

LA VEGETACIÓN Y EL CICLO HIDROLÓGICO. FLUJOS EN EL SISTEMA SUELO-PLANTA-ATMÓSFERA

Pilar Llorens

Grup d'Hidrologia i Erosió

Institut de Diagnosi Ambiental i Estudis de l'Aigua (IDAEA). CSIC

pllorens@idaea.csic.es

- ¿Como afecta la vegetación al ciclo hidrológico?
¿Cuales son los flujos de agua en el sistema suelo-planta-atmósfera?

- La transpiración
 - Fundamentos teóricos
 - Métodos de medición
 - Modelización

- La Interceptación
 - Fundamentos teóricos
 - Métodos de medición
 - Modelización

- Ejemplos en las cuencas experimentales de Vallcebre

Como afecta la vegetación al ciclo hidrológico?

- Sus características físicas determinan la redistribución del agua de lluvia que llega al suelo:

INTERCEPTACIÓN / RAINFALL INTERCEPTION

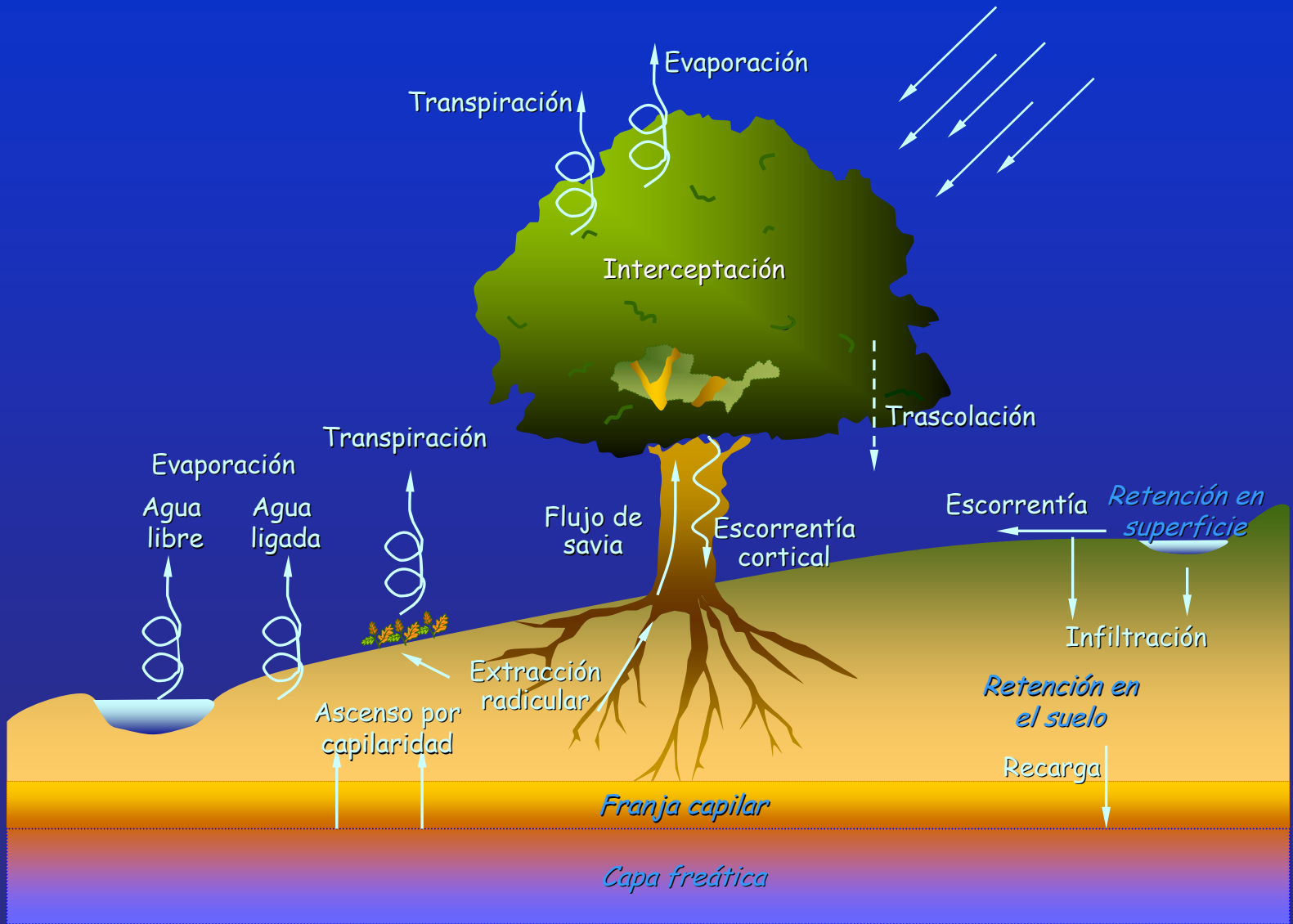
- Sus características fisiológicas determinan la extracción del agua del suelo:

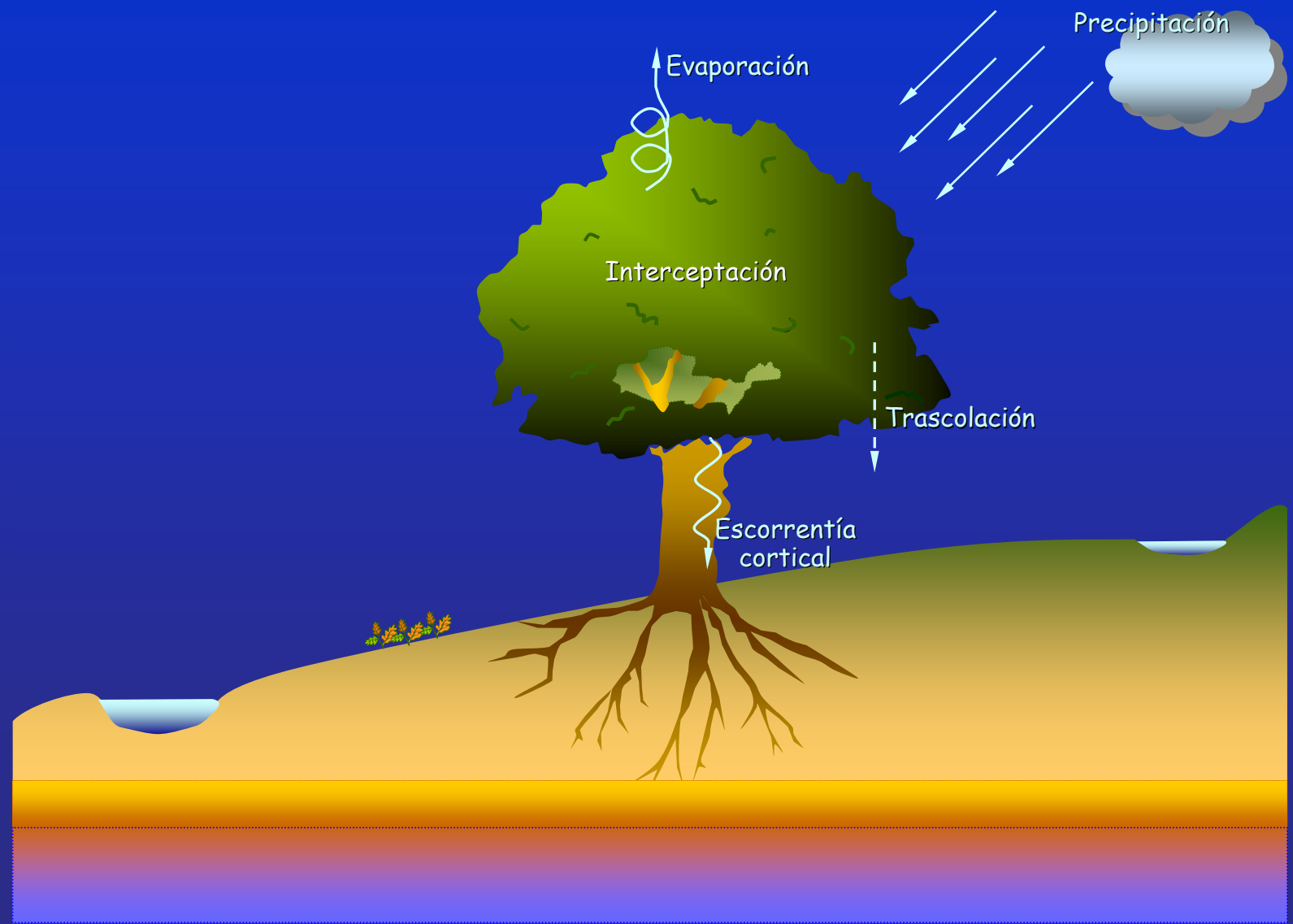
TRANSPIRACIÓN / TRANSPIRATION

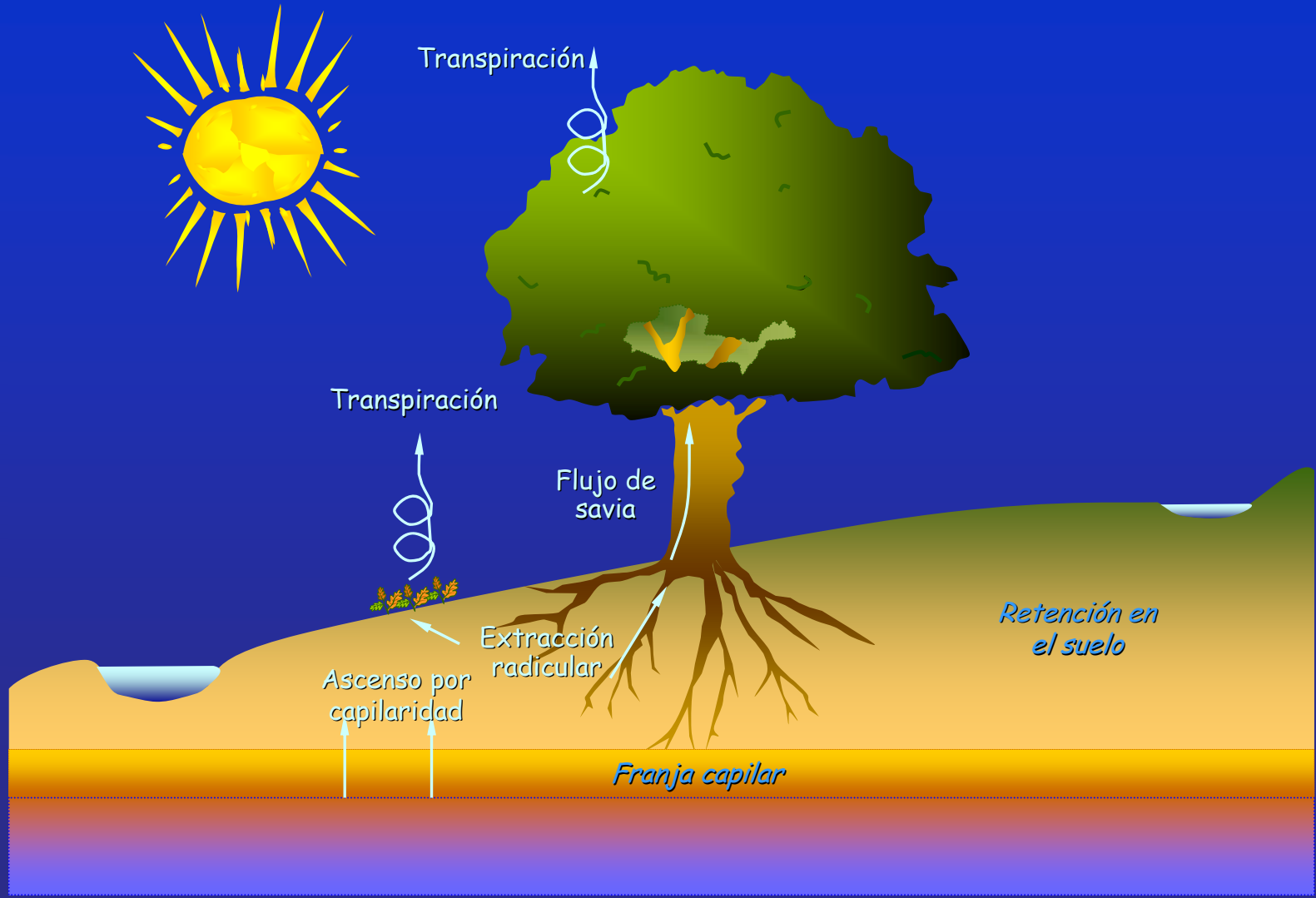
Los dos procesos están determinados por la
EVAPORACIÓN

