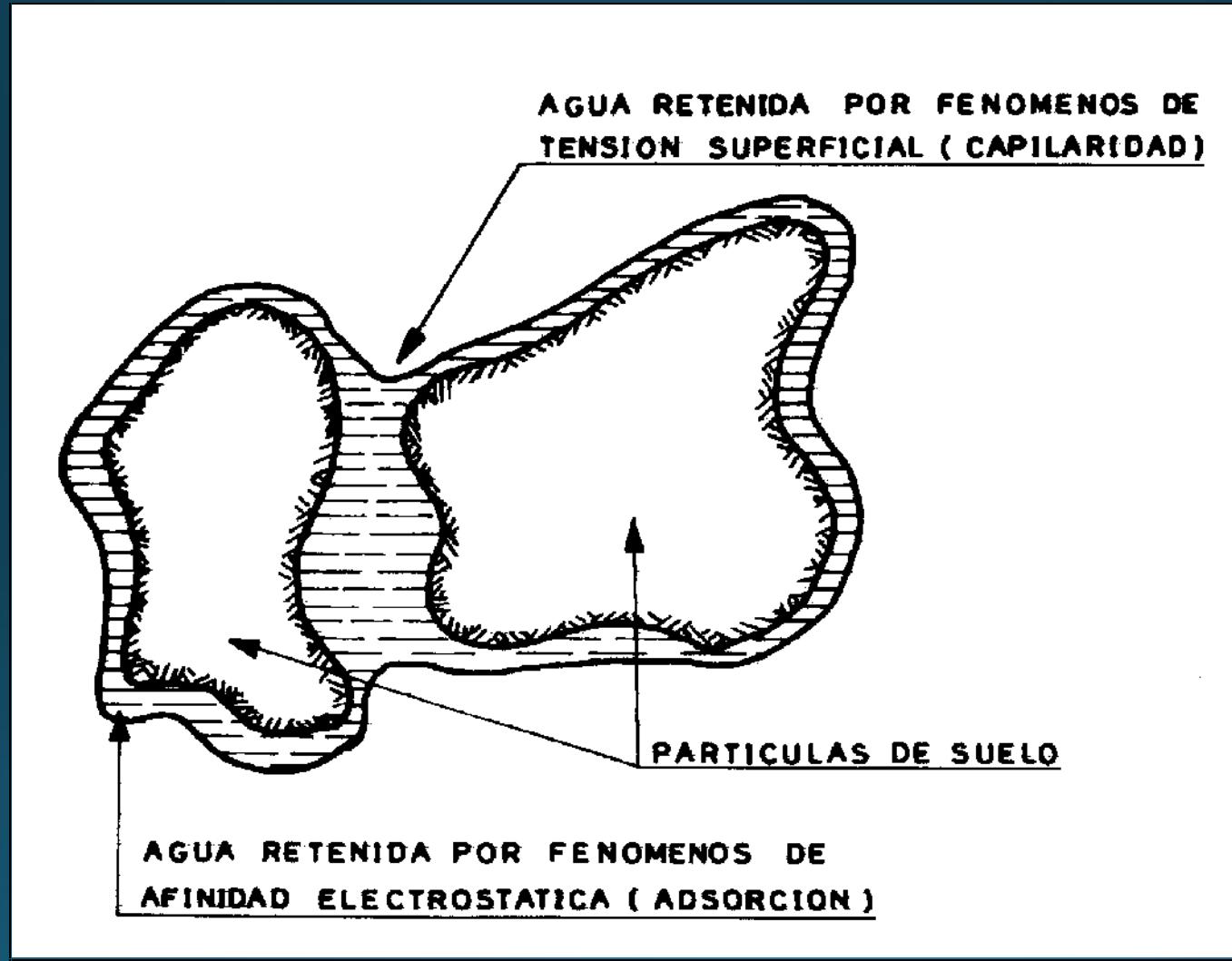
\mathbb{E}_m potencial matriz (-) → → *Potencial de presión en suelo saturado* es +

\mathbb{E}_a potencial neumático diferencias de presión con la P. atmosférica (→0)

\mathbb{E}_o es el potencial osmótico (-)

Unidades: **1 atm = 1,013 bares = 10,3 m.c.a. = 101,3 kPascal = 0,1 Mpascal = 101 cbar**

Potencial matricial ($m < 0$)



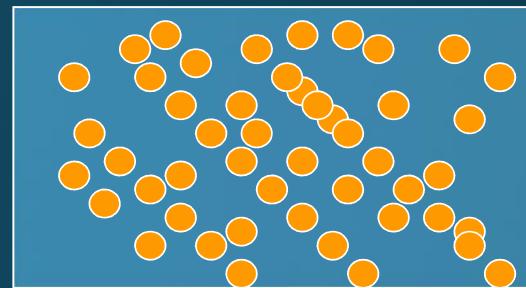
Potencial osmótico (solutos) ($\Psi_o < 0$): resulta de las fuerzas de atracción que ejerce la concentración de solutos sobre las moléculas del disolvente.

$$\Psi_o = -R \cdot T \cdot C_s$$

R: cte. universal de los gases ($8,143 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$)

T la temperatura del medio $^{\circ}\text{K}$

C_s, la concentración de solutos en moles m^{-3}



Relación entre el contenido de humedad del suelo y el potencial de solutos: cuando el contenido de humedad del suelo disminuye, la concentración de solutos aumenta en la solución suelo, lo que se traduce en la reducción del potencial osmótico.

