

Isótopos de oxígeno/hidrógeno

Juan Pedro Ferrio

Dpto. Botánica, Universidad de Concepción



Universidad de Concepción

“Isotopos estables: fundamentos y aplicaciones en ciencias naturales” 16 al 20 de enero, 2017



Universidad
de Concepción

Dirección de
Extensión
UdeC



ESCUELA
DE VERANO
UdeC



DIRECCIÓN DE
POSTGRADO



FONDECYT
N° 11150914



PROGRAMA
DOCTORADO EN
SISTEMÁTICA
Y BIODIVERSIDAD

DOCTORADO EN OCEANOGRAFÍA

Proyecto “Red_Clima_Rec”



FONDEQUIP
EQM 150018



Isótopos de oxígeno/hidrógeno en plantas

Conceptos generales

- Fuentes de variación: ciclo hidrológico, enriquecimiento evaporativo,
- fraccionamiento en suelo y planta

Aplicaciones

- Origen del agua transpirada
- Transpiración y enriquecimiento isotópico de la hoja

Principales isótopos estables en la biosfera

	Par de isótopos			
	$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$	$^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$	$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$	$^2\text{H}(\text{D})/^1\text{H}$
Estándar	PDB ^b	N ₂ aire	SMOW ^c	SMOW ^c
Notación	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H} / \delta\text{D}$ (‰)
Abundancia (%) ^a	1,1	0,37	0,20	0,015

^a Abundancia del isótopo pesado respecto al total del elemento

^b PDB, Pee-Dee Belemnite (calcárea)

^c SMOW, Standard Mean Ocean Water

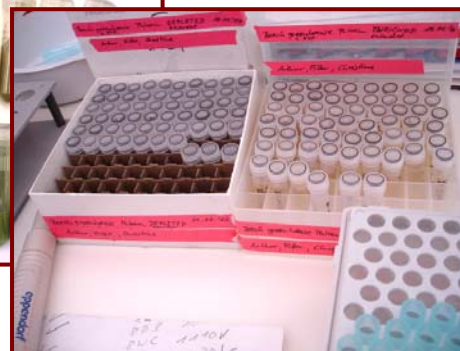
Métodos de análisis (^{18}O , ^2H)



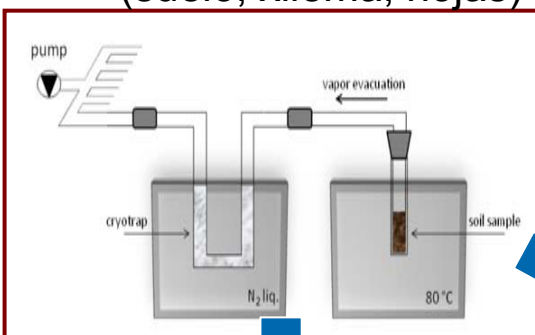
**Materia
Orgánica**



Homogeneizado /
Extracción compuestos

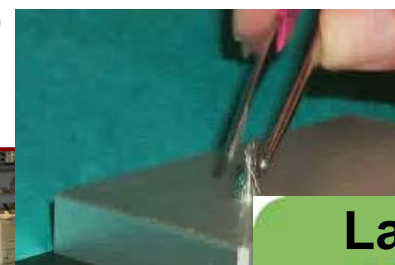


Extracción criogénica agua
(suelo, xilema, hojas)



Pirólisis
agua

Encapsulado
y pirólisis (TC-EA)



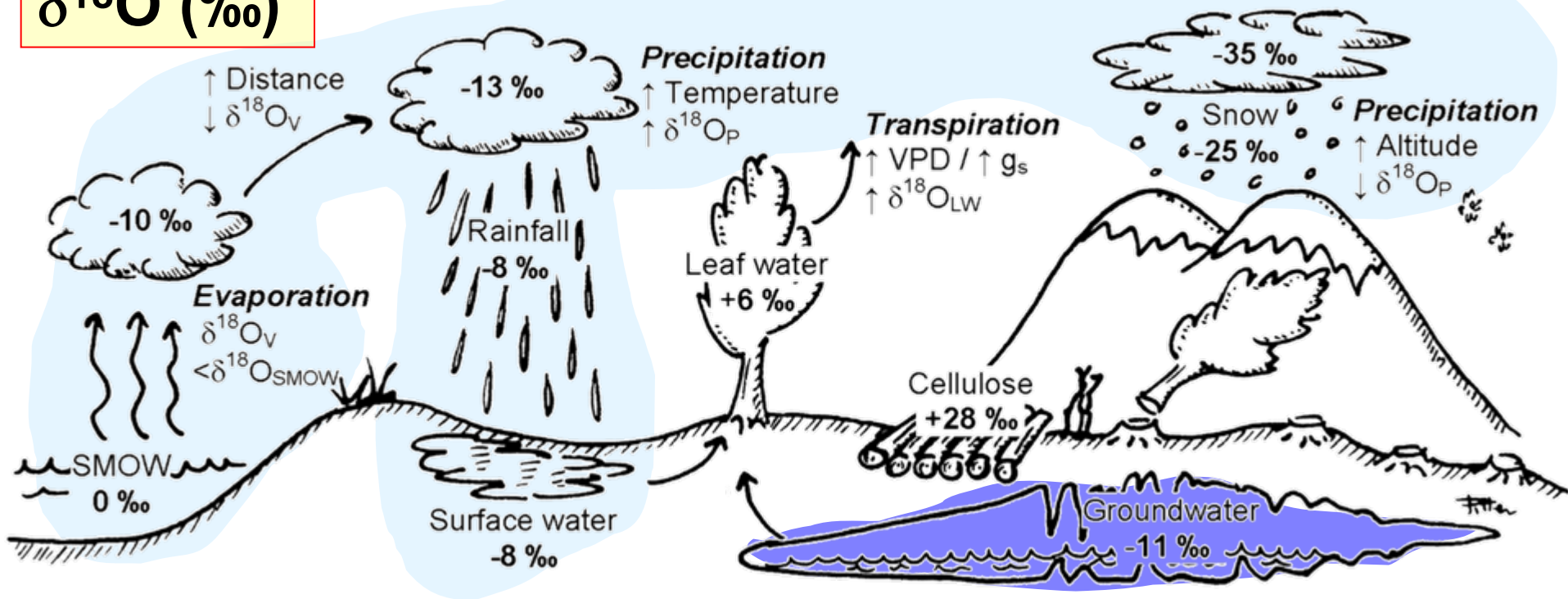
Equilibrado
con CO_2 / H_2

Inyección
 CO_2 / H_2



Variación en el ciclo hidrológico

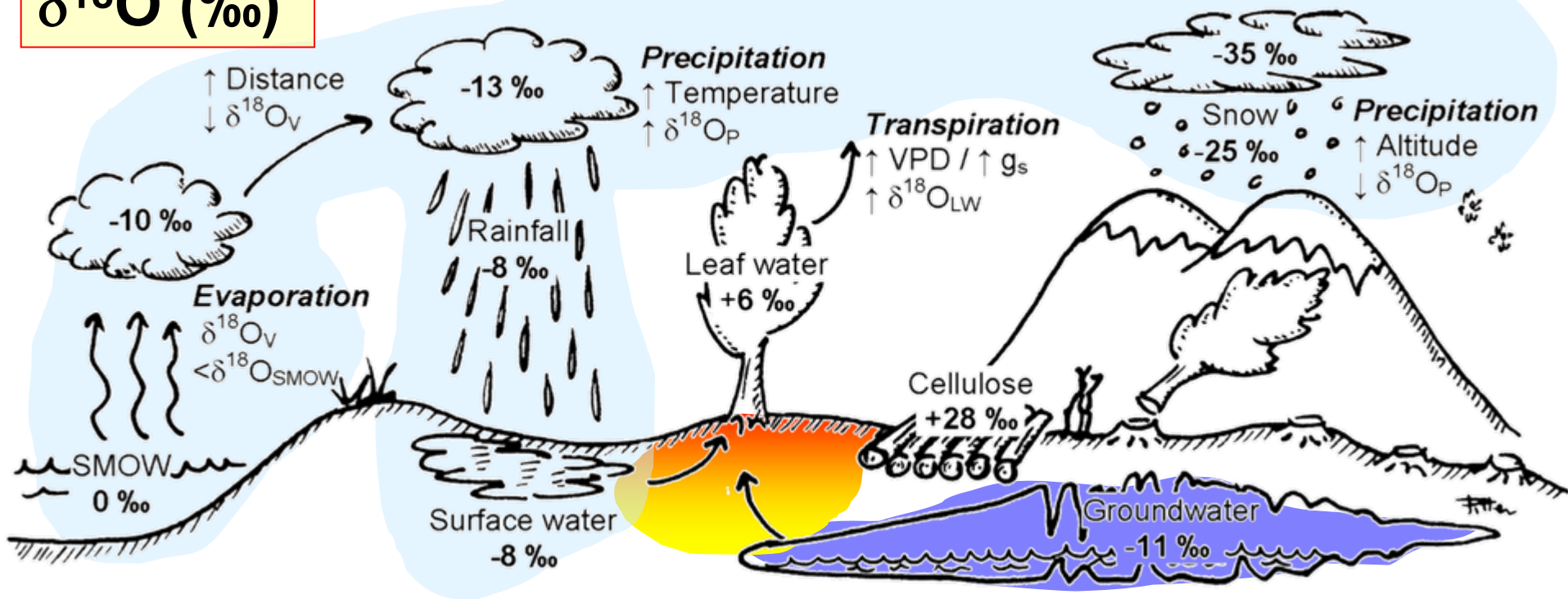
$\delta^{18}\text{O}$ (‰)



- $\delta^{18}\text{O}$ (‰) varía durante el ciclo hidrológico

Variación en el ciclo hidrológico

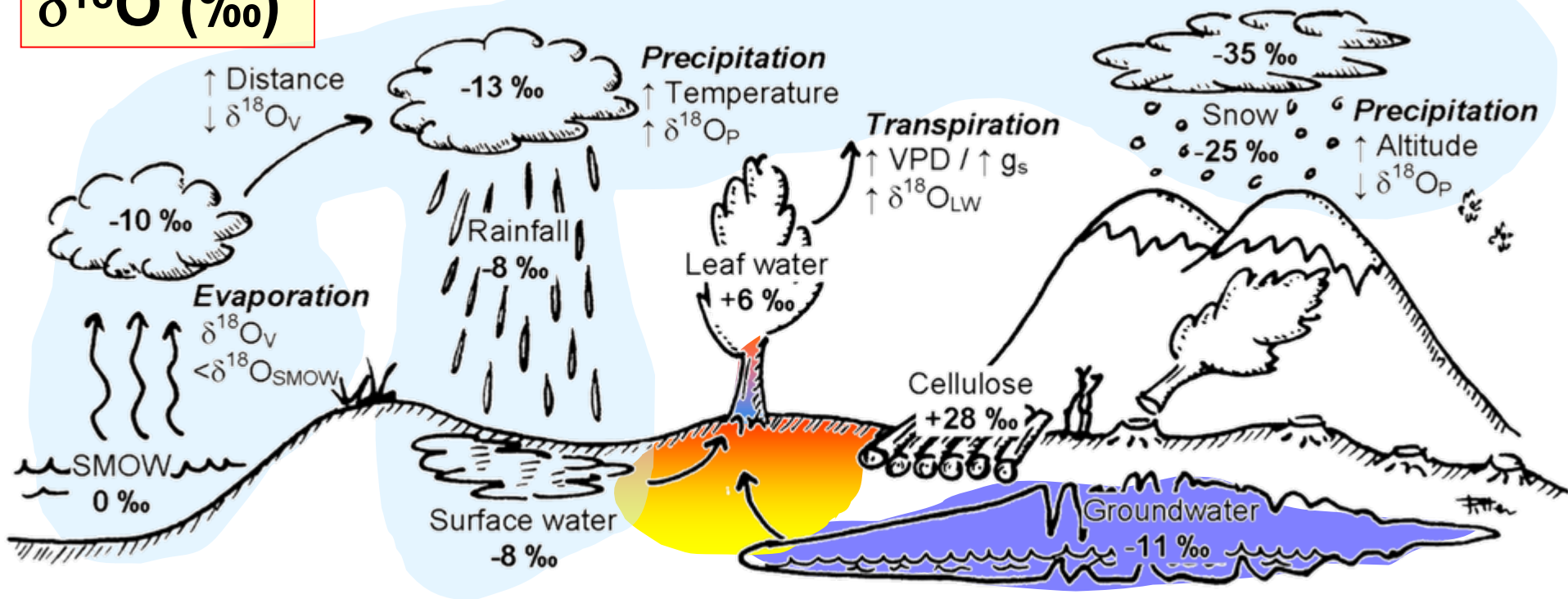
$\delta^{18}\text{O}$ (‰)



- $\delta^{18}\text{O}$ (‰) varía durante el ciclo hidrológico
- + gradiente por evaporación en el suelo

Variación en el ciclo hidrológico

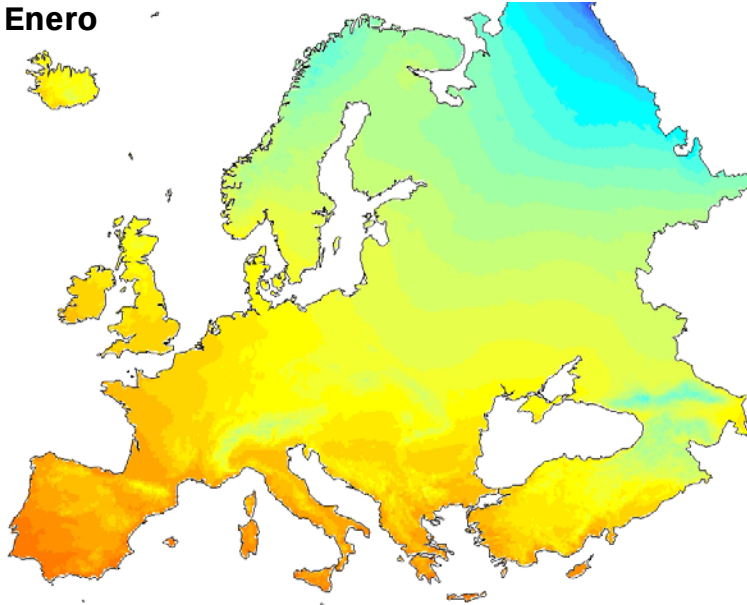
$\delta^{18}\text{O}$ (‰)



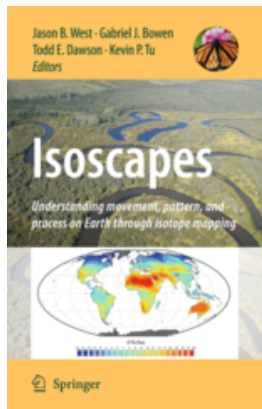
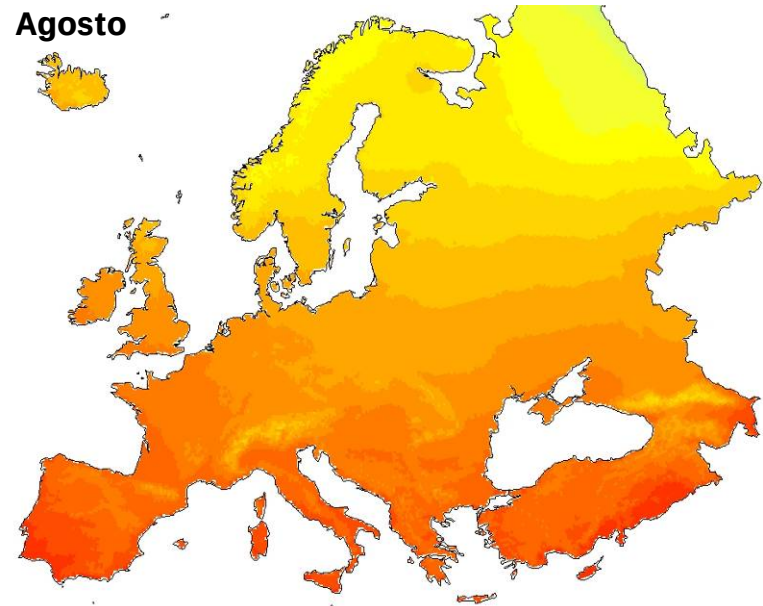
- $\delta^{18}\text{O}$ (‰) varía durante el ciclo hidrológico
- + gradiente por evaporación en el suelo
- $\delta^{18}\text{O}$ (‰) del xilema refleja la del agua fuente