Evapotranspiración: globalmente 57% de la precipitación anual

En 'buenas condiciones': 3-4 mm/día

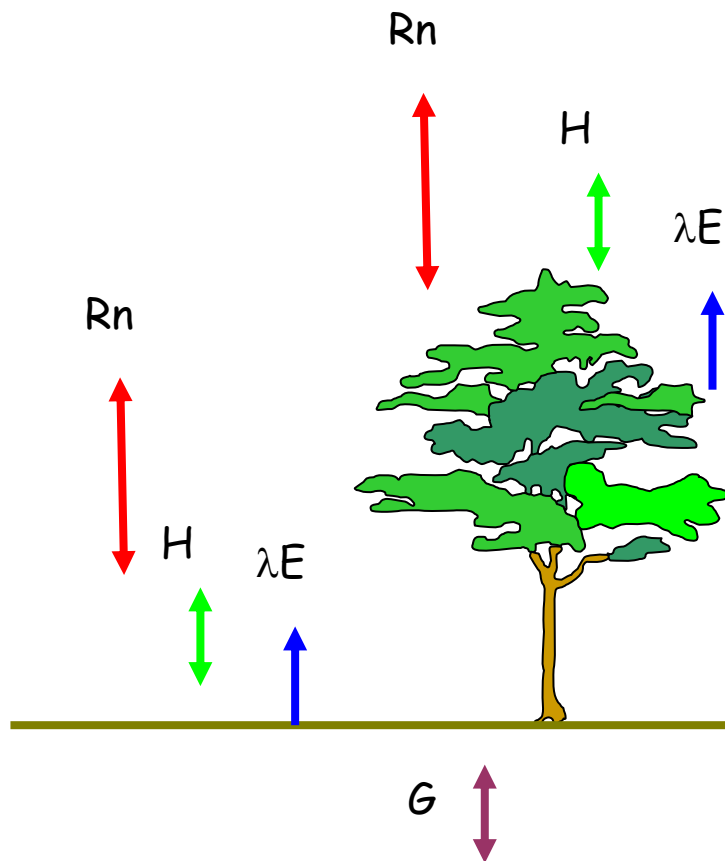






BALANCE ENERGÉTICO DE LAS SUPERFICIES

$$R_n - G = \lambda E + H (+P)$$

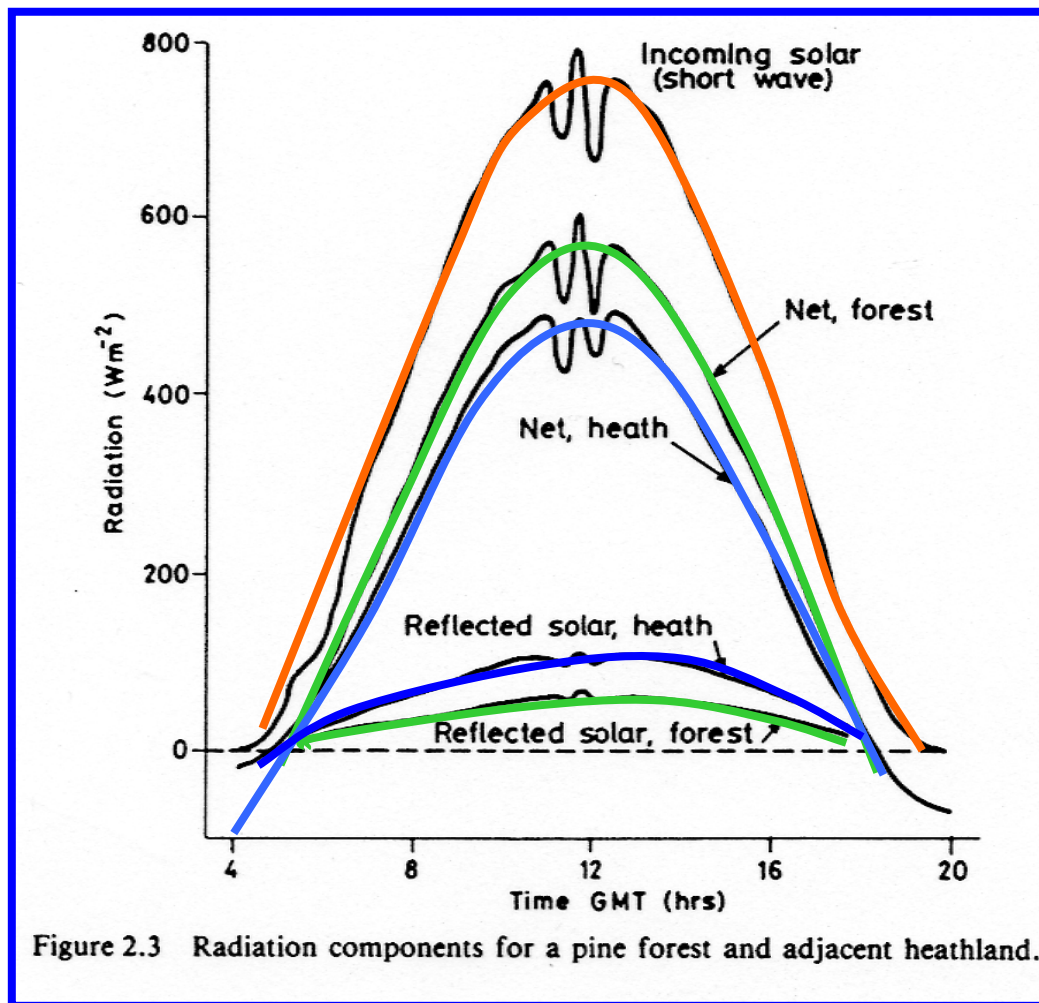


Introducción

Transpiración

Intercepción

Vallcebre

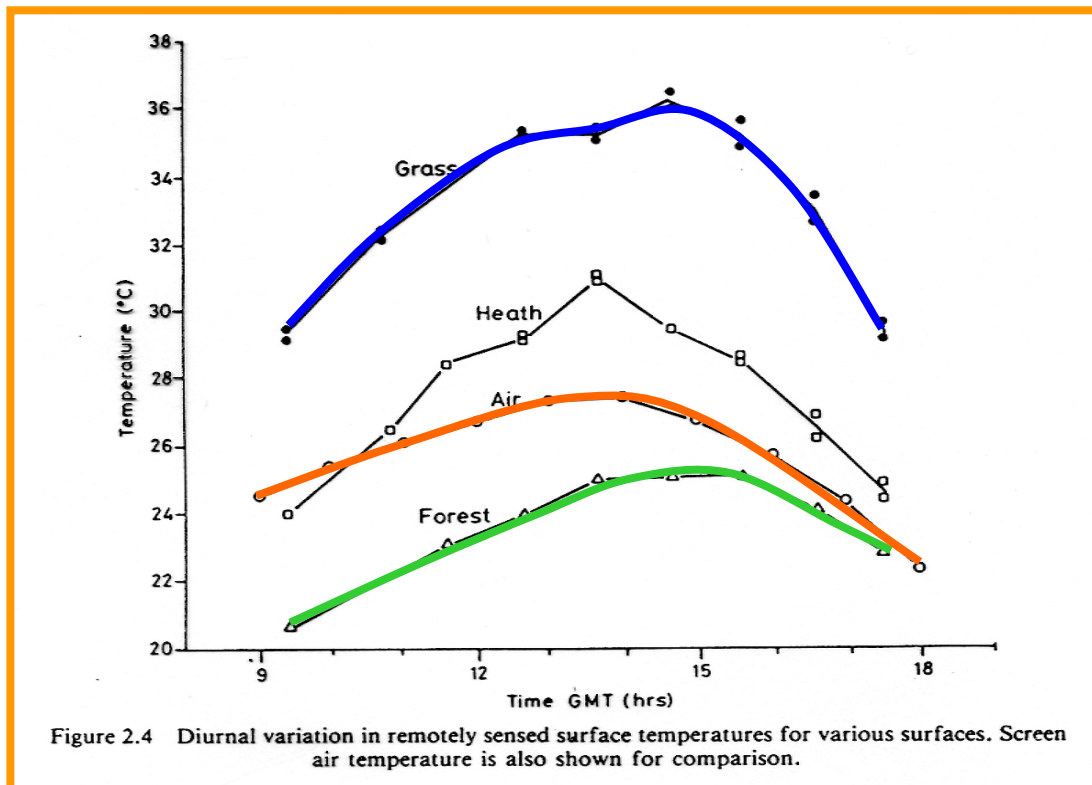


Wallace and Oliver (1990)

Balance energético:

(a) Albedo
bosque (7-8%)
prado (20-25%)

- color
-trampa de radiación
(estructural)



Wallace and Oliver (1990)

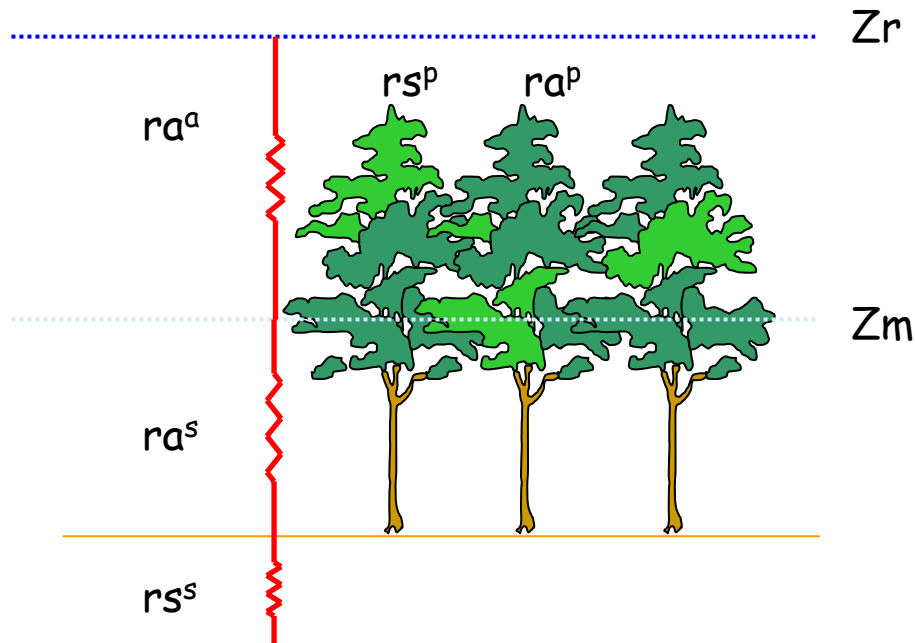
Balanz energètica:

(b) Temperatura superficie

bosque < prado

- mayores "eddies"
- mayor transferència de calor sensible
- trampa de radiación (estructural)

PROCESOS DE TRANSPORTE



Introducción

Transpiración

Intercepción

Vallcebre

- Gradientes de humedad, temperatura y velocidad del viento



Facilitan la evaporación

DIFUSIÓN TURBULENTA

- RESISTENCIAS



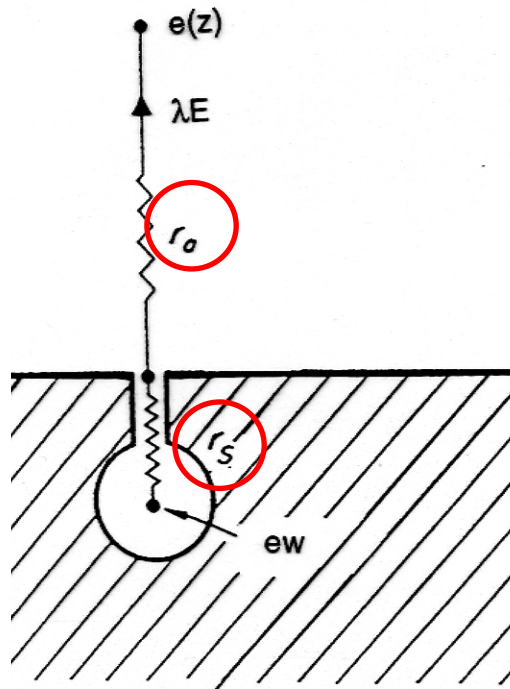
Se oponen a la evaporación

Resistencias a la
transferencia de
vapor de agua

RESISTENCIA
AERODINÁMICA (r_a)

RESISTENCIA
ESTOMÁTICA (r_s)

CONDICIONES
SECAS



Adaptado de Monteith (1976)

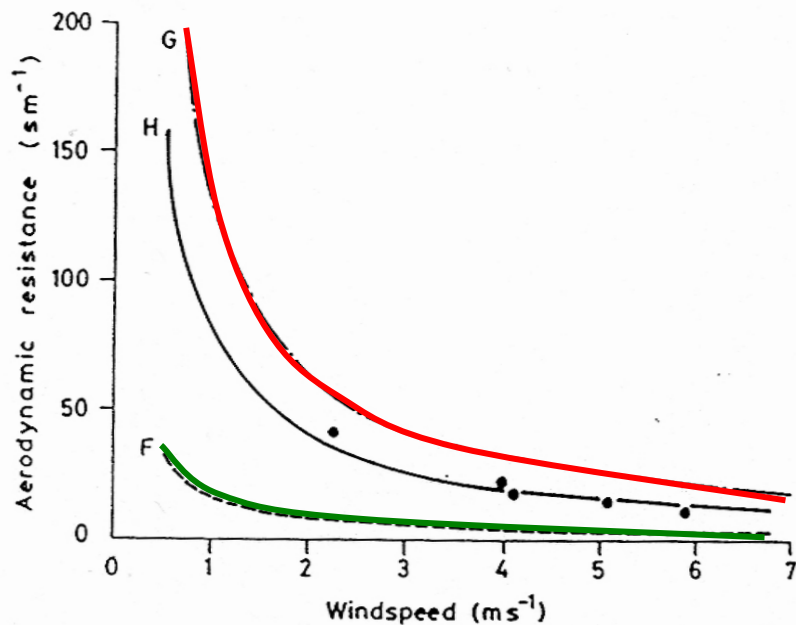


Figure 2.11 A comparison of the aerodynamic resistances of forest (F), heather (H) and grass (G). Measured values of r_a for heather (●) are also shown. (Further details can be found in Wallace *et al.*, 1982)

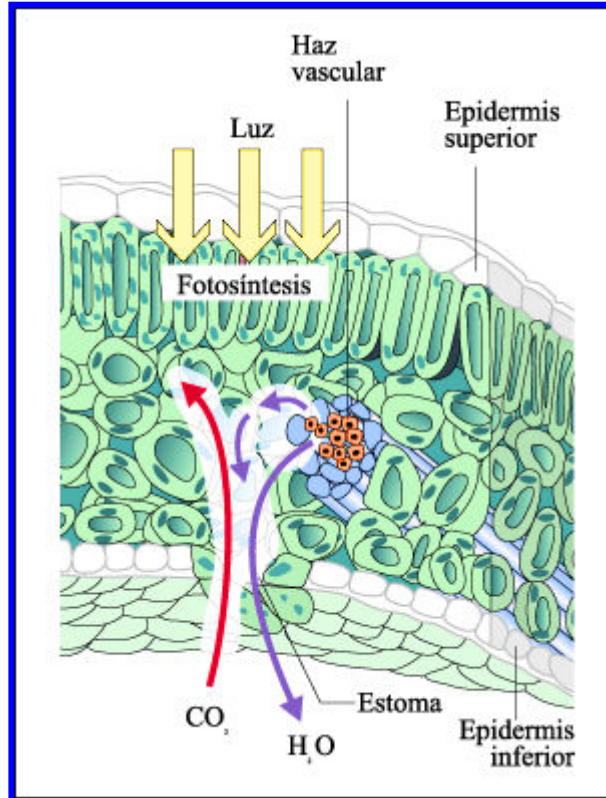
Wallace & Oliver (1990)

Trasferencia de vapor de agua:

(a) resistencia aerodinámica

bosque < prado

- mayores "eddies"
- mayor turbulencia



Trasferencia de vapor de agua:

(a) conductancia estomática

-mayor regulación en árboles

La Transpiración

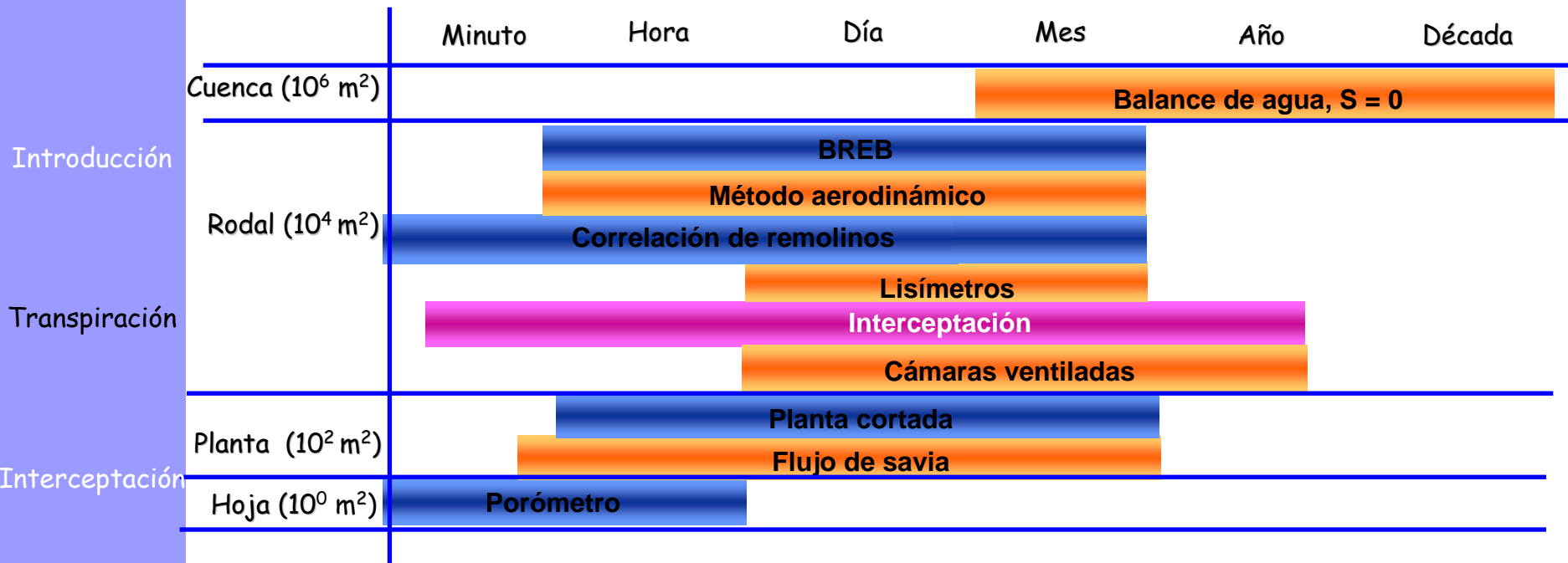
- Escalas de medición
- Métodos de medición
- Algunos resultados de medidas de transpiración
- Modelitzación de la transpiración
 - Penman-Monteith
 - Resistencias
 - SVATs
- La evapotranspiración de referencia

Introducción

Transpiración

Interceptación

Vallcebre



- Cada técnica es representativa de una escala espacial y temporal. Para inferir tasas a otras escalas son necesarias técnicas de interpolación o extrapolación.
- Cada técnica introduce un conjunto particular de asunciones, dificultades técnicas, errores de medida, etc. Se dan ventajas y limitaciones propias de cada técnica.

Medición de la transpiración. Escala de hoja

Introducción

Transpiración

Interceptación

Vallcebre



INTERCAMBIO DE GASES

Medidas de conductancia estomática foliar con un sistema portátil, basado en un analizador de gases por infrarrojo (IRGA).

Medición de la transpiración. Escala de planta

Introducción

Transpiración

Interceptación

Vallcebre



© F. Domingo



© P. Llorens



© R. Poyatos

FLUJO DE SAVIA

Diferentes métodos:

- (1) Balance térmico
- (2) Disipación térmica
- (3) Deformación del campo de calor

Todos miden la el flujo de savia basándose en la medida de la temperatura.