$$\Psi_{o1} = \Psi_{o0} * P_{ws} / P_{w1}$$

Ψ_{o1} =potencial osmótico a P_{w1}

Ψ_{o0} = potencial osmótico a saturación

P_{ws} = contenido de humedad a saturación

P_{w1} = contenido de humedad 1

$$\Psi_{o0} = -36 * CE$$

Ψ_{o0} en kPa
CE, en dS m^{-1}

Suelo insaturado

$$\Psi = \Psi_g + \Psi_m + \Psi_o$$

$$S = \tau + \Pi$$

Ψ_g potencial gravitatorio, es + $\rightarrow 0$

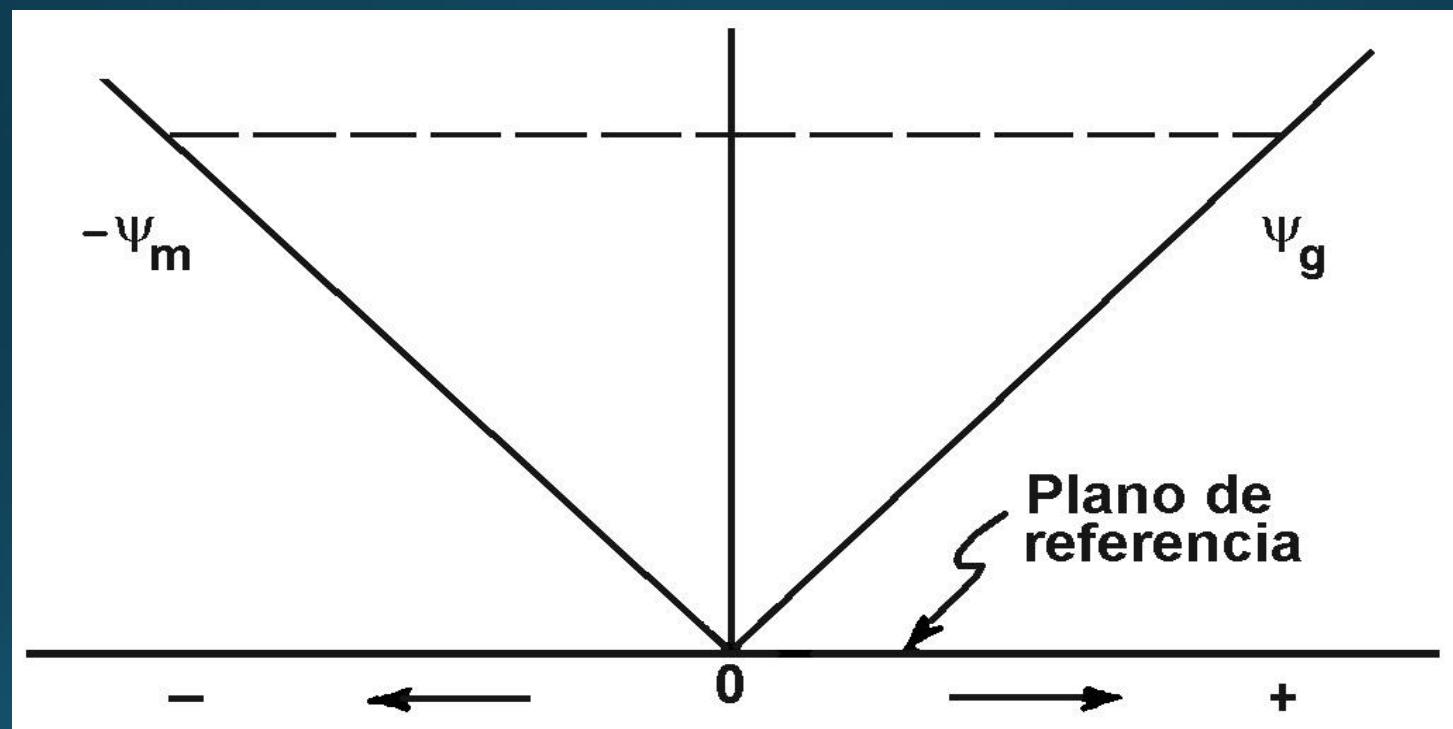
Ψ_m potencial matriz (-)

Ψ_o es el potencial osmótico (-)

