

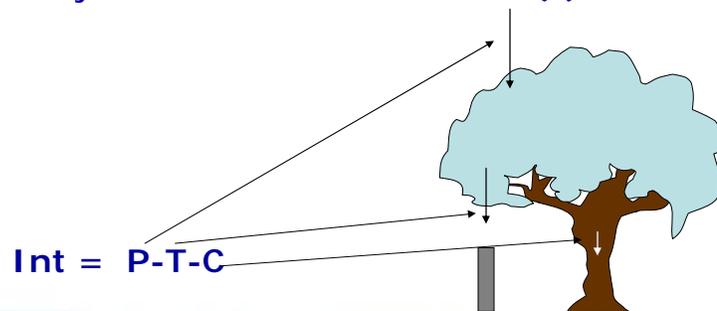
**fcfm**  
Ingeniería

# CI 41C HIDROLOGÍA

- Intercepción
- Flujo en Zona No saturada del Suelo
- Infiltración

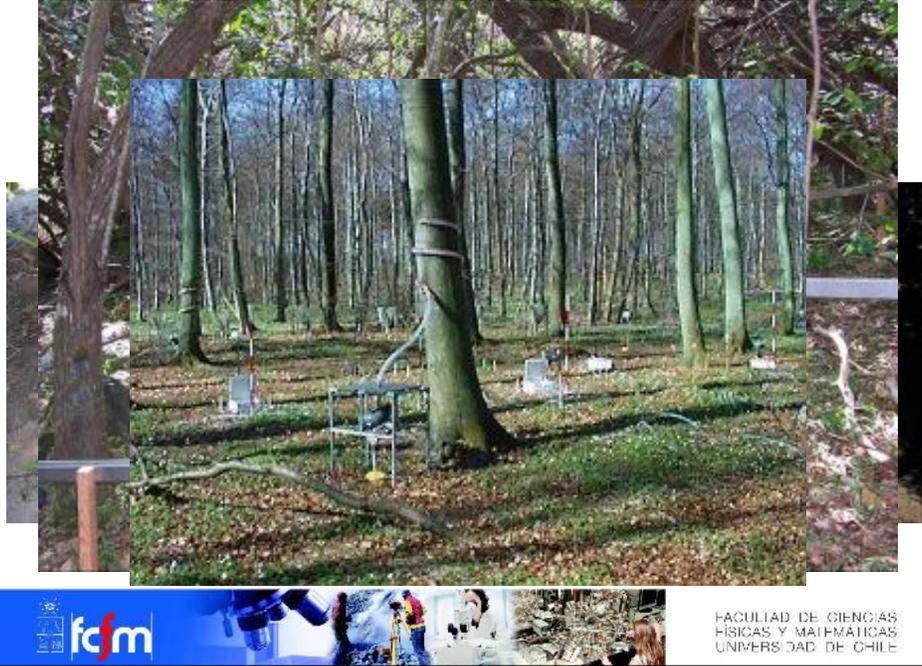
## INTERCEPCIÓN

Quando la precipitación (P) llega a la superficie en áreas con vegetación, un cierto porcentaje de ella es retenida o interceptada por la vegetación. La lluvia que no es interceptada se denomina "throughfall" (T). El agua que llega al suelo a través de las ramas y troncos se llama "stemflow" (C).

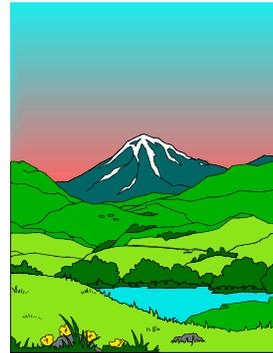


FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

Tomado del curso de A. Fares "Watershed Hydrology"



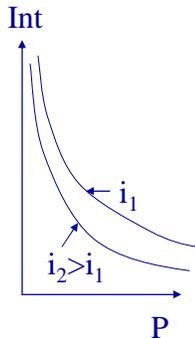
Medidas han mostrado que hasta 8 mm de lluvia pueden ser interceptadas por la vegetación. El agua interceptada se evapora posteriormente a tasas que dependen de las condiciones meteorológicas existentes y varían según el tipo de vegetación.



En áreas húmedas, la evaporación del agua interceptada puede ser un importante componente del balance (250 mm anuales); áreas forestadas han mostrado tener mayores pérdidas por interceptación que áreas de pasto. Esto se debe a la mayor rugosidad de la cubierta forestal que resulta en una eficiente transferencia de vapor de agua de la superficie.

CIENCIAS  
FÍSICAS  
Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

## FACTORES



- Características de precipitación (intensidad, volumen de precipitación y lluvia antecedente)
- Condiciones climáticas (veloc. viento)
- Tipo y densidad de vegetación
- período del año

En bosques :

si  $P < 0,3$  mm todo es interceptado

si  $P > 1$ mm 10 a 40% puede ser retenido



UNIVERSIDAD DE CHILE

## Estimación

$$Int = S_v + \left( \frac{A_v}{A} \right) E t_r$$

Horton (1919)

Capacidad de almacenamiento por unidad de área (mm)

Limitaciones:

- No depende de la Pp
- Debe conocerse  $S_v$



FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

$$Int = S_v (1 - e^{-P/S_v}) + R E t_r \quad \text{Meriam (1960)}$$



$$Int = S_v (1 - e^{-P/S_v}) + K P$$

$$K = R E t_r / P = \text{constante}$$



fcfm

FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

## Ecuaciones empíricas

$$Int = a + b P^n$$

$$S_v = a P^2 + b P \quad \text{Bultot (1972)}$$

Capacidad máxima de almacenamiento  
según cobertura (mm)