Medición de la transpiración. Escala de cubierta



© P. Llorens

CORRELACIÓN DE REMOLINOS (Eddy Correlation)

Método micrometeorológico utilizado para estimar la evapotranspiración de cubiertas vegetales a partir de la medición de los componentes en 3 direcciones de la velocidad del viento y las fluctuaciones de temperatura y vapor de agua.



© P. Llorens

MÉTODO COMBINADO DEL BALANCE ENERGÉTICO Y LA RAZÓN DE BOWEN (BREB)

Método micrometeorológico que combina la medida del balance energético de la superficie i la razón de Bowen, que se define como el cociente entre el calor sensible y latente.

Introducció

Transpiració

Intercepció

Vallcebre

Medición de la transpiración. Escala de cubierta

Razón de Bowen

$$\beta = \frac{H}{\lambda E}$$
$$\beta = \gamma \frac{\delta T / \delta z}{\delta e / \delta z} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e}$$

Balance energético

$$R_n - G - H - \lambda E = 0$$

Relaciones flujos- gradientes

$$\lambda E = -\rho \frac{\varepsilon}{P} \lambda K_w \delta \frac{\delta \bar{e}}{\delta z} \quad H = \rho C_p K_h \frac{\delta T}{\delta z}$$

Medición de la transpiración. Medidas complementarias



© J. Latron

Variables meteorológicas sobre la cubierta.
Humedad del suelo
Potenciales hídricos del suelo y las plantas
Parámetros de la vegetación



© P. Llorens



© M.E.

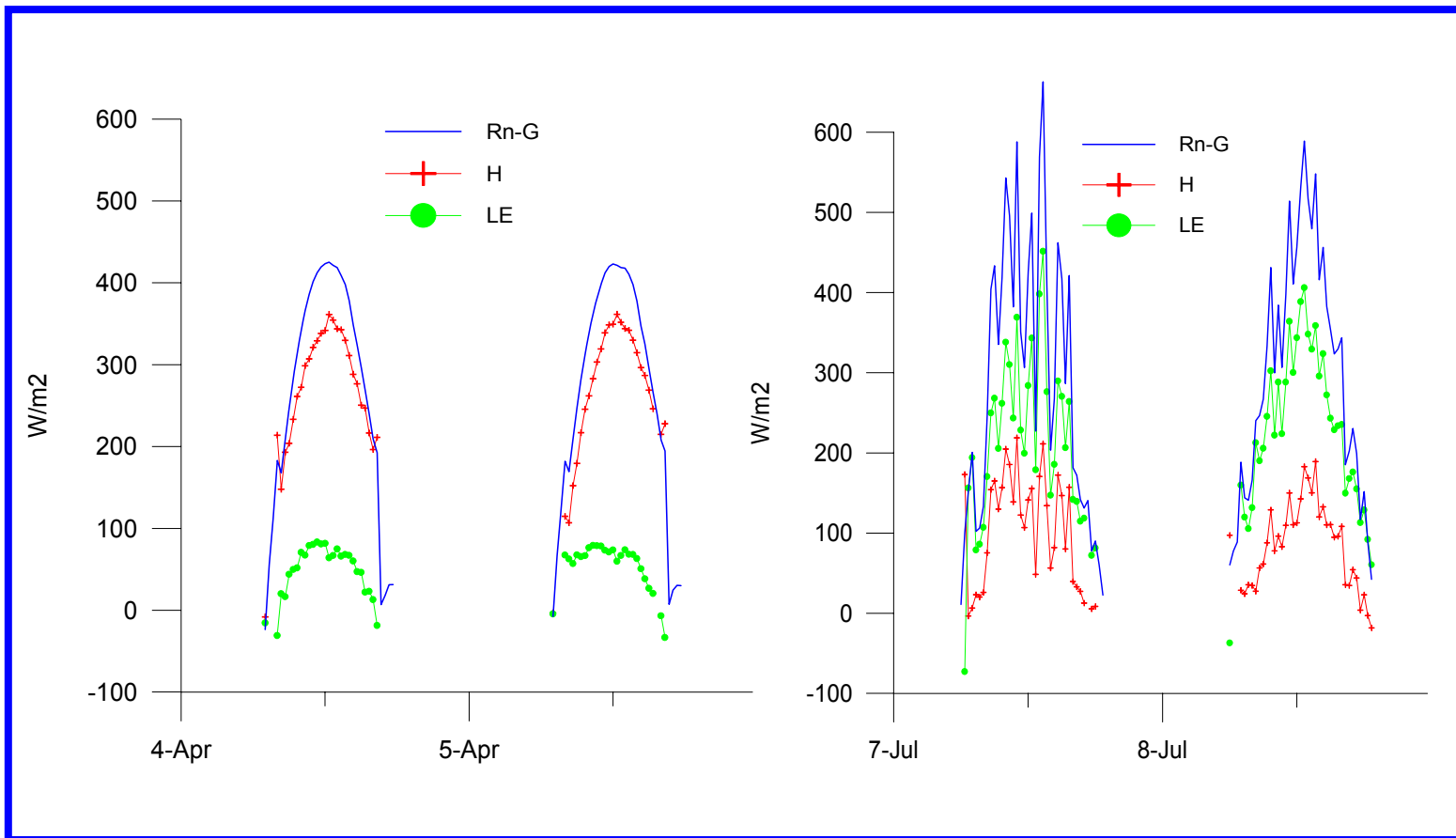
Transpiración. Ejemplos de resultados

Introducción

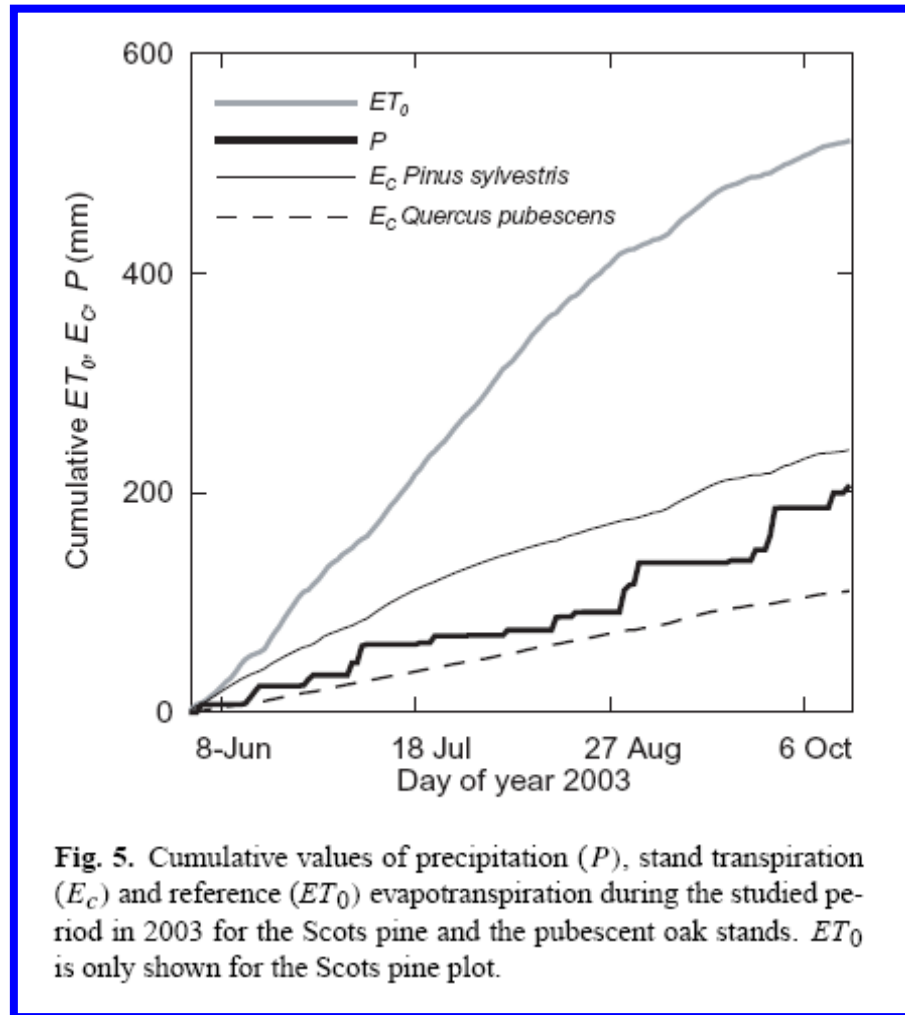
Transpiración

Interceptación

Vallcebre



Transpiración. Ejemplos de resultados



Poyatos et al. (2005)

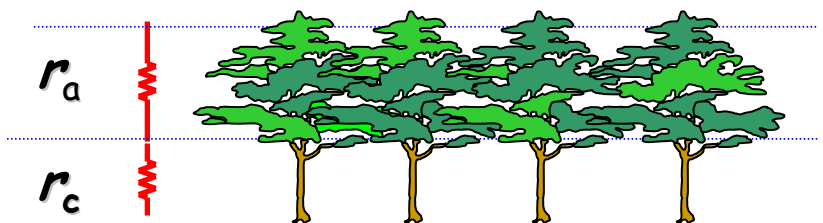
Introducción

Transpiración

Interceptación

Vallcebre

Modelització de la transpiració. Ecuación de combinación (Penman-Monteith)



$$\lambda E = \frac{[\Delta(Rn-G) + \rho C VPD/r_a]}{\Delta + \gamma (1+r_c/r_a)}$$

$$Rn - G = \lambda E + H (+P)$$

Balance energético

$$H = \rho C_p K_H (\delta T / \delta z)$$

$$\lambda E = K_v (\delta q / \delta z)$$

Difusión turbulenta

- Combina variables meteorológica y fisiológicas.
- Elimina necesidad de medidas en la superficie evaporante y a diversas alturas sobre la superficie.
- Asume una superficie uniforme ('big-leaf')

Introducción

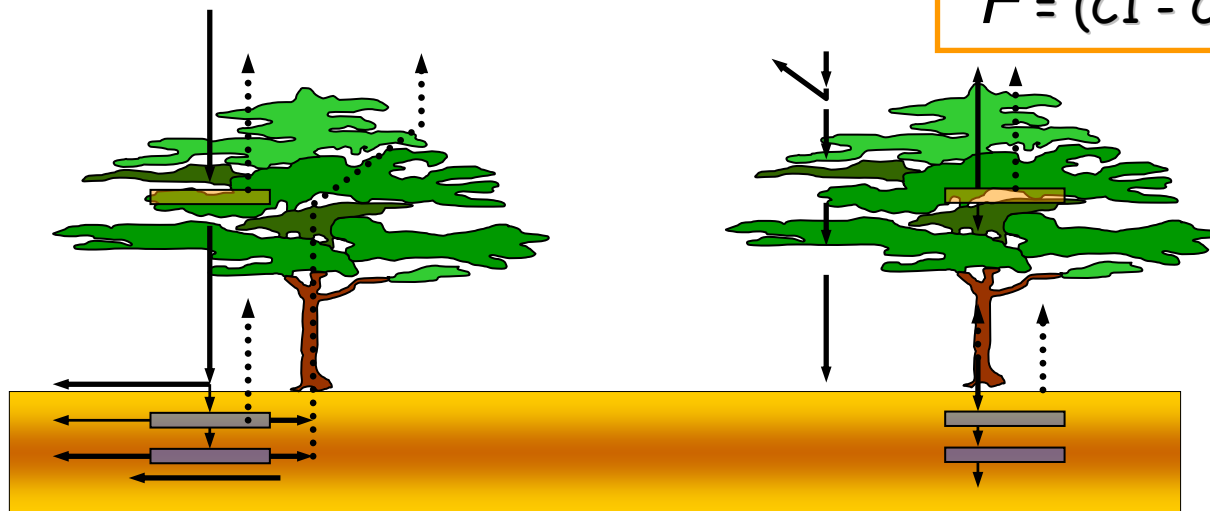
Transpiración

Interceptación

Vallcebre

Modelos SVAT (Soil Vegetation Atmosphere Transfer)

$$F = (C_1 - C_2)/r$$



Agua

Energía

Shuttleworth (1991)

- Continuo suelo-planta-atmósfera representado en perfil unidimensional.
- Representación multicapa (grado de complejidad) en suelos y vegetación.
- Representación de almacenes y flujos de entrada y salida regulados por gradientes de concentración y resistencias.
- Predicciones no significativamente diferentes de los modelos de combinación que consideran múltiples fuentes.

EVAPORACIÓ POTENCIAL

Tasa máxima de evaporación de una superficie completamente sombreada por un cultivo verde y sin limitación de suministro hídrico. (Penman, 1948 y Thornthwaite, 1948)

MÉTODO	Temp.	H R.	H sol	R. Sol	Viento	vd/vn
Thornthwaite (1948, 1951, 1957)	*		(*)			
Blaney-Criddle (1950)	*		*			
Blaney-Criddle - FAO (Doorenbos & Pruitt, 1977)	*	*			*	
Turc (1955, 1961)	*	(*)		o		
Jensen - Haise (1963)	*			o		
Hargreaves (Hargreaves & Samani, 1982)	*	(*)	(*)	o		
Penman (1948)	*	*	(*)	(o)	*	
Penman - FAO (Doorenbos & Pruitt, 1977)	*	*	(*)	(o)	*	*
Jensen - ASCE (1974)	*	*	(*)	(o)	*	
Penman - Monteith (Smith, 1990; Allen et al,1998)	*	*	(*)	o	*	
Linacre (1977)	*	*				
Priestley - Taylor (1972)	*	(*)	(*)	o		
Radiación - FAO (1977)	(*)	*	(*)	o	*	*

* Medidas necesarias (*) convenientes (o) variables calculadas

- Gran variedad de métodos
- Heterogeneidad de conceptos y supuestos de partida
- Desconexión entre la disponibilidad de datos y la realidad física

FAO, International Commission for Irrigation and Drainage i WMO (1990)

unificaron la terminología y los conceptos, hicieron una revisión y actualización metodológica a partir del uso de la ecuación de Penman-Monteith.

$$\lambda E = \frac{[\Delta(R_n - G) + \rho C VPD / r_a]}{\Delta + \gamma (1 + r_c / r_a)}$$

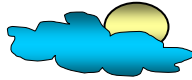
EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA (ET₀)

Evapotranspiración de un cultivo hipotético con valores fijos de:
altura (12cm)
resistencia de cobert (70 s m⁻¹)
albedo (0.23)

representa la evapotranspiración de una superficie extensa cubierta de gramíneas verdes, de altura uniforme y crecimiento activo, que cubre completamente el suelo y no tiene falta de agua.