S succión hídrica

\dagger succión matriz

a succión osmótica

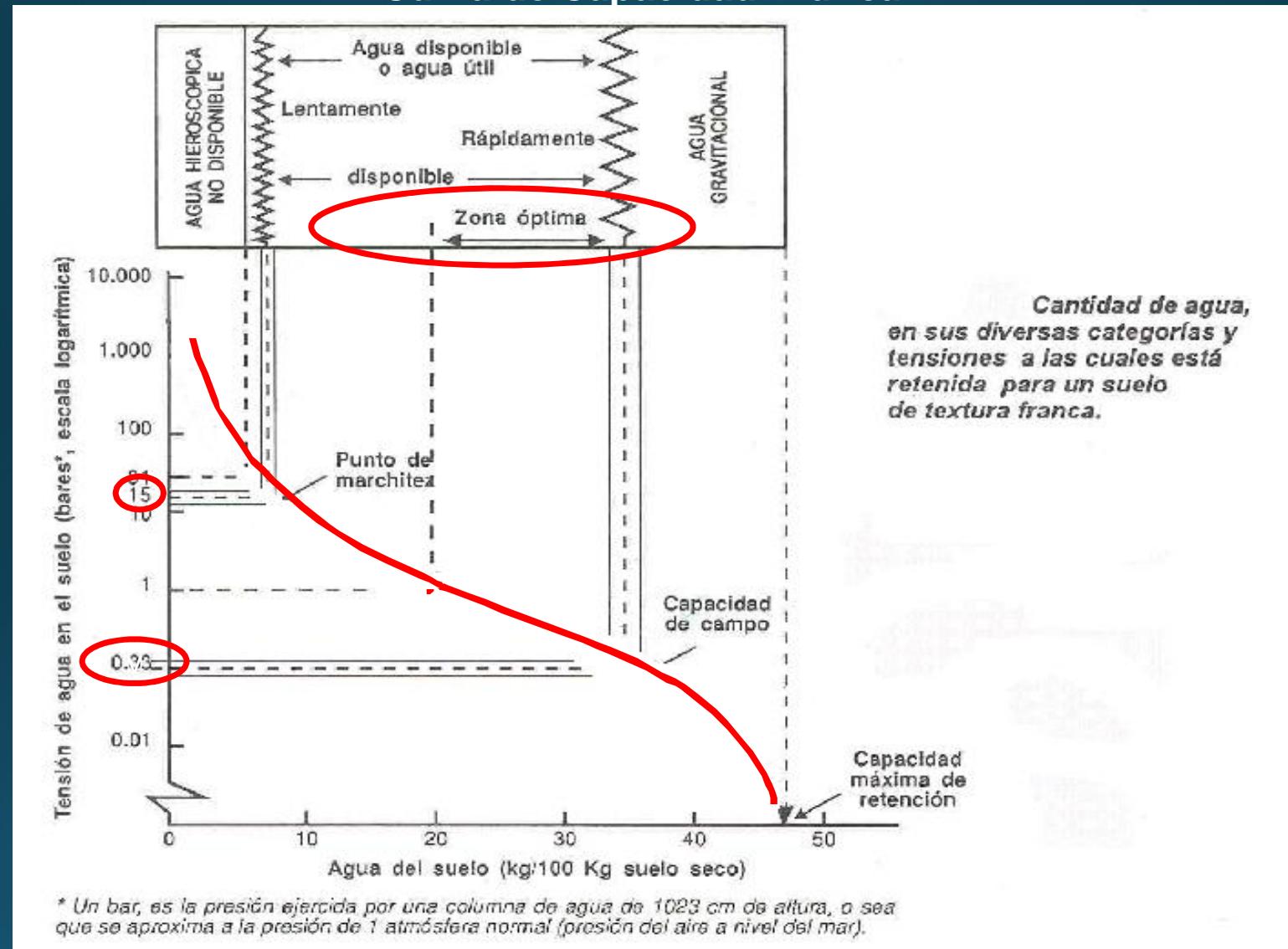


Potenciales de humedad en suelo no saturado en equilibrio estático

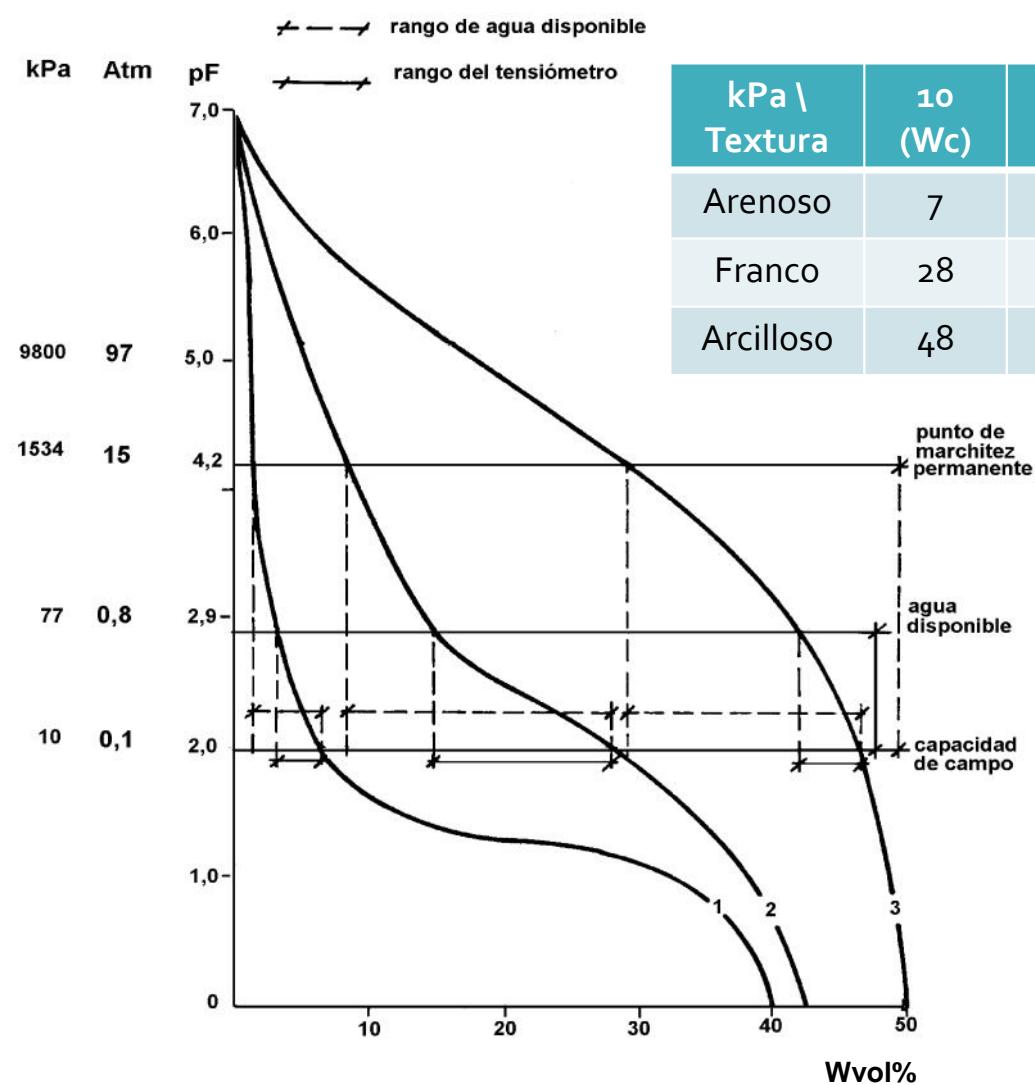
$$\Psi = 0$$

José A. Morábito

Curva de Capacidad Hídrica



Gentileza Ing. R. Vallone



kPa \ Textura	10 (Wc)	77	1500 (Wm)	dt mm/m	dr mm/m	dc mm/m
Arenoso	7	4	2	50	20	30
Franco	28	15	8	200	70	130
Arcilloso	48	43	28	200	150	50

1. Arenoso, 50% del agua disponible
2. Franco, 75% del agua disponible
3. Arcilloso, 25% del agua disponible

¿Cuál será el agua remanente y consumida en un suelo FRANCO, cuando la succión matriz medida por el tensiómetro, es de 0,8 atm? Compare con un suelo ARCILLOSO. De conclusiones.

SUELO FRANCO: por gráfico

$$\begin{aligned} W_c &= 0,1 \text{ Atm} & 28 \text{ g%g de H}^\circ \\ W_m &= 15 \text{ Atm} & 9 \text{ g%g de H}^\circ \\ x &= 0,8 \text{ Atm} & 15 \text{ g%g de H}^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{AGUA CONSUMIDA} &= 28 \% - 15 \% = 13 \% \\ \text{AGUA REMANENTE} &= 15 \% - 9 \% = 6 \% \end{aligned}$$

