



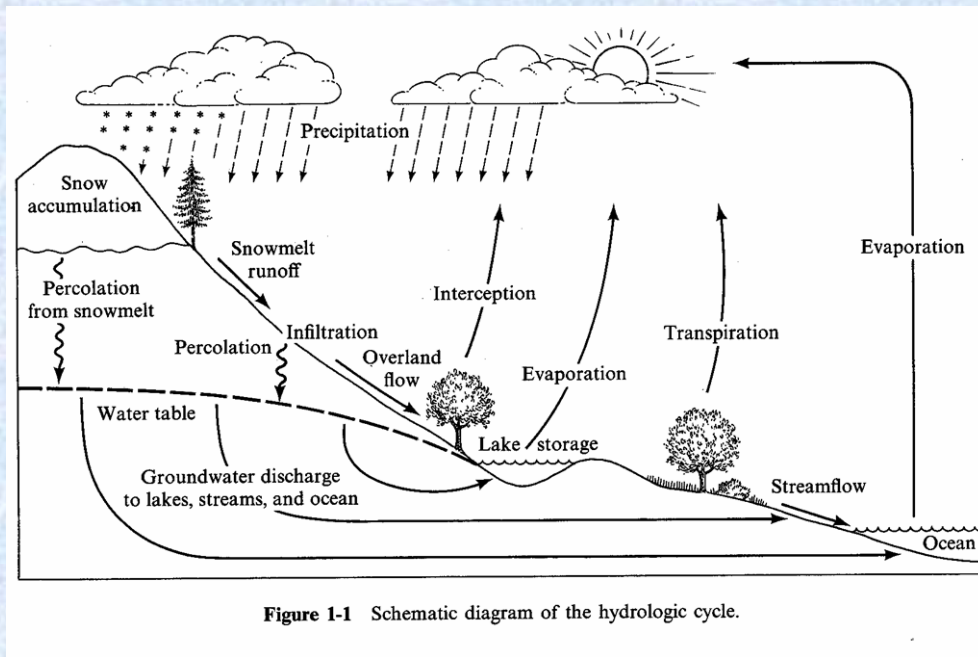
POLITÉCNICA



TEMA 7: Evapotranspiración



MARTA GONZÁLEZ DEL TÁNAGO
UNIDAD DOCENTE DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA FORESTAL
E.T.S. DE INGENIEROS DE MONTES
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



Dunne & Leopold (1978)

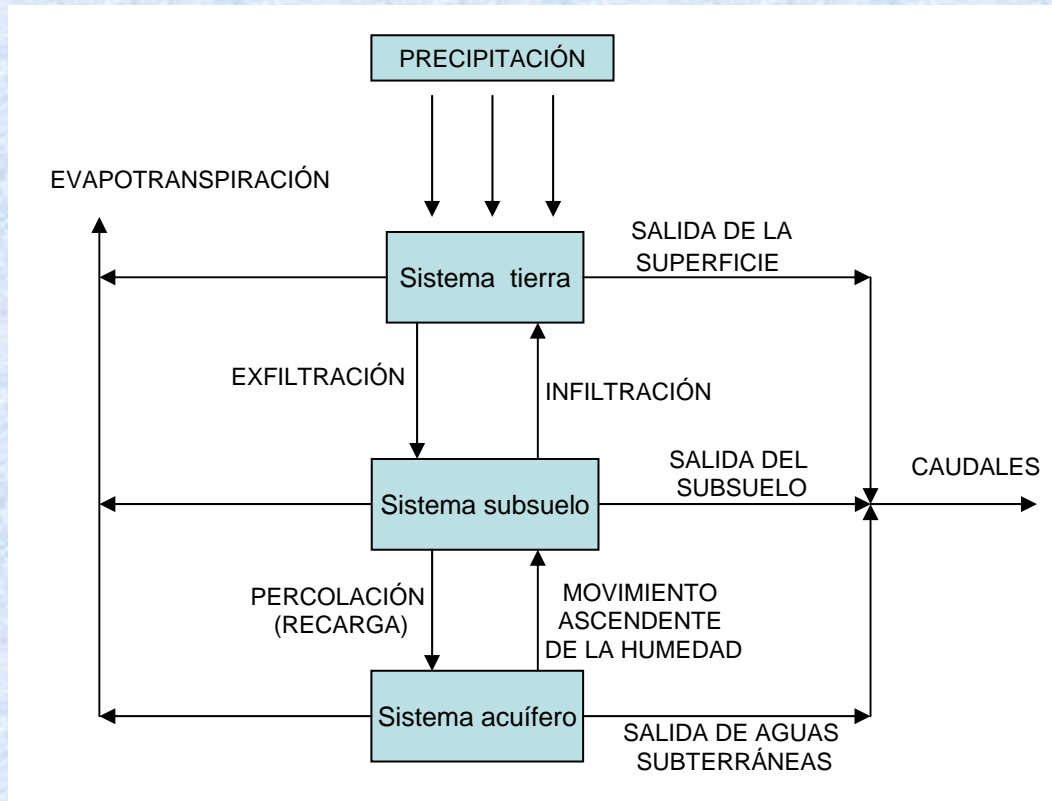
Figure 1-1 Schematic diagram of the hydrologic cycle.

- Definición del Proceso. Importancia del mismo
- Evapotranspiración Potencial y Evapotranspiración Real
- Medición y Unidades
- Fórmulas para el cálculo de la Evapotranspiración
- Factores que determinan la evapotranspiración

IMPORTANCIA DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

1.- Representa la principal vía de salida de agua de una cuenca

- La mayor parte del agua de las precipitaciones entra en el suelo, y de aquí es devuelta a la atmósfera a través de la evapotranspiración.



Sólo una parte, en ocasiones muy pequeña, de la precipitación anual sale de la cuenca en forma de caudales (*stream flow*).

Los recursos hídricos disponibles para el hombre proceden de los caudales y del agua almacenada en los acuíferos (agua no evapotranspirada).

IMPORTANCIA DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

2.- Tiene una gran influencia en la magnitud y estacionalidad del régimen de caudales de los ríos

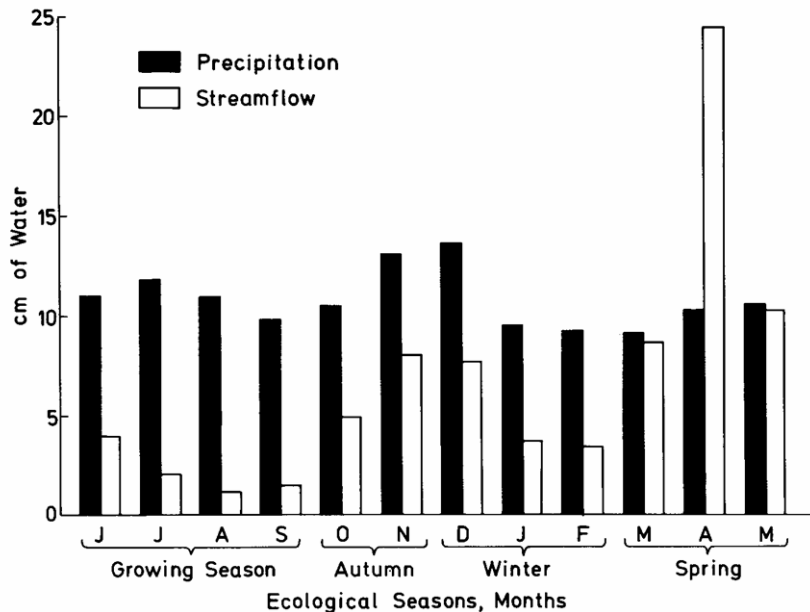


Figure 2-5. Monthly average distribution of precipitation and streamflow in centimeters of water. Ecological seasons are the growing season; autumn; winter, accumulating snow; and spring snowmelt and runoff period (after Likens et al., 1977).