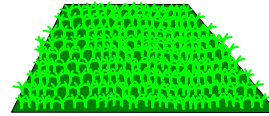
Cultivo herbáceo de referencia

Clima



Radiación
Temperatura
Velocidad
viento
Humedad

+



=

ET_o

$$ET = ET_o * \text{coeficiente de cultivo (Kc)}$$

Cultivo regado
Condiciones óptimas agrícolas

ET_o

x



=

ET_c

Factor K_c

$$ET = ET_o * K_c * \text{factor de stress (Ks)}$$

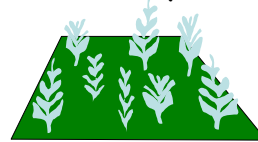
Estrés hídrico y ambiental

ET_o

x

K_c

x



=

ET_{cs}

Factor K_s

La Interceptación

- Procesos de interceptación de la lluvia
- Las resistencias de la vegetación mojada
- Métodos de medida de la
Trascolación
Escorrentía cortical
- Algunos resultados de medida de la interceptación
- Modelitzación de la interceptación

Introducción

Transpiración

Interceptación

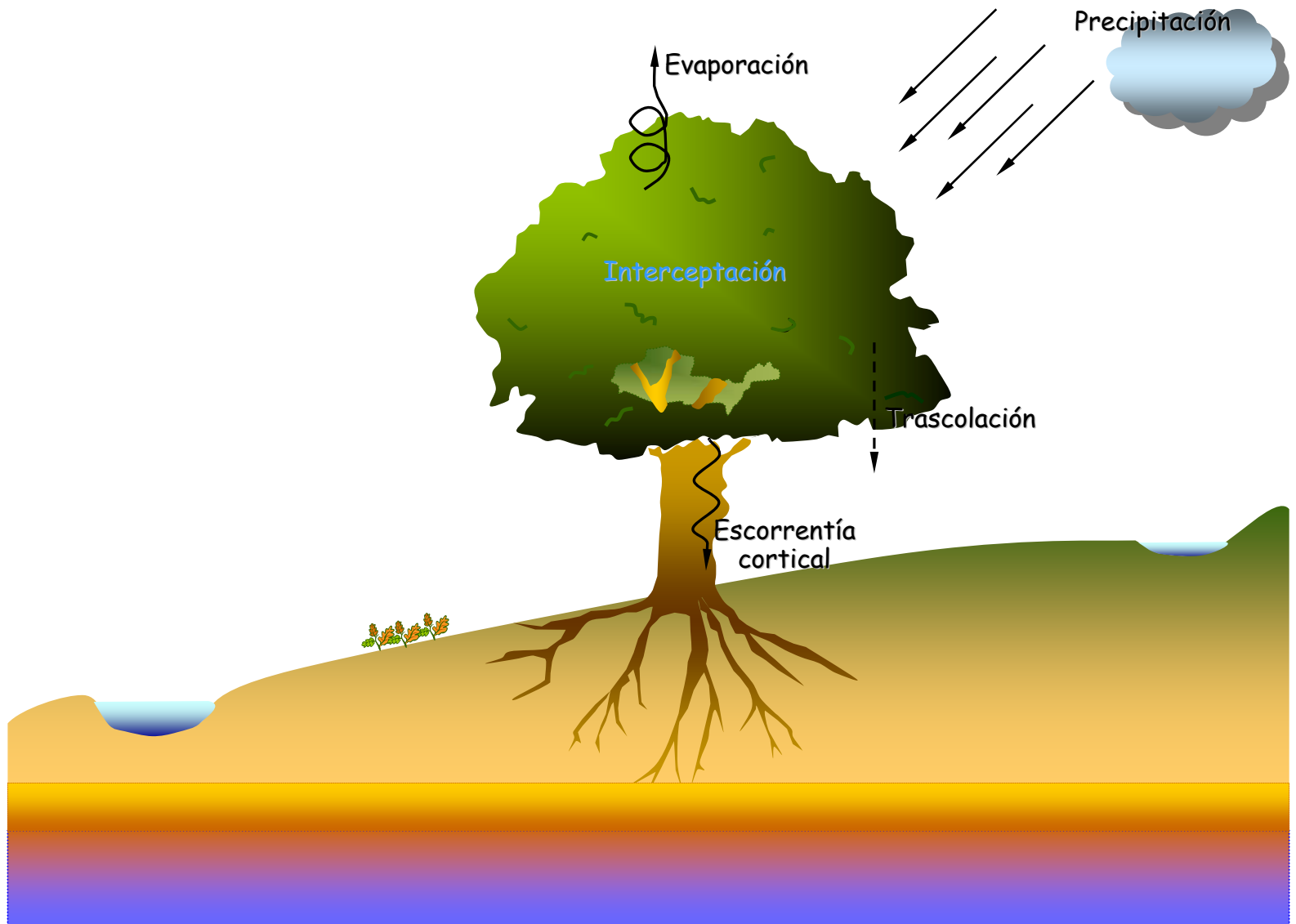
Vallcebre

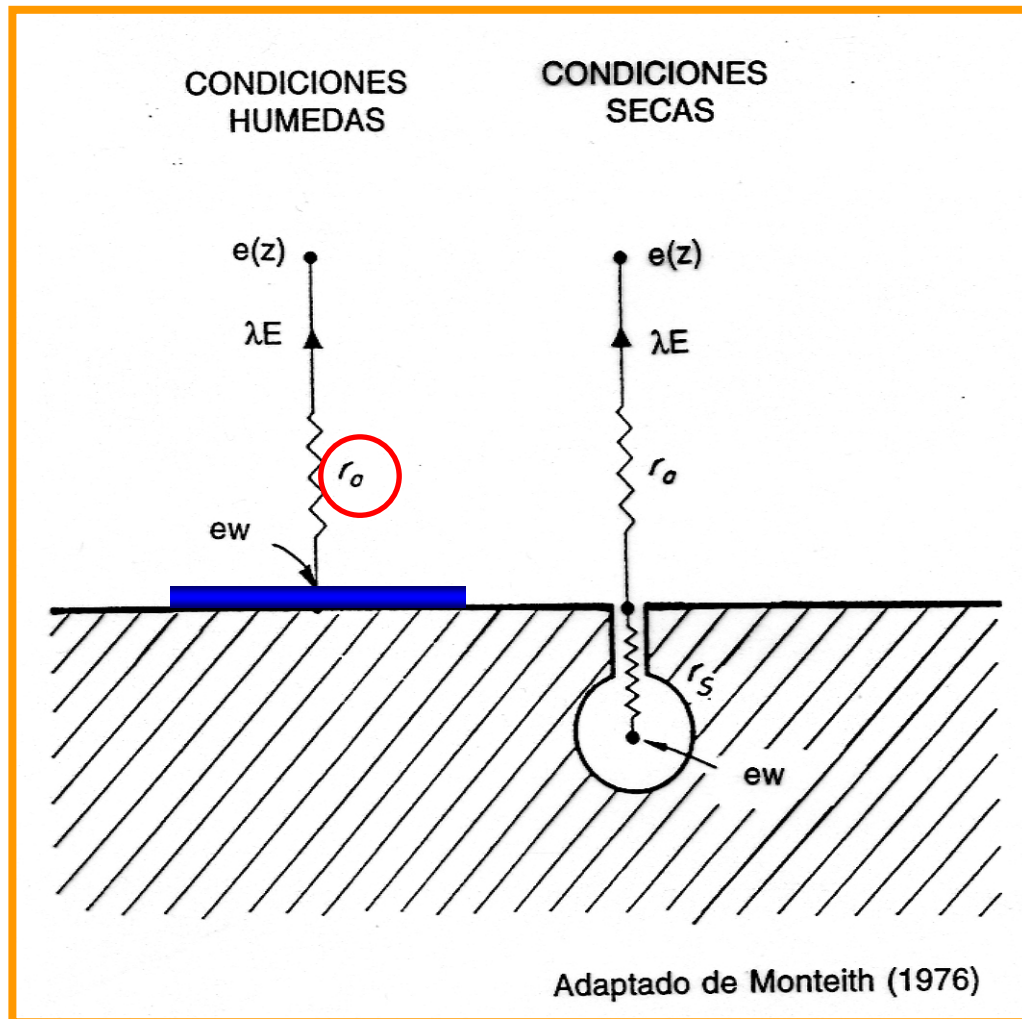
Introducción

Transpiración

Interceptación

Vallcebre





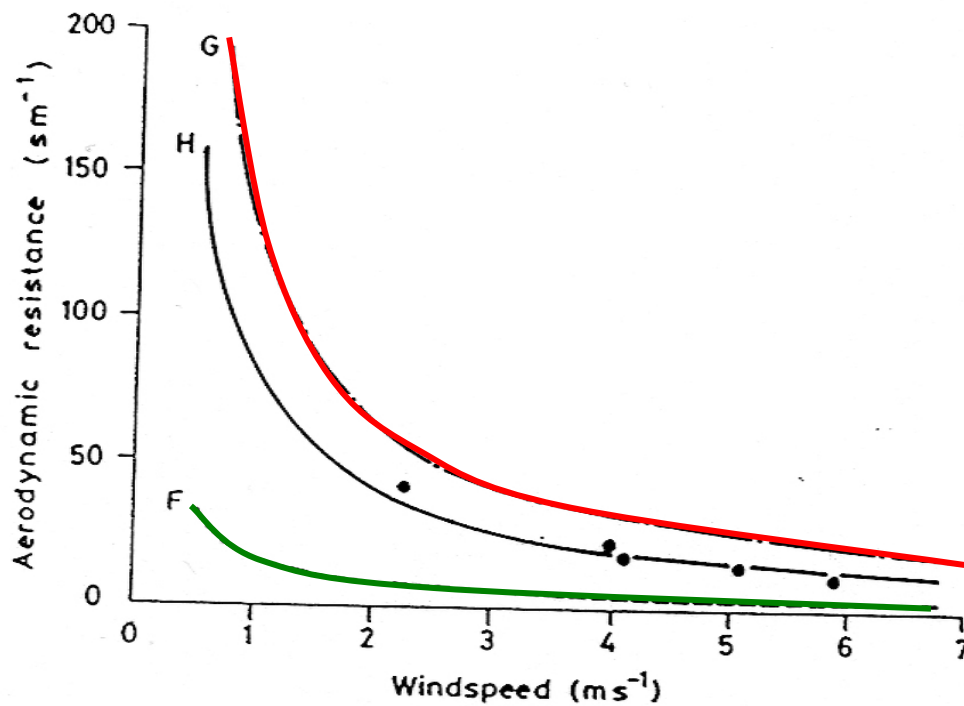


Figure 2.11 A comparison of the aerodynamic resistances of forest (F), heather (H) and grass (G). Measured values of r_a for heather (●) are also shown. (Further details can be found in Wallace *et al.*, 1982)

Wallace & Oliver (1990)

Medición de la interceptación

	Measurement method	Time resolution
Bulk rainfall	Funnel	Day
	Funnel with tipping bucket	Minute
Throughfall	Stationary funnel	Day
	Stationary funnel with tipping bucket	Minute
	Rowing funnels	Day
Stemflow	Through	Day
	Through with tipping bucket	Minute
Stemflow	Ring	Day
	Ring with tipping bucket	Minute

Llorens and Domingo (2007)

Introducción

Transpiración

Interceptación

Vallcebre

Medición de la interceptación

Throughfall

- Stationary funnel
 - Stationary funnel with tipping bucket
 - Rowing funnels
-
- Through
 - Through with tipping bucket
-

Ejemplos de instrumentación en las cuencas de investigación de Vallcebre (Prepirineo)



© P. Llorens

© P. Llorens

Medición de la interceptación

Stemflow

Ring

Ring with tipping bucket



© P. Llorens

Ejemplos de instrumentación en las cuencas de investigación de Vallcebre (Prepirineo)

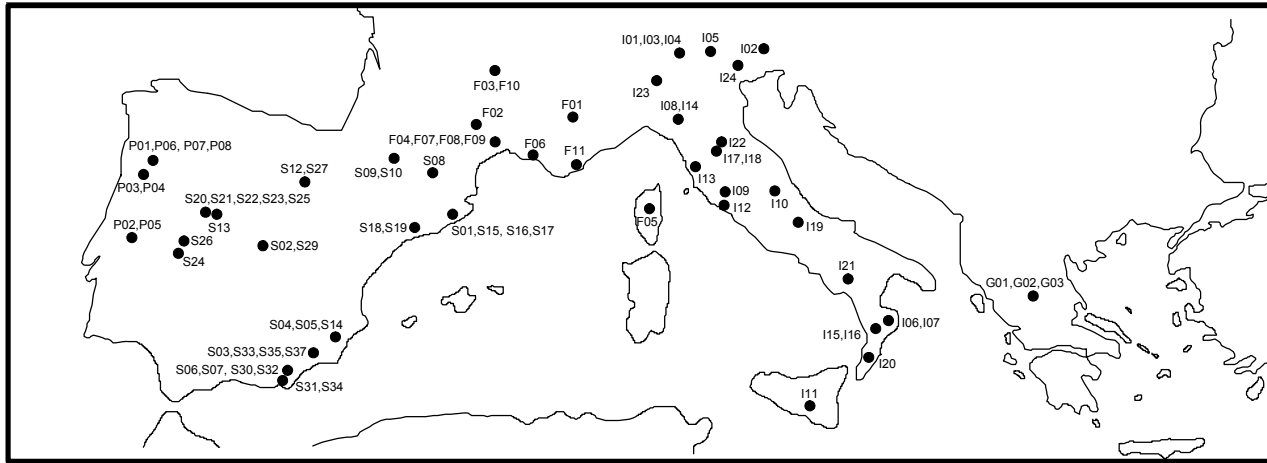
Introducción

Transpiración

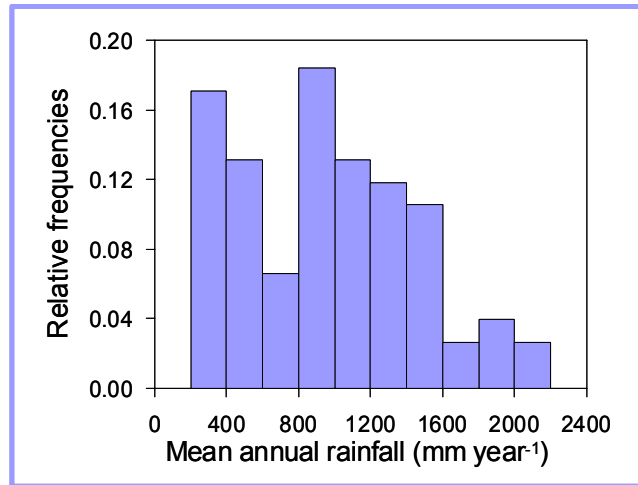
Interceptación

Vallcebre

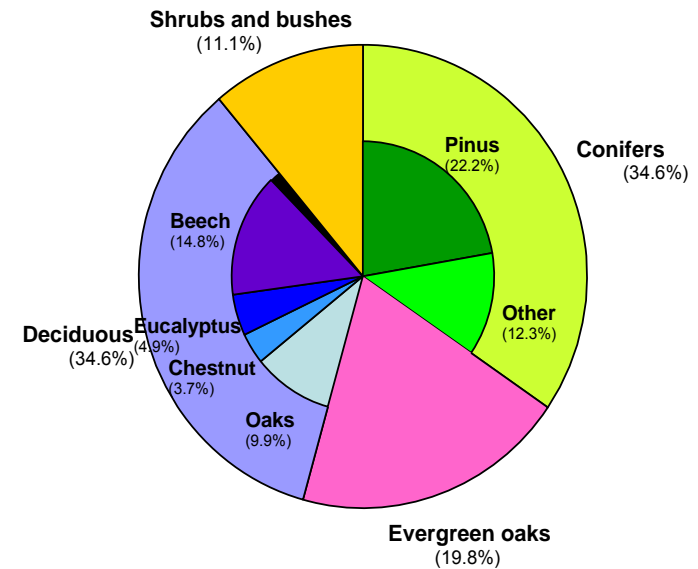
Interceptación. Ejemplo de resultados



Llorens and Domingo (2007)



Llorens and Domingo (2007)