Ciclo hidrológico: variación estacional

Enero

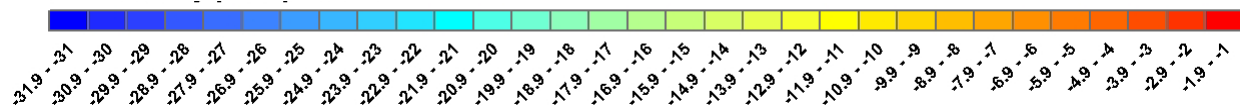


Agosto



www.waterisotopes.org

$\delta^{18}\text{O}$



Ciclo hidrológico: evaporación

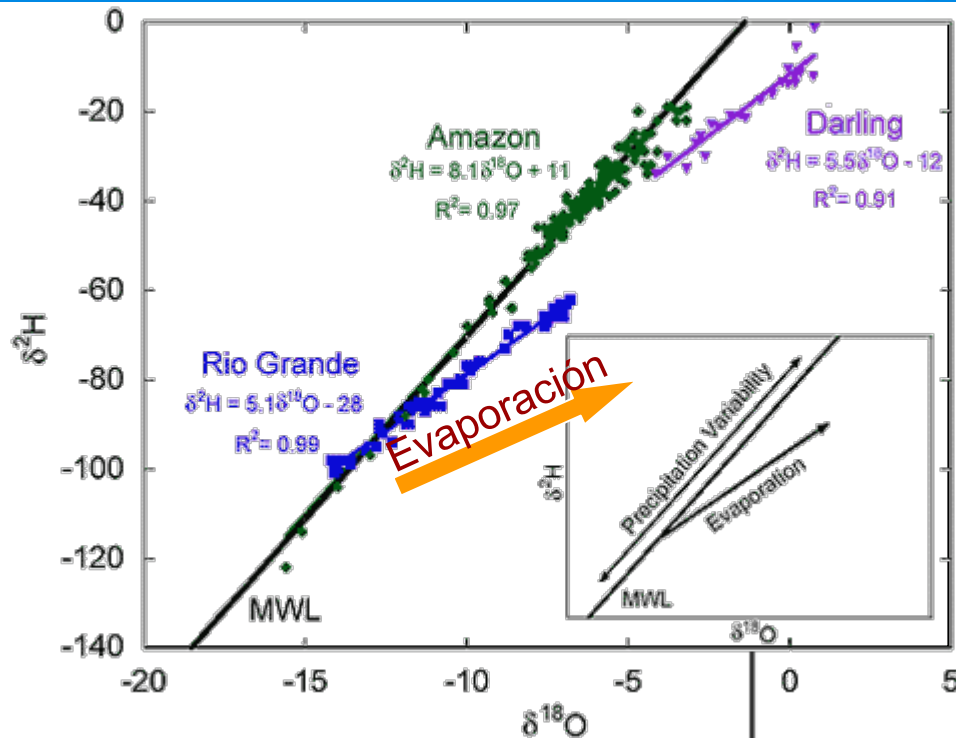
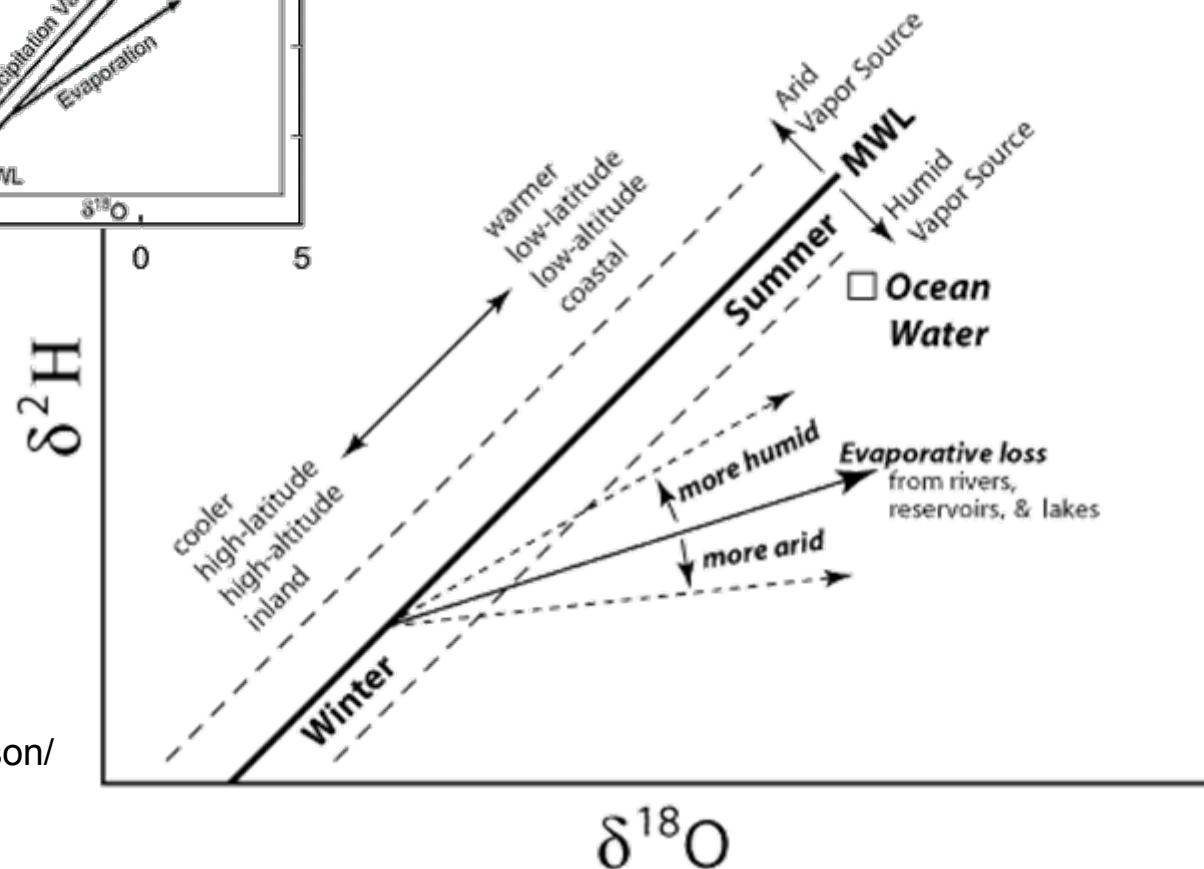


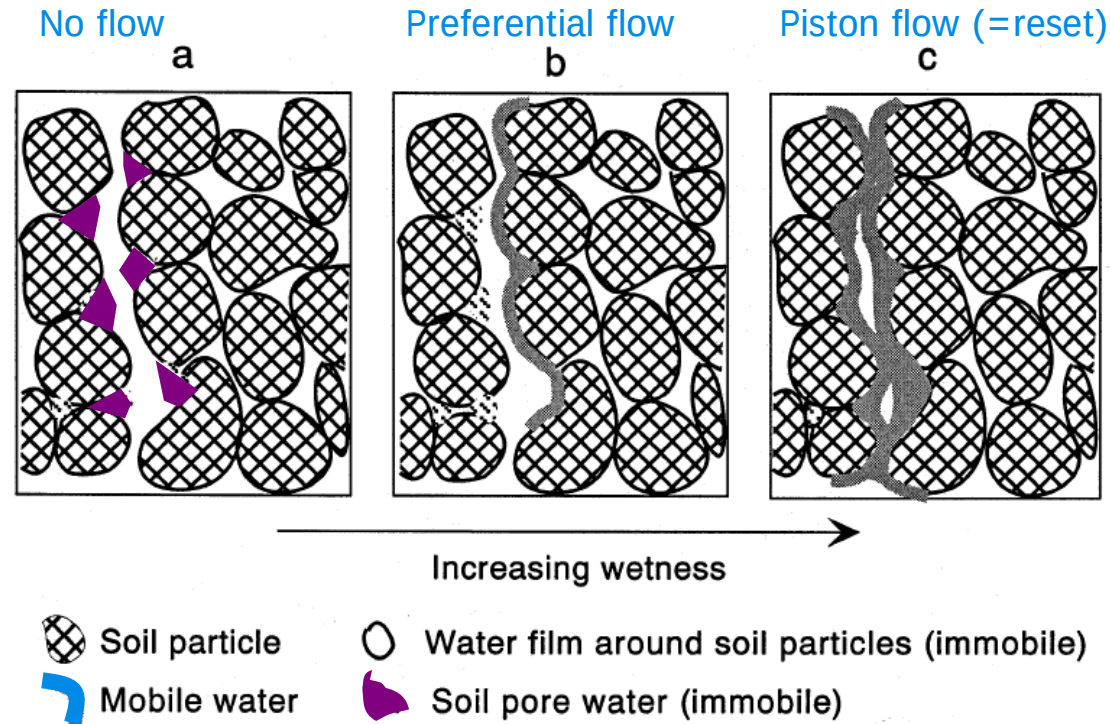
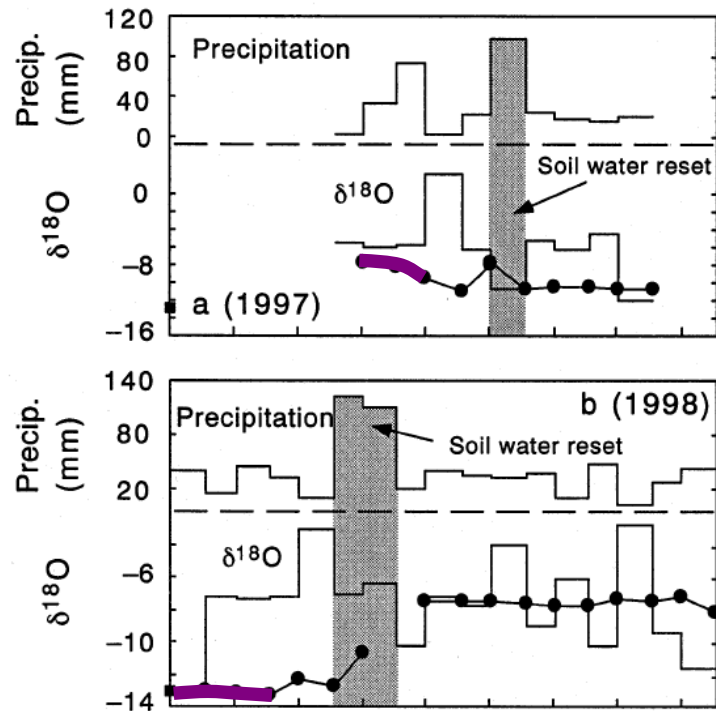
Figure 5. Rivers in humid regions (Amazon) show little deviation from the GMWL; those flowing in arid lands (Rio Grande in the southwestern U.S. and the Darling River in Australia) do.

Meteoric water line

Distinto fraccionamiento isotópico para oxígeno e hidrógeno



Hidrología y suelo



El agua del suelo no siempre se renueva totalmente
Otra fuente de heterogeneidad en el suelo

ELSEVIER

Earth and Planetary Science Letters 185 (2001) 355–367

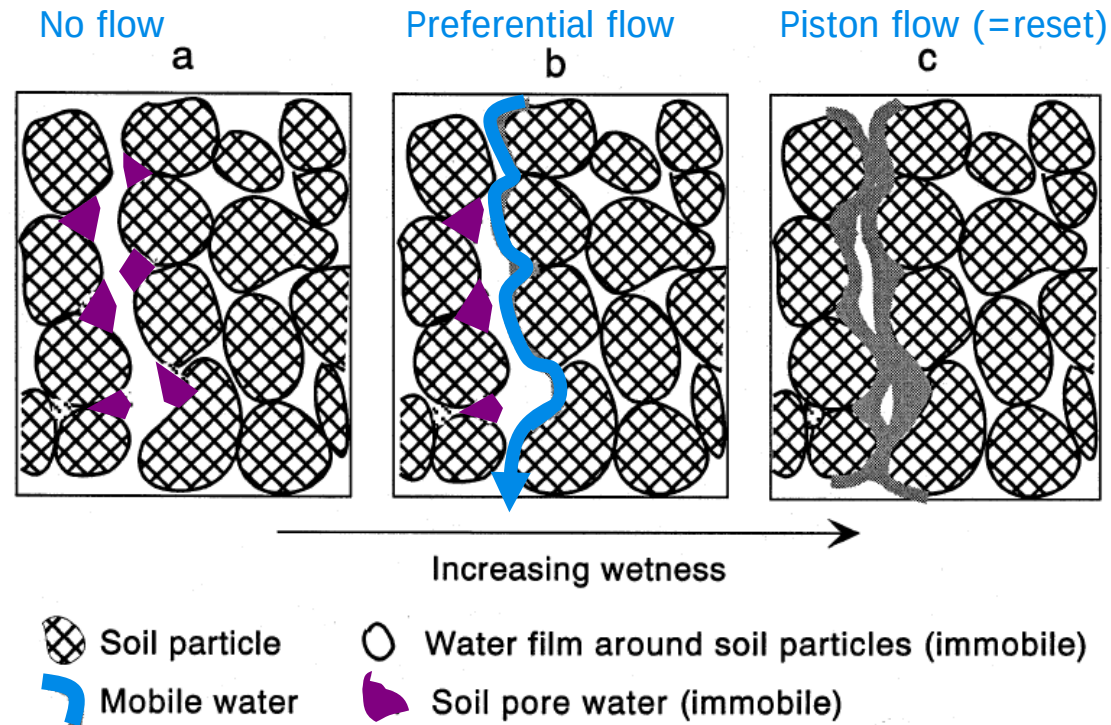
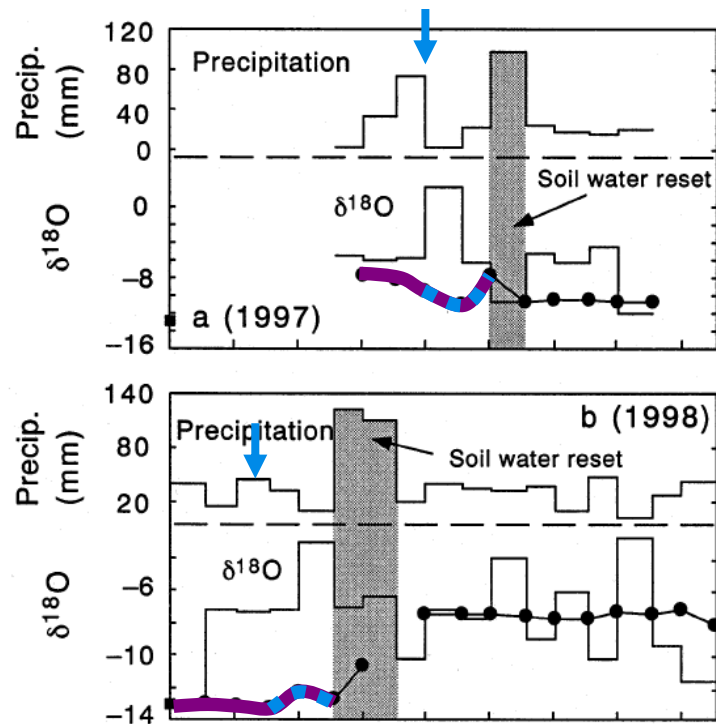
www.elsevier.com/locate/