Davies et al. (1994)

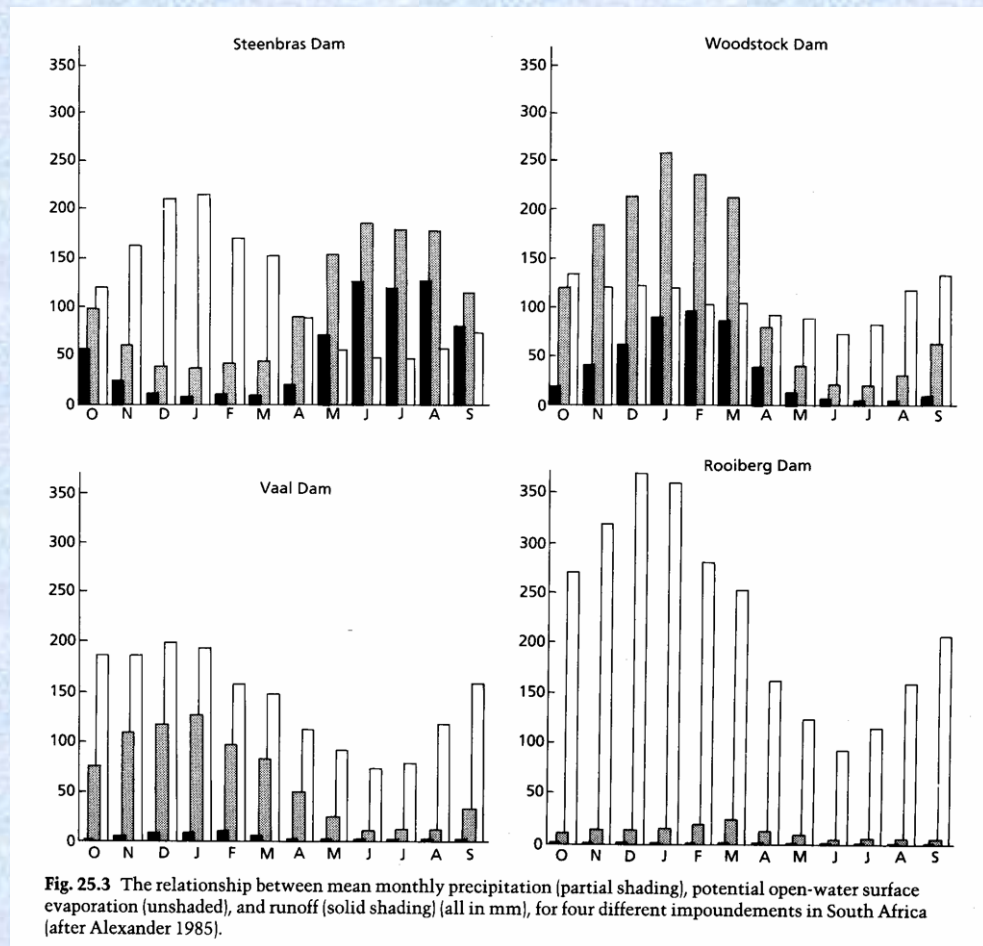
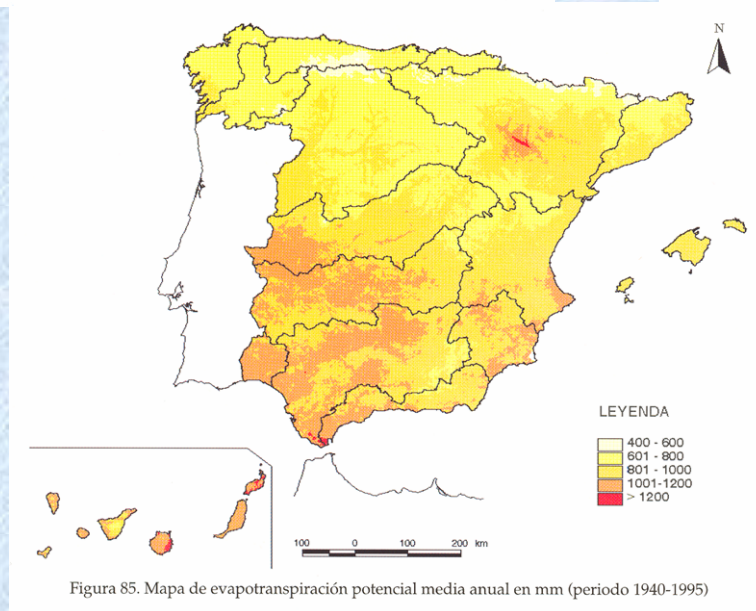
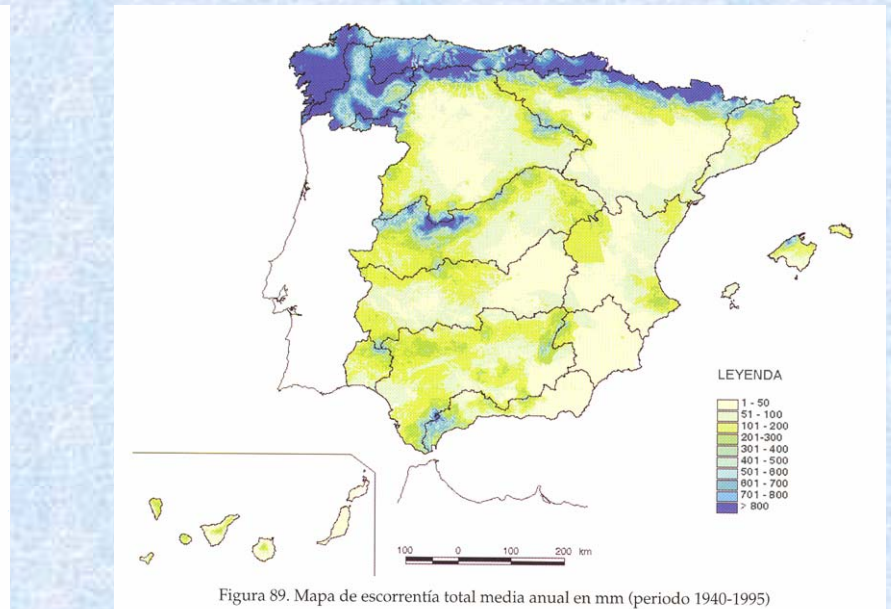
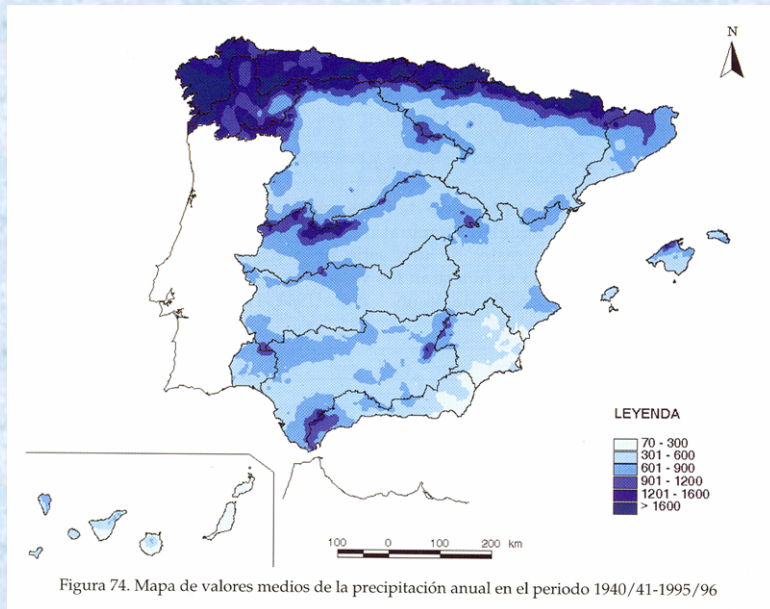