Introducción

Transpiración

Interceptación

Vallcebre

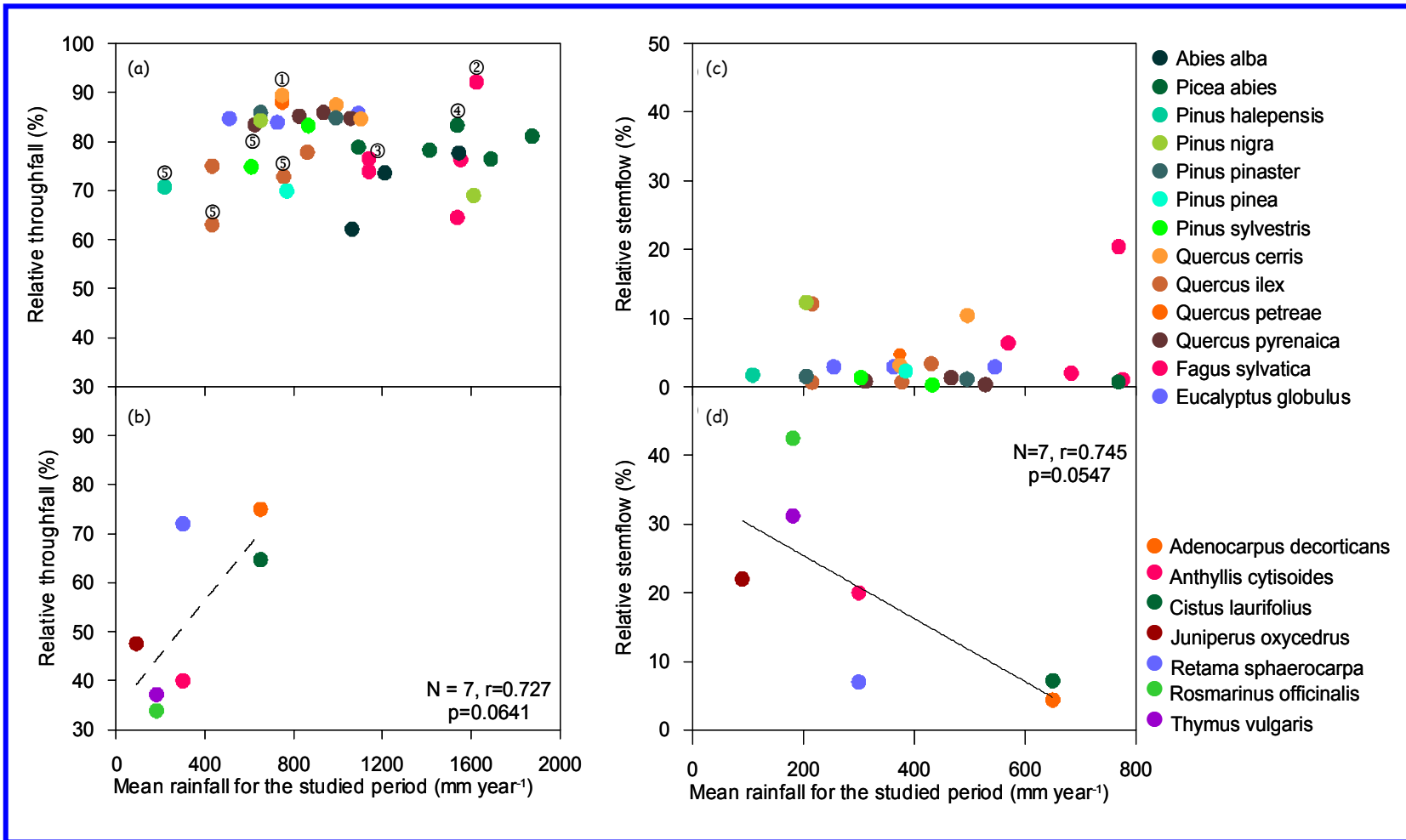
Intercepción. Ejemplo de resultados

Introducción

Transpiración

Intercepción

Vallcebre



Llorens and Domingo (2007)

Interceptación. Ejemplo de resultados

	Throughfall				Stemflow				
	n	Mean	Standard error	Variation coefficient	n	Mean	Standard error	Variation coefficient	
Introducción	<i>A. Alba</i>	3	71.1	4.66	11.3	-			
	<i>P. Abies</i>	5	79.6	1.19	3.4	1	0.7		
	<i>P. halepensis</i>	1	70.7			1	1.7		
	<i>P. nigra</i>	2	76.6	7.66	14.1	1	12.3		
	<i>P. pinaster</i>	2	85.4	0.55	0.9	2	1.3	0.20	21.8
Transpiración	<i>P. pinea</i>	1	69.9			1	1.7		
	<i>P. sylvestris</i>	2	79.0	4.19	7.5	2	0.8	0.52	93.1
	<i>Q. cerris</i>	3	87.2	1.39	2.8	2	6.8	3.62	75.7
	<i>Q. ilex</i>	4	72.2	3.22	8.9	4	4.2	2.70	128.9
Interceptación	<i>Q. petraea</i>	1	88.0			1	4.8		
	<i>Q. pyrenaica</i>	4	84.8	0.53	1.2	3	0.8	0.29	60.5
	<i>E. globulus</i>	3	84.8	0.52	1.1	3	2.9		
	<i>F. sylvatica</i> ^a	4	72.8	2.83	7.8	3	3.1	1.64	90.4
Vallcebre	Trees	35	78.8	1.24	9.3	24	3.2	0.73	111.1
	Schrubs	6	49.2	6.40	31.8	7	19.2	5.36	73.9

Llorens and Domingo (2007)

Factores determinantes en la interceptación:

- Intensidad
- Distribución

de la precipitación

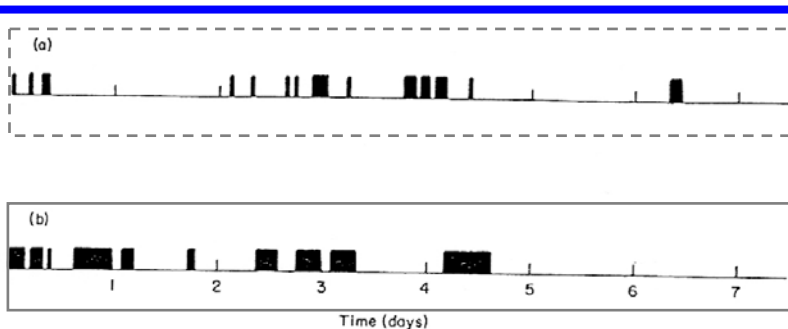


FIG. 3. The distribution in time of rainy hours in (a) the 'intermittent' pattern, and (b) the 'continuous' pattern used in the model climates.

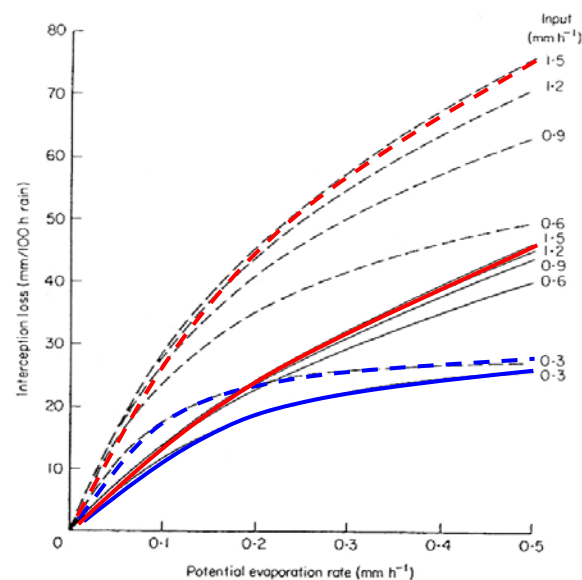


FIG. 4. The calculated effects of combinations of potential evaporation rate, water input rate and rainfall distribution on interception loss. Patterns of rainfall distribution: (----) 'intermittent' and (—) 'continuous'.

Rutter and Morton (1977)

Introducción

Transpiración

Interceptación

Vallcebre

Modelització

Evaporació, E

Precipitació, R

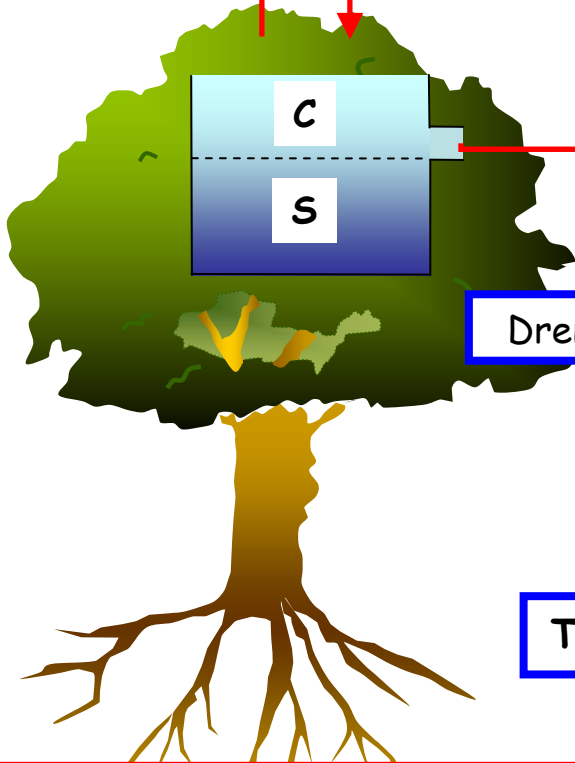
$$\begin{aligned}
 C < S &\rightarrow E = E_p \cdot C/S \\
 C \geq S &\rightarrow E = E_p
 \end{aligned}$$

$$(1-p) R$$

$$p R$$

Inputs:
 Precipitació (R)
 Evapotrans. referència (ET_o)

Paràmetres:
 Capacitat màx. saturació (S)
 Coef. trascolació lliure (p)



Drenaje

Trasc. Libre

Trascolación

Esquema simplificat del Model de interceptació de Rutter

Introducció

Transpiració

Interceptació

Vallcebre

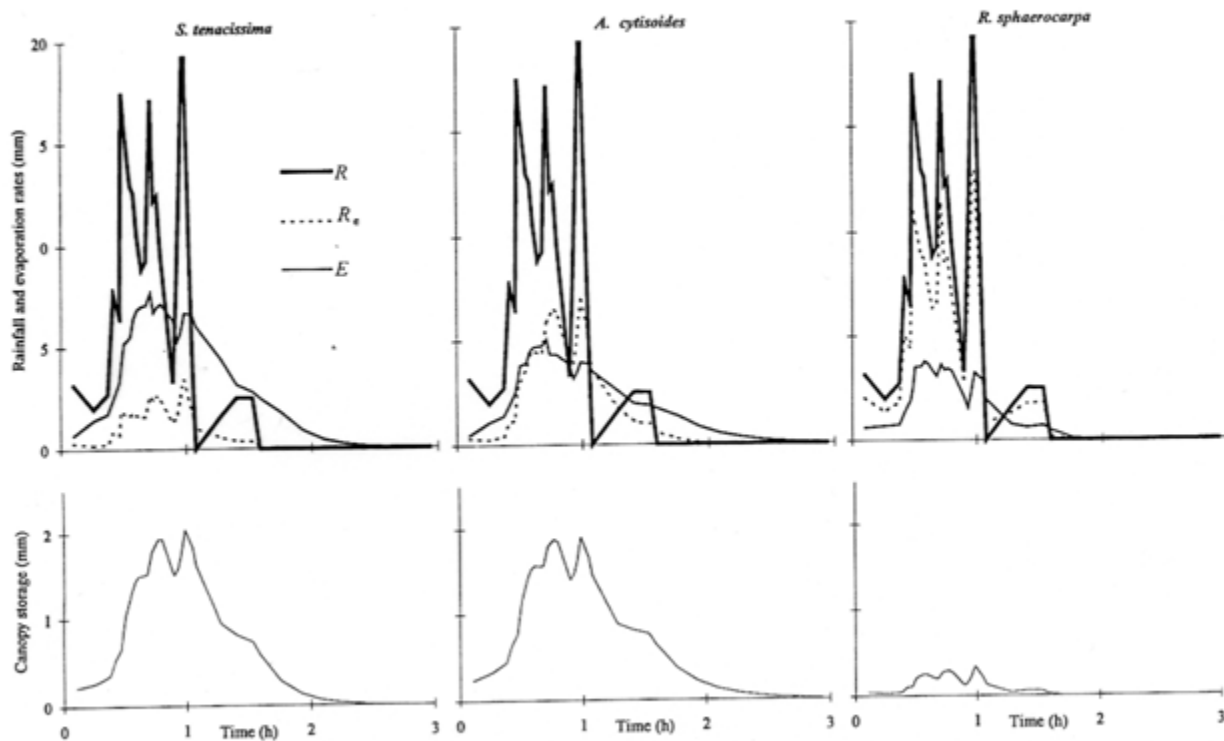


Fig. 6. Time series of evaporation of intercepted water (E), effective rainfall (R_e) and water on the canopy (C) predicted by the interception model during an example (11 March 1995, see Table 1) of an actual rainfall event (R) for (a) *S. tenacissima* (b) *A. cytoides* and (c) *R. sphaerocarpa*.

Domingo et et al. (1998)

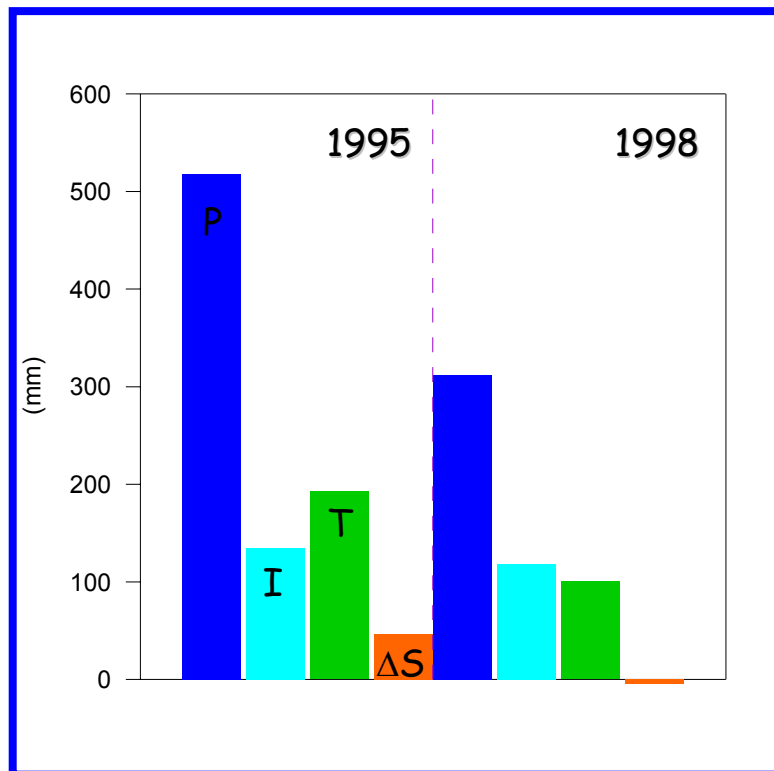
Introducció

Transpiració

Interceptació

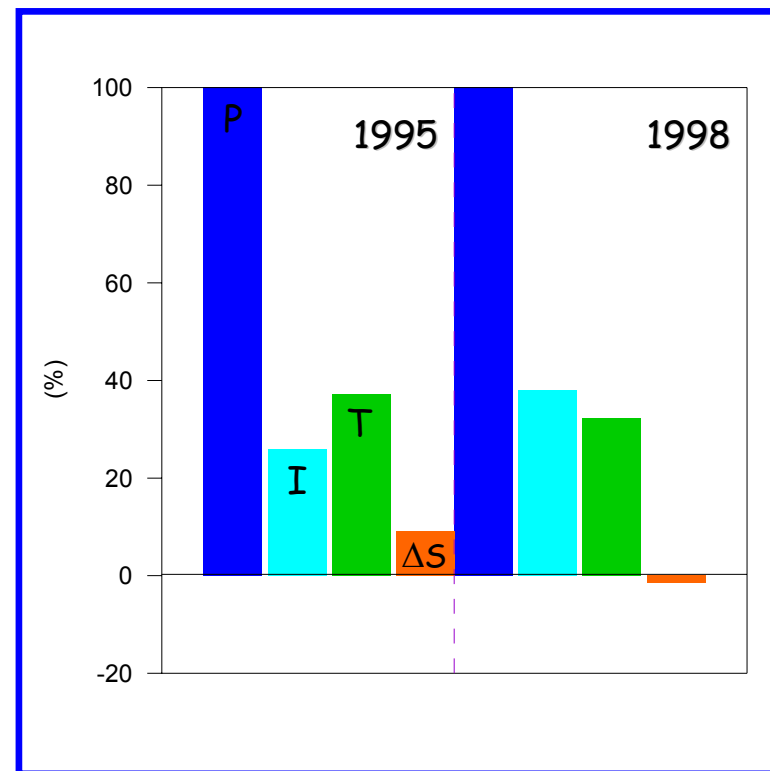
Vallcebre

Comparación de flujos. Balance



	wet	dry
I/P	0.26	0.38
T/P	0.37	0.32
T/E ₀	0.43	0.23

Abril-Agosto



Llorens et al (2003)

- La evaporación no depende solo del clima.
- Diferentes tipos de cubierta determinan intercambios de energía entre la superficie y la atmósfera muy diferentes.
- La vegetación herbácea evapotranspira a elevadas tasas mientras que dispone de agua i energía suficiente.
- La vegetación arbórea es capaz de ejercer un fuerte control estomático sobre la transpiración. Tiene una gran capacidad para evaporar el agua que intercepta.
- En ambientes limitados por la energía, los árboles evaporan más agua que la hierba al tener una mayor eficiencia energética (albedo y rugosidad aerodinámica).
- En ambientes limitados por el agua, los árboles pueden transpirar más agua por una mejor eficiencia radicular.