Tang & Feng 2001

The effect of soil hydrology on the oxygen and hydrogen isotopic compositions of plants' source water

Kuilian Tang*, Xiaohong Feng

Hidrología y suelo



El agua del suelo no siempre se renueva totalmente
Otra fuente de heterogeneidad en el suelo

ELSEVIER

Earth and Planetary Science Letters 185 (2001) 355–367

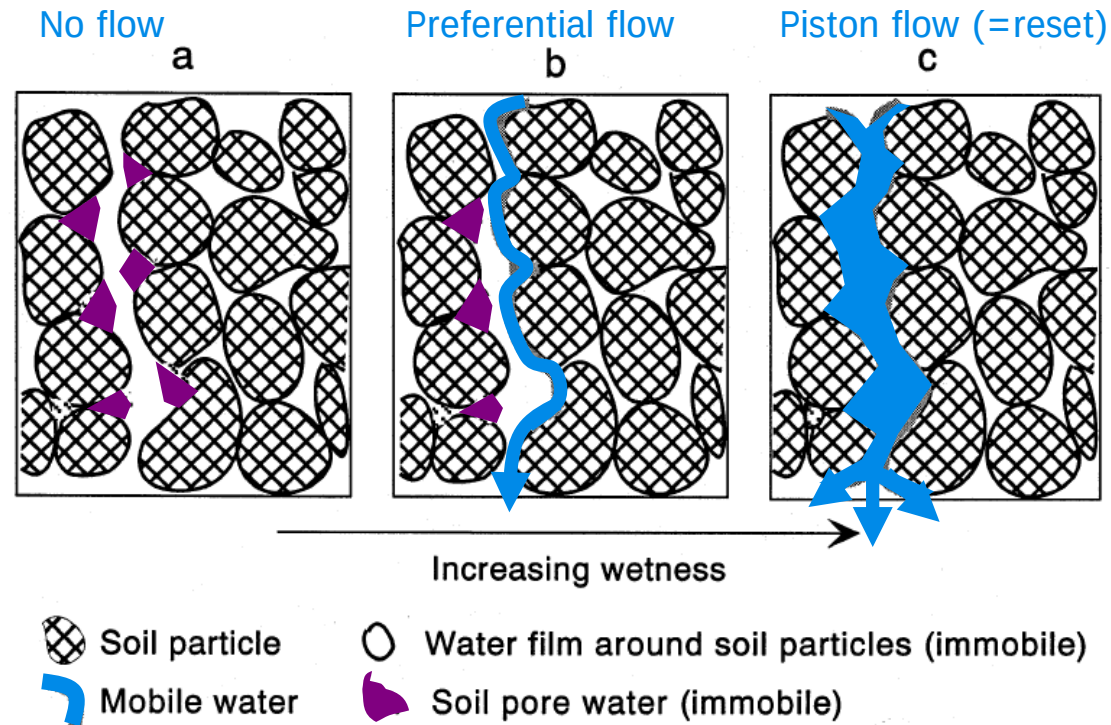
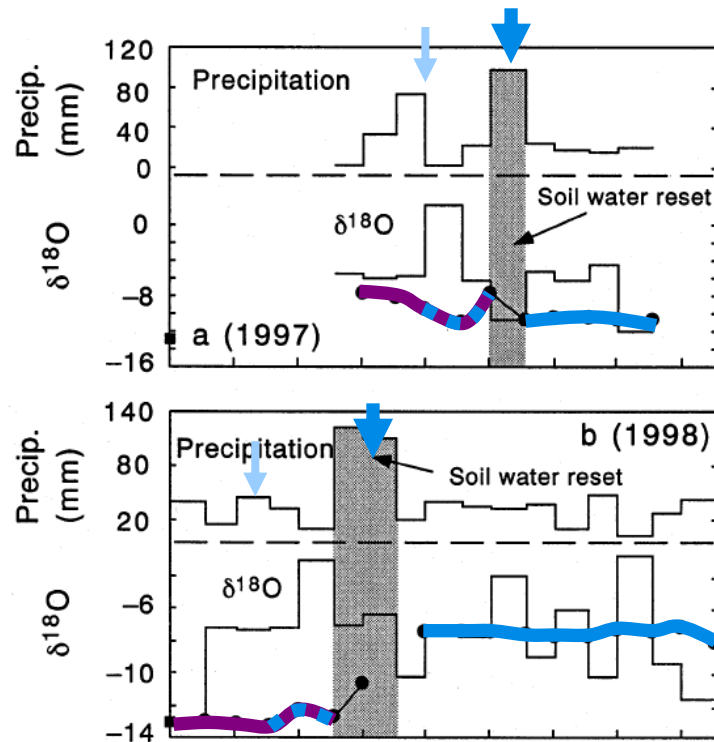
www.elsevier.com/locate/

Tang & Feng 2001

The effect of soil hydrology on the oxygen and hydrogen isotopic compositions of plants' source water

Kuilian Tang*, Xiaohong Feng

Hidrología y suelo



El agua del suelo no siempre se renueva totalmente
Otra fuente posible de heterogeneidad en el agua fuente

ELSEVIER

Earth and Planetary Science Letters 185 (2001) 355–367

www.elsevier.com/locate/

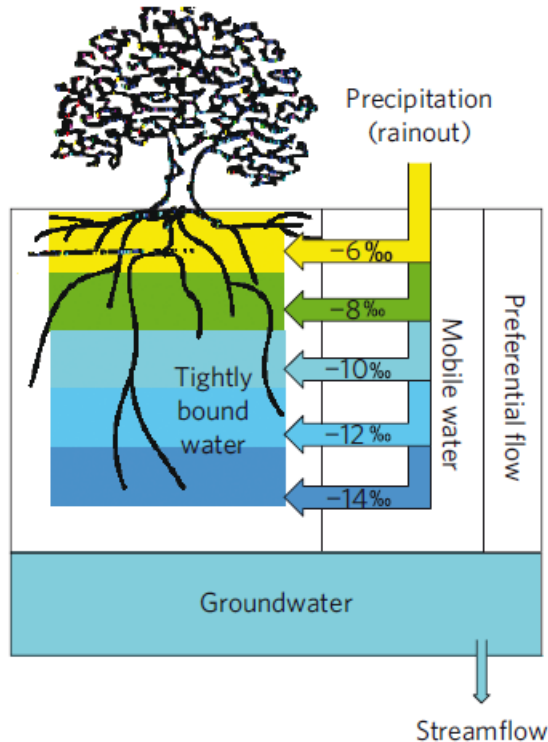
Tang & Feng 2001

The effect of soil hydrology on the oxygen and hydrogen isotopic compositions of plants' source water

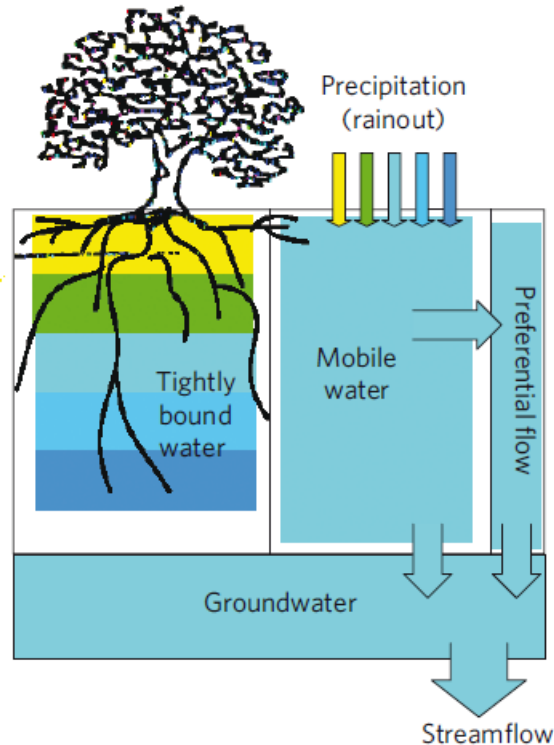
Kuilian Tang*, Xiaohong Feng

Hidrología y suelo

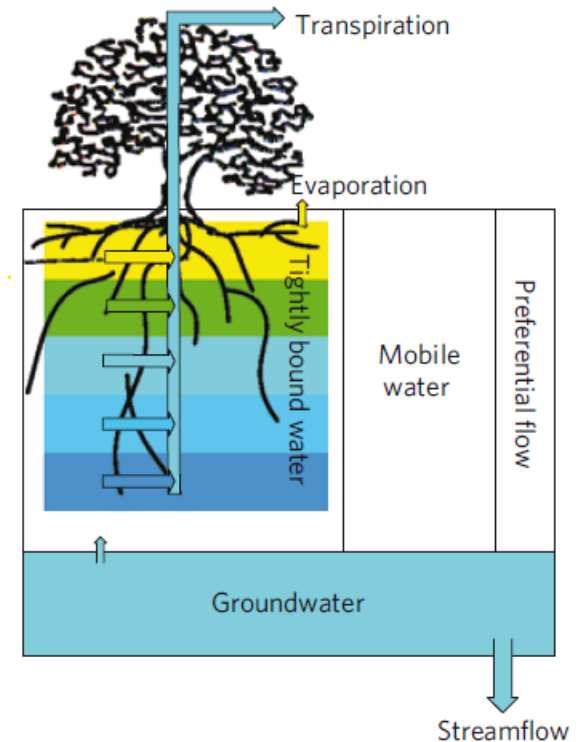
a Autumn wet-up



b Rainy season



c Dry season



LETTERS

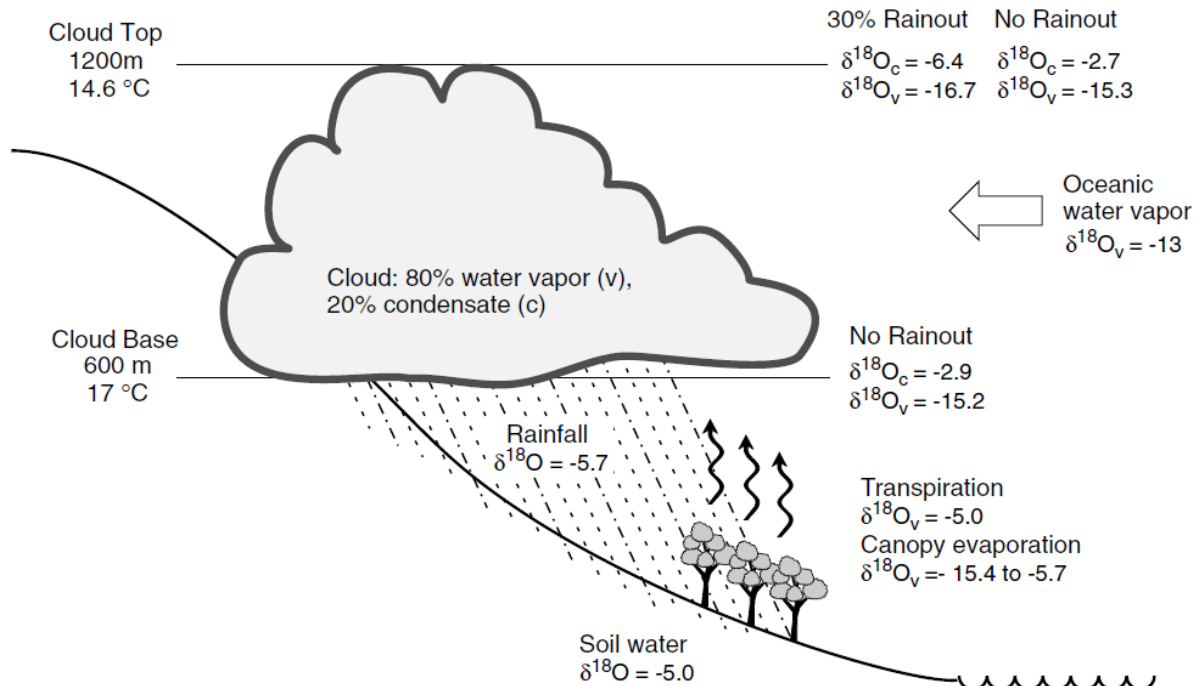
PUBLISHED ONLINE: 20 DECEMBER 2009 | DOI: 10.1038/NGEO722

nature
geoscience

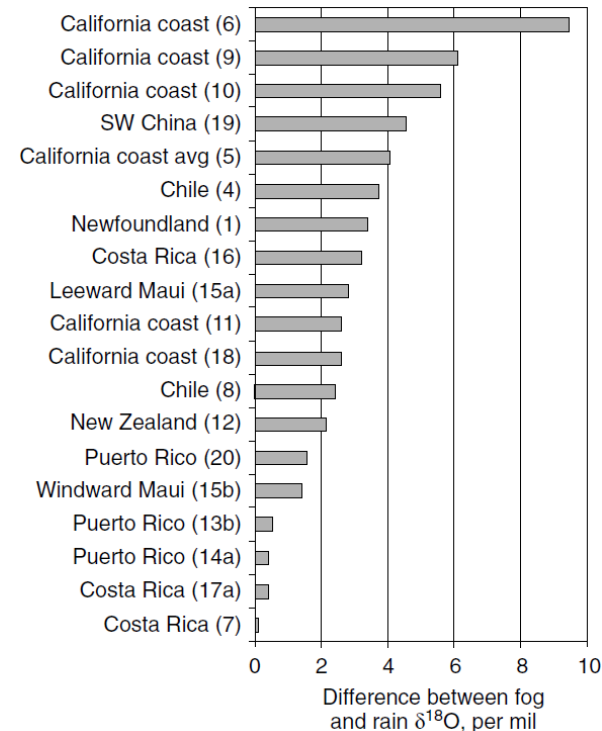
Ecohydrologic separation of water between trees and streams in a Mediterranean climate

J. Renée Brooks^{1*}, Holly R. Barnard², Rob Coulombe³ and Jeffrey J. McDonnell^{2,4}

Fuentes alternativas: niebla y rocío



La niebla y el rocío suelen tener una temperatura de condensación inferior a la de la lluvia, por lo que están más enriquecidos

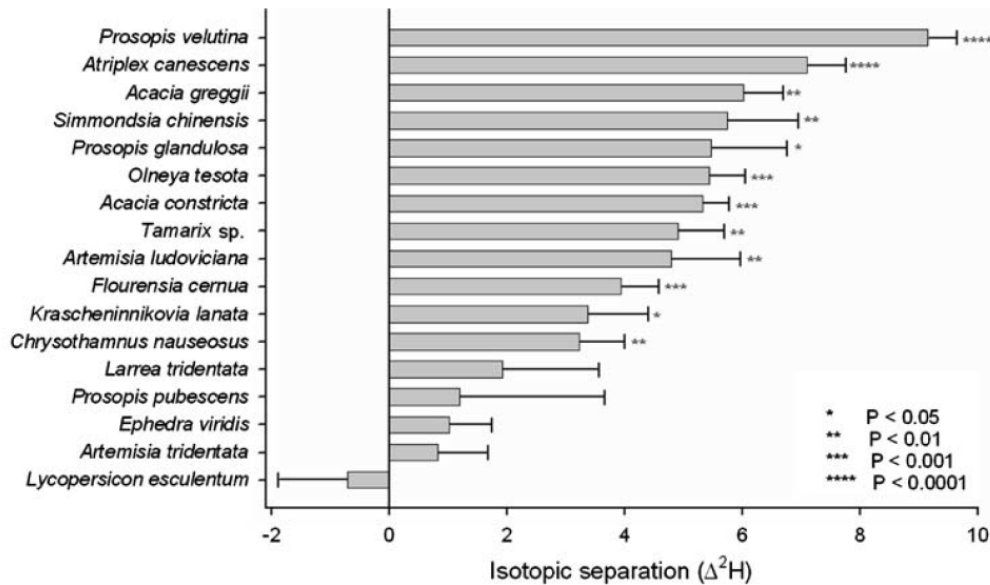


HYDROLOGICAL PROCESSES
Hydrol. Process. 25, 353–366 (2011)
 Published online 23 December 2010 in Wiley Online Library
 (wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/hyp.7762

Understanding the role of fog in forest hydrology: stable isotopes as tools for determining input and partitioning of cloud water in montane forests^{†,‡}

Martha Scholl,^{1*} Werner Eugster² and Reto Burkard³

¿ agua del xilema = agua fuente ?