campo prado 2,5

árbol o matorral 3,75

árboles o matorrales densos 5,00



fcfm

FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

## Almacenamiento en Depresiones

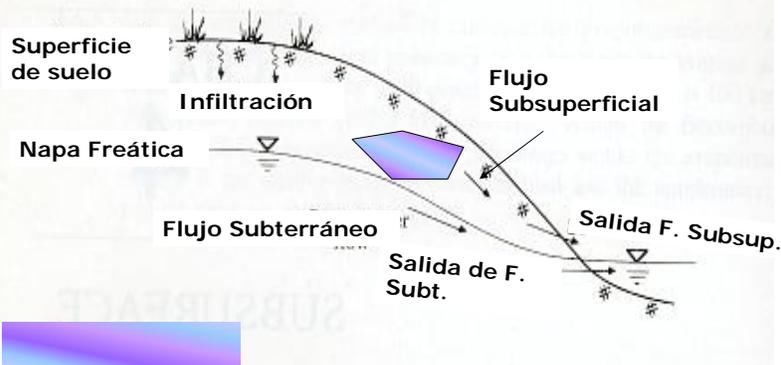
$$V_d = S_d(1 - e^{-k P_e})$$

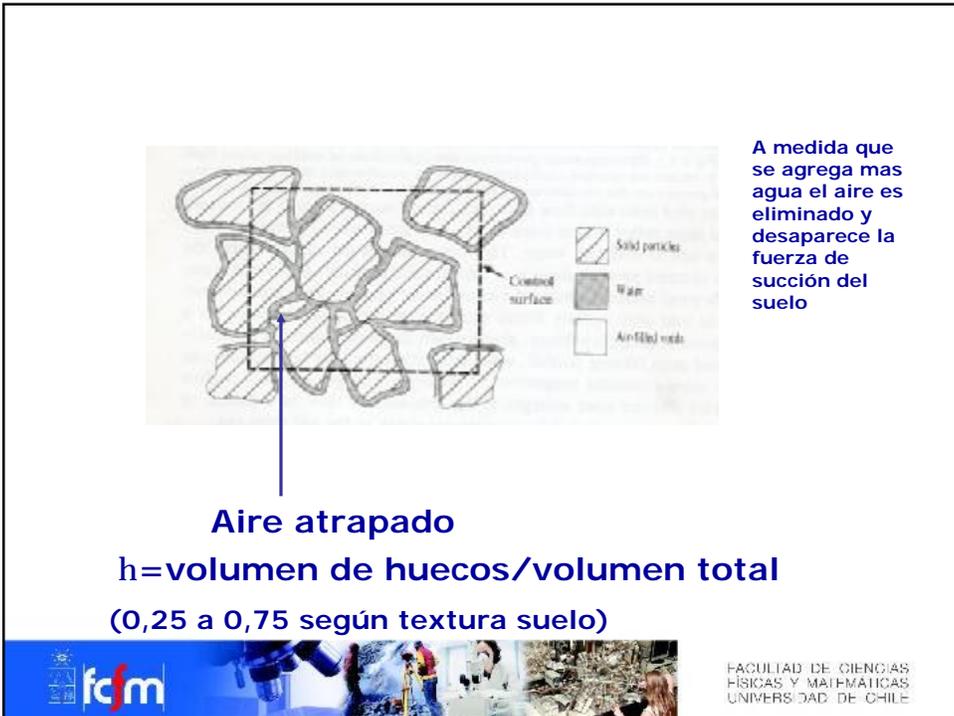
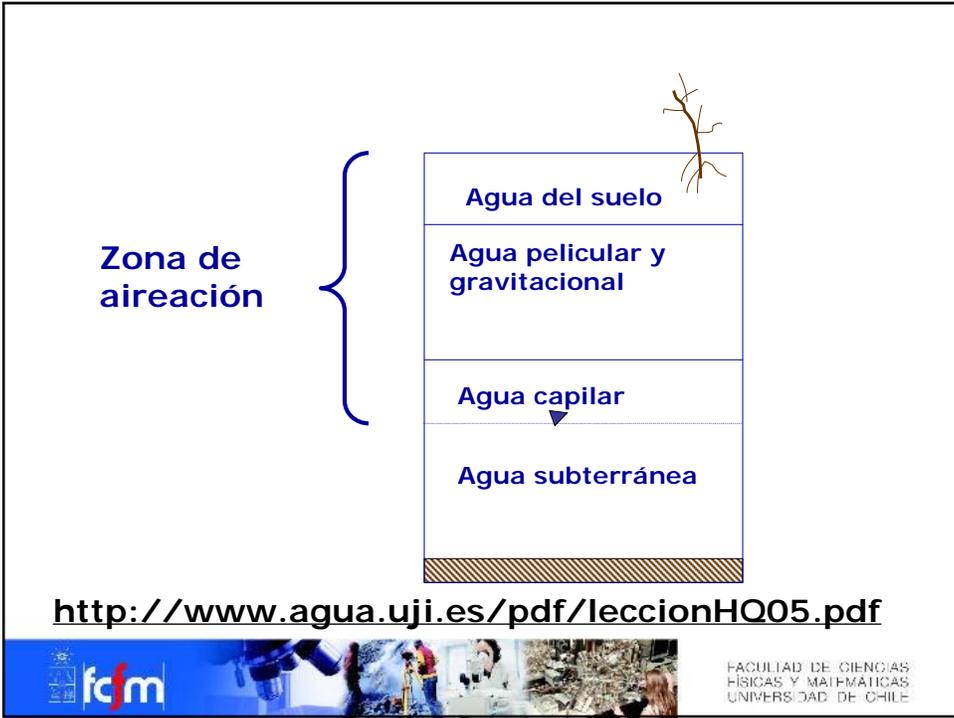
Labels in the diagram:  
-  $V_d$ : Almacenamiento en Depresiones  
-  $S_d$ : Capacidad máxima  
-  $P_e$ : Precipitación efectiva  
-  $1/S_d$ : Coeficiente de almacenamiento

Al iniciarse la precipitación se satisfacen estos almacenamientos (Intercepción y depresiones superficiales) antes de iniciarse la infiltración.