Ejemplos de los estudios realizados en las cuencas de investigación de Vallcebre

Efectos del cambio global en la hidrología de
las cuencas mediterráneas

PILAR LLORENS, JÉRÔME LATRON, MONTSERRAT SOLER, RAFAEL
POYATOS, CARLES RUBIO, ALEKSANDRA MUZYLO, NÚRIA MARTÍNEZ-
CARRERAS, JULIANA DELGADO, DAVID REGÜÉS, GUSMAN CATARI,
GUILLAUME NORD¹ & FRANCESC GALLART

pllorens@idaea.csic.es

Grup d'Hidrologia i Erosió

Institut de Diagnosi Ambiental i Estudis de l'Aigua (IDÀEA). CSIC

Cuencas de investigación de Vallcebre



© J. Latron

- Prepirineo (Alto Llobregat)
1100 - 1700 m
- Clima Mediterráneo de montaña
P= 860 mm
T= 7.3°C
PET=700mm
- Vegetación
Prados mesófilos (campos abandonados)
reforestación espontánea pinos silvestres

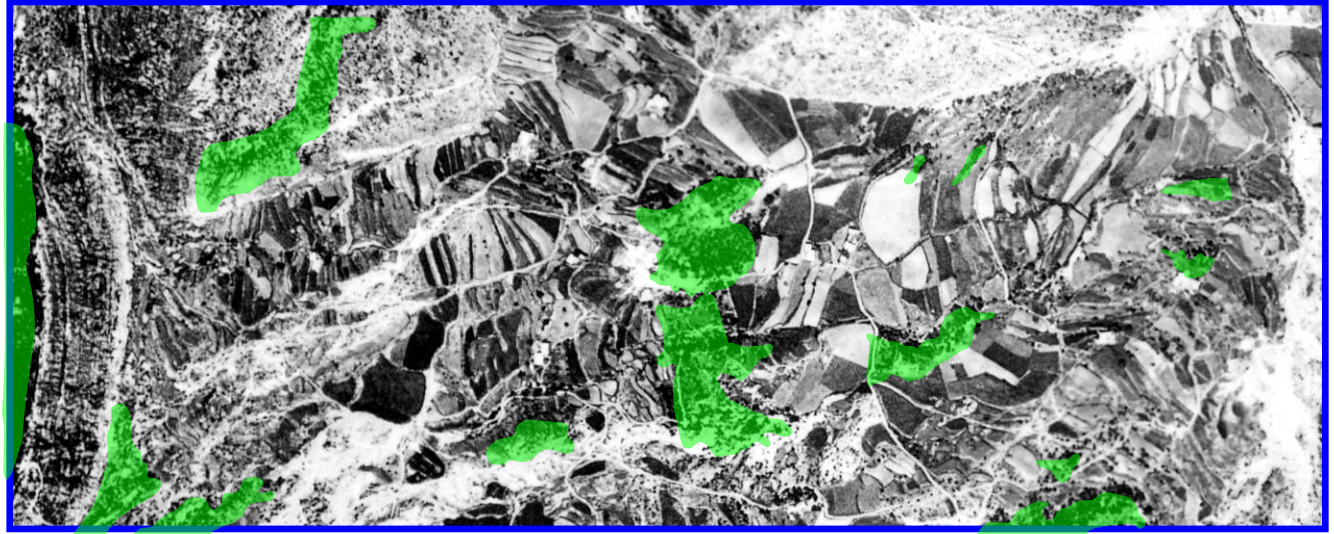


© J. Latron

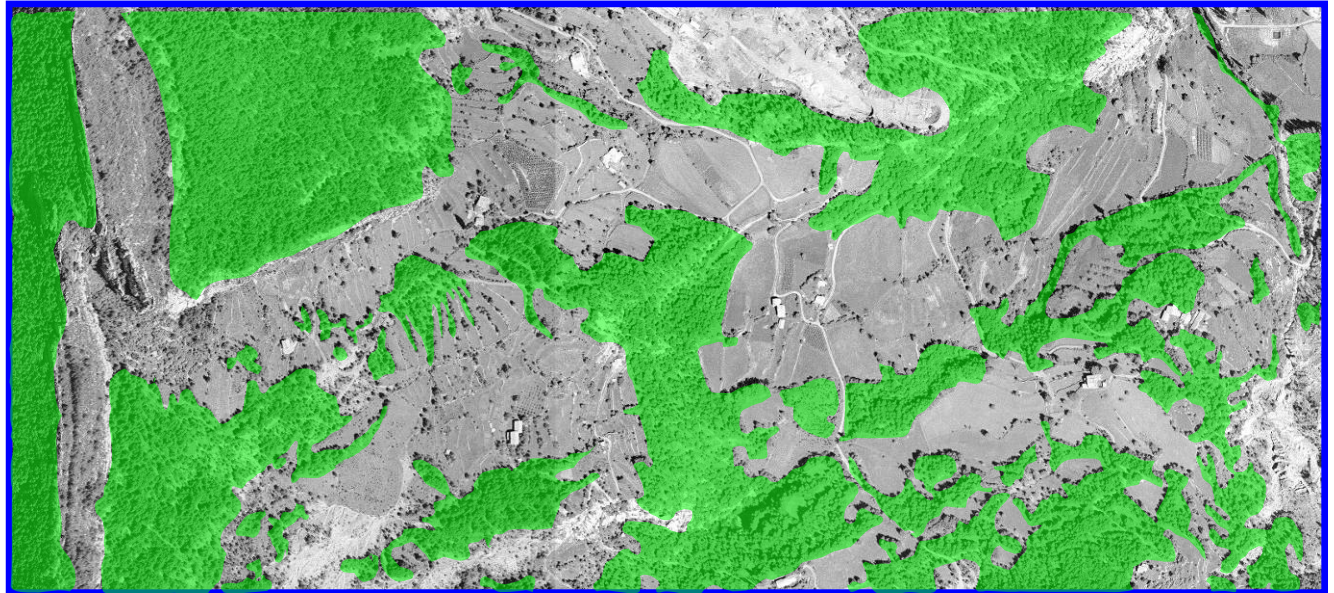


© J. Latron

1957



1996



Introducción

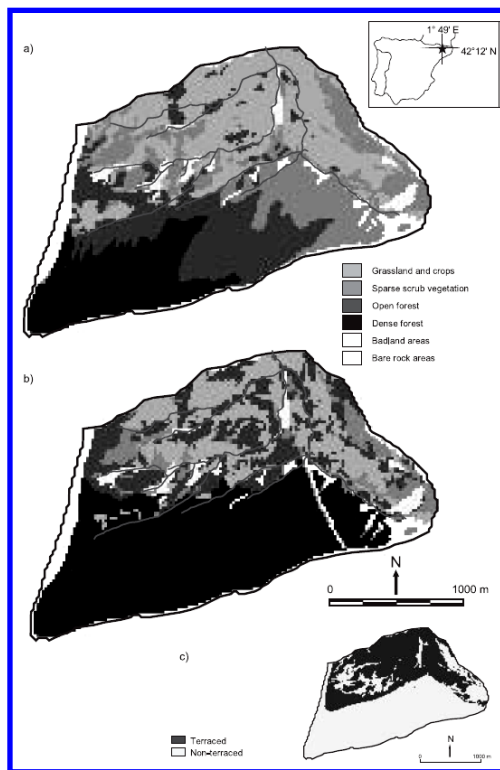
Vallcebre

Intercepción

humedad
suelo

Escorrentía

Transpiración



Poyatos et al (2003)

Land-cover classes	% of catchment area	
	1957	1996
Grassland and crops	28.3	18.1
Sparse scrub vegetation	23.2	8.3
Open forest	22.5	18.8
Dense forest	16.9	45.3
Badlands	2.8	2.8
Bare rock	6.3	6.8

Land-cover classes	% of terraced area	
	1957	1996
Grassland and crops	73.6	47.0
Sparse scrub vegetation	9.7	3.7
Open forest	16.7	38.4
Dense forest	0.0	10.9

- Cuenca: Disminución pastos (-10%) y arbustos (-15%), densificación del bosque (28%)
- Área de terrazas: Disminución pastos → Aumento del bosque (~30%)