- En algunas especies xerófitas se han observado fraccionamientos importantes entre xilema y fuente para $\delta^2\text{H}$

Plant Soil (2007) 291:93–107
DOI 10.1007/s11104-006-9177-1

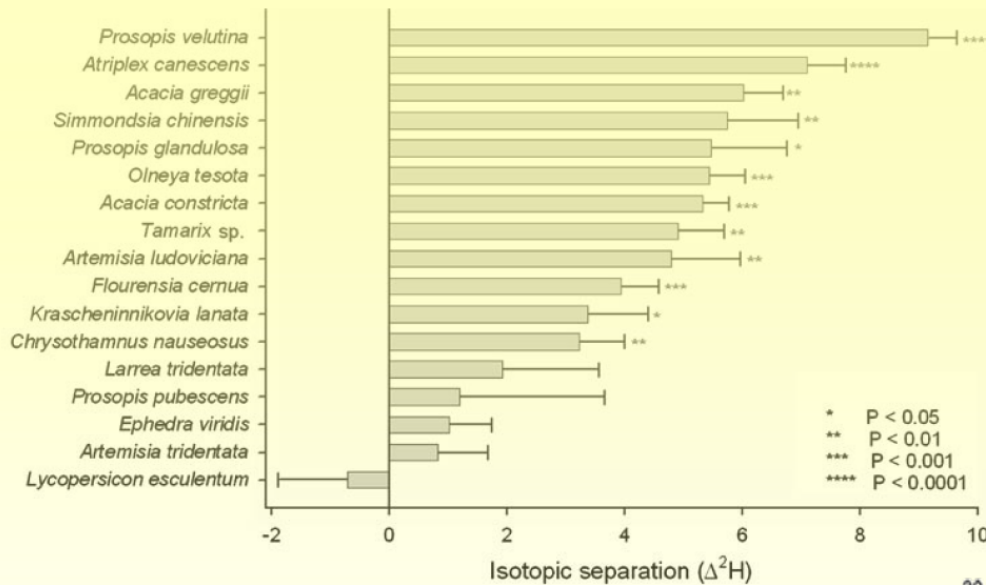
ORIGINAL PAPER

Hydrogen isotope fractionation during water uptake by woody xerophytes

Patrick Z. Ellsworth · David G. Williams



¿ agua del xilema = agua fuente ?



Plant Soil (2007) 291:93–107
 DOI 10.1007/s11104-006-9177-1

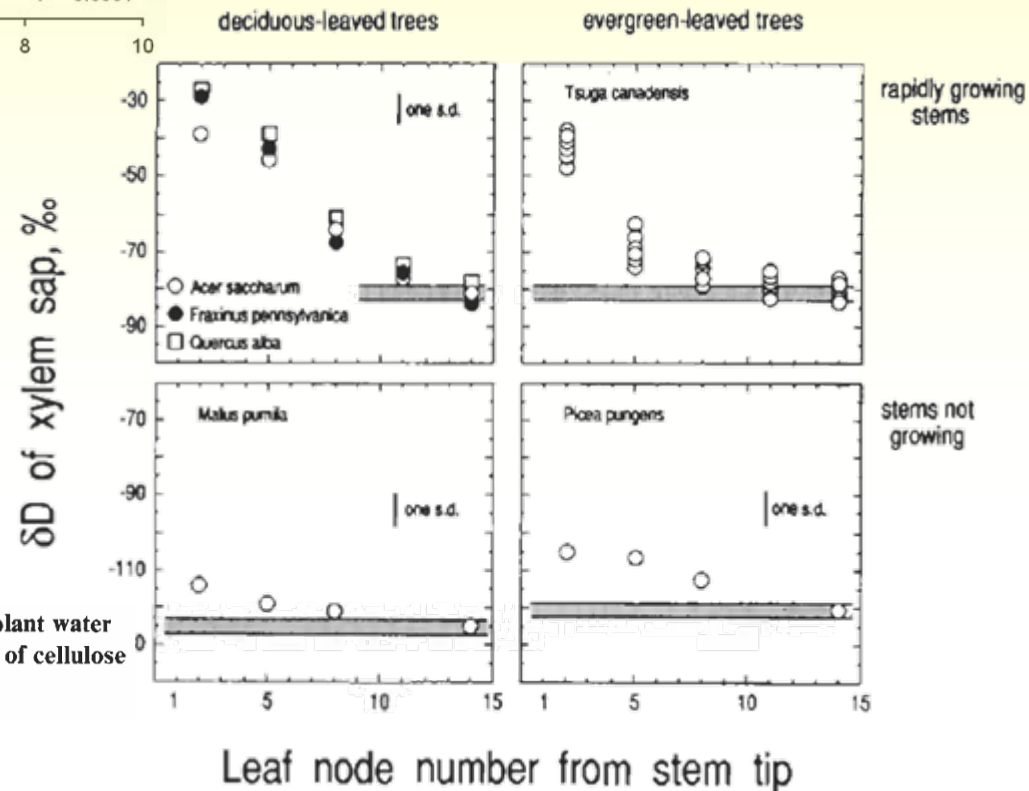
ORIGINAL PAPER

Hydrogen isotope fractionation during water uptake by woody xerophytes

Patrick Z. Ellsworth · David G. Williams

- En algunas especies xerófitas se han observado fraccionamientos importantes entre xilema y fuente para $\delta^2\text{H}$

- La acumulación de agua en las ramas puede dar lugar a fraccionamiento por evaporación o intercambio con el floema



Isotopic enrichment of water in the “woody” tissues of plants: Implications for plant water source, water uptake, and other studies which use the stable isotopic composition of cellulose

TODD E. DAWSON¹ and JAMES R. EHLERINGER²

Geochimica et Cosmochimica Acta Vol. 57, pp. 3487–3492
 Copyright © 1993 Pergamon Press Ltd. Printed in U.S.A.

Origen del agua de las plantas

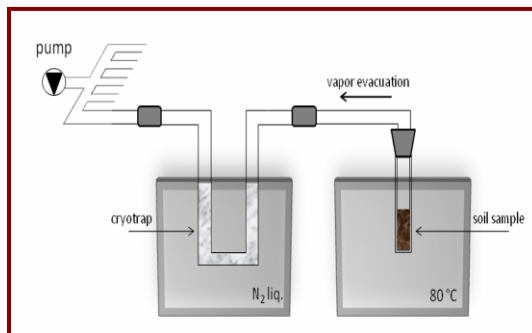
Suelo



Ramas



Extracción criogénica
(suelo, xilema, hojas)



Muestras líquidas (lluvia, pozos)
Agua libre suelo: equilibrado con H_2O
Micro-inducción (suelo, xilema, hojas)

Pirólisis

Equilibrado con CO_2 / H_2



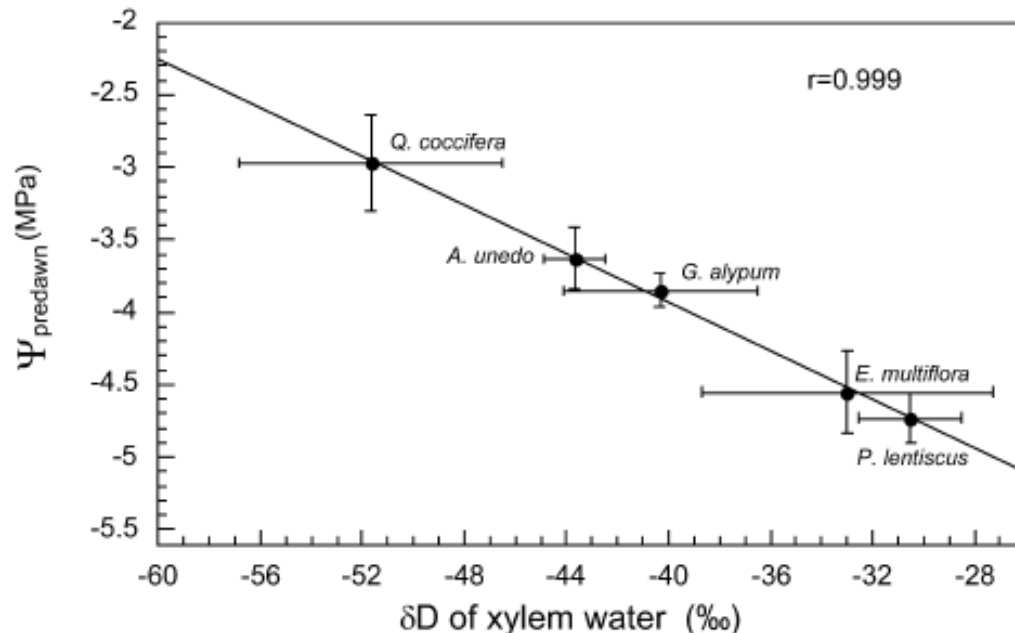
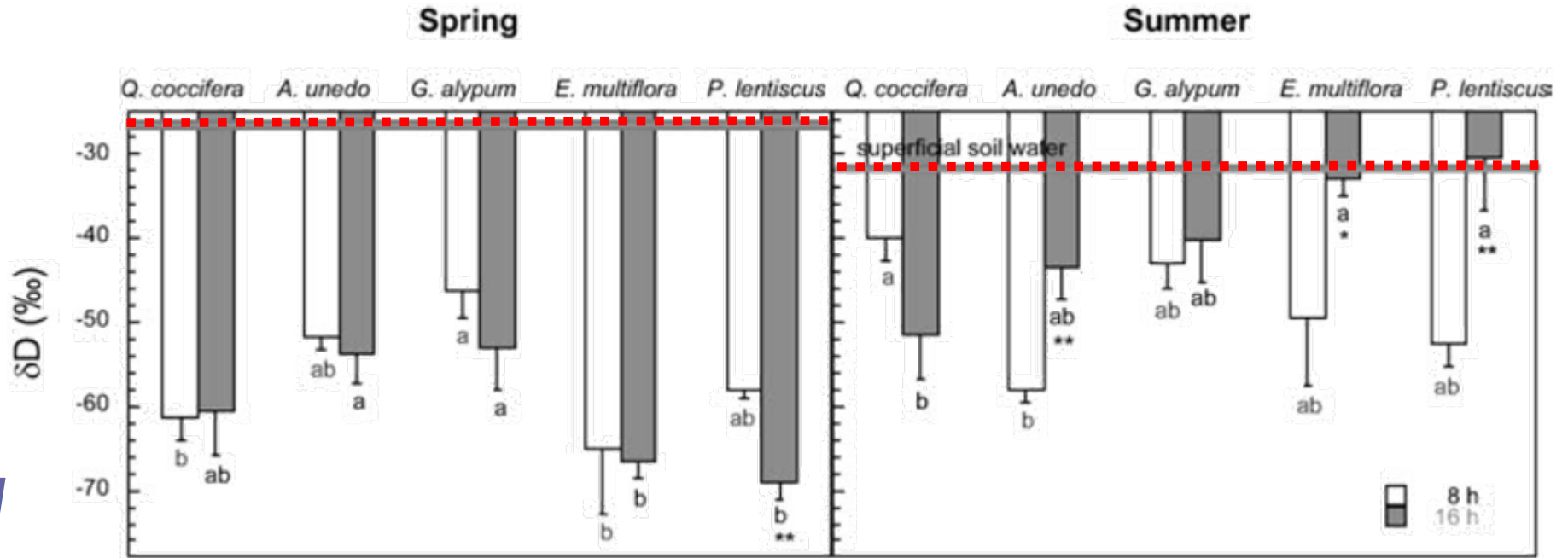
Laser (ICOS)



Laser (CRDS)



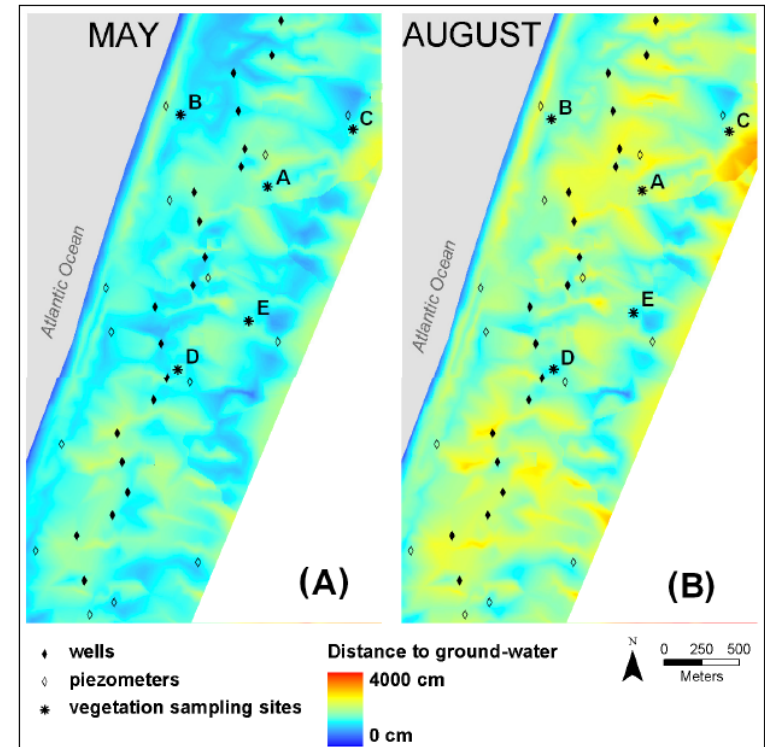
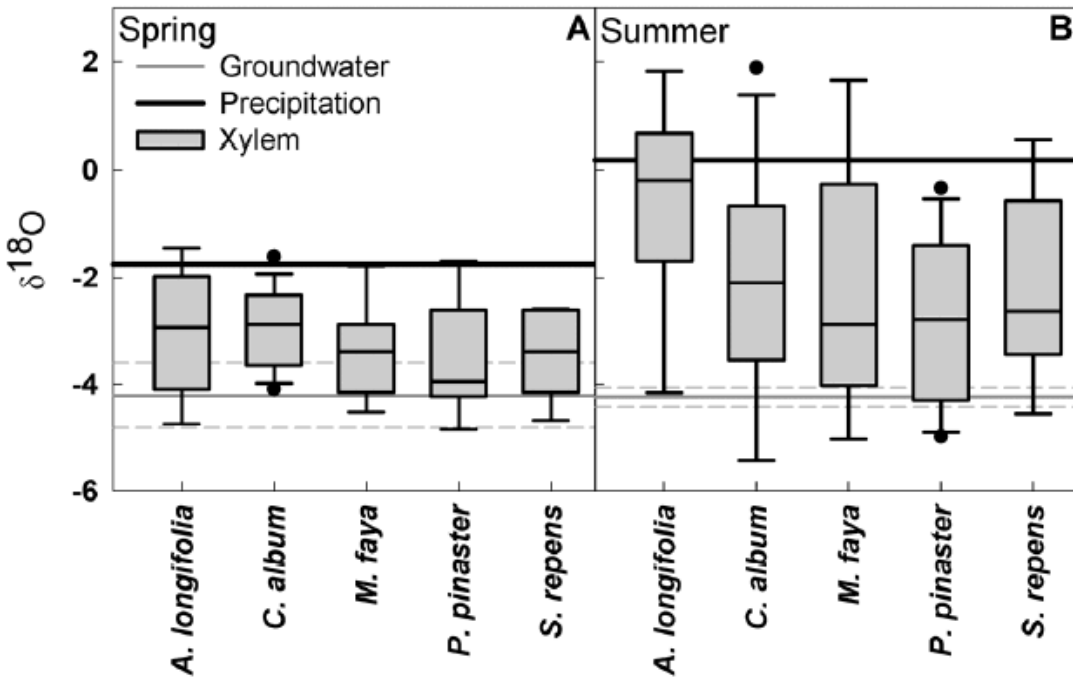
Comparación del uso de agua entre especies