SUELO ARCILLOSO: por gráfico

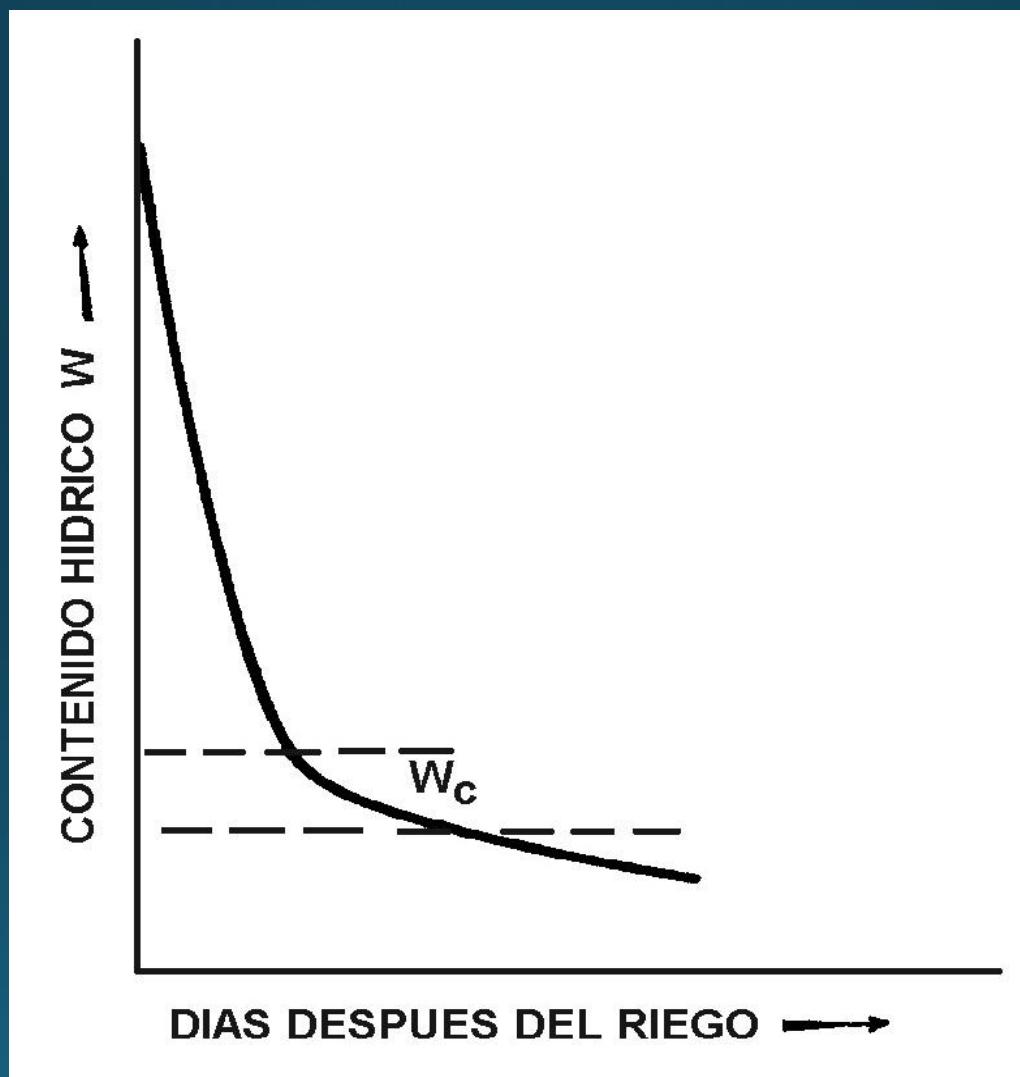
$$\begin{aligned} W_c &= 0,1 \text{ Atm} & 48 \text{ g%g de H}^\circ \\ W_m &= 15 \text{ Atm} & 28 \text{ g%g de H}^\circ \\ x &= 0,8 \text{ Atm} & 43 \text{ g%g de H}^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{AGUA CONSUMIDA} &= 48\% - 43\% = 5\% \\ \text{AGUA REMANENTE} &= 43\% - 28\% = 15\% \end{aligned}$$

CONCLUSION: En un suelo arcilloso el agua es retenida con mayor fuerza, por este motivo a un mismo valor de SM queda más agua en el perfil que en un suelo franco.