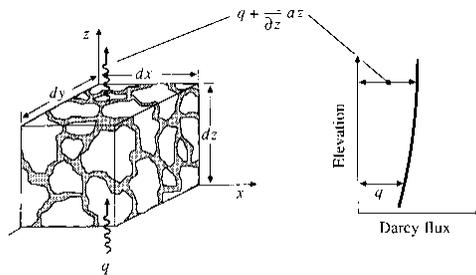
## Flujo en Zona No Saturada del Suelo





## Contenido de humedad del suelo

$q$  = volumen de agua/volumen total  
 varía entre 0 y  $h$



flujo másico de  
 entrada:

$$r_w * q * (dx dy)$$

flujo másico de salida:

$$r_w * (q + \frac{\partial q}{\partial z} dz) * (dx dy)$$

$$r_w * (dx dy dz) \frac{\partial q}{\partial t}$$

variación de almacenamiento



## ECUACIÓN DE CONTINUIDAD

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial z} = 0$$

Considerando el medio poroso como una estructura de pequeños conductos interconectados, de diámetro medio  $D$ , entonces el flujo laminar queda descrito por la ecuación:

$$v = \left( \frac{g D^2}{32 \mu} \right) S_f$$

como el área real de escurrimiento ( $A$ ) no se conoce, se define  $q=Q/A$  como el flujo de Darcy. La ley de Darcy, válida sólo en régimen laminar, establece que:

conductividad hidráulica

$$q = K * S_f$$

pendiente del plano de carga

ACULIAD I  
SICAS Y M  
UNIVERSIDAD DE CHILE

### Conductividad Hidráulica y Porosidad de Medios Porosos

Material	K(cm/s)	h
Grava	$10^{-1}-10^2$	25-40
Arena	$10^{-5}-1$	25-50
Limo	$10^{-7}-10^{-3}$	35-50
Arcilla	$10^{-9}-10^{-5}$	40-70

velocidad media real puede expresarse como:  $q/h$

Para el flujo en la dirección vertical  $z$ , si  $h$  es la carga total

$$S_f = - \frac{\partial h}{\partial z}$$

la carga es decreciente en la dirección del flujo debido a la fricción

fcfm

UNIVERSIDAD DE CHILE

## ecuación de Darcy

$$q = -K \frac{\partial h}{\partial z}$$

En el flujo **saturado** no confinado, las únicas fuerzas que actúan sobre el elemento fluido son la gravedad y la fricción; cuando el flujo es **no saturado** debe incluirse además el efecto de la fuerza de succión que ejercen las láminas de agua adheridas a las partículas de suelo, provocada por la tensión superficial.



$h$  se mide en dimensiones de altura (energía por unidad de peso). Si medio no saturado, la energía que posee el fluido debido a las fuerzas de succión del suelo, se denomina carga de succión  $\Psi$ , ésta varía con la humedad del suelo. La carga hidráulica es entonces:

$$h = y + z$$

$$q = -K \frac{\partial(y+z)}{\partial z} = -\left(K \frac{\partial y}{\partial q} \frac{\partial q}{\partial z} + K\right) = -\left(D \frac{\partial q}{\partial z} + K\right)$$

ecuación de continuidad

difusividad agua suelo que tiene dimensiones de  $L^2/T$ .

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial q}{\partial z} + K \right)$$

ecuación de Richards para  
flujo unidimensional

## Cálculo del Flujo de Humedad

si se conocen las cargas de succión,  $\Psi$ , a diferentes profundidades,  $z$ , y la relación entre la conductividad hidráulica  $K$  y  $\Psi$ .

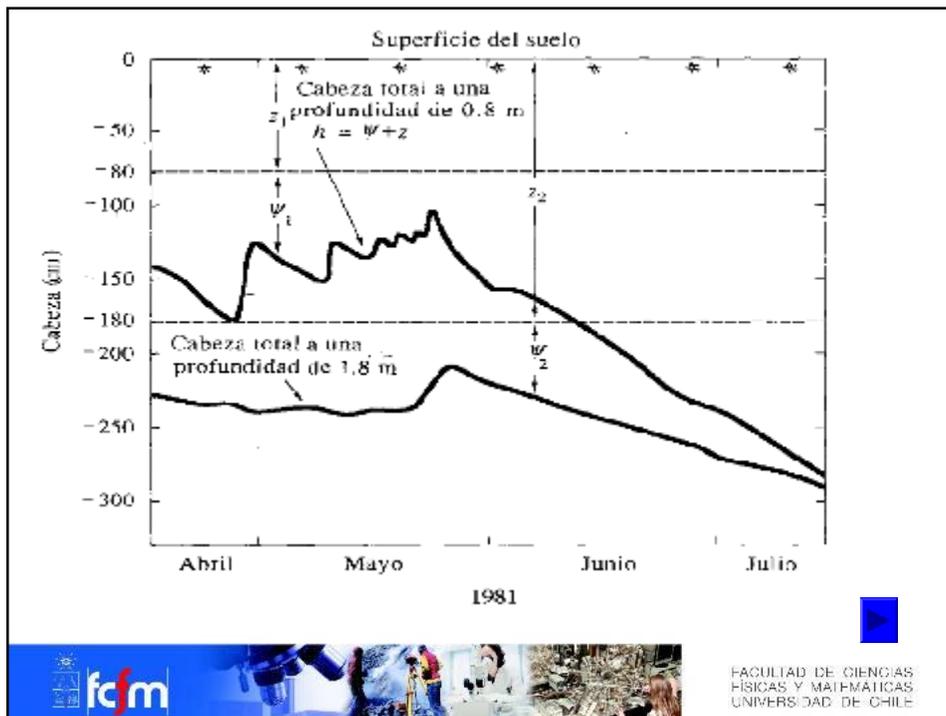
$$q = -K \frac{\partial h}{\partial z}$$