Acceso agua profunda
Menos estrés

Agua superficial
Mayor estrés

Comparación del uso de agua entre especies

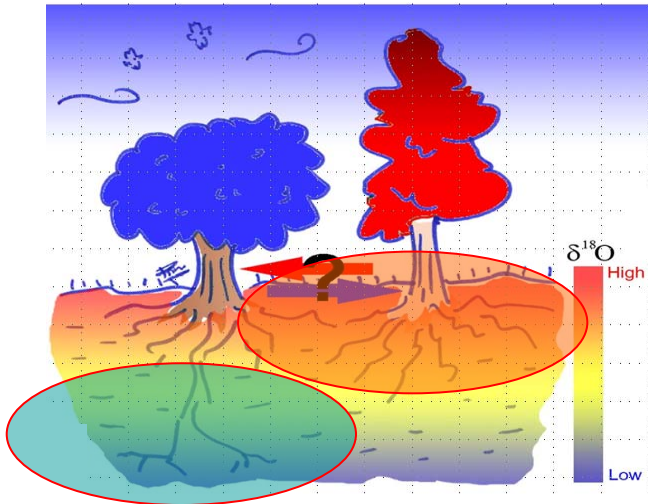
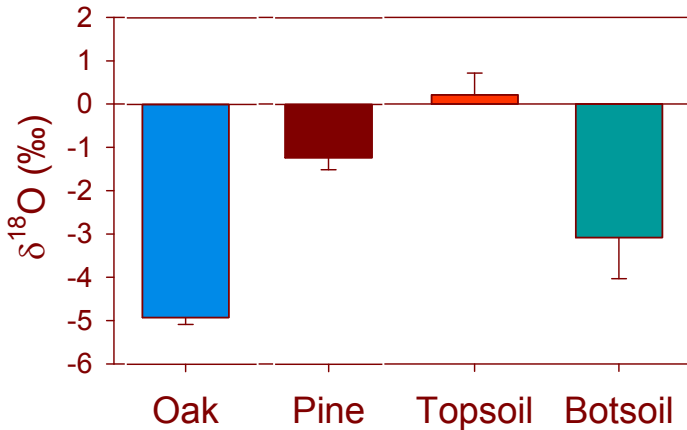


Responses of woody species to spatial and temporal ground water changes in coastal sand dune systems

C. Máguas¹, K. G. Rascher^{1,3}, A. Martins-Loução¹, P. Carvalho^{1,2}, P. Pinho¹, M. Ramos¹, O. Correia¹, and C. Werner³
Biogeosciences, 8, 3823–3832, 2011

Relaciones inter-específicas

Diferencias entre especies co-existentes



Encina
Quercus ilex L.



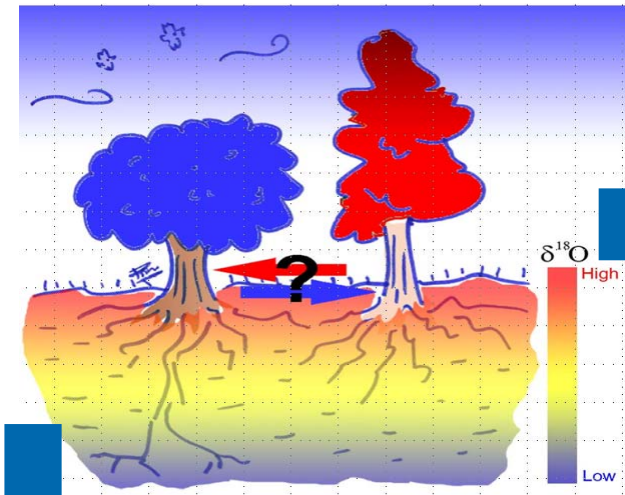
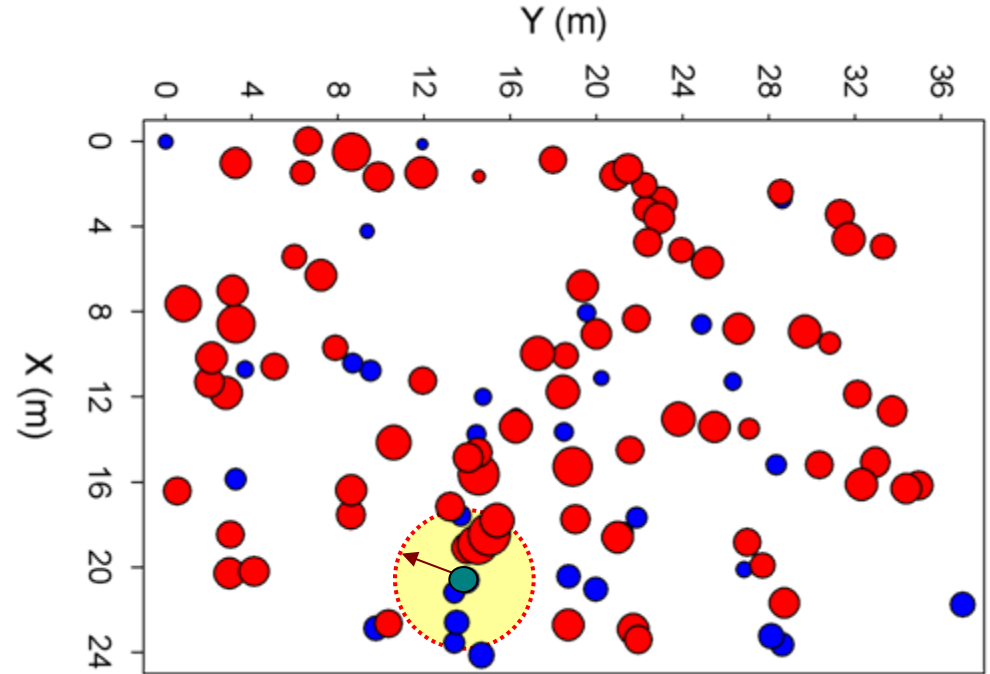
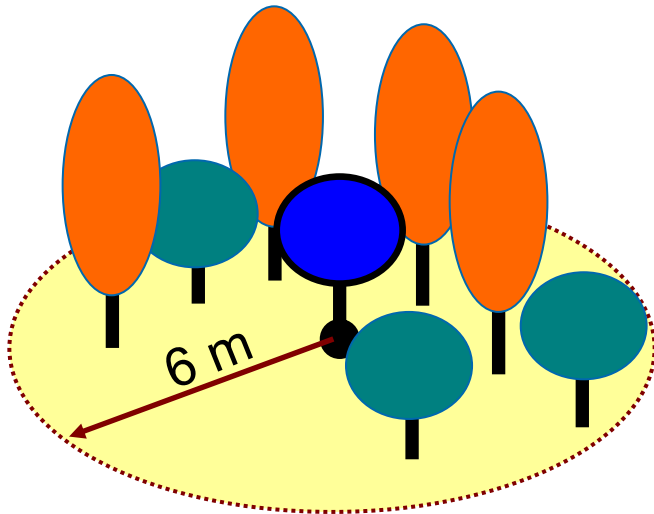
Pino carrasco
Pinus halepensis Mill.

Las encinas buscan agua a mayor profundidad

Relaciones inter-específicas

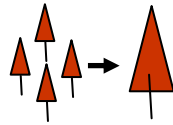
¿Respuesta diferente
a la competencia?

Compara $\delta^{18}\text{O}$ xilema
con el **área basal (BA)**
de árboles vecinos

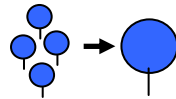


Relaciones inter-específicas: *nichos*

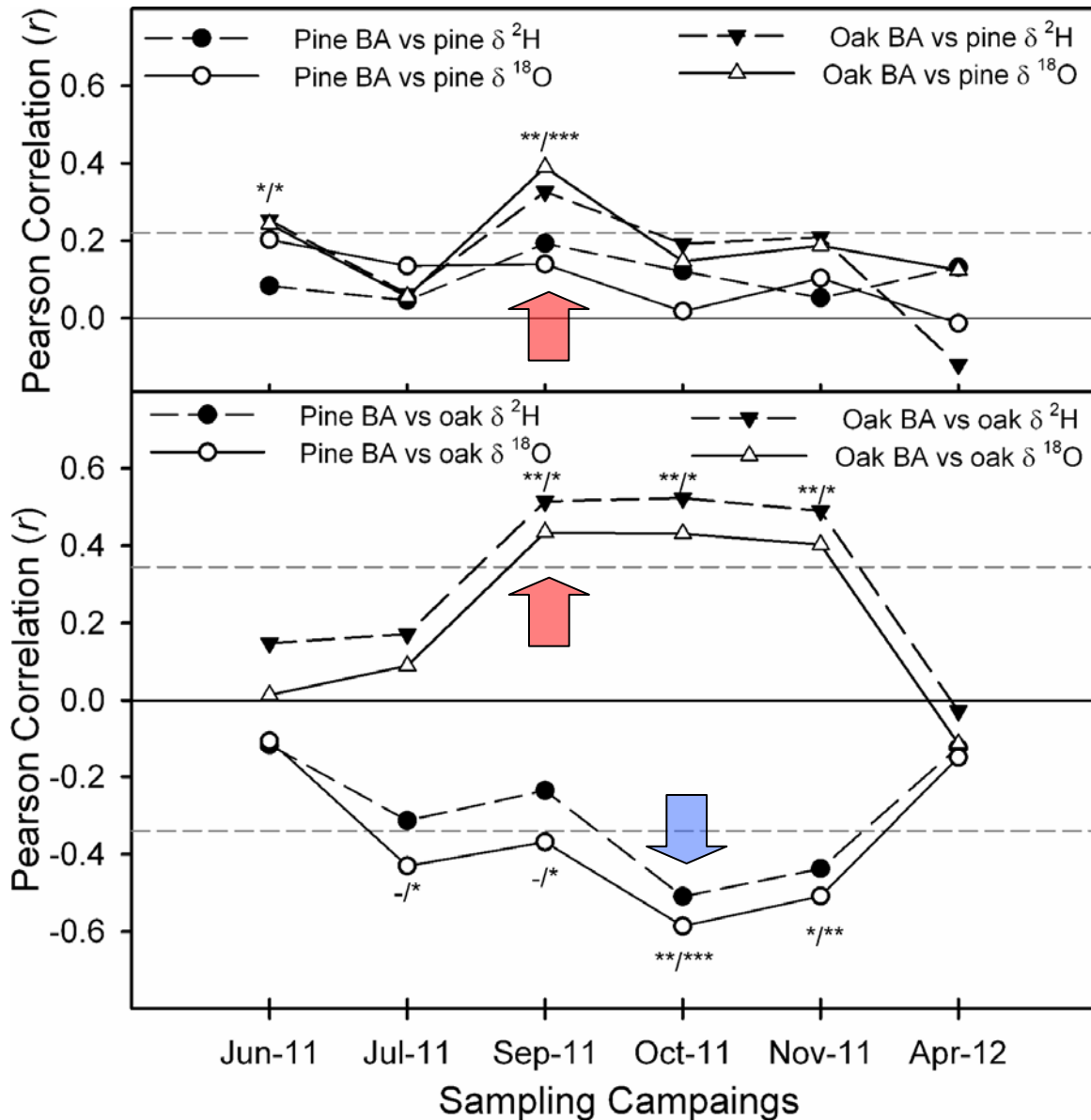
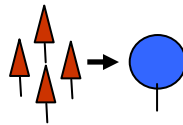
¿Respuesta diferente a la competencia?



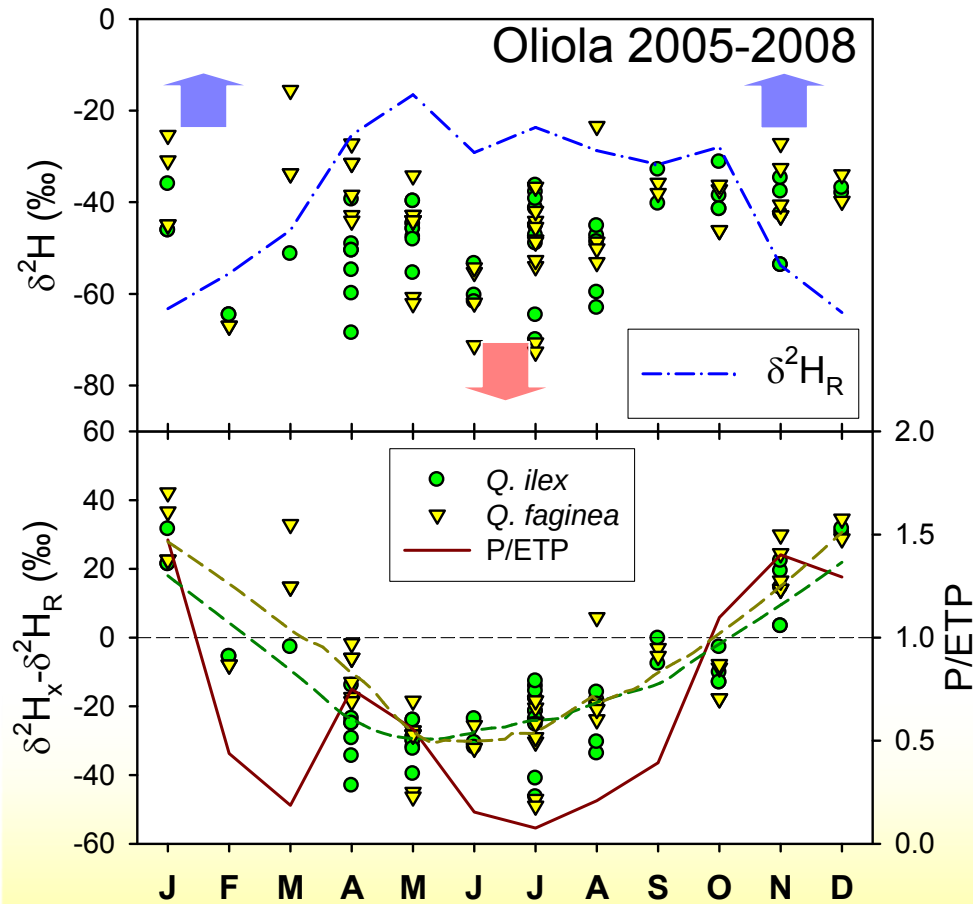
Pino y encina:
más evaporación con alta densidad de la propia especie (estancamiento)