Punto de inflexión que determina la capacidad de campo

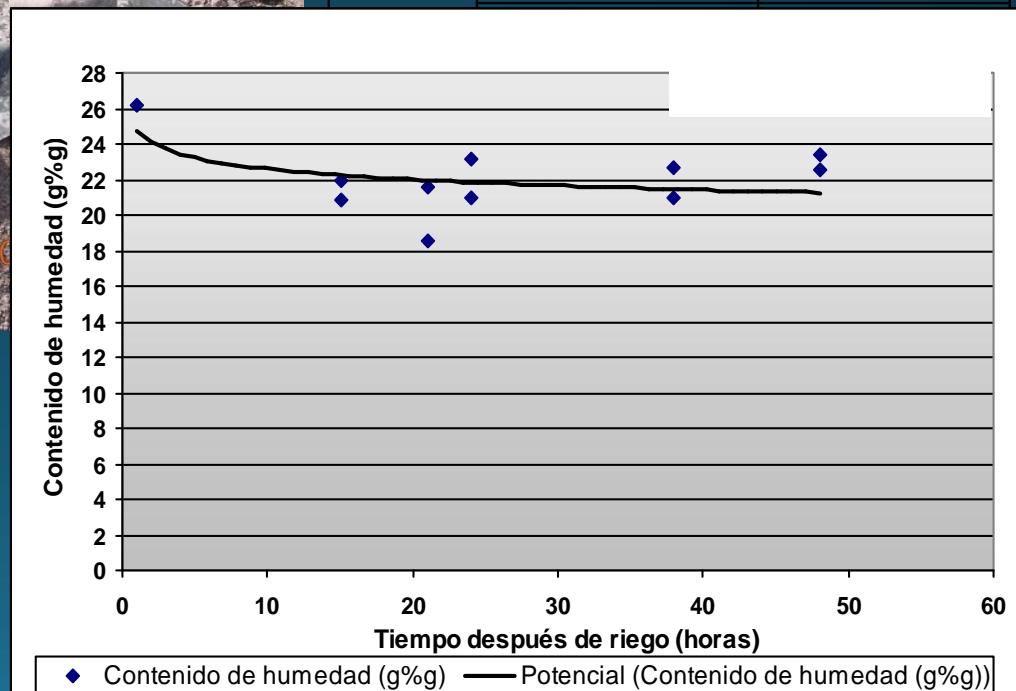


José A. Morábito

Método para determinar la Capacidad de Campo (Wc) a campo

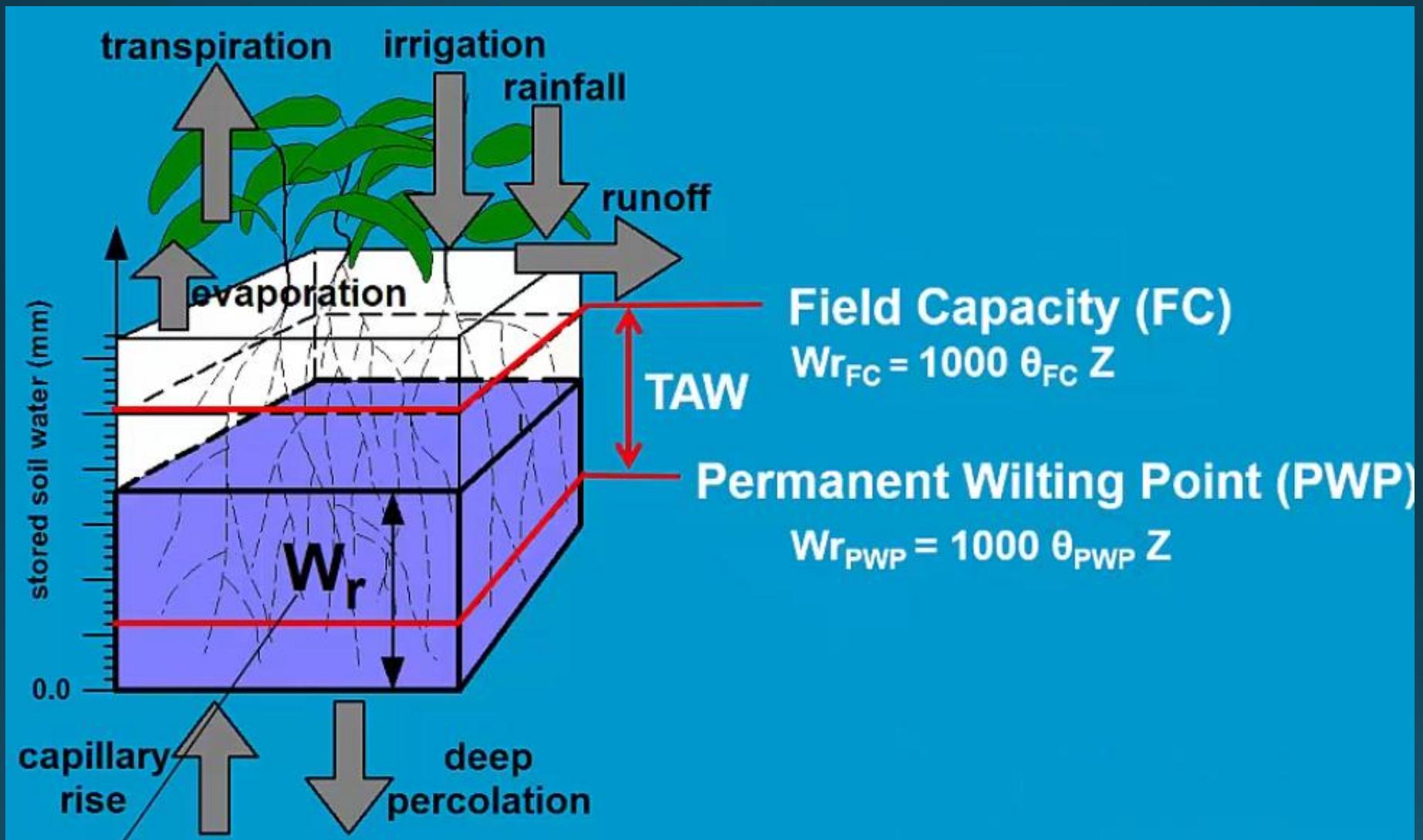


Capa (cm)	Horas después de mojado	Contenido de humedad (g%g)
0 - 30	1	26,2
	15	22
	21	21,6
	24	23,1
	38	22,7



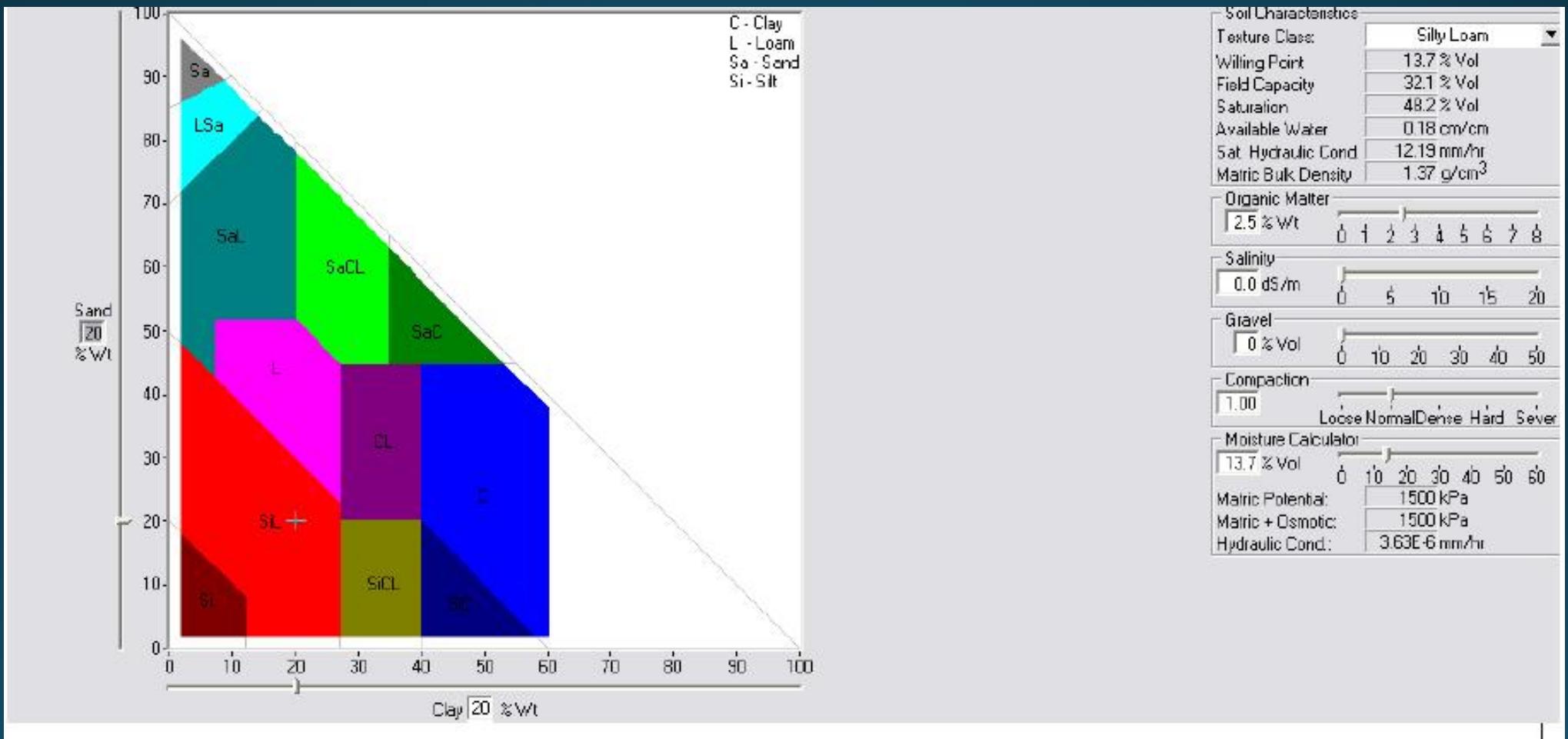
De los datos de campo y el ajuste de la curva se observa que la capacidad de campo es de **21 g%g** de suelo seco y se produce 48 horas después del riego.