Fig. 25.3 The relationship between mean monthly precipitation (partial shading), potential open-water surface evaporation (unshaded), and runoff (solid shading) (all in mm), for four different impoundments in South Africa (after Alexander 1985).



EVAPOTRANSPIRACIÓN Y ESCORRENTÍAS EN ESPAÑA



Libro Blanco del Agua en España
(Ministerio de Medio Ambiente, 1998)

IMPORTANCIA DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

3.- Es un proceso fundamental para la vegetación, a través del cual regula su temperatura.

La vegetación utiliza una cantidad muy grande de agua como medio de transporte para llevar las sustancias nutritivas a sus tejidos. La mayor parte de este agua sale fuera de la planta, mediante la transpiración.

Una gran parte de la energía radiante solar se utiliza en cambiar de estado el agua líquida (evaporación), con lo que disminuye su poder de calentamiento de los cuerpos con humedad, especialmente la vegetación.

A 20°C, el calor latente de vaporización es aproximadamente 2,45 MJ/kg, lo que quiere decir que se emplean 2,45 MJ para evaporar 1 kg de agua.



EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL (ETP)

Se refiere a la pérdida de agua de un suelo con vegetación, en unas condiciones hipotéticas: cubierto por un tapiz herbáceo denso y continuo, sin limitación de humedad (evapotranspiración de referencia).

Equivale a la evaporación que tendría lugar en una lámina libre de agua. Depende de la **capacidad evaporante del aire**.

En este sentido, constituye un parámetro climatológico de cada zona, estando condicionado exclusivamente por las condiciones meteorológicas de cada época y lugar.

	Temperatura media diaria (°C)		
	Fría (-10 °C)	Moderada (20 °C)	Cálida (> 30 °C)
Trópicos y Subtrópicos: - húmedo y subhúmedo - árido y semiárido	2 - 3 2 - 4	3 - 5 4 - 6	5 - 7 6 - 8
Región Templada: - húmedo y subhúmedo - árido y semiárido	1 - 2 1 - 3	2 - 4 4 - 7	4 - 7 6 - 9

Valores medios de la evapotranspiración de referencia, expresados en mm/día, para las diferentes regiones agroclimáticas.



EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL (ETR)

Se refiere a la pérdida de agua del suelo con vegetación, cuando éste presenta un déficit de humedad.

En este caso, la tasa de pérdida de agua del suelo depende no solo de la capacidad evaporante del aire, sino de la facilidad que tenga el **suelo** para ceder el agua que contiene, y de la capacidad de la **vegetación** para disponer de dicha agua.

$$ETP \geq ETR$$



Unidades en que se expresa la Evapotranspiración

	Altura (mm/día)	Volumen por unidad de superficie		Energía por unidad de superficie * MJ m ⁻² día ⁻¹
		M ³ ha ⁻¹ día ⁻¹	L s ⁻¹ ha ⁻¹	
1 mm día ⁻¹	1	10	0.116	2.45
1 m ³ ha ⁻¹ día ⁻¹	0.1	1	0.012	0.245
1 l s ⁻¹ ha ⁻¹	8.640	86.40	1	21.17
1 MJ m ⁻² día ⁻¹	0.408	4.082	0.047	1

* Para agua con una densidad de 1000 kg m⁻³ a 20 °C.

MEDICIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

Tanques Evaporímetros (ETP, Evaporación de masas de agua)

- Son tanques o recipientes normalizados llenos de agua, donde periódicamente se mide la evaporación a través de la variación del nivel contenido de agua.
- Reflejan la influencia de las condiciones meteorológicas, asimilándose a las correspondientes a la evapotranspiración potencial.

Con los datos de los evaporímetros puede calcularse la evaporación de las masas de agua (ej.embalses), mediante coeficientes estimados en cada zona.

En general, la evaporación real de un embalse puede ser menor que la estimada por el evaporímetro al principio de la temporada cálida, y mayor que ésta al final de la temporada cálida, debido a la inercia de la temperatura de la masa de agua embalsada.



MEDICIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

Lisímetros (ETR bajo condiciones controladas)

- Son sistemas que aíslan porciones de suelo y permiten medir las entradas y salidas de agua y el intercambio de humedad, sirviendo para estimar, por diferencia de ambas, la evapotranspiración de una determinada cubierta vegetal.

P: Precipitación

I: Riego

D: Drenaje

$\Delta\theta$ Intercambio de humedad del suelo

Lisímetros de drenaje:

$$ETR = P + I - D$$

Lisímetros de pesada:

$$ETR = P + I - D \pm \Delta\theta$$

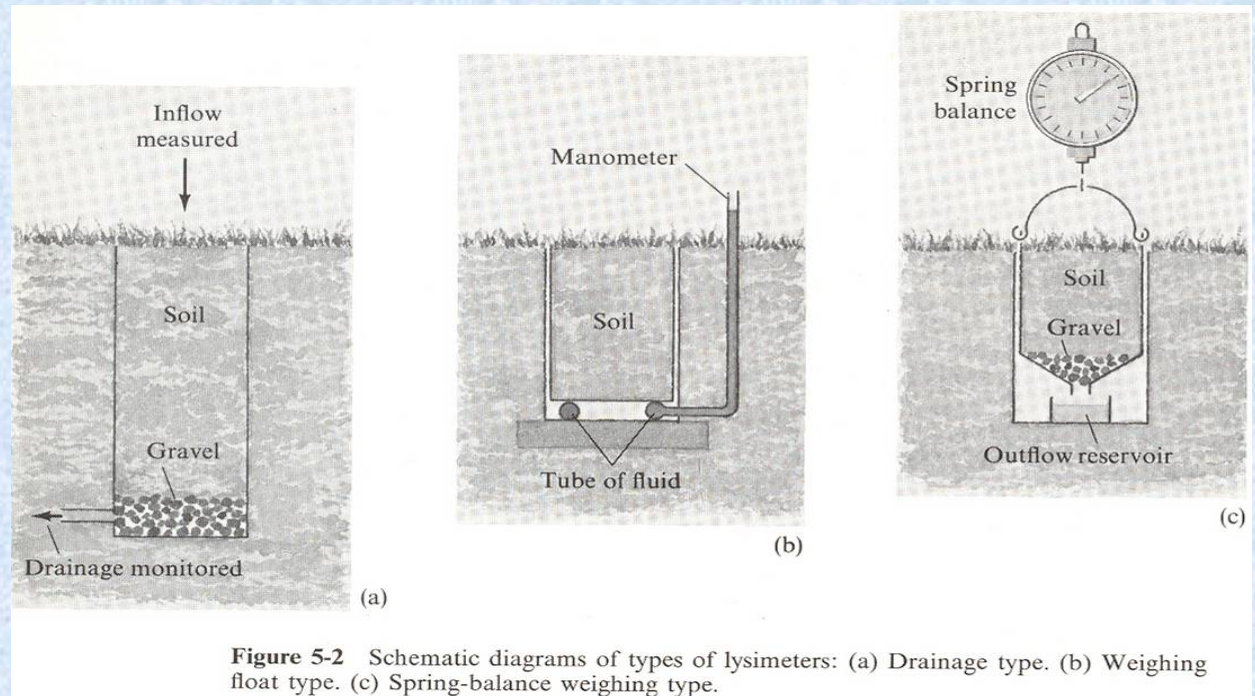


Figure 5-2 Schematic diagrams of types of lysimeters: (a) Drainage type. (b) Weighing float type. (c) Spring-balance weighing type.

Dunne & Leopold (1978)

MEDICIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

- **Balances hídricos**

La evapotranspiración es muy difícil de medir directamente, y casi siempre se valora como diferencia entre entradas (precipitación – intercepción) y otras formas de salida de agua (escorrentías), teniendo en cuenta cambios en la cantidad de agua almacenada en el suelo (humedad del suelo):

$$ETR = (P - I) - Q \pm \Delta\theta$$

Balances en parcelas experimentales: Equivalentes a lisímetros de pesada.

Balances en cuencas vertientes: La salida de escorrentías se mide mediante una estación de aforos en la sección de salida de la cuenca.



MEDICIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

Balance anual o mensual: (Para un año)

- Medición de la Precipitación (Entradas de agua)
- Medición de la Intercepción y de las escorrentías en el cauce (Salidas de agua)
- Medición de la humedad del suelo (Cambios de nivel de agua almacenada)

Balance anual medio (Para un periodo de años):

Al final de la estación seca:

$$ETR_1 = P_1 - Q_1 \pm \Delta\theta_1$$

$$ETR_2 = P_2 - Q_2 \pm \Delta\theta_2$$

$$ETR_N = P_N - Q_N \pm \Delta\theta_N$$

$$\overline{ETR} = \overline{P} - \overline{Q} \pm \frac{\sum \Delta\theta}{N} = \overline{P} - \overline{Q}$$



FÓRMULAS PARA EL CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

1. Basadas en la Temperatura del aire:

Fórmula de Thornthwaite (1949):

$$E = 1,6d \left[\frac{10\bar{t}}{I} \right]^a$$

E: evaporación mensual (cm/mes)

t: temperatura media mensual

d: factor de corrección de horas de luz, en relación a un mes de 30 días y 360 horas de luz

$$I = \sum_1^{12} \left(\frac{\bar{t}}{5} \right)^{1,514}$$

$$a = 0,49 + 0,0179I + 0,000077I^2 + 0,000000675I^3$$

Fórmula de Turc (1954):

E: Evaporación anual (mm)

T: Temperatura media anual

$$E = \frac{P}{\sqrt{0,9 + (P/L)^2}}$$

$$L = 300 + 25T + 0,05T^3$$

Fórmula de Blaney-Criddle (1950):

ET: Evapotranspiración potencial mensual (cm)

K: factor empírico de cultivo

d: horas de luz del mes, como fracción del año

$$ET = (0,142\bar{t} + 1,095)(\bar{t} + 17,8)kd_n$$



CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

2. Fórmulas basadas en el intercambio de masa

Ley de Dalton (1802):

E : Agua evaporada

$f(u)$: función de la velocidad del viento

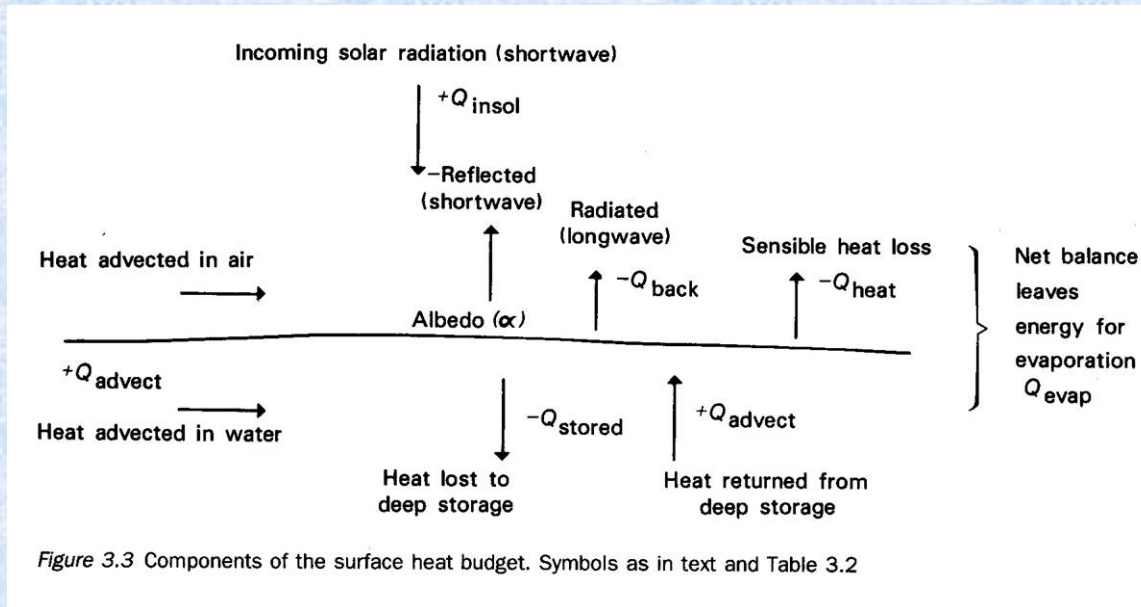
$e_{sat} - e_{act}$: déficit de saturación

$$E = f(u)(e_{sat} - e_{act})$$



CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

3. Fórmulas basadas en el intercambio de energía



Jones (1997)

$$Q_{evap} = Q_{ins} (1 - \alpha) - Q_{back} + Q_{adv} - (Q_{heat} + Q_{stored})$$

ρ Densidad del agua (kg/mm³)

$$E_o = \frac{Q_{evap}}{\rho \lambda}$$

λ Calor latente de vaporización (J/kg)