Introducción

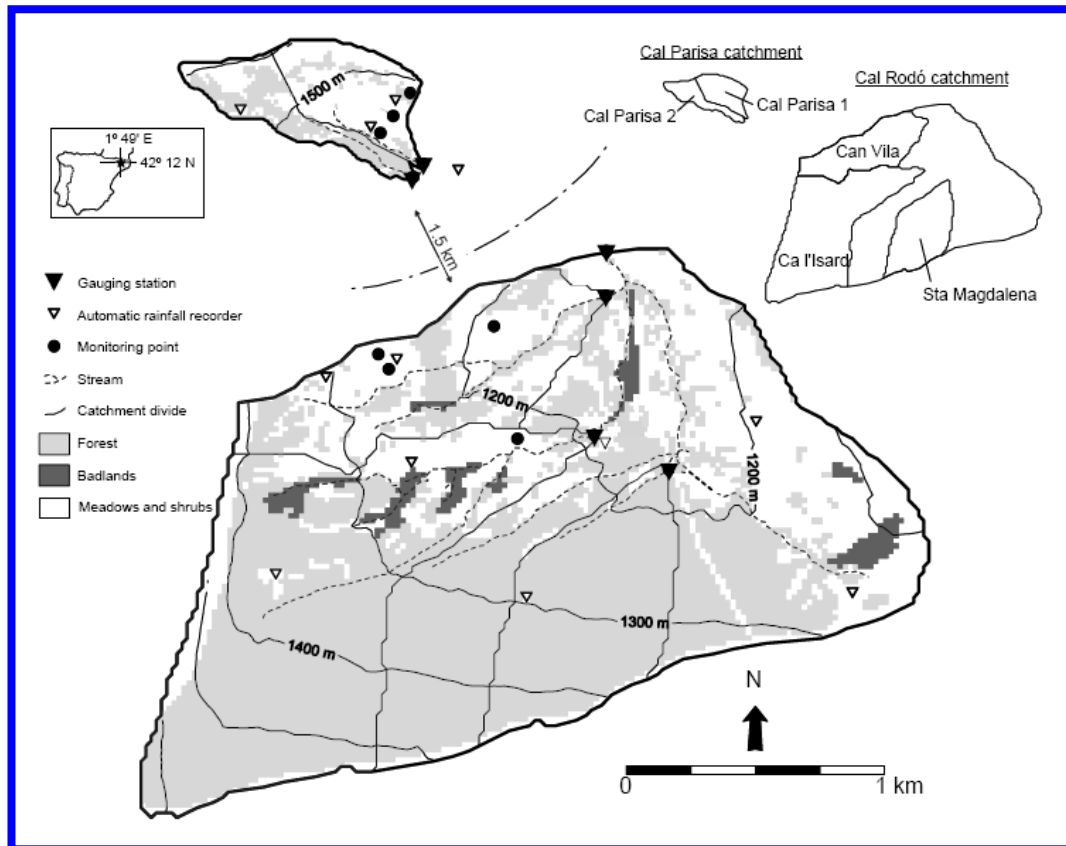
Vallcebre

Interceptación

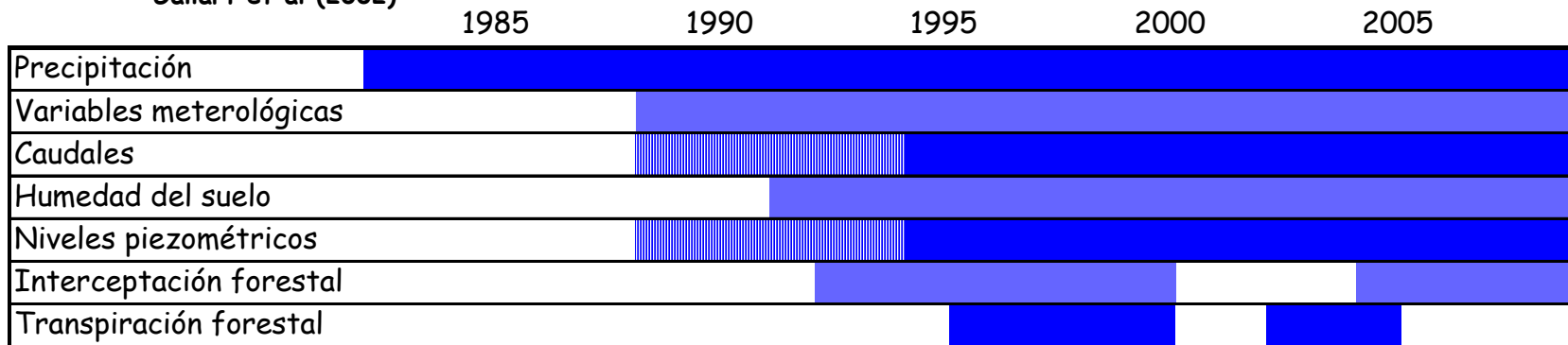
humedad
suelo

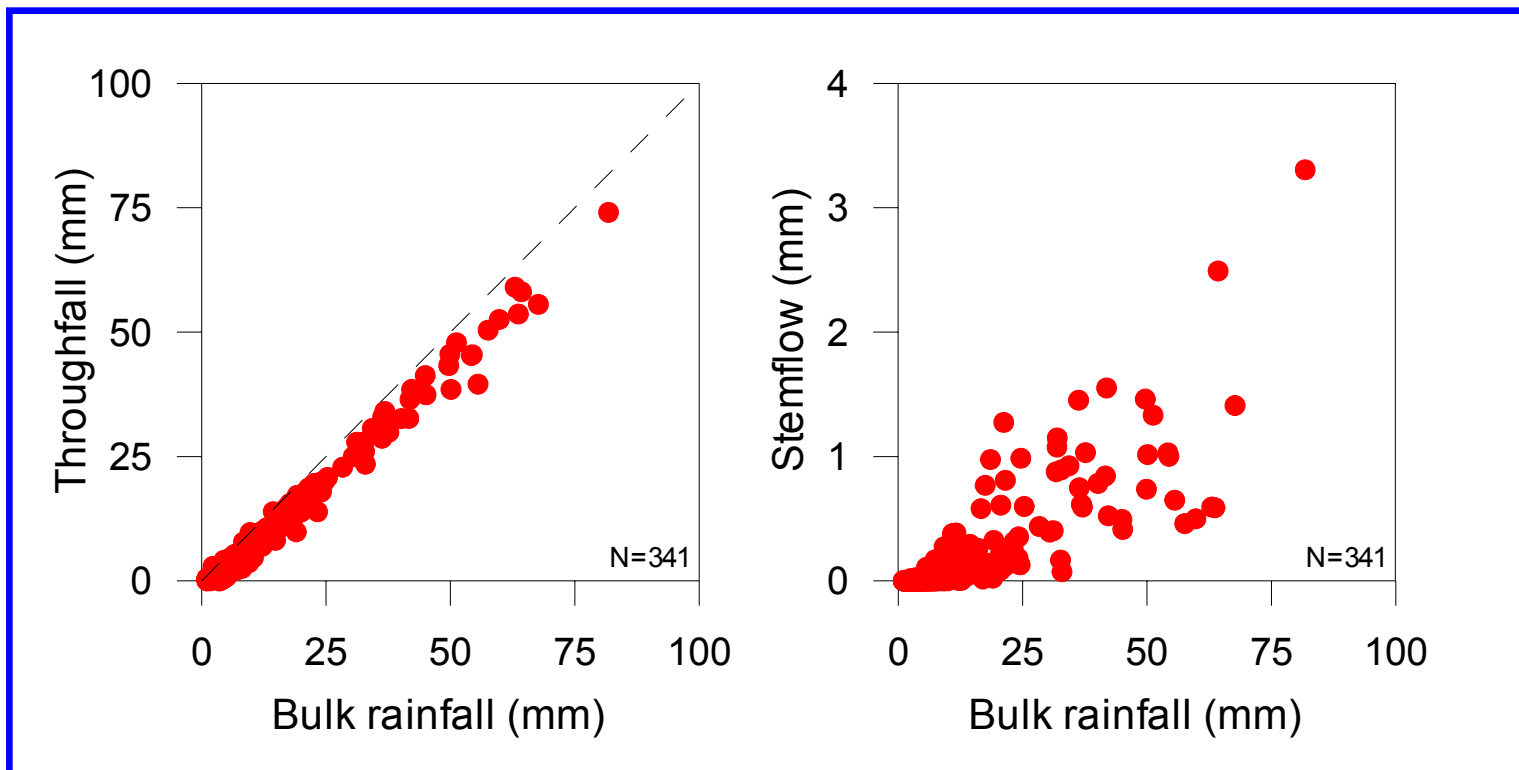
Escorrentía

Transpiración



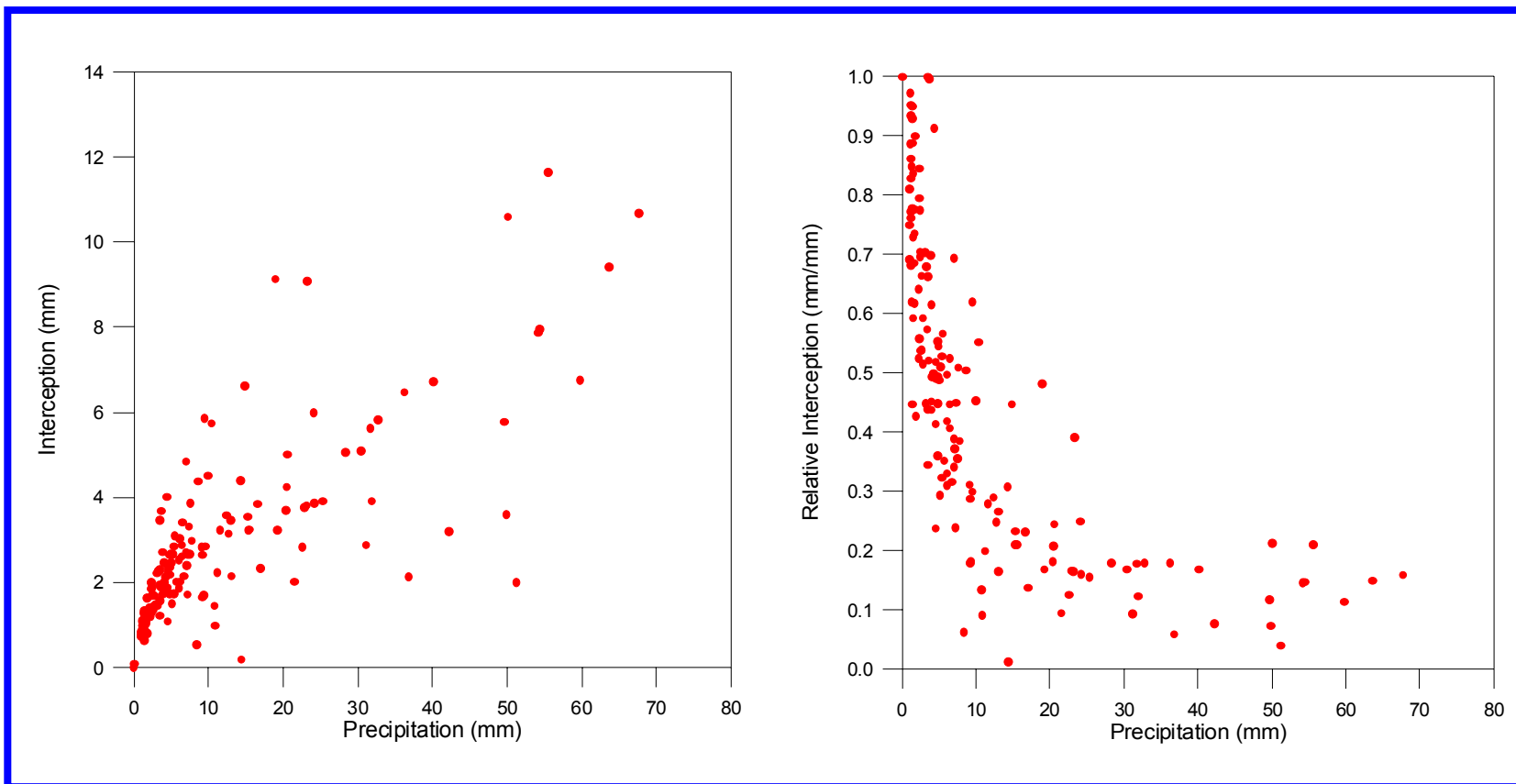
Gallart et al (2002)





Llorens et al. (2003)

- ✓ Throughfall = 74% bulk rainfall
- ✓ Stemflow = 2% bulk rainfall



Llorens et al. (1997)

Introducción

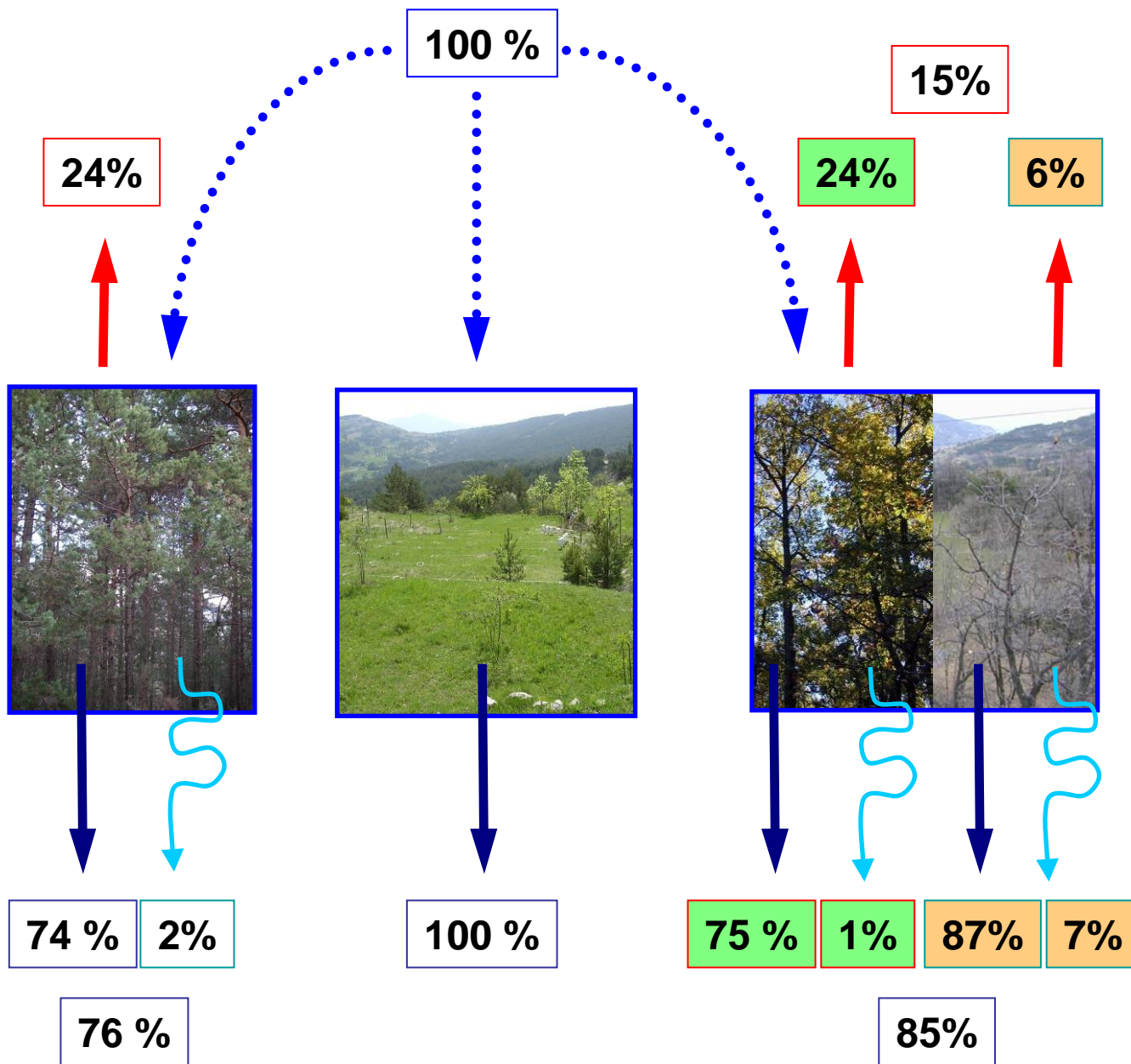
Vallcebre

Intercepción

humedad
suelo

Escorrentía

Transpiración

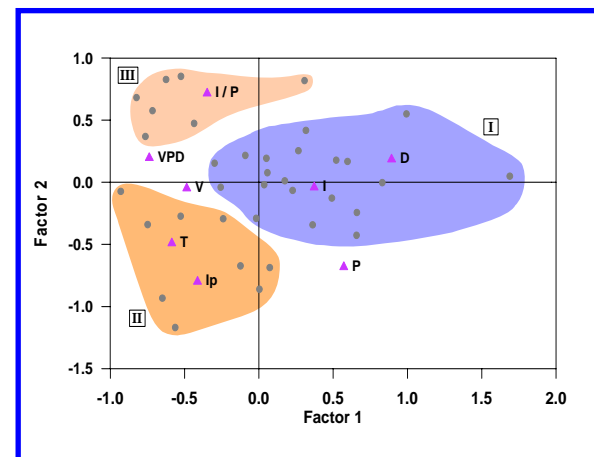


Llorens et al (1997); Muzylo (2007)

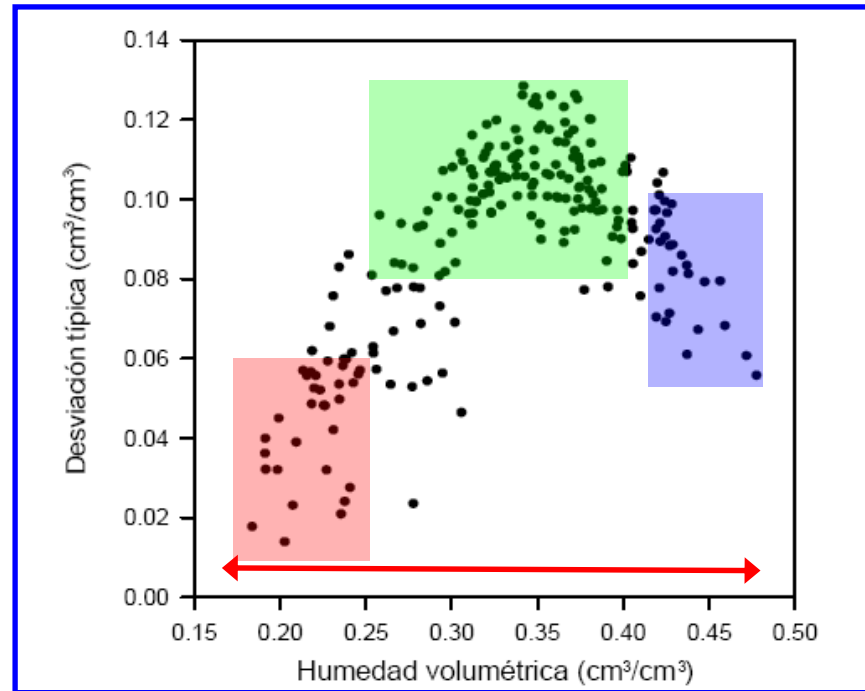
class	Duration (h)		Rainfall intensity (mm h ⁻¹)		Vap. press. deficit (kPa)		Interception rate (%)	
I	26	long	1.6	low	0.03	wet	15%	62%P
II	5	short	7.6	high	0.11	dry	13%	24%P
III	12	medium	1.2	low	0.20	very dry	49%	8%P

● Eventos similares a los descritos en climas templado-húmedos: la interceptación es efectiva debido al tiempo en que las copas se mantienen húmedas.

● Eventos típicamente mediterráneos: La tasa de interceptación depende de la intensidad de la lluvia.

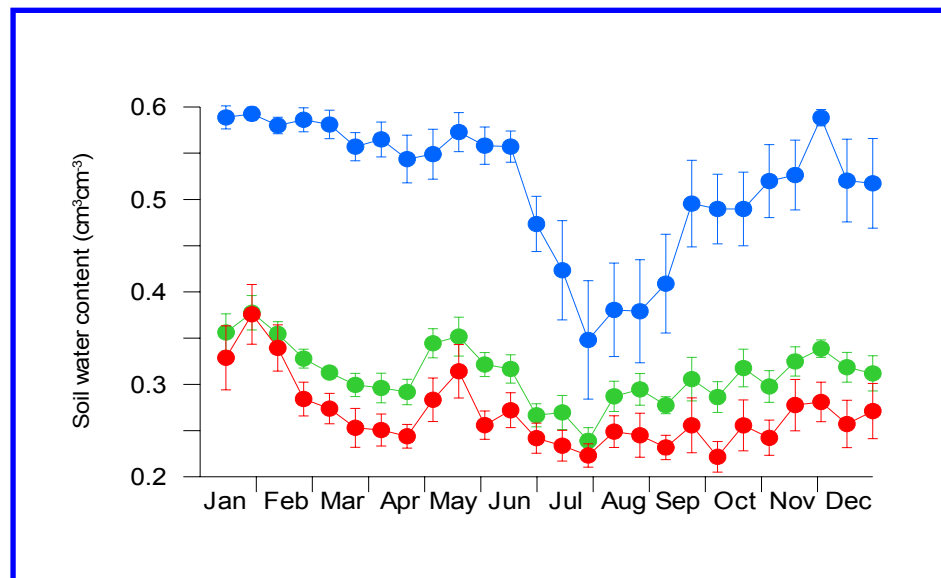


Llorens et al. (1997)



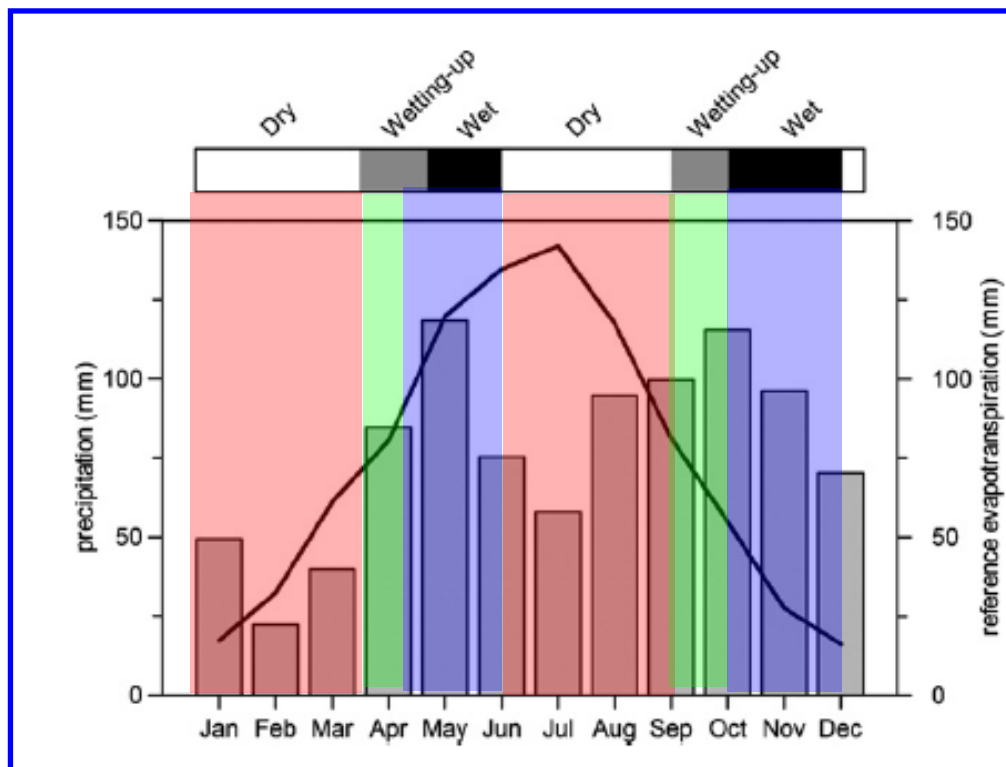
Llorens et al (2003)

- Buena representatividad de la humedad medida (media de 10 perfiles 0-80cm)
- Mayor variabilidad espacio-temporal que en ambientes secos o húmedos.