José A. Morábito



Fuente: Aquacrop-Training module, FAO (2016)

Soil water characteristics

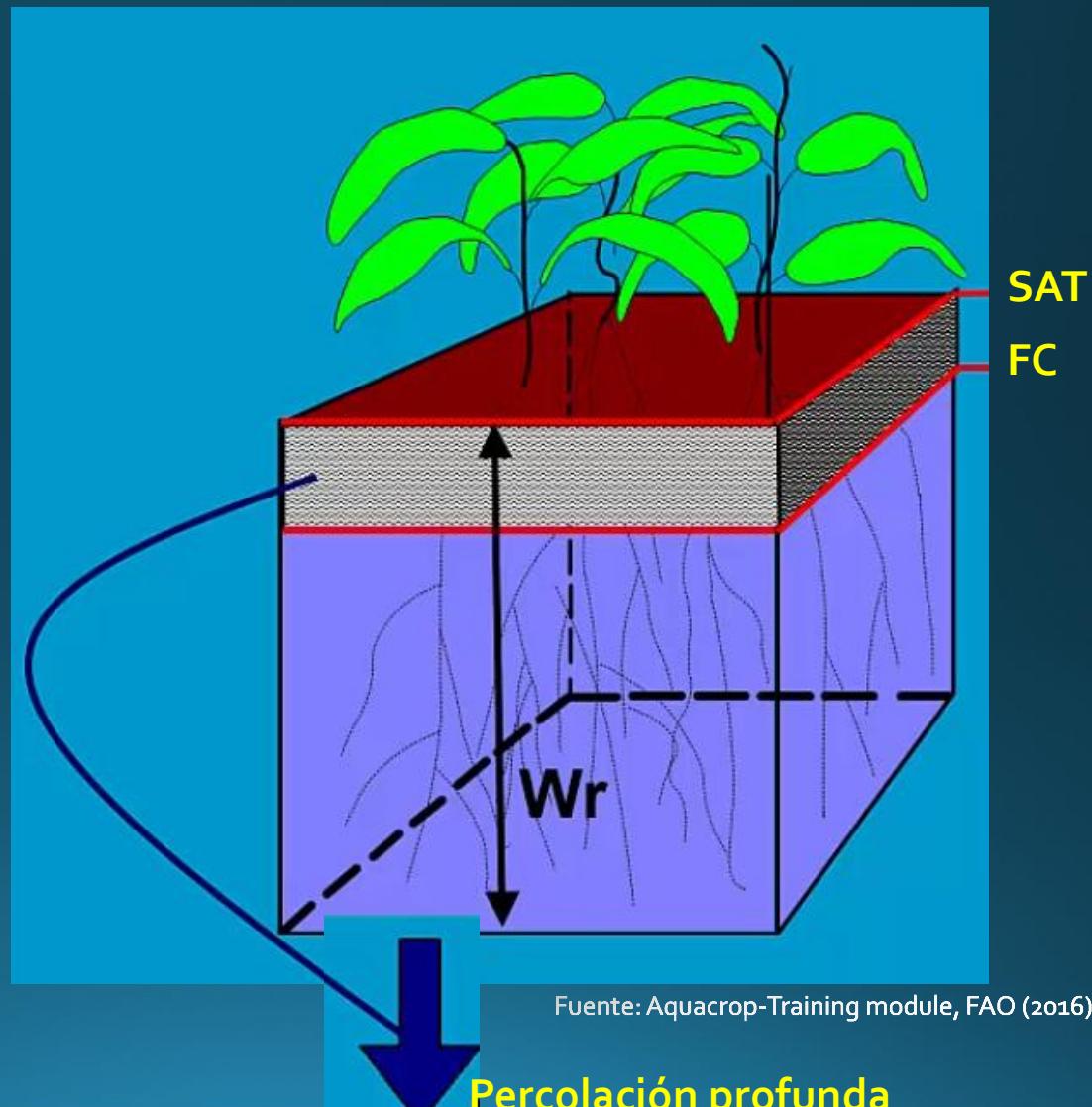


CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL SUELO DETERMINADAS POR AQUACROP

- **TAW (total available water)**: FC – PWP
- **Tau**: coeficiente de drenaje adimensional utilizado para la simulación del movimiento descendente del agua en el perfil del suelo.
- **REW (readily evaporable water)**: expresa la cantidad máxima de agua que se puede extraer de la parte superior del suelo durante el proceso de evaporación.
- **CN (curve number)**: Necesario para la simulación de una cantidad de lluvia perdida por la escorrentía superficial.

CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA SATURADA (K_s , mm/h)

- O permeabilidad, define la tasa de movimiento de agua a través del suelo saturado bajo la influencia de la gravedad.