E_o: Agua evaporada mm/mm²

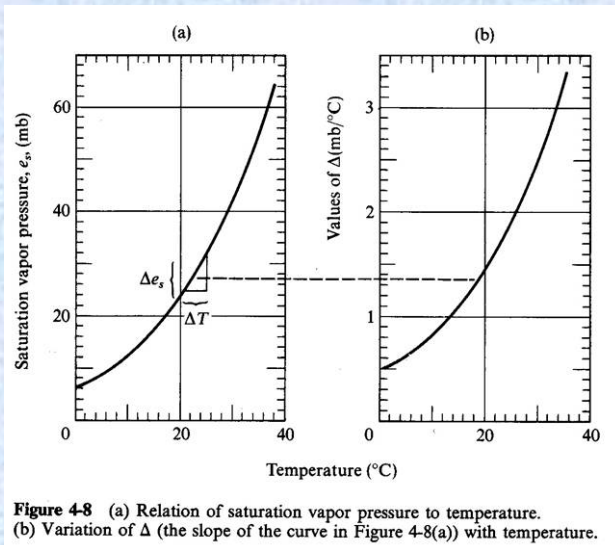


CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

4. Fórmulas combinadas

Fórmula de Penman-Monteith
(Allen *et al.*, 1998)

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)}$$



Dunne & Leopold (1978)

R_n : radiación neta

G : flujo de calor hacia el suelo

c_p : calor específico del aire

γ : Constante psicrométrica

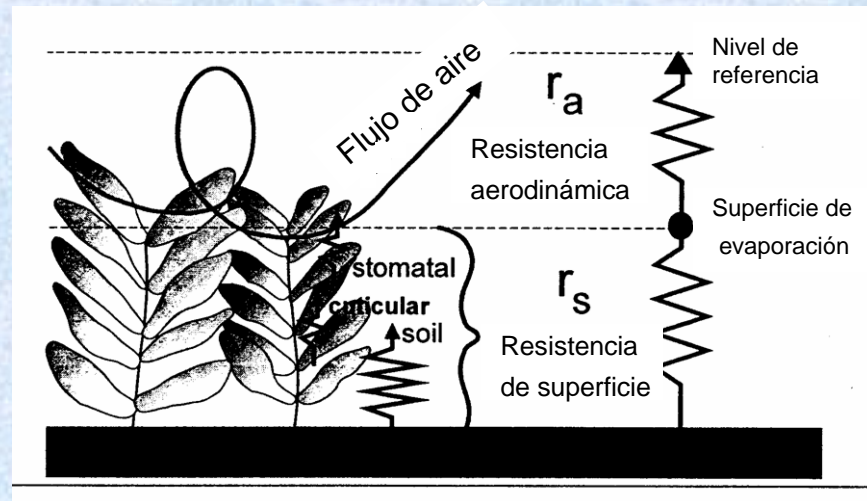
Δ : Pendiente de la curva que relaciona presión de vapor en saturación con $^{\circ}\text{C}$

ρ_a densidad del aire

r_s : resistencia de la superficie

r_a : resistencia aerodinámica

Componentes de la resistencia a la difusión de vapor desde la vegetación



FAO (1998)

Resistencia aerodinámica:

$$r_a = \frac{\ln \left[\frac{z_m - d}{z_{om}} \right] \ln \left[\frac{z_h - d}{z_{oh}} \right]}{k^2 u_z}$$

$$d = \frac{2}{3} h$$

$$z_{om} = 0,123h$$

$$z_{oh} = 0,1z_{om}$$

h : altura de la vegetación

k : von Karman's constante

u_z velocidad del viento a la altura z

Resistencia de la superficie evaporante:

$$r_s = \frac{r_l}{LAI_{activo}}$$

r_l resistencia de los estomas (distinta para cada especie)

$$LAI_{activo}: 0,5 LAI$$

Comparación de resultados obtenidos con distintas fórmulas

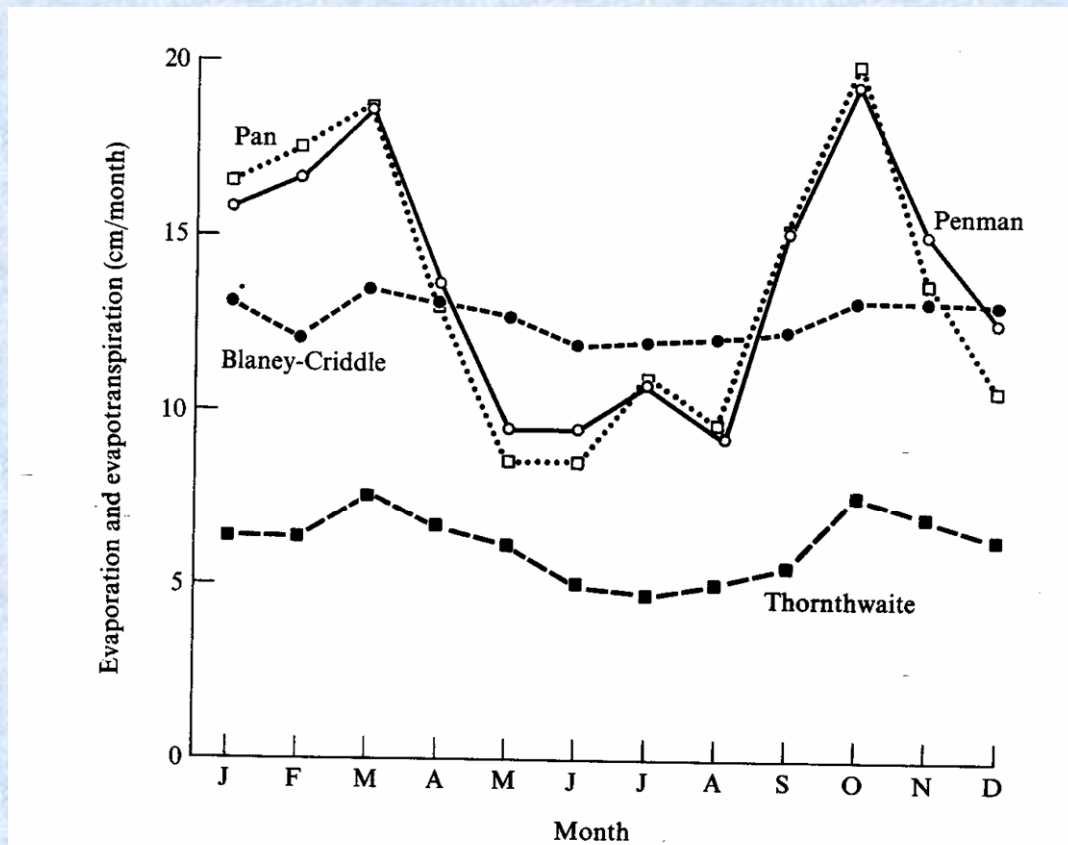
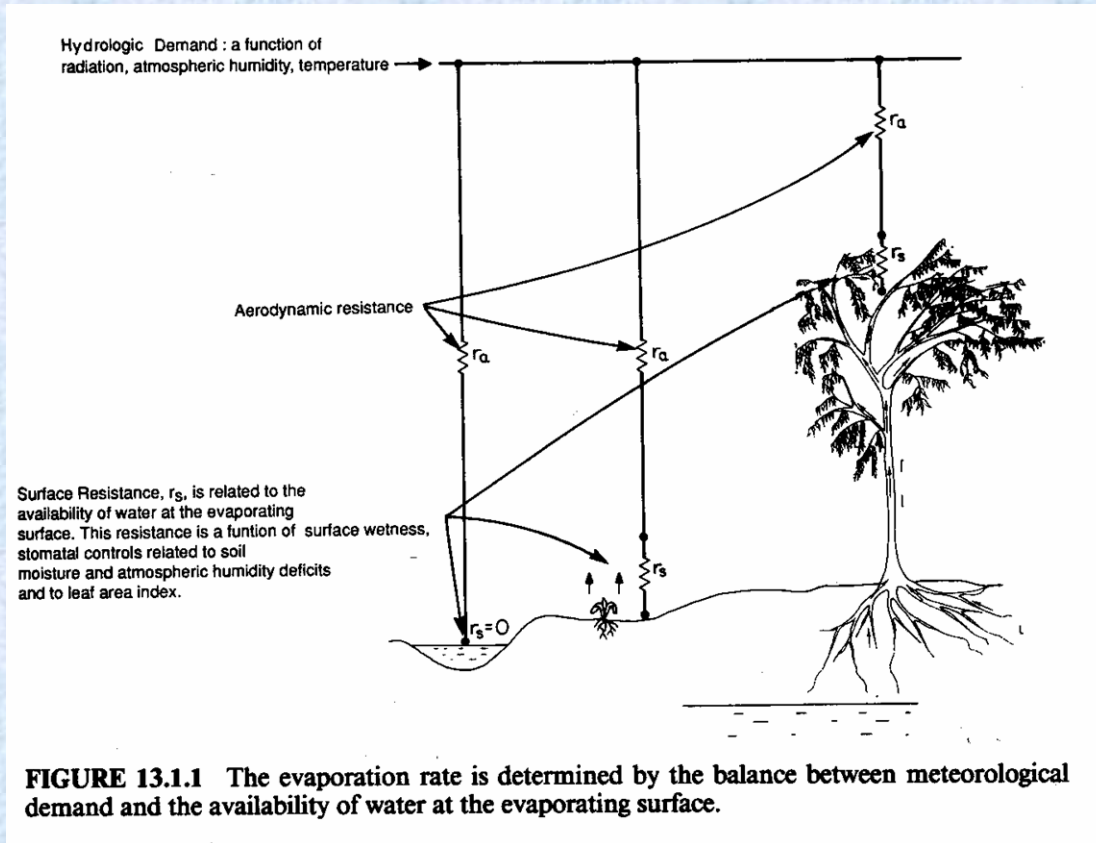