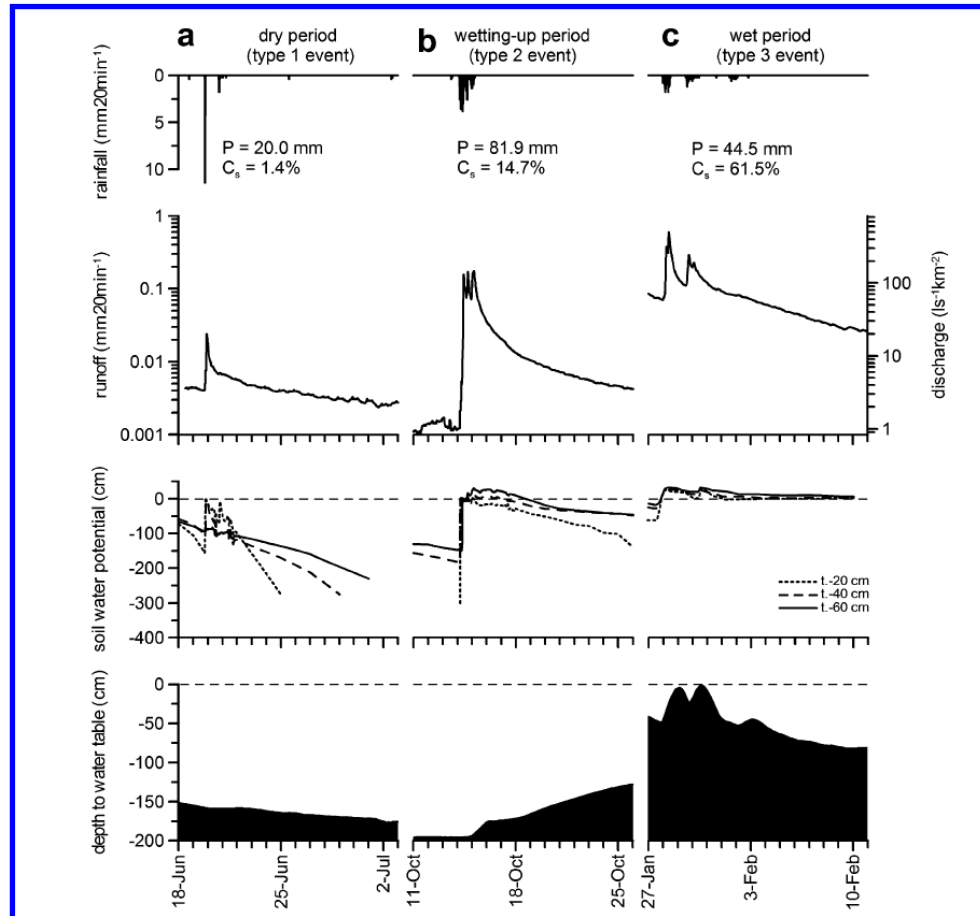
Gallart et al (2004)

- Perfiles de humedad en terrazas y claros (verde) sistemáticamente más húmedos que bajo bosque (rojo).
- Zona saturada (azul) mantiene la saturación durante casi todo el año.
- Las diferencias entre perfiles bajo bosque y en claros son mínimas en los periodos más secos y más húmedos.



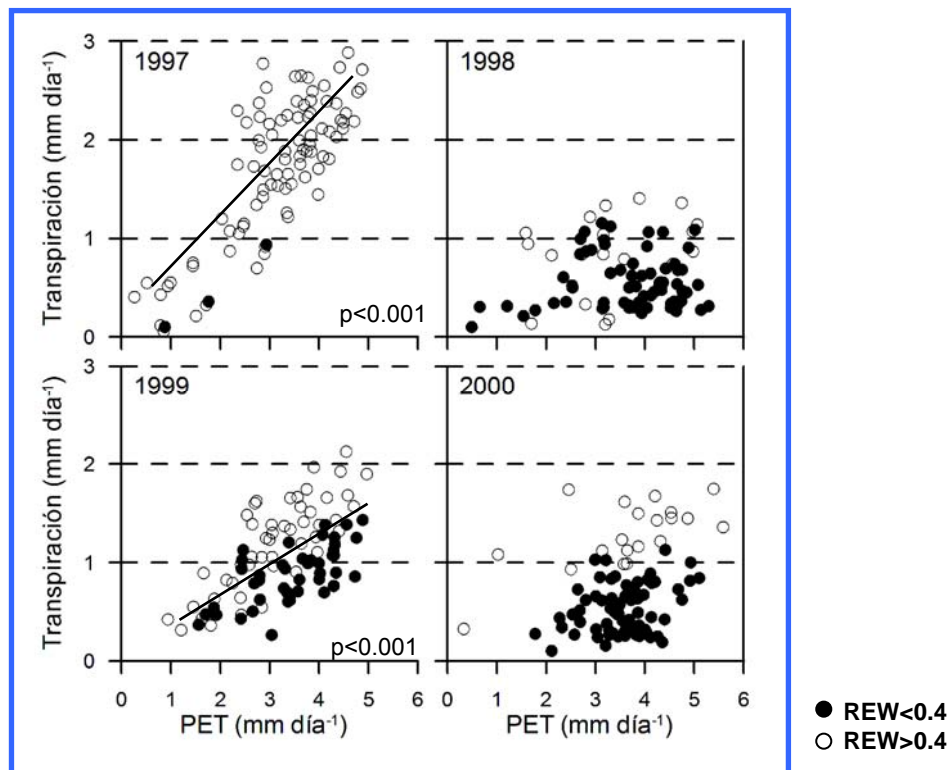
Latron and Gallart (2008)

- Periodo 'seco': Evaporación \gg Precipitación, Escorrentía=0
- Periodo de 'transición': Llenado de las reservas de la cuenca. Escorrentía pequeña.
- Periodo 'húmedo': Evaporación \ll Precipitación, Escorrentía elevada.



Latron and Gallart (2008)

- Eventos de verano: lluvias intensas sobre una cuenca seca, poca escorrentía.
- Eventos de transición: provocan la saturación local de los suelos y una escorrentía moderada.
- Eventos en periodo húmedo: lluvias sobre la cuenca húmeda provocando escorrentía elevada.

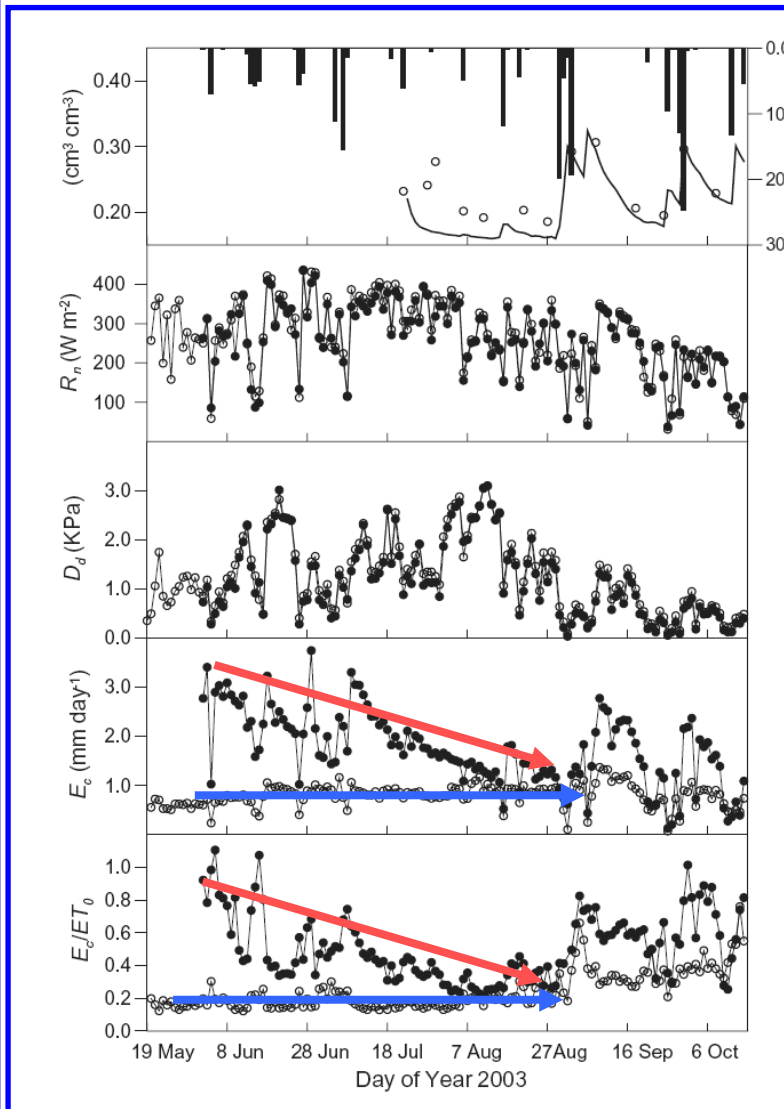


● Veranos húmedos e intermedios
(1997 y 1999)

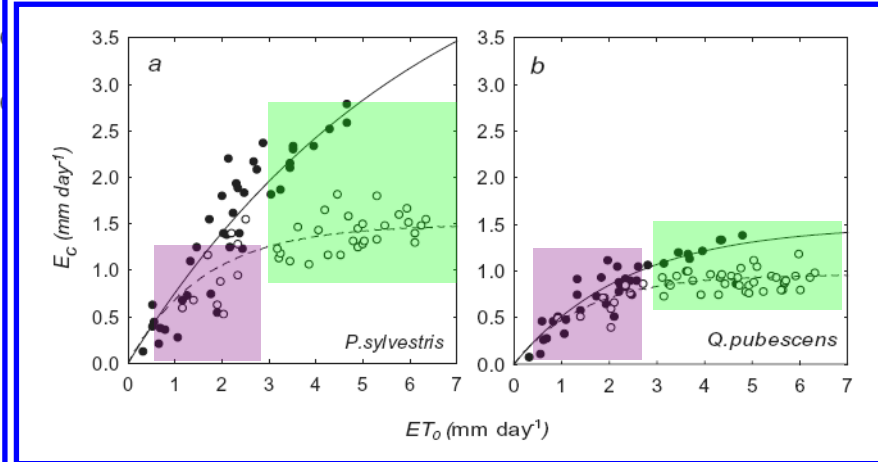
El agua no es un factor limitante.
Correlación positiva significativa con
la demanda (PET).

● Veranos secos
(1998 y 2000)

El agua es un factor limitante.
No existe correlación significativa con
la demanda (PET).



Poyatos et al. (2005)



- Pinos más sensibles al déficit hídrico (superficial). Fuerte reducción de la transpiración (0.75 a 0.25 PET)
- Robles mantienen la transpiración más baja y constante durante el periodo seco (0.25 PET).

● Contactos:

pllorens@idaea.csic.es, jlatron@idaea.csic.es, fgallart@idaea.csic.es

● Referencias bibliogràfiques

- Gallart, F., Latron, J. and Llorens, P., 2005. Catchment dynamics in a Mediterranean mountain environment. The Vallcebre research basins (south eastern Pyrenees) I: hydrology. In: C. Garcia and R.J. Batalla (Editors), *Catchment Dynamics and River Processes: Mediterranean and Other Climate Regions*. Elsevier, pp. 1-16.
- Gallart, F., Latron, J., Llorens, P. and Rabada, D., 1997. Hydrological functioning of Mediterranean mountain basins in Vallcebre, Catalonia: Some challenges for hydrological modelling. *Hydrological Processes*, 11(9): 1263-1272.
- Gallart, F., Llorens, P. and Latron, J., 1994. Studying the Role of Old Agricultural Terraces on Runoff Generation in a Small Mediterranean Mountainous Basin. *Journal of Hydrology*, 159(1-4): 291-303.
- Gallart, F., Llorens, P., Latron, J. and Regues, D., 2002. Hydrological processes and their seasonal controls in a small Mediterranean mountain catchment in the Pyrenees. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(3): 527-537.
- Latron J. 2003. Estudio del funcionamiento hidrológico de una cuenca mediterránea de montaña (Vallcebre, Pirineos Catalanes). PhD thesis, Universitat de Barcelona, 269pp.
- Latron, J. and Gallart, F., 2007. Seasonal dynamics of runoff-contributing areas in a small Mediterranean research catchment (Vallcebre, Eastern Pyrenees). *Journal of Hydrology*, 335(1-2): 194-206.
- Latron, J. and Gallart, F., 2008. Runoff generation processes in a small Mediterranean research catchment (Vallcebre, Eastern Pyrenees). *Journal of Hydrology*, 358(3-4): 206-220.
- Latron, J., Anderton, S., White, S., Llorens, P. and Gallart, F. 2003. Seasonal characteristics of the hydrological response in a Mediterranean mountain research catchment (Vallcebre, Catalan Pyrenees): field investigations and modelling. *Hydrology of Mediterranean and Semiarid Regions*, IAHS pub. nº 278: 106-110.
- Latron, J., Soler, M., Llorens, P. and Gallart, F., 2008. Spatial and temporal variability of the hydrological response in a small Mediterranean research catchment (Vallcebre, Eastern Pyrenees). *Hydrological Processes*, 22(6): 775-787.
- Llorens, P. and Domingo, F., 2007. Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions. A review of studies in Europe. *Journal of Hydrology*, 335(1-2): 37-54.
- Llorens, P., 1997. Rainfall interception by a *Pinus sylvestris* forest patch overgrown in a Mediterranean mountainous abandoned area .2. Assessment of the applicability of Gash's analytical model. *Journal of Hydrology*, 199(3-4): 346-359.
- Llorens, P., Latron, J. and Gallart, F. 2003. Dinámica espacio-temporal de la humedad del suelo en un área de montañaMediterránea. cuencas experimentales de Vallcebre (Alto Llobregat). In J., Álvarez-Benedí & P., Marinero (Eds): *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo*, 6: 71-76.

Llorens, P., Oliveras, I. and Poyatos, R., 2003. Temporal variability of water fluxes in a *Pinus sylvestris* forest patch in Mediterranean mountain conditions (Vallecebre research catchments, Catalan Pyrenees). *Hydrology of Mediterranean and Semiarid Regions: IAHS pub. n° 278*: 101-105.

Llorens, P., Poch, R., Latron, J. and Gallart, F., 1997. Rainfall interception by a *Pinus sylvestris* forest patch overgrown in a Mediterranean mountainous abandoned area .1. Monitoring design and results down to the event scale. *Journal of Hydrology*, 199(3-4): 331-345.

Muzylo, A., 2008. Interception as a component of water balance: comparison of experimental and modeling approaches. Unpublished DEA Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 60 pp.

Oliveras, I. and Llorens, P., 2001. Medium-term sap flux monitoring in a Scots pine stand: analysis of the operability of the heat dissipation method for hydrological purposes. *Tree Physiology*, 21(7): 473-480.

Poyatos, R. et al., 2007b. Plasticity in hydraulic architecture of Scots pine across Eurasia. *Oecologia*, 153(2): 245-259.

Poyatos, R., Cermak, J. and Llorens, P., 2007. Variation in the radial patterns of sap flux density in pubescent oak (*Quercus pubescens*) and its implications for tree and stand transpiration measurements. *Tree Physiology*, 27(4): 537-548.

Poyatos, R., Latron, J. and Llorens, P., 2003. Land use and land cover change after agricultural abandonment - The case of a Mediterranean Mountain Area (Catalan Pre-Pyrenees). *Mountain Research and Development*, 23(4): 362-368.

Poyatos, R., Llorens, P. and Gallart, F., 2005. Transpiration of montane *Pinus sylvestris* L. and *Quercus pubescens* Willd. forest stands measured with sap flow sensors in NE Spain. *Hydrology and Earth System Sciences*, 9(5): 493-505.

Poyatos, R., Llorens, P., Pinol, J. and Rubio, C., 2008. Response of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and pubescent oak (*Quercus pubescens* Willd.) to soil and atmospheric water deficits under Mediterranean mountain climate. *Annals of Forest Science*, 65(3).

Poyatos, R., Villagarcia, L., Domingo, F., Piñol, J. and Llorens, P., 2007. Modelling evapotranspiration in a Scots pine stand under Mediterranean mountain climate using the GLUE methodology. *Agricultural and Forest Meteorology*, 146(1-2): 13-28.