Encina:
“baja más” en presencia de pinos

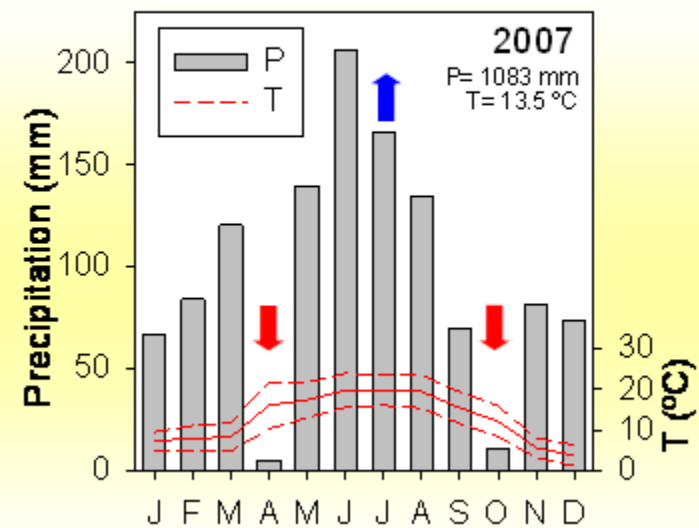
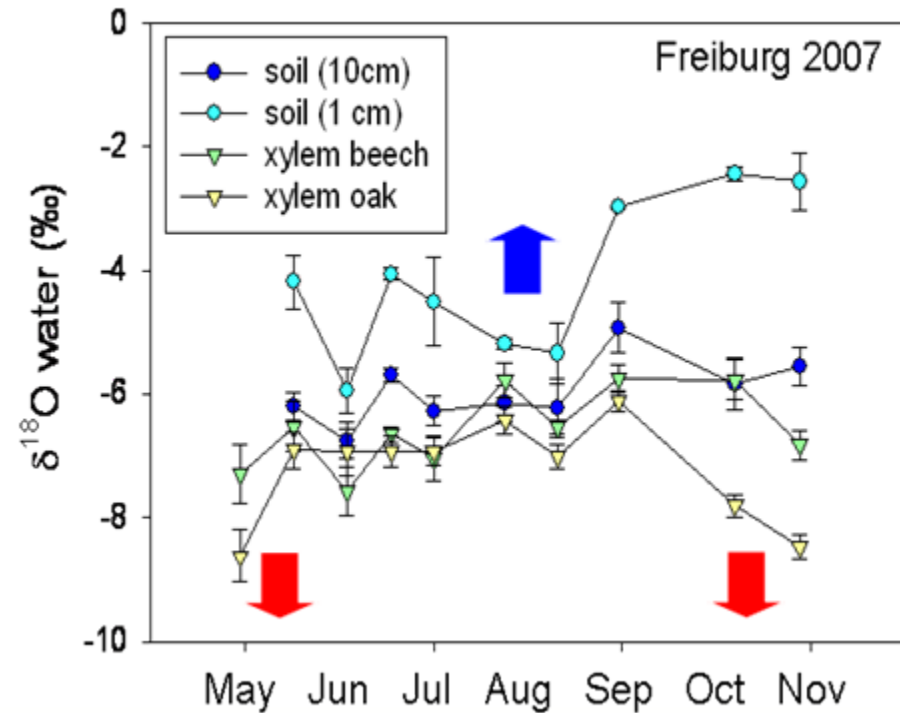


¿variación del xilema = variación fuente?



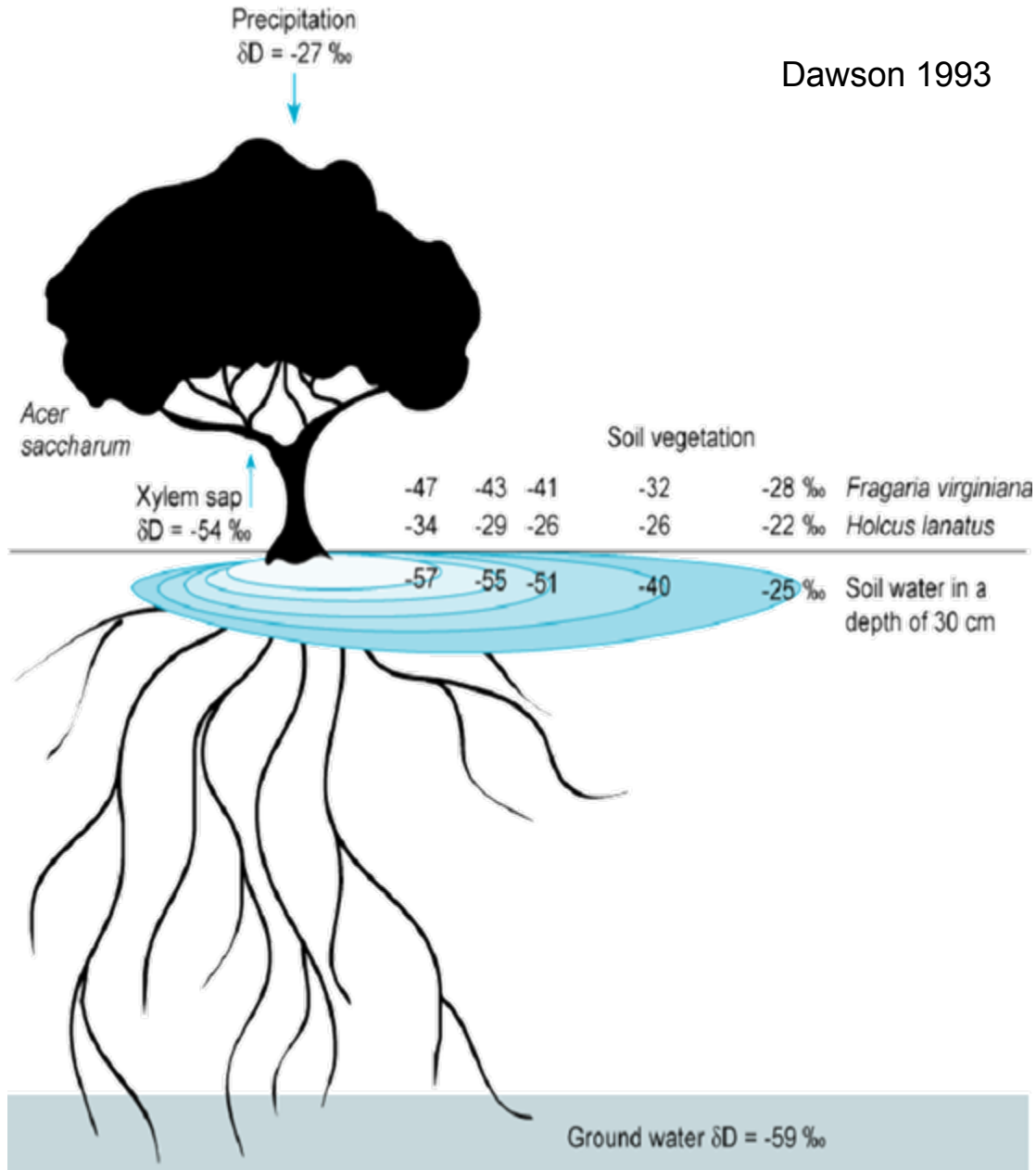
**Divergencia entre variación
meteórica y valores del xilema**

Cambios estacionales en el patrón de
extracción de agua



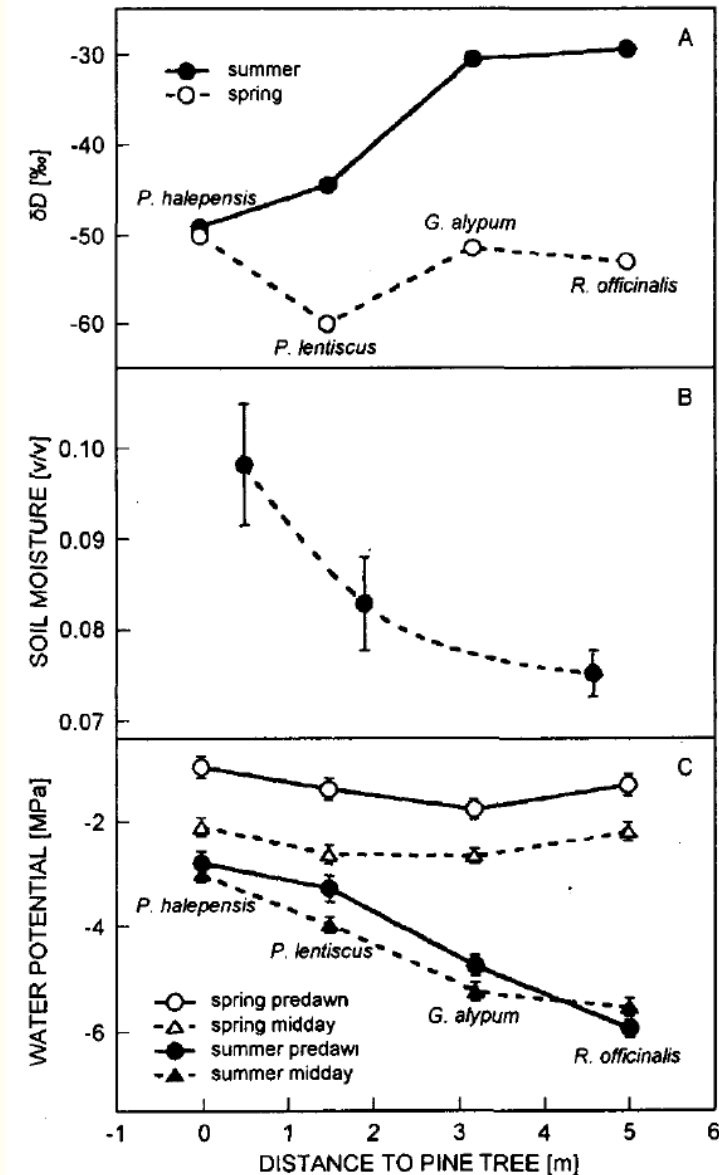
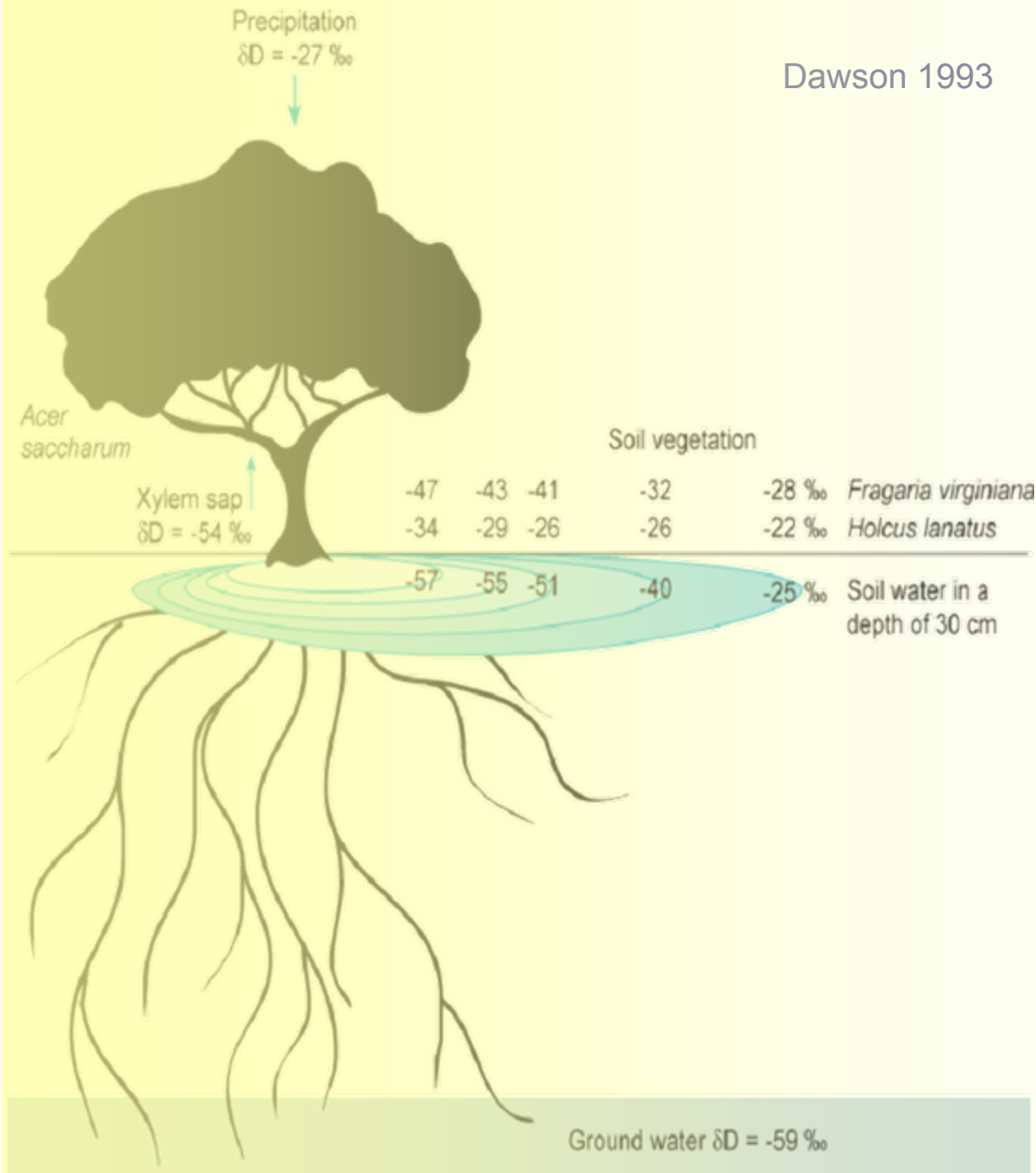
Relaciones inter-específicas: *hydraulic lift*