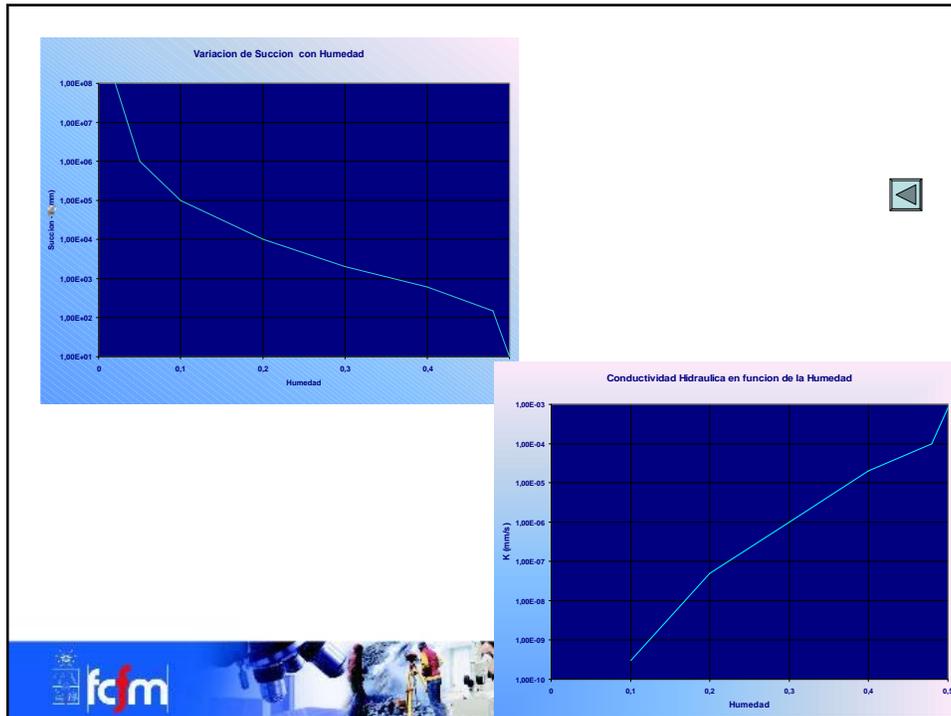
$$h = \Psi + z$$

$$K = 250(-\Psi)^{-2.11}$$



FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE





## INFILTRACION

Es el paso del agua a través de la superficie del terreno hacia el interior del suelo

Factores que afectan la Infiltración

entrada superficial  
transmisión a partir del suelo y  
acumulación en el suelo  
 las características del medio permeable  
 y las del fluido



La superficie del suelo puede estar cerrada por la acumulación de finos u otras partículas que pueden impedir o retrasar la entrada de agua al suelo.

El agua no puede entrar al suelo con mayor rapidez que la de su transmisión hacia abajo.

El almacenamiento disponible en cualquier horizonte de suelo, depende de  $h$ ,  $e$  y  $q$  existente. La porosidad, tamaño y disposición de los poros tiene incidencia significativa en la disponibilidad de almacenamiento. Al inicio de la tormenta la infiltración es en gran medida controlada por el volumen, tamaño y continuidad de los poros de mayor tamaño ya que proporcionan caminos fáciles para el movimiento del agua

Distribución espacial y temporal de poros  
(algunos suelos se hinchan con el agua)

Vegetación: raíces lo mantienen porosos



Agua contaminada, turbia



## Medición

### Cilindros infiltrómetros

De disco



FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

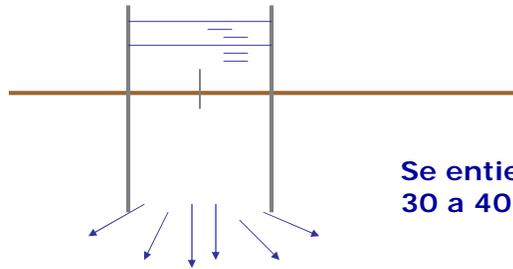


FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

## MEDICIÓN

Díámetro 15 a 20 cm

H: 40 a  
60 cm

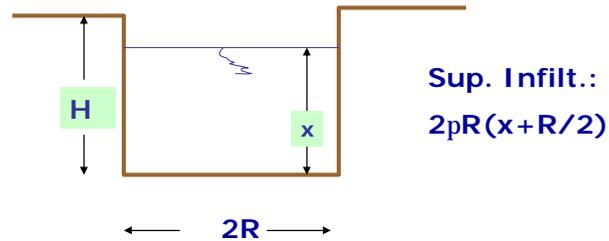


Se entierra  
30 a 40 cm



FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

## PORCHET



Sup. Infiltr.:  
 $2pR(x+R/2)$

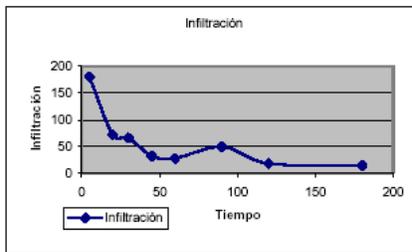


FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

Ensayo: Name, Forestal Celco, VII Región.

Tiempo (min)	Diferencial (cm)	Infiltración (mm/hr)
0		
5	1,5	180
10	4,1	492
20	1,2	72
30	1,1	66
45	0,8	32
60	0,7	28
90	2,5	50
120	0,9	18
180	1,5	15