Figure 5-3 Measured pan evaporation and calculated potential evapotranspiration at Muguga, Kenya, for 1963. The curve marked "Pan" is measured evaporation. The other three curves are computed values of evapotranspiration using different methods. (After Dagg and Blackie 1970.)

Dunne & Leopold (1978)



FACTORES QUE INFLUYEN EN LA EVAPOTRANSPIRACIÓN



- Factores climatológicos (ETP)
- Factores del suelo y de la vegetación (ETR)

FACTORES QUE INFLUYEN EN LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

Evapotranspiración: Proceso combinado, físico y biológico, por el cual el agua en estado líquido pasa a estado de vapor, desde el suelo hasta el aire, a través de la vegetación.

Ley de Fick:
$$F = A * \frac{\Delta C}{\sum r}$$

F: Tasa de difusión del vapor de agua

A: Superficie de difusión

C: gradiente de concentración del vapor de agua

r: Conjunto de resistencias ofrecidas a la difusión

$$T = f \frac{\Psi_{suelo} - \Psi_{raíces}}{r_{suelo} + r_{raíces}} + \frac{\Psi_{raíces} - \Psi_{hojas}}{r_{raíces} + r_{hojas}} + \frac{\Psi_{hojas} - \Psi_{aire}}{r_{hojas} + r_{aire}}$$

Respecto al potencial hídrico, el del aire es el que más varía:

$$\Psi_{aire} = R * T \ln\left(\frac{e_a}{e_s}\right)$$

Respecto a las resistencias, la mayor es la de la hoja (cutícula y estomas).



FACTORES QUE INFLUYEN EN LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

1. Factores meteorológicos:

- Dominan el orden de magnitud del proceso, definiendo la ETP
- Determinan la capacidad evaporante del aire, función de variables como:
 - Temperatura del aire
 - Déficit de humedad
 - Velocidad del viento
- De forma indirecta, también influyen:
 - Régimen de precipitaciones (humedad del suelo)
 - Régimen de temperaturas (duración de periodos vegetativos)



FACTORES QUE INFLUYEN EN LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

2. Factores del suelo:

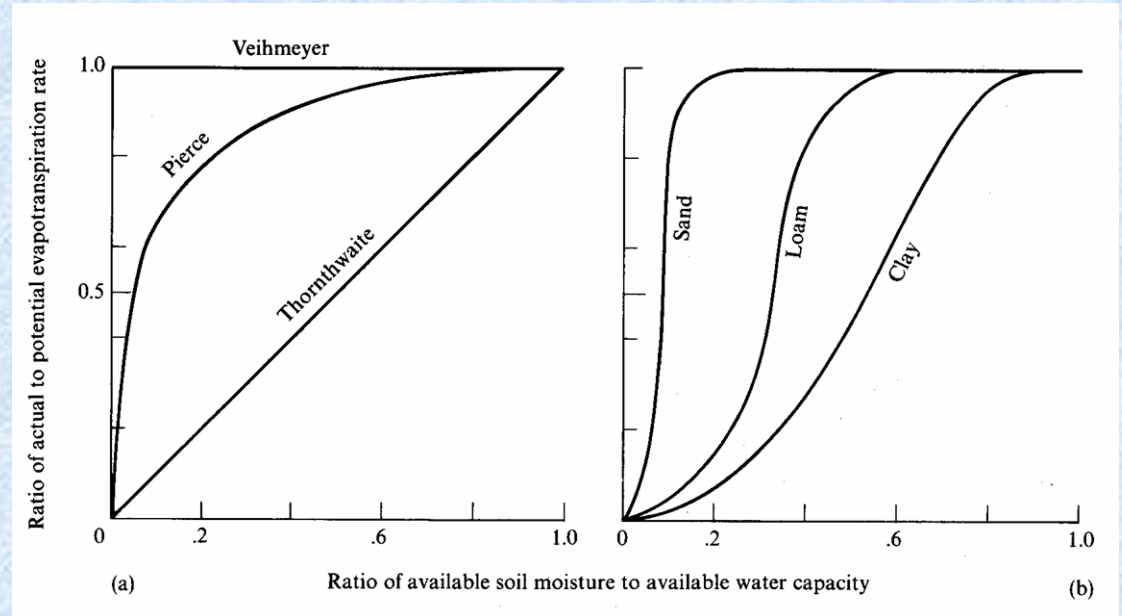
- Controlan la cantidad de agua disponible para la evapotranspiración,
- No intervienen cuando no hay déficit de humedad ($ETR=ETP$)
- Entran en juego cuando la humedad del suelo es inferior a la capacidad de campo
- Están relacionados con la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, y con su facilidad para ceder el agua retenida. Se refieren, entre otros, a:
 - Porosidad
 - Textura, Estructura, Forma y distribución de los poros
 - Profundidad del suelo
 - Contenido de materia orgánica y comportamiento del suelo (agrietamiento)
 - Contenido en sales (potencial osmótico)



2. Factores del suelo:

$$\frac{ETR}{ETP} = f\left(\frac{AW}{AWC}\right)$$

Dunne & Leopold (1978)



AW: Agua disponible = (Humedad del suelo – Punto de marchitez) x profundidad de raíces

AWC: Capacidad de agua disponible = (Capacidad de campo – Punto de marchitez) x profundidad de raíces

3. Factores relacionados con la vegetación:

Coeficiente de albedo: Reflectividad de la superficie vegetal, distinta para cada especie según la forma de la hoja, color, rugosidad superficial, etc.