Dawson 1993



Relaciones inter-específicas: *hydraulic lift*

Dawson 1993

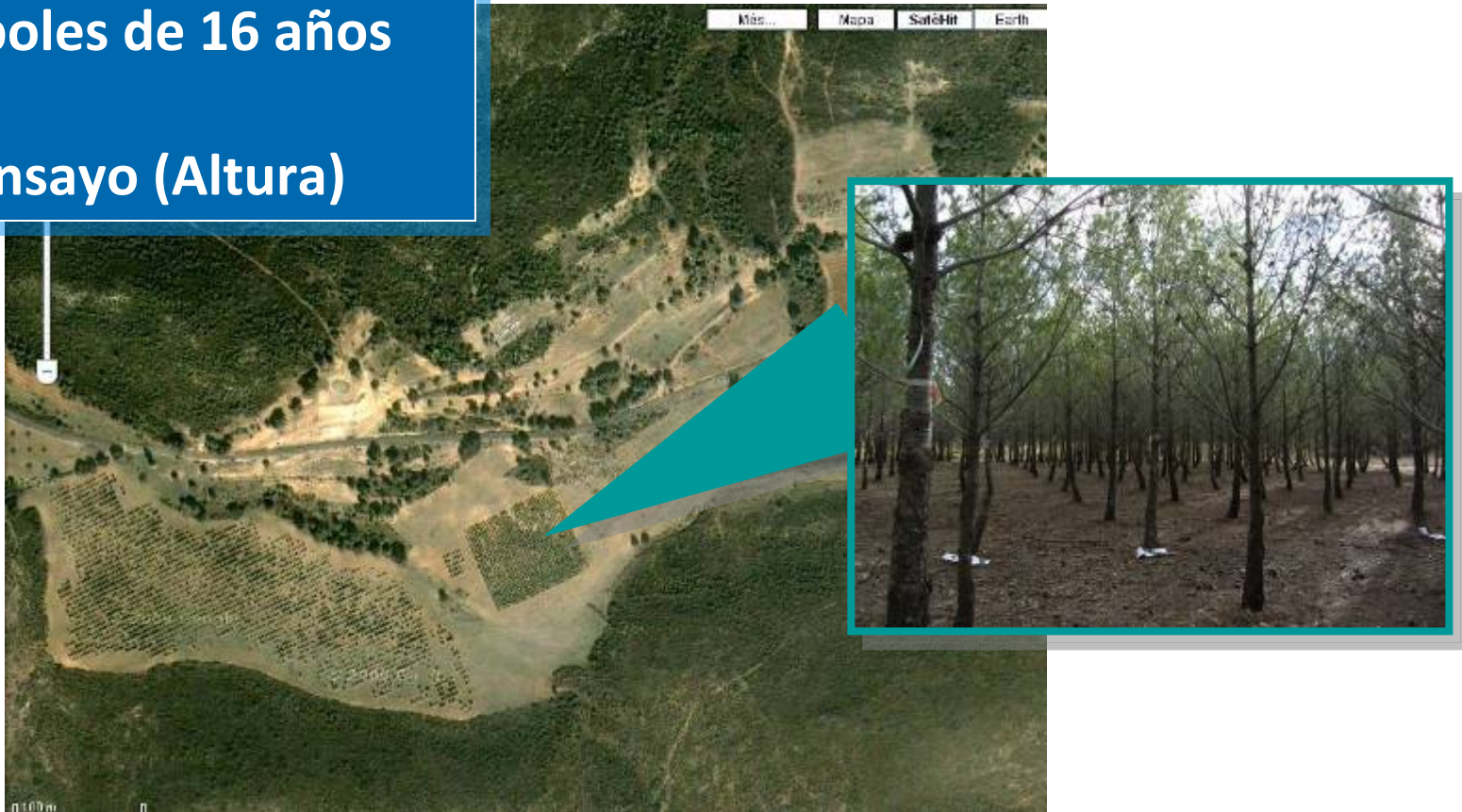


Filella & Peñuelas 2003

Variación intraespecífica en uso de agua

56 poblaciones
Árboles de 16 años

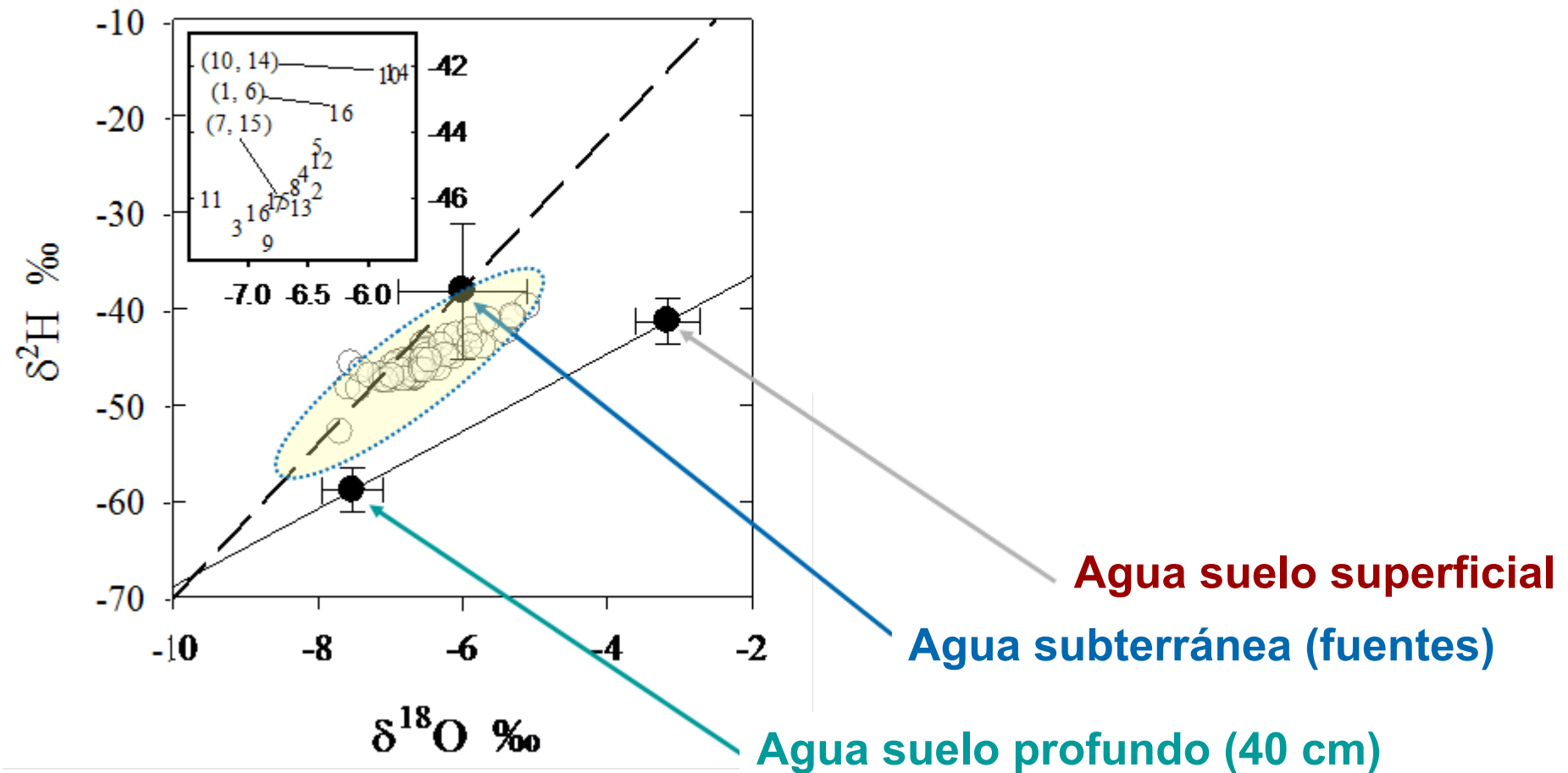
1 ensayo (Altura)



Voltas *et al.* 2015 *New Phytologist*

Variación intraespecífica en uso de agua

Sequía estival (Julio)



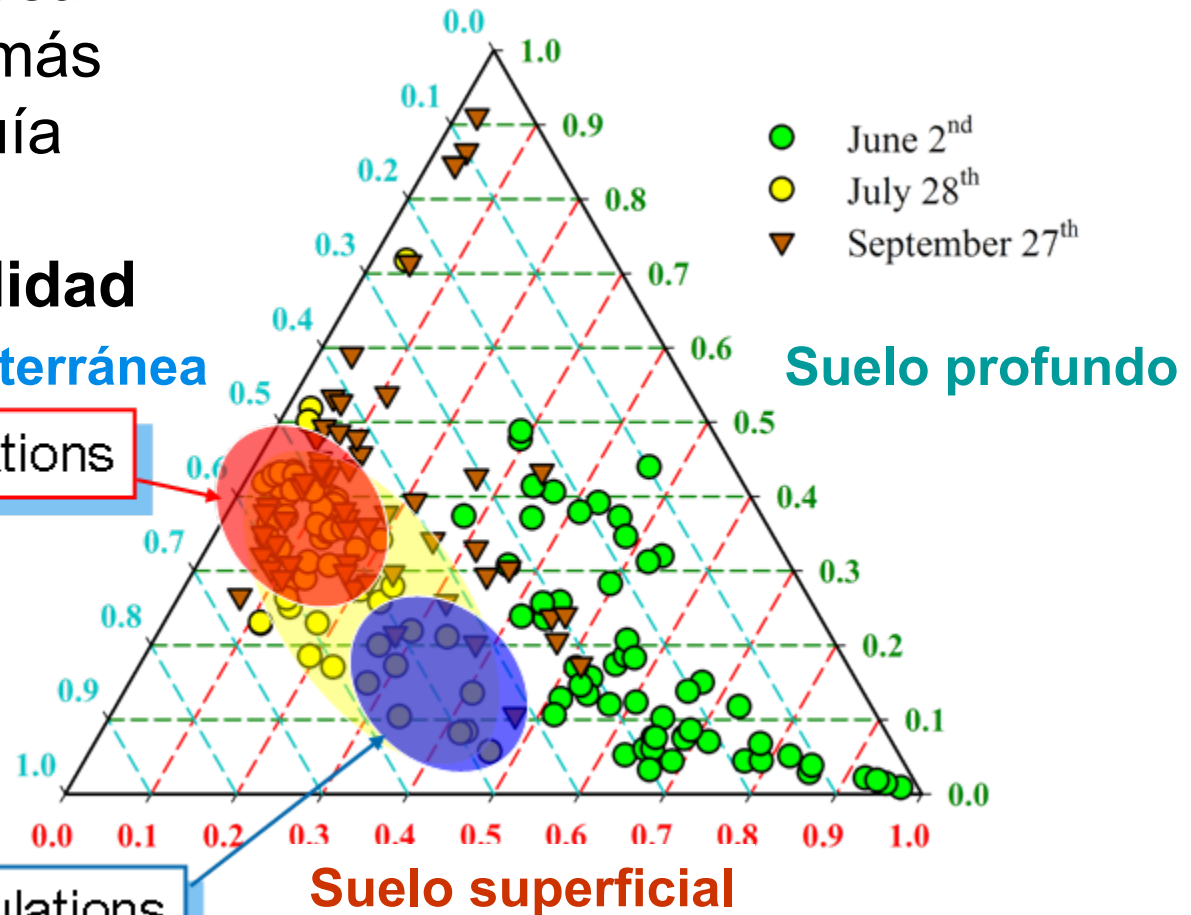
Variación intraespecífica en uso de agua

En la **estación seca**
Las poblaciones más
adaptadas a sequía
obtienen agua
a **mayor profundidad**

Agua subterránea

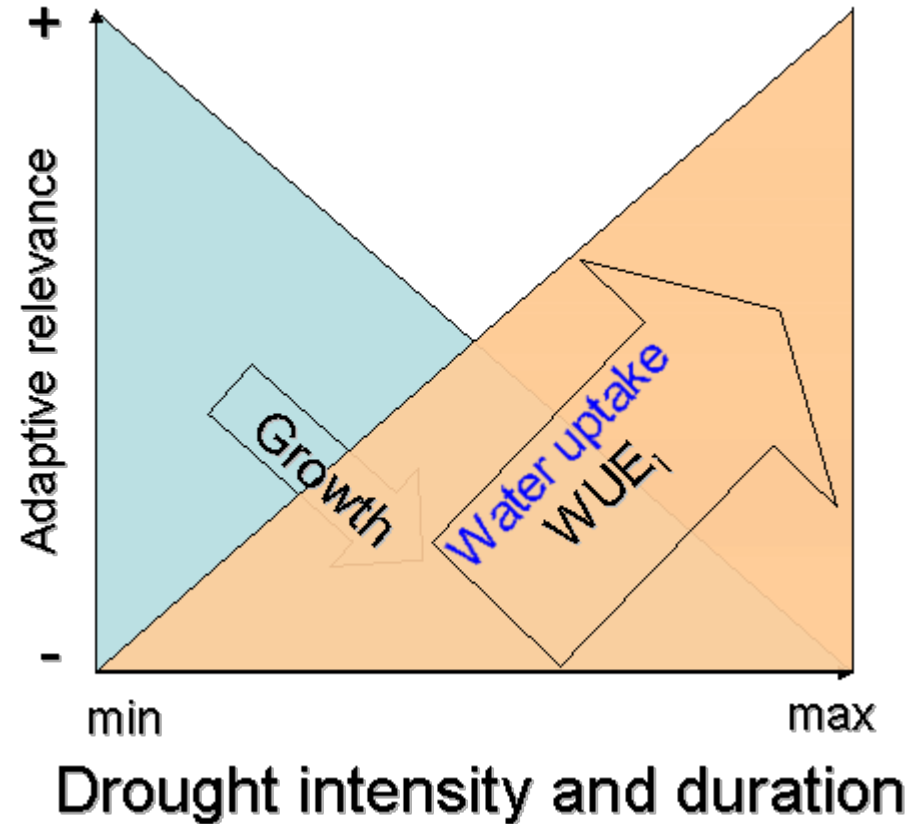
"Dry" populations

"Wet" populations



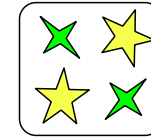
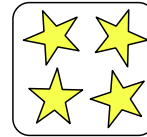
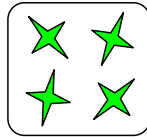
Variación intraespecífica en uso de agua

	Mésico	Xérico
EUA	-	++
Obtención agua	-	++
Altura planta	++	-
tallo / raiz	++	-



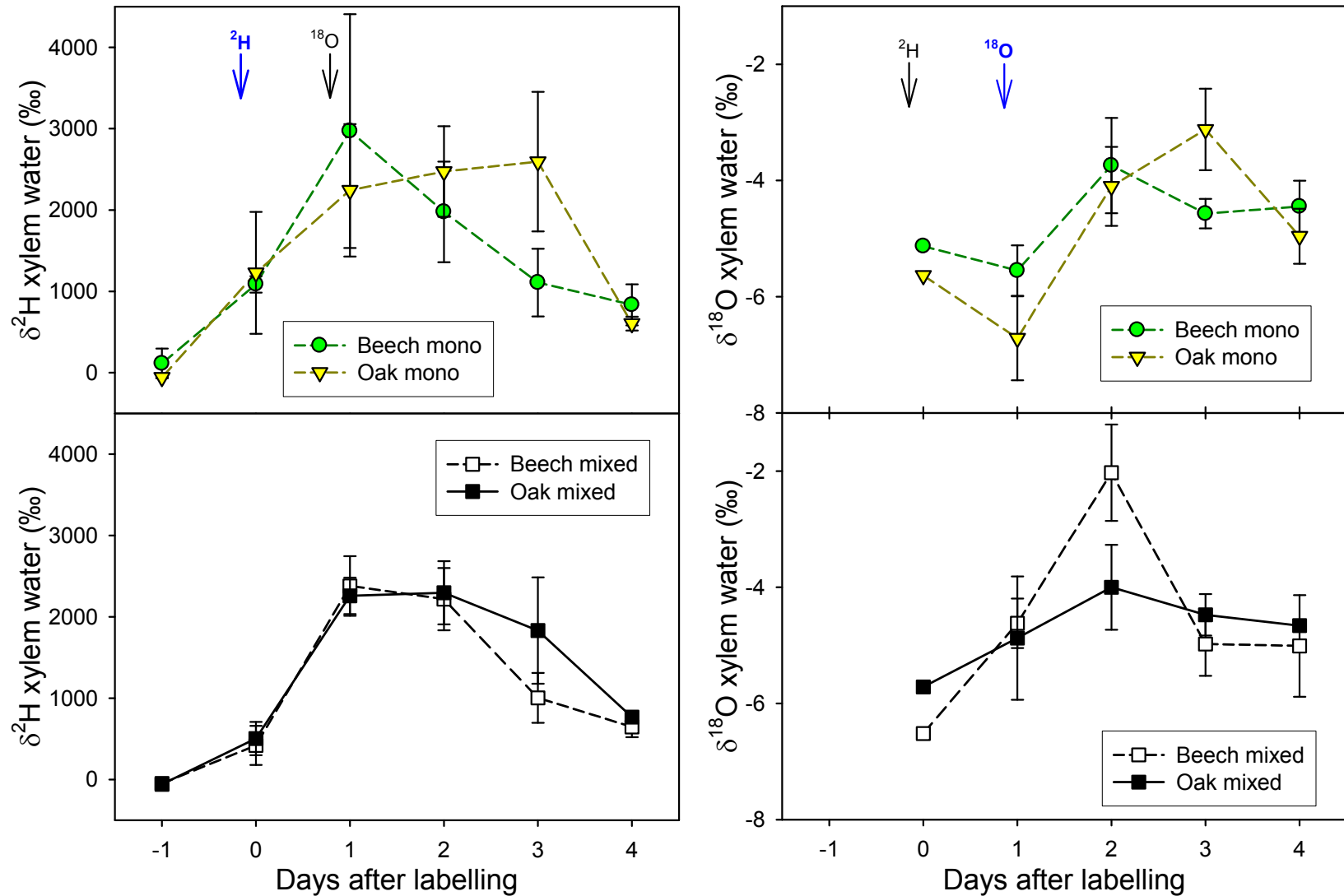
Marcadores isotópicos (pulse labelling)