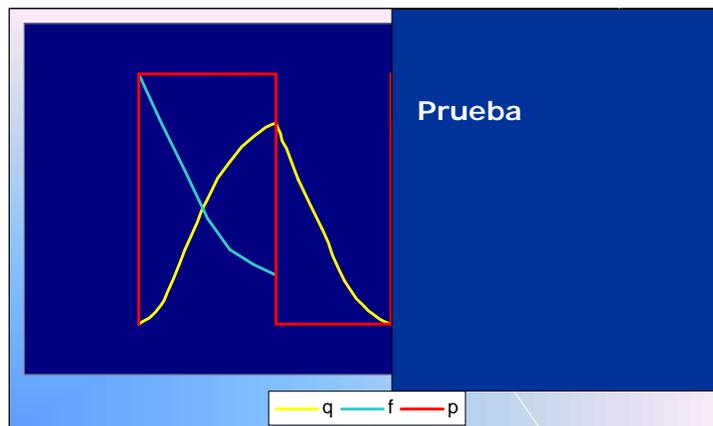
20,3



FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS UNIVERSIDAD DE CHILE

## PARCELAS EXPERIMENTALES

$D_a$ : Volumen de detención superficial



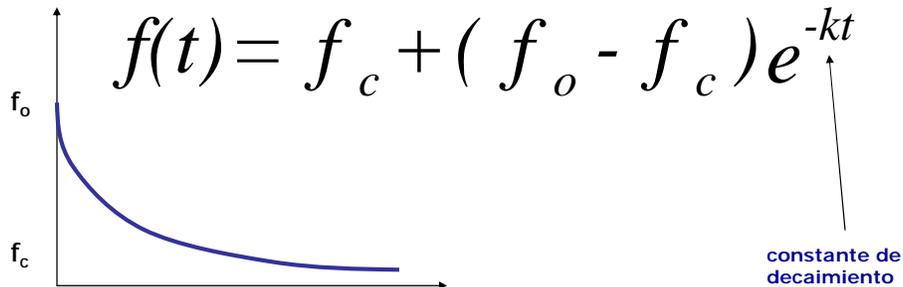
$D_a + V$  depresiones superf.



FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS UNIVERSIDAD DE CHILE

## Ecuaciones Empíricas para Estimar la Infiltración

### Horton



corresponde a la solución de la ecuación de Richards para la tasa de difusión de humedad ( $D(\partial\theta/\partial z)$ ) en la superficie del suelo, cuando se considera que K y D son constantes independientes de la humedad del suelo.

### Philip (1957,1969)

resolvió la ec. de Richards en condiciones menos restrictivas, considerando que K y D podían variar con el contenido de humedad  $\theta$ .



transformación de Boltzman  $B(\theta) = zt^{-1/2}$

infiltración acumulada  $F(t)$ :

$$F(t) = St^{1/2} + Kt$$

$f(t) = \frac{1}{2} St^{-1/2}$

Columna horizontal  $\rightarrow dF/dt$   $\rightarrow$  Sorptividad o Adsorción

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS UNIVERSIDAD DE CHILE

**Philip**

Potencial capilar en el frente de humedad

permeabilidad

$$f = \frac{dF}{dt} = \frac{k}{m} \left( 1 + \frac{(q - q_i)(y + H)}{F} \right)$$

viscosidad

Profundidad de agua sobre el suelo

$\theta_s = \eta$

$\theta_i$

L

Frente húmedo

**fcfm**

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS UNIVERSIDAD DE CHILE

**MÉTODO DE HUGGINS Y MONKE (1966)**

Se considera  $f=f(q)$

coeficientes

$$f = f_c + A(S'/h)^p$$

Potencial de almacenamiento. Inicialmente  $h-q_i$

Porosidad capa superior suelo

$F = \int f dt$

Ecuación se resuelve iterativamente

Inicio tormenta:  $F=0$   $S' = h-q_i$

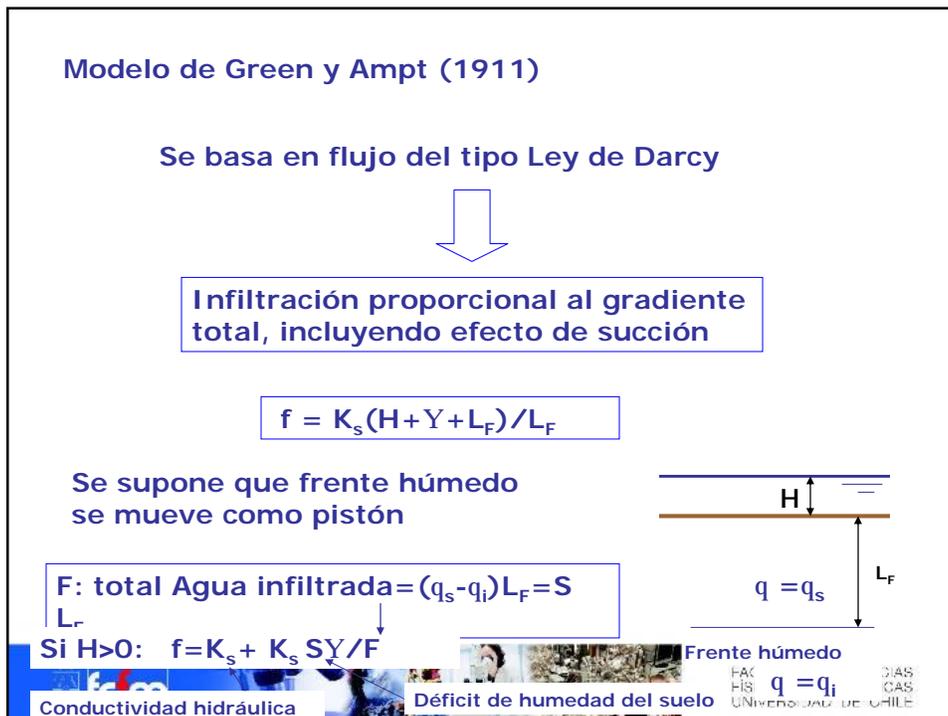
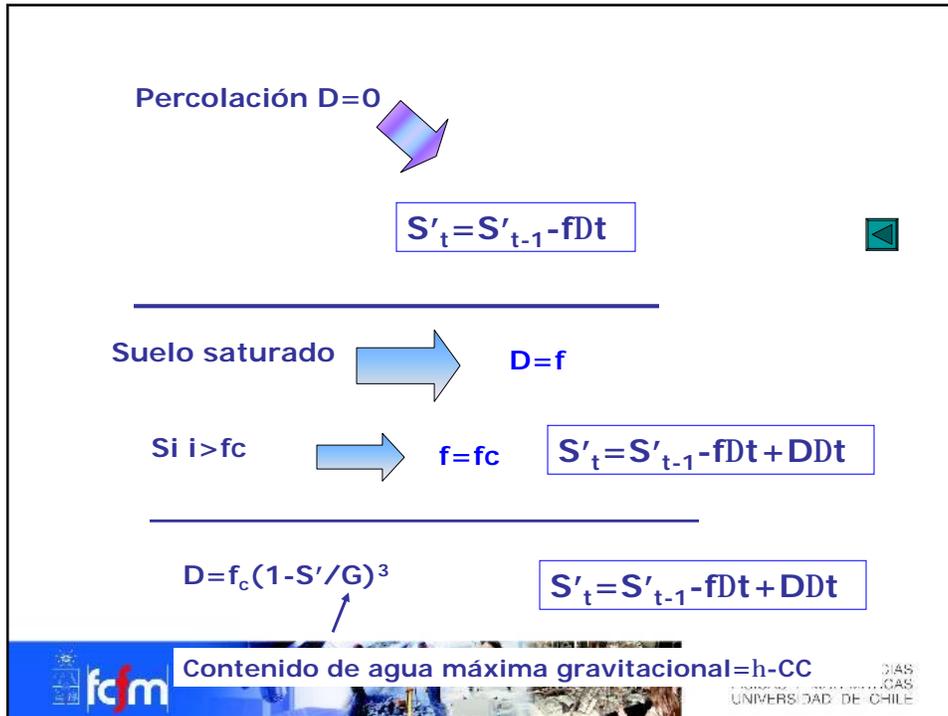
Si  $h-S' < CC = f_c$