Resistencia a la difusión de vapor:

$$r_s = f\left(\frac{r_{estomas}}{LAI}\right)$$

$$r_a = f(h)$$

a) de la superficie vegetal, desde los estomas y la cutícula (mayor o menor adaptación a vivir en ambientes secos):

- Valores bajos para herbáceas de zonas templadas.
- Valores más pequeños para árboles de hoja caduca, más altos para los de hoja perenne y mayores para las coníferas, hierbas de regiones secas y plantas suculentas.

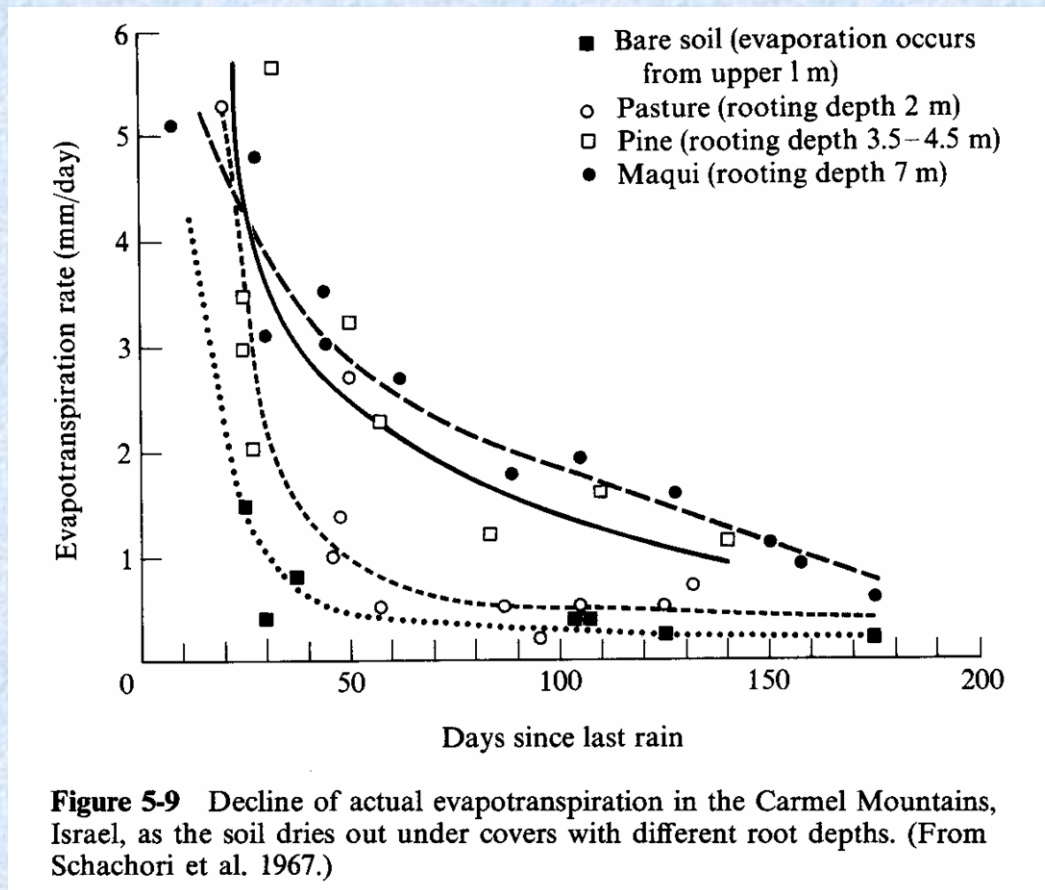
b) Resistencia aerodinámica de la cubierta vegetal, en función de su altura, siendo menor (mayor difusión de vapor) para las cubiertas más altas.



3. Factores relacionados con la vegetación:

-**Relación raíz a tallo** (superficie absorbente de las raíces en relación a superficie evaporante de las hojas).

- **Profundidad y densidad de raíces**, que posibilita el acceso a mayor humedad del suelo (más espacio efectivo).



Dunne & Leopold (1978)

EVAPOTRANSPIRACIÓN EN ECOSISTEMAS FORESTALES

El tipo de vegetación existente en cada zona influye en la disponibilidad de recursos hídricos de esa zona.

Para un mismo régimen de precipitaciones, cuánta más agua utilice la vegetación para transpirar, menores serán las escorrentías y reservas de agua del suelo.

1. Zonas húmedas:

El suelo no tiene restricciones de humedad durante todo o gran parte del año.

Las tasas de evapotranspiración son muy similares entre unas cubiertas y otras, estando próximas al valor de ETP regulado por variables meteorológicas.

La menor cobertura de estratos arbóreos se compensa con mayor sotobosque, manteniéndose el consumo de agua del suelo en condiciones muy similares.

En este caso, son importantes las pérdidas por evaporación del agua interceptada durante las lluvias.



EVAPORACIÓN DEL AGUA INTERCEPTADA DURANTE LAS LLUVIAS

Table 1.3 Evaporation measurements from the Plynlimon forest lysimeter, February 1974–September 1976; units: mm. (Reproduced by permission from Calder *et al.*, 1982b.)

Period	Precipitation	Interception	Transpiration
6 February 1974–31 December 1974	3238	685	289
1 January 1975–31 December 1975	2013	529	335
1 January 1976–1 October 1976	1103	366	277
TOTAL	5444	1580	901

Calder (1982)

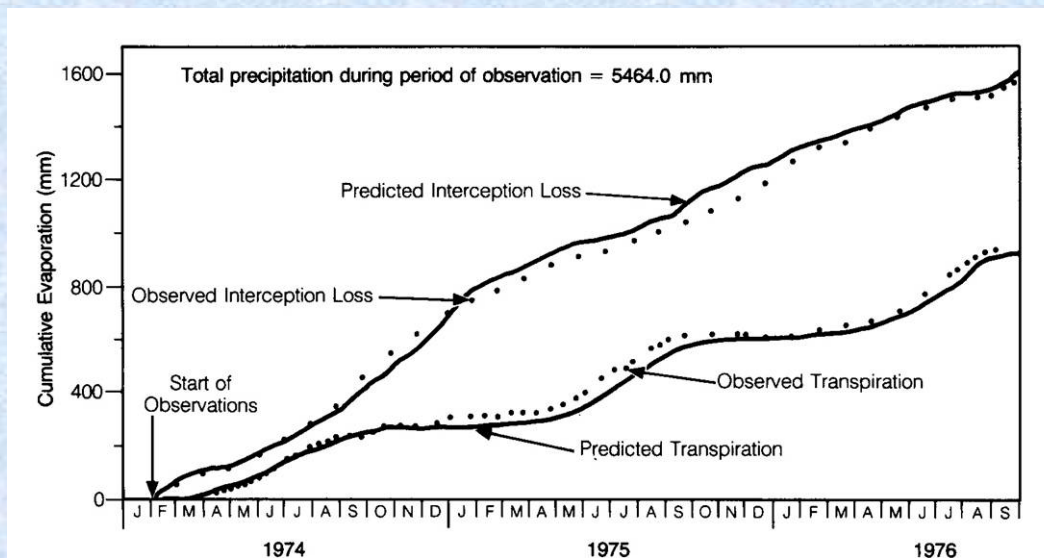


Figure 1.8 Observed and predicted cumulative interception and transpiration losses from the Plynlimon forest lysimeter. (Reproduced by permission from Calder, 1979a; Copyright Water Services.)