- 2.5 years-old seedlings *Fagus sylvatica* and *Quercus petraea*
- Drought conditions prior to labeling
- 4 plants per pot (36 x 30 x 20 cm)
- 3 combinations: beech monoculture, oak monoculture, beech-oak mixed



- Double water labelling:
 - 1) low intensity (2H) 2 mm/h
to fill up meso- and micro-pores
 - 2) high intensity (18O) 30 mm/h
to drain through macro-pores

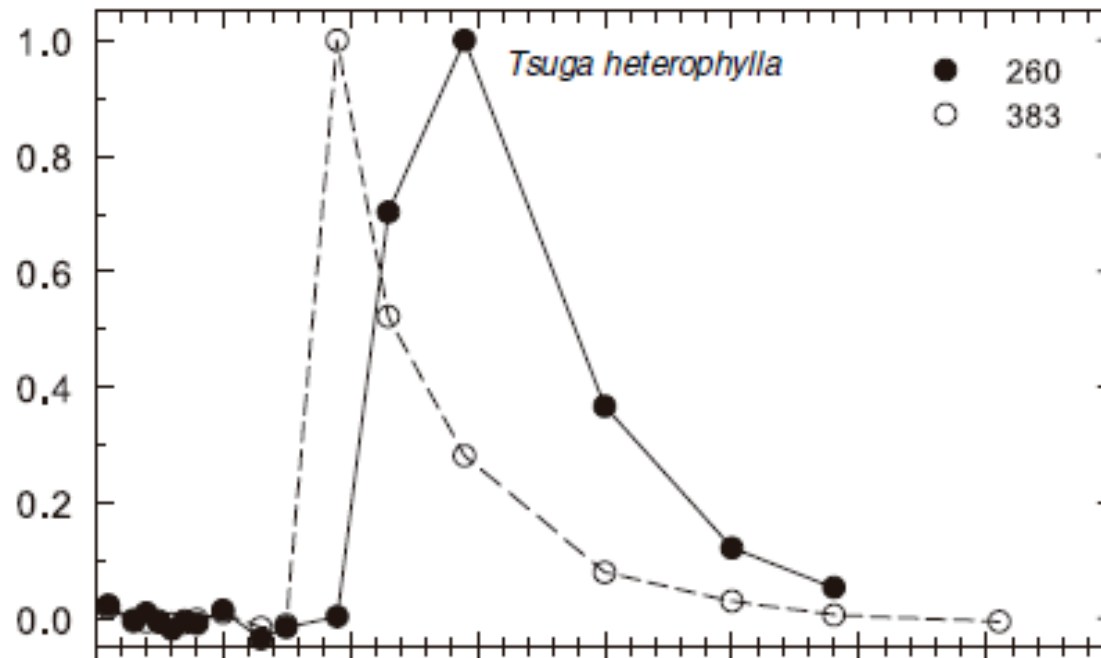
Marcadores isotópicos (pulse labelling)



Marcado aparece más tarde en robles >> menos transpiración

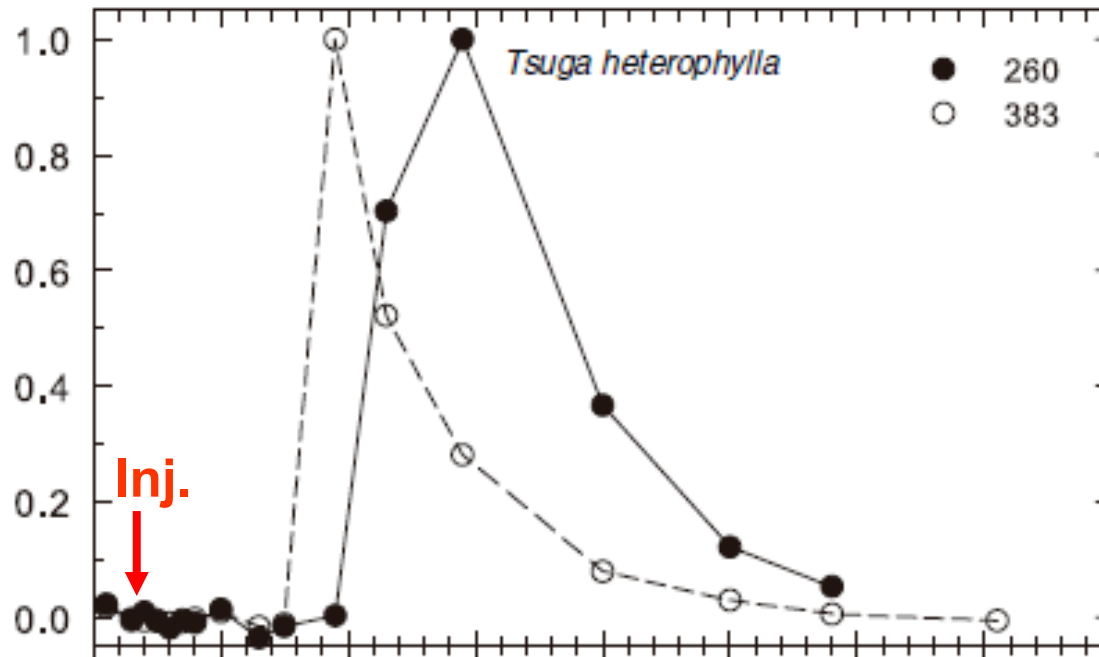
Medida de transpiración por “dilución de traza”

Meinzer et al. 2006



Medida de transpiración por “dilución de traza”

Meinzer et al. 2006

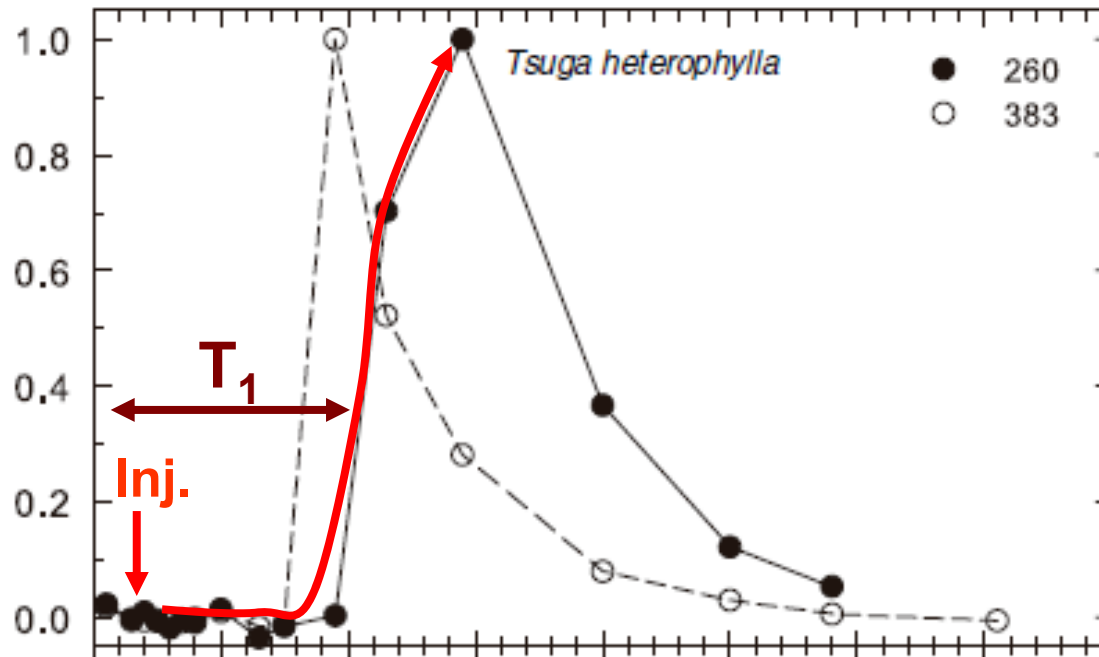


Principio básico:

- Inyección en el tronco (agua Deuterada, 99.9% D₂O)

Medida de transpiración por “dilución de traza”

Meinzer et al. 2006

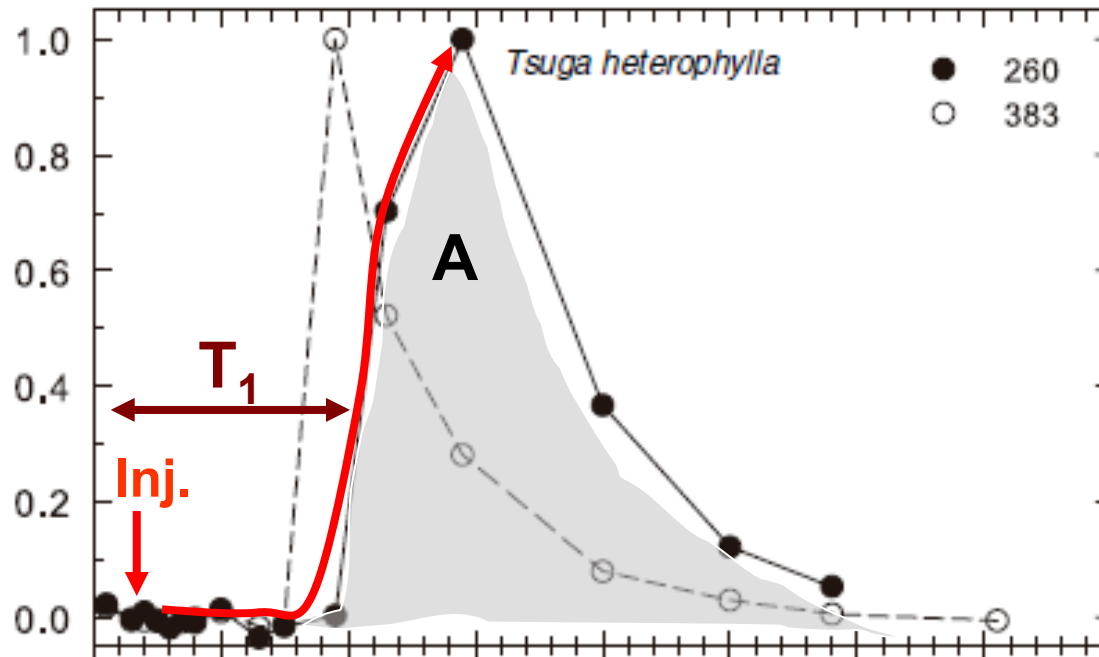


Principio básico:

- Inyección en el tronco (agua Deuterada, 99.9% D₂O)
- Parámetros del pico:
 - T_1 : tiempo hasta máximo: velocidad de transpiración

Medida de transpiración por “dilución de traza”

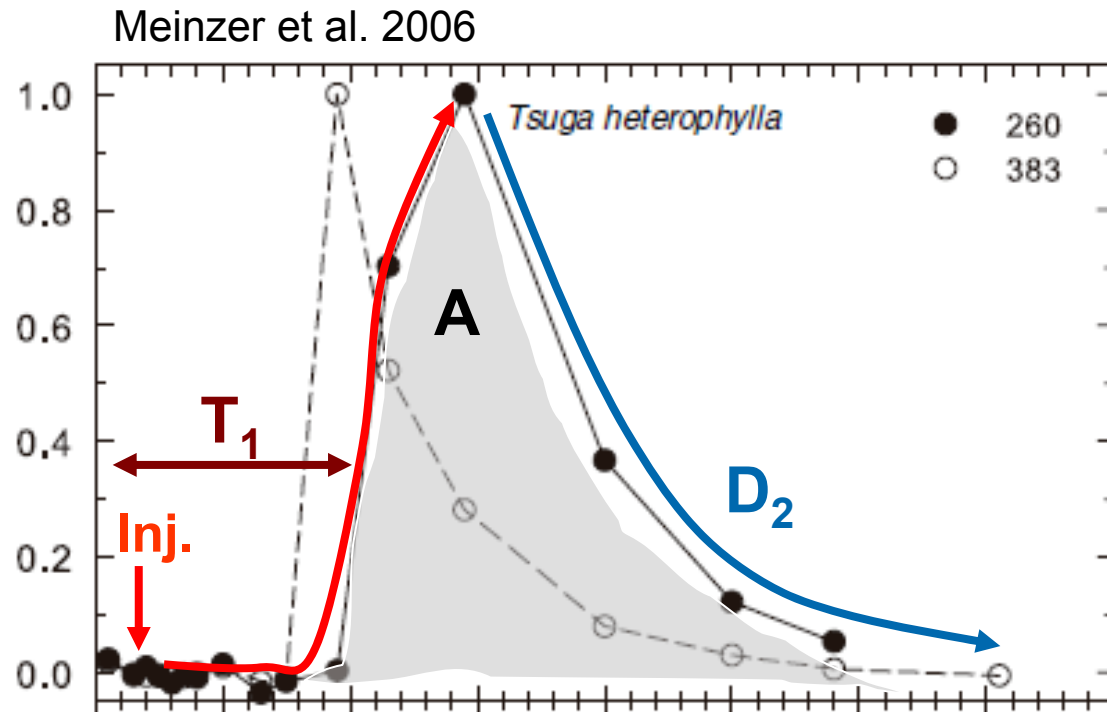
Meinzer et al. 2006



Principio básico:

- Inyección en el tronco (agua Deuterada, 99.9% D_2O)
- Parámetros del pico:
 - T_1 : tiempo hasta máximo: velocidad de transpiración
 - A : área pico: dilución de traza = uso de agua

Medida de transpiración por “dilución de traza”



Principio básico:

- Inyección en el tronco (agua Deuterada, 99.9% D₂O)
- Parámetros del pico:
 - **T₁**: tiempo hasta máximo: velocidad de transpiración
 - **A**: área pico: dilución de traza = uso de agua
 - **D₂**: decaimiento exponencial = tiempo de residencia

Medida de transpiración por “dilución de traza”

Plantones “cedro japonés” (*Cryptomeria japonica* D. Don)

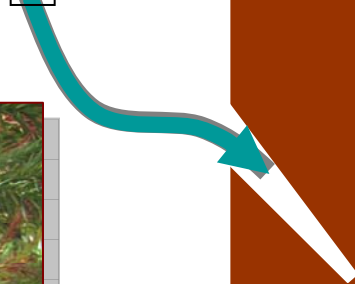
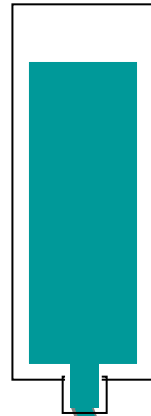
transpiración

Recolección
Agua transpirada
(1 semana
8 muestreos)

Agua suelo