Si  $S' = 0$

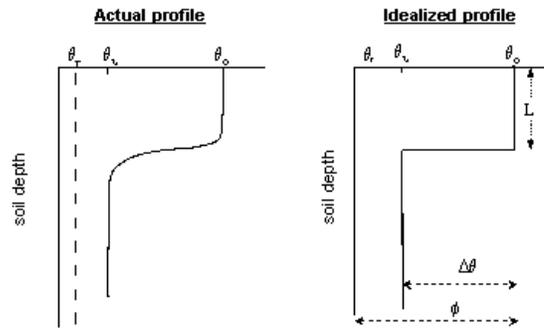
Si  $CC < h-S' < \text{saturación}$

**fcfm**

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS UNIVERSIDAD DE CHILE



## Green-Ampt Infiltration Model



FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

## Método de la Curva Número (Soil Conservation Service)

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a}$$

máximo valor de retención de agua en el suelo

máxima escorrentía superficial

$$P = P_e + I_a + F_a$$

Ecuación de continuidad

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$



FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

$$P_e = \frac{(P - 0,2 * S)^2}{P + 0,8 * S}$$

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad "$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{mm}$$

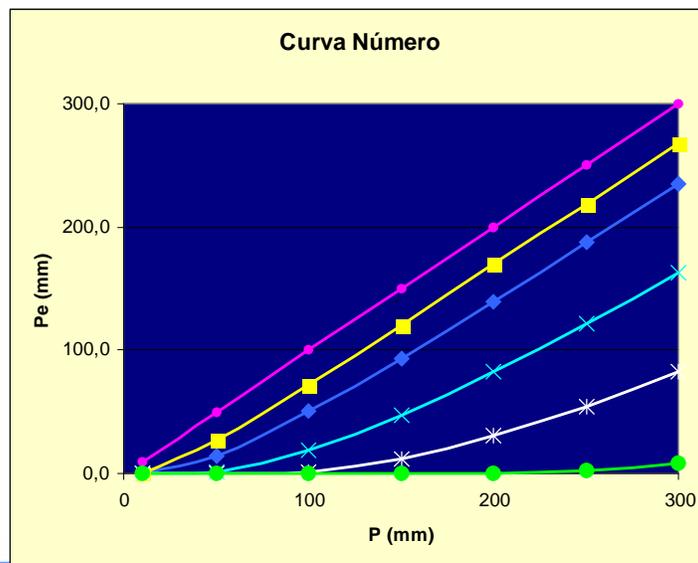
$$CN(I) = \frac{4,2 * CN(II)}{10 - 0,058 * CN(II)}$$

$$CN(III) = \frac{23 * CN(II)}{10 + 0,13 * CN(II)}$$



fcfm

FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE



fcfm

FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

Números de curva de escorrenia para usos selectos de tierra agrícola, sub-urbana y urbana (condiciones antecedentes de humedad II,  $I_a = 0.25$ )

Descripción del uso de la tierra	Grupo hidrológico del suelo			
	A	B	C	D
Tierra cultivada <sup>1</sup> : sin tratamientos de conservación con tratamientos de conservación	72 62	81 71	88 78	91 81
Pastizales: condiciones pobres condiciones óptimas	68 39	79 61	86 74	89 80
Vegas de rios: condiciones óptimas	30	58	71	78
Bosques: troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas, cubierta buena <sup>2</sup>	45 23	66 55	77 70	83 73
Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc. óptimas condiciones: cubierta de pasto en el 75% o más condiciones aceptables: cubierta de pasto en el 50 al 75%	39 49	61 69	74 79	80 84
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)	89	92	94	95
Districtos industriales (72% impermeables)	81	88	91	93
Residencial <sup>5</sup>				
Tamaño promedio del lote	Porcentaje promedio impermeable <sup>4</sup>			
1/8 acre o menos	65	77	83	90
1/4 acre	38	61	75	83
1/3 acre	30	57	72	81
1/2 acre	25	54	70	80
1 acre	20	51	68	79
Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc. <sup>3</sup>	98	98	98	98
Calles y carreteras:				
Pavimentados con cunetas y alcantarillados <sup>3</sup>	98	98	98	98
grava	76	85	89	91
tierra	72	82	87	89

1. Para una descripción más detallada de los números de curva para usos agrícolas de la tierra, consulte a Soil

DE CIENCIAS  
MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE



AGUA SUPERFICIAL

155

Uso de la tierra	Grupo hidrológico de suelo						
	%	B			C		
		CN	Producto	%	CN	Producto	
Residencial (30% impermeable)	20	72	1,440	20	81	1,620	
Residencial (65% impermeable)	6	85	510	6	90	540	
Carreteras	9	98	882	9	98	882	
Terreno abierto: Buena cubierta	4	61	244	4	74	296	
Aceptable cubierta	4	69	276	4	79	316	
Parqueaderos	7	98	686	7	98	686	
	50		4,038	50		4,340	



FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

**CLASE A:** Suelos con alta capacidad de infiltración. Arenas, gravas y loess profundos.

**CLASE B:** Suelos con capacidad de infiltración moderada. Loess poco profundos, marga arenosa

**CLASE C:** Suelos con capacidad de infiltración bajas. Marga arcillosa, marga arenosa poco profunda, suelos de bajo contenido orgánico y suelos generalmente con alto contenido de arcilla.