Calder (1979)



EVAPOTRANSPIRACIÓN EN ECOSISTEMAS FORESTALES

2. Zonas secas

Para una misma disponibilidad de agua en el suelo:

Existen grandes diferencias de evapotranspiración según el tipo de cubierta vegetal existente.

Cada especie tiene diferentes estrategias para compensar la falta de humedad del suelo:

- Agostarse antes (ej. herbáceas), caída de la hoja, periodos durmientes
- Desarrollo de sistemas radicales
- Comportamiento fisiológico y cierre de estomas

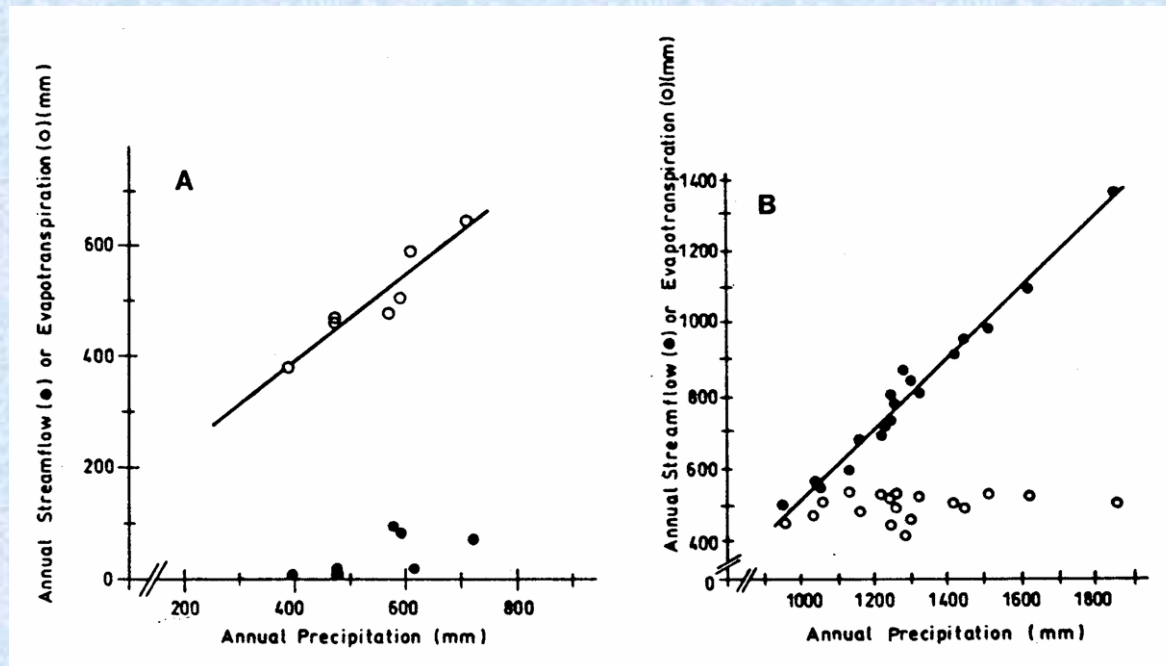
Los años que llueve más, la humedad del suelo es mayor y la ETR se aproxima más a la ETP.



DIFERENCIAS DE COMPORTAMIENTO EN ZONAS HÚMEDAS-ZONAS SECAS

En **zonas húmedas** (ej. Hubbard Brook, NE Estados Unidos), la evapotranspiración anual es muy parecida de un año a otro (valores próximos a la ETP), y la escorrentía es la que varía, en función de las precipitaciones.

En **zonas secas** (l'Avic, Cataluña), la escorrentía anual es muy parecida de un año a otro, y la evapotranspiración (ETR) es la que varía, en función de las precipitaciones.



Relación entre la evapotranspiración y el drenaje anuales con la precipitación anual en las cuencas de l'Avic (A) y Hubbard Brook, New Hampshire, USA (B). El dibujo de Hubbard Brook es copia de Likens et al. (1977).

EFECTOS HIDROLÓGICOS DE LA CORTA (REPOBLACIÓN) DE LA VEGETACIÓN

La respuesta a la corta de la vegetación, o a la repoblación, en la formación de escorrentías puede ser muy diferente de unas zonas a otras, dependiendo de:

- Régimen de precipitaciones en relación a las condiciones de infiltración del suelo.
- Mantenimiento de las condiciones de infiltración después de la corta.
- Rapidez de la recuperación de la vegetación después de la corta.
- Déficit de humedad del suelo en las distintas épocas del año.
- Otros aspectos relacionados con el balance que establece la vegetación: mayor entrada de agua al suelo pero mayor consumo de su humedad.

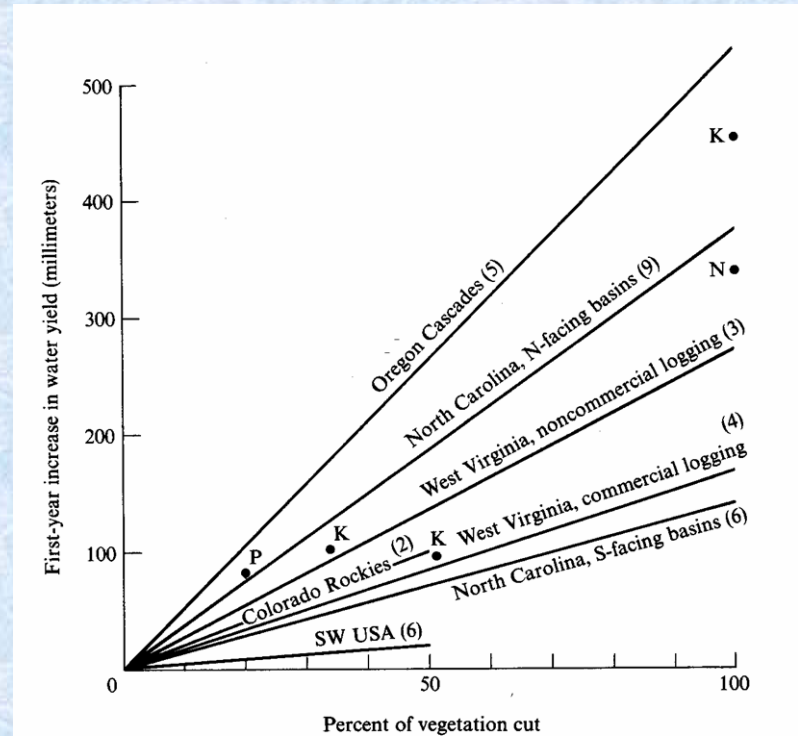


Figure 5-11 First-year increase in runoff as a function of percentage of forest vegetation removed by clearcutting. The points for the lines are omitted for clarity, but they define the lines well. Individual points are plotted, identified by letters, to show results of experiments on drainage basins in various regions: K = Kenya highlands; N = New Hampshire; P = Pennsylvania. (Data from Hibbert 1967 and many other reports.)

Dunne & Leopold (1978)