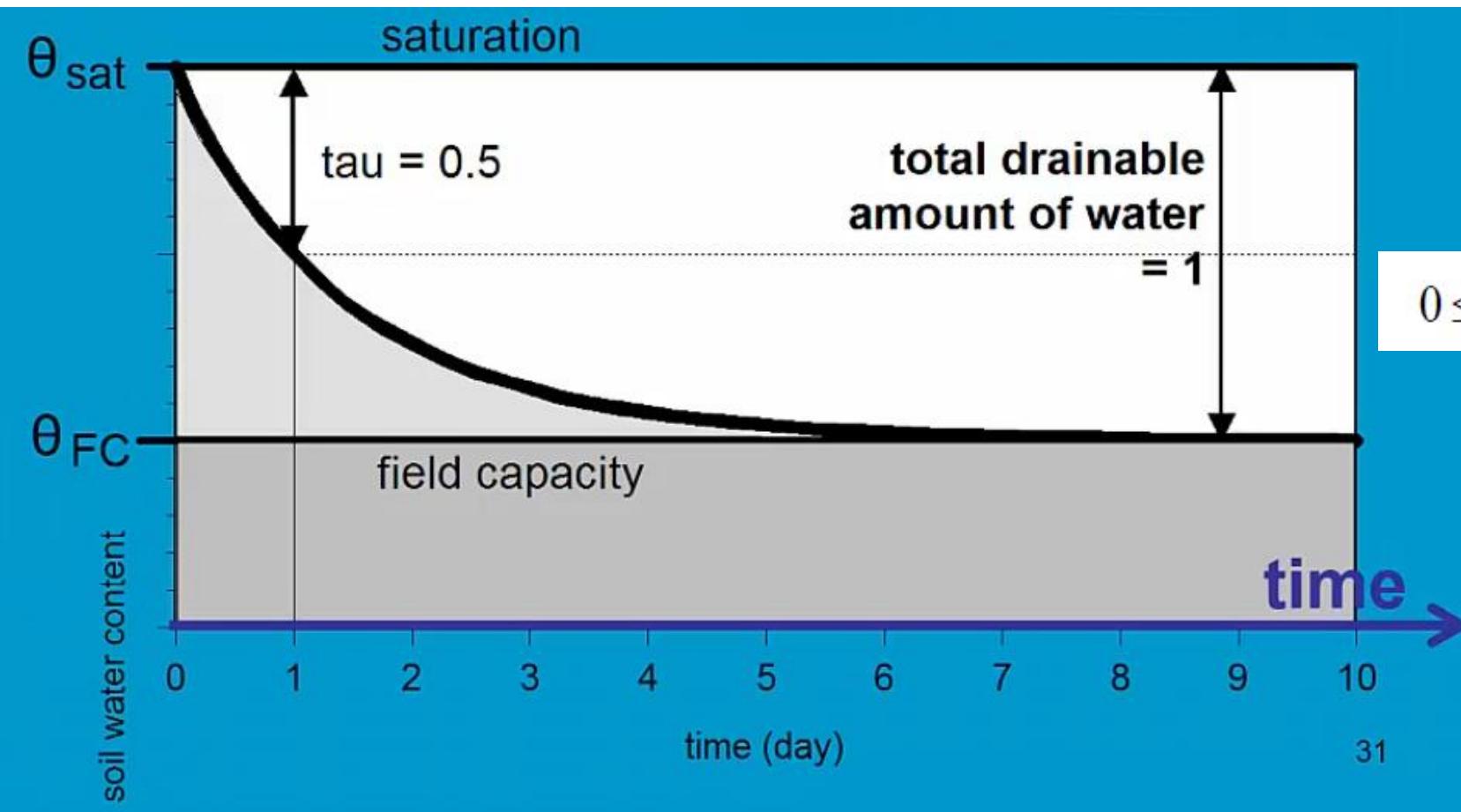
Fuente: Aquacrop-Training module, FAO (2016)

Percolación profunda

K_s en diferentes texturas

Soil textural class	soil water content			Saturated hydraulic conductivity
	Saturation vol %	Field Capacity vol %	Permanent Wilting Point vol %	
				mm/day
Sand	36	13	6	3,000
Loamy sand	38	16	8	2,200
Sandy loam	41	22	10	1,200
Loam	46	31	15	500
Silt loam	46	33	13	575
Silt	43	33	9	500
Sandy clay loam	47	32	20	225
Clay loam	50	39	23	125
Silty clay loam	52	44	23	150
Sandy clay	50	39	27	35
Silty clay	54	50	32	100
Clay	55	54	39	35

Fuente: Reference manual - Aquacrop, FAO (2017)



Fuente: Aquacrop-Training module, FAO (2016)

50 % de la cantidad de agua total drenable se pierde de la capa de suelo completamente saturada después de un día de drenaje libre.

$$Tau =$$

- $o,9$ (arenoso)
- $o,2$ (arcilloso)