**CLASE D:** Suelos con muy baja capacidad de infiltración o en los que el nivel freático está cerca de la superficie. Suelos que aumentan de volumen cuando están mojados, arcillas plásticas pesadas y algunos suelos salinos.



#### Clasificación de las Condiciones de Humedad

Lluvia antecedente de 5 días (mm)

Grupo AMC	Estación Latente	Estación de Crecimiento
I	<12,7	<35,6
II	12,7-27,9	35,6 - 53,3
III	>27,9	>53,3



## Indices de Infiltración

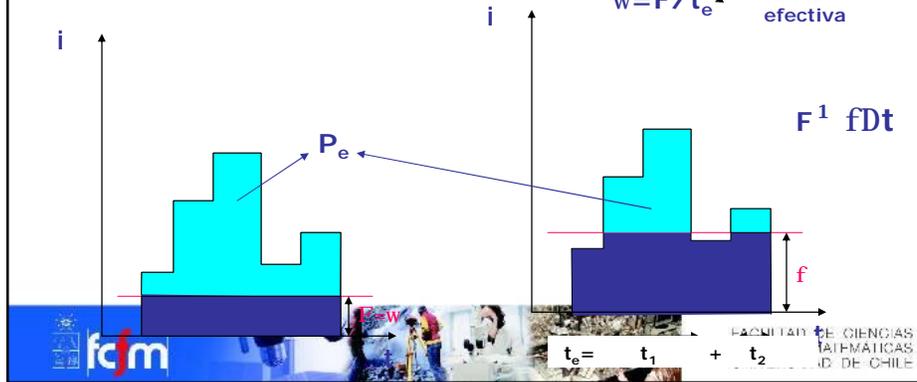
### Indice $f$

Se admite que para una tormenta dada y en las condiciones iniciales determinadas en la cuenca, el valor de recarga de la cuenca es constante durante toda la duración de la lluvia.