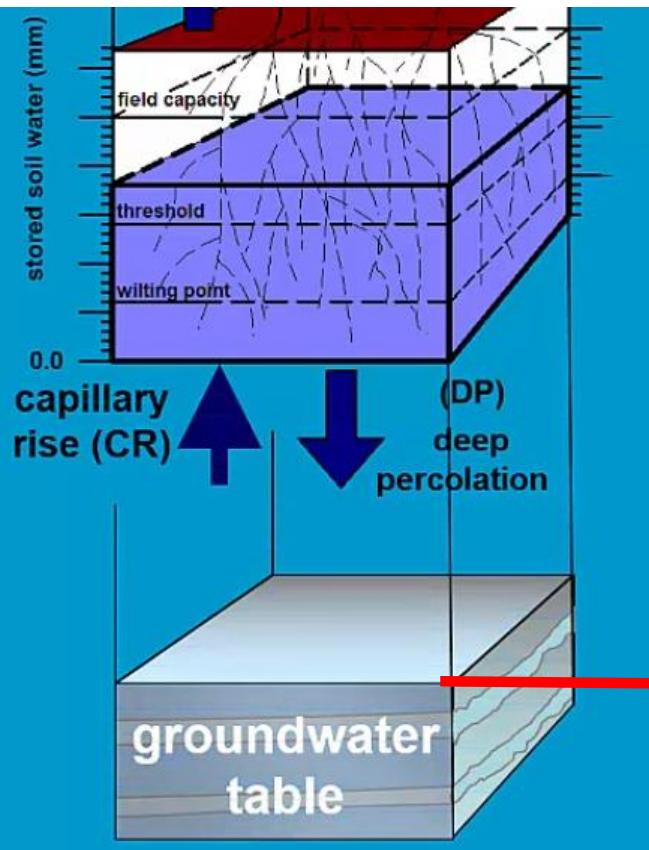
SIMULACION DEL DRENAJE EN AQUACROP

Soil profile

ET₀ = 0 mm

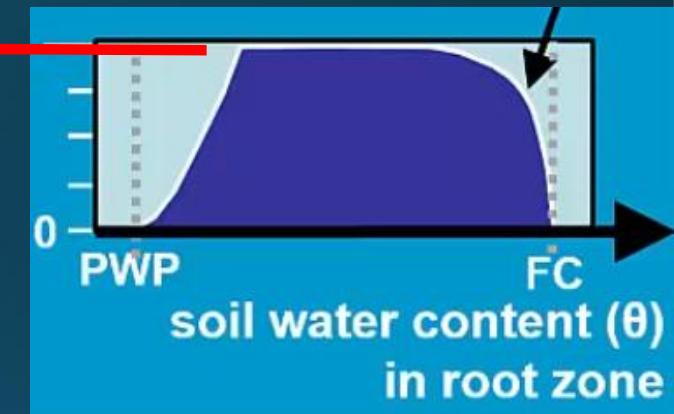
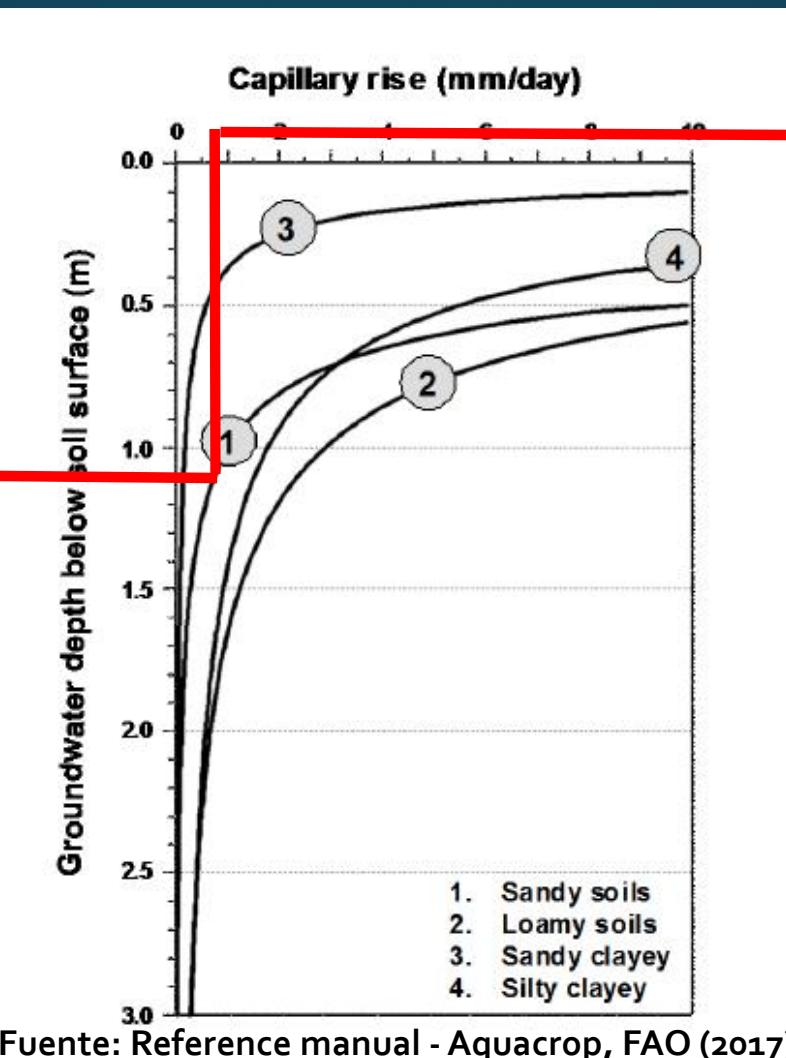
Irrigation = 100 mm

Deep percolation = Drain



Fuente: Aquacrop-Training module, FAO (2016)

Ascenso capilar



Fuente: Aquacrop-Training module, FAO (2016)

Suelo seco= k muy baja

Suelo húmedo= fuerza motriz baja

SIMULACION DEL ASCENSO CAPILAR EN AQUACROP

1) Groundwater table- Display

Deep: 2 m

Et= 5mm

Irrigation = 200 mm

2) Soil profile characteristics

Calibration of capillary rise

SIMULACION DE LA PROFUNDIDAD Y SALES DE LA CAPA FREATICA

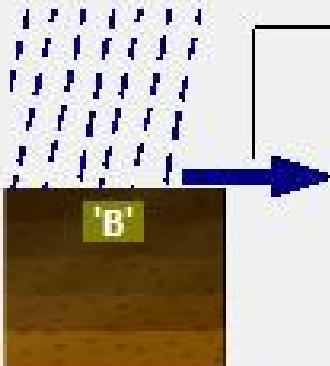
3) Groundwater table- Create

ESCORRENTÍA (RUNOFF)

- Para simular la escorrentía, se considera el CN y la humedad de la capa superficial del suelo.

Soil surface characteristics

Surface runoff

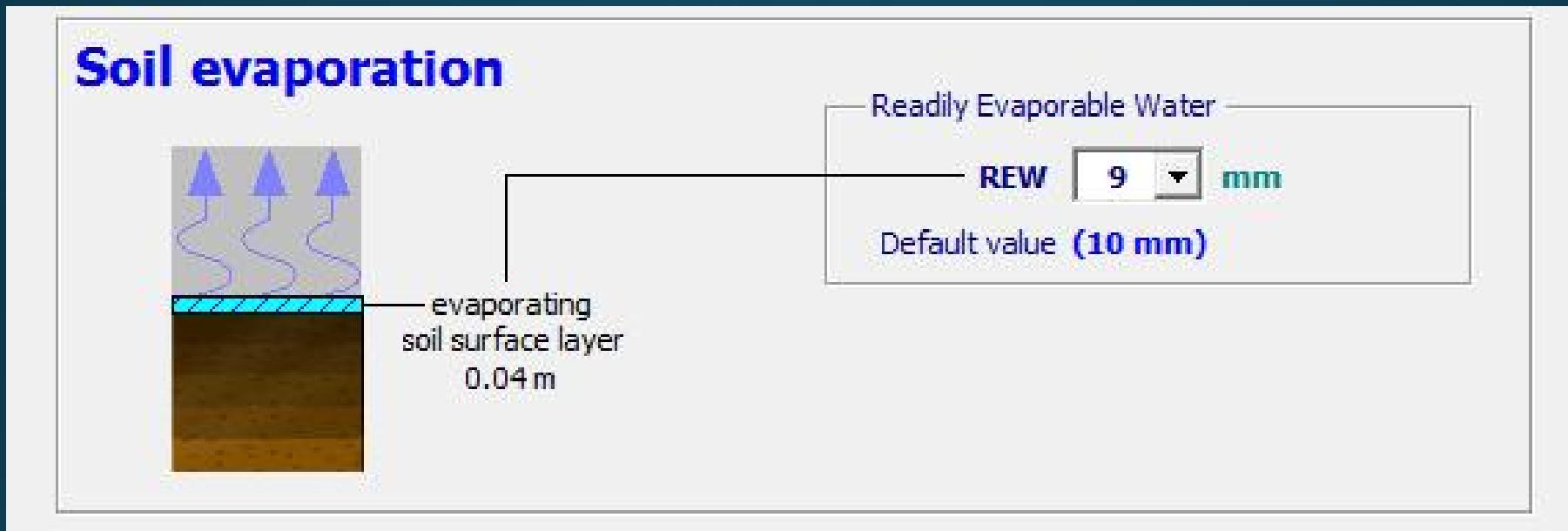


Curve Number

CN 61 for proper field management

Default value (**CN = 61**)
└ for hydrologic soil group : 'B'
classification based on Ksat of top horizon

Agua fácilmente evaporable (REW)



- Expresa la cantidad máxima de agua (mm) que puede ser extraída por la evaporación del suelo de la capa superficial del suelo en la etapa I.
- El agua perdida por la evaporación del suelo en la etapa I proviene principalmente de una fina capa superficial del suelo que está en contacto directo con el aire por encima del campo.