### Indice $w$

$$w = F / t_e$$

Tiempo de lluvia efectiva



## Indices de Saturación

$$a_1 P_1 + a_2 P_2 + \dots + a_n P_n$$

$$a P_1 (K - t_a)$$

Tiempo en días sin llover cuando ocurre  $P_1$

$$I = S P_i (k - t_i) / 100$$

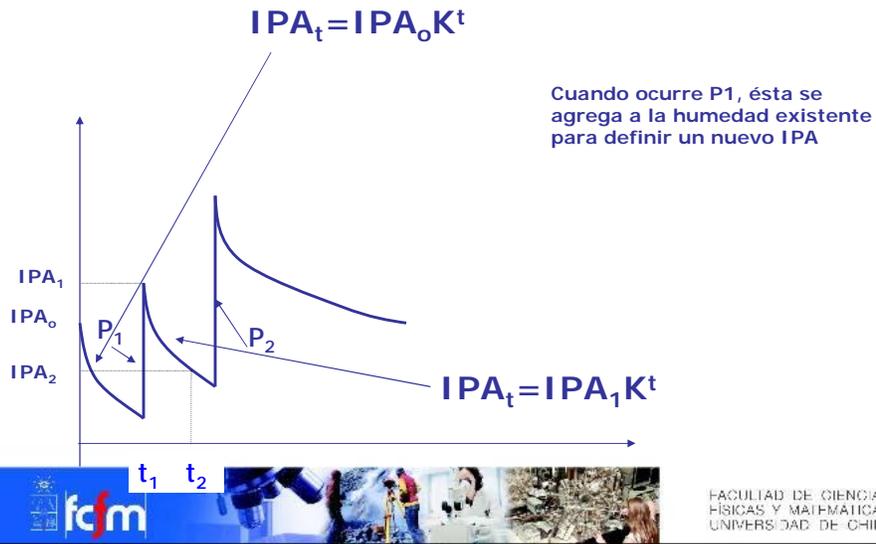
tiempo entre lluvia  $i$  y la anterior

COEFICIENTES DE ESCORRENTIA:  $C$

$$P_e = C P$$

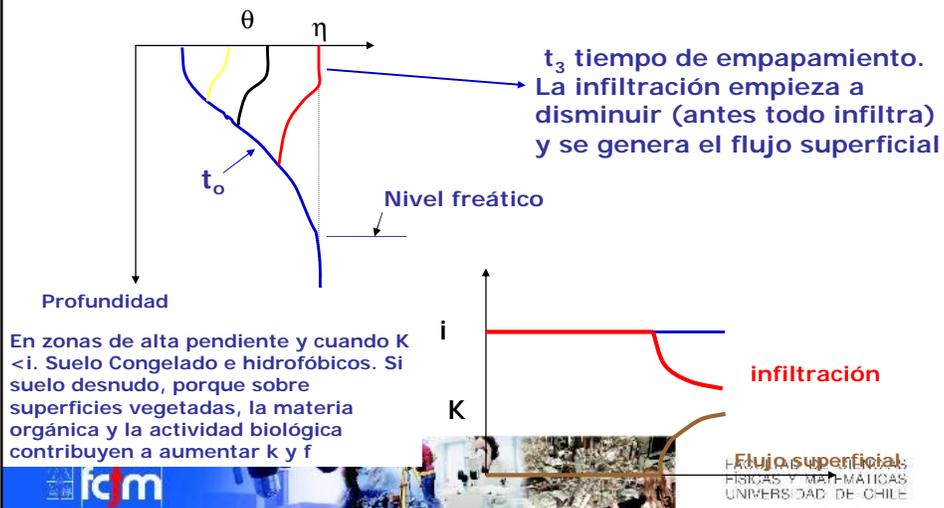


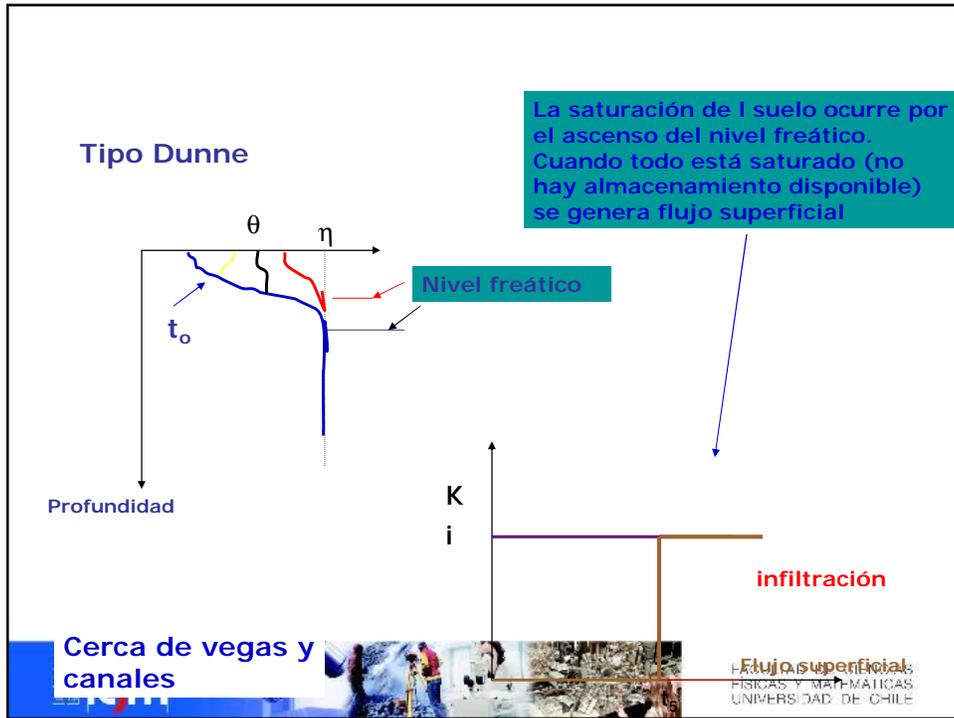
## Indice de Precipitación Antecedente (IPA)



## Mecanismos de Producción de la Escorrentía

### Tipo Horton

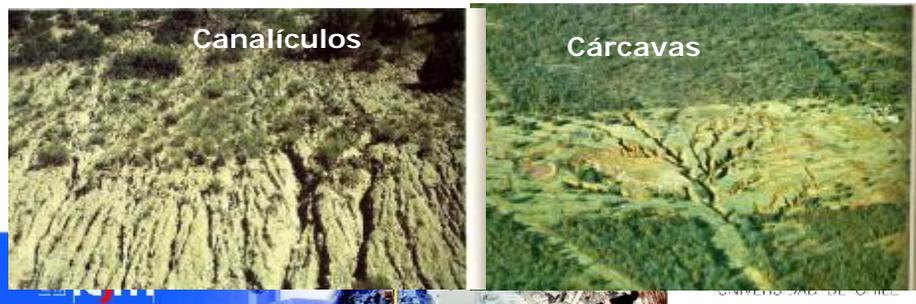




**Flujo Superficial y Erosión.** Los flujos tipo Horton y por saturación mueven sedimento pendiente abajo. Esto da como resultado el lavado superficial del suelo (sheetwash) y la formación de canalículos (rills) y cárcavas (gullies).

El lavado superficial es fomentado por la erosión producida por el impacto de las gotas de lluvia que remueven las partículas superficiales (más efectivo en suelos sin cubierta vegetal).

En todos los casos, el movimiento del suelo y partículas de roca debido al escurrimiento del agua es la **EROSIÓN**.



## Tasa de almacenamiento superficial:

$$n \equiv \frac{dV}{dt} \equiv S_d k e^{-kP_e} \frac{dP_e}{dt}$$

$$n \equiv e^{-kP_e} (i - f)$$

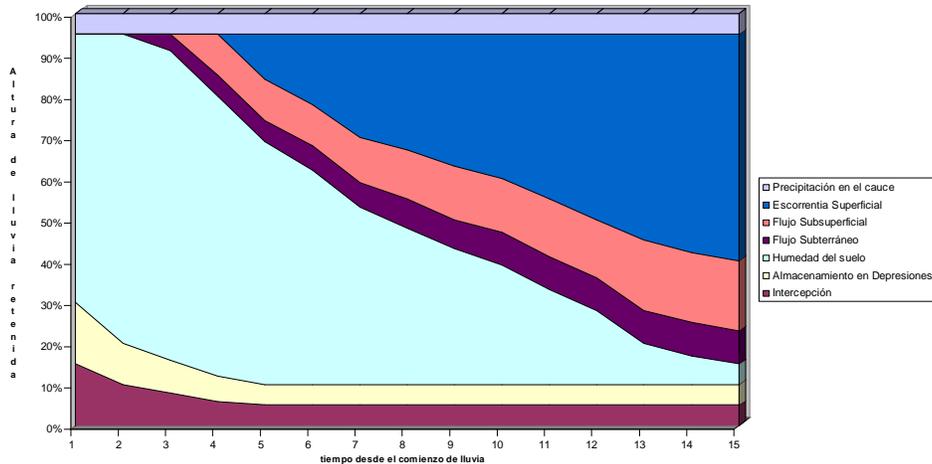
## Tasa de escurrimiento superficial

$$s \equiv i - f - n \equiv (i - f)(1 - e^{-kP_e})$$



FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

## Diagrama de Distribución de la Lluvia



**fin**  
FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

Si las presiones negativas son mayores de 15 bar,  
la planta (raíces) no puede extraer el agua.  
**Punto de Marchitez Permanente.**

Máxima cantidad de agua que el suelo puede  
almacenar en contra de la acción de la gravedad:  
**Capacidad de campo**

**El agua en exceso (por sobre CC) percola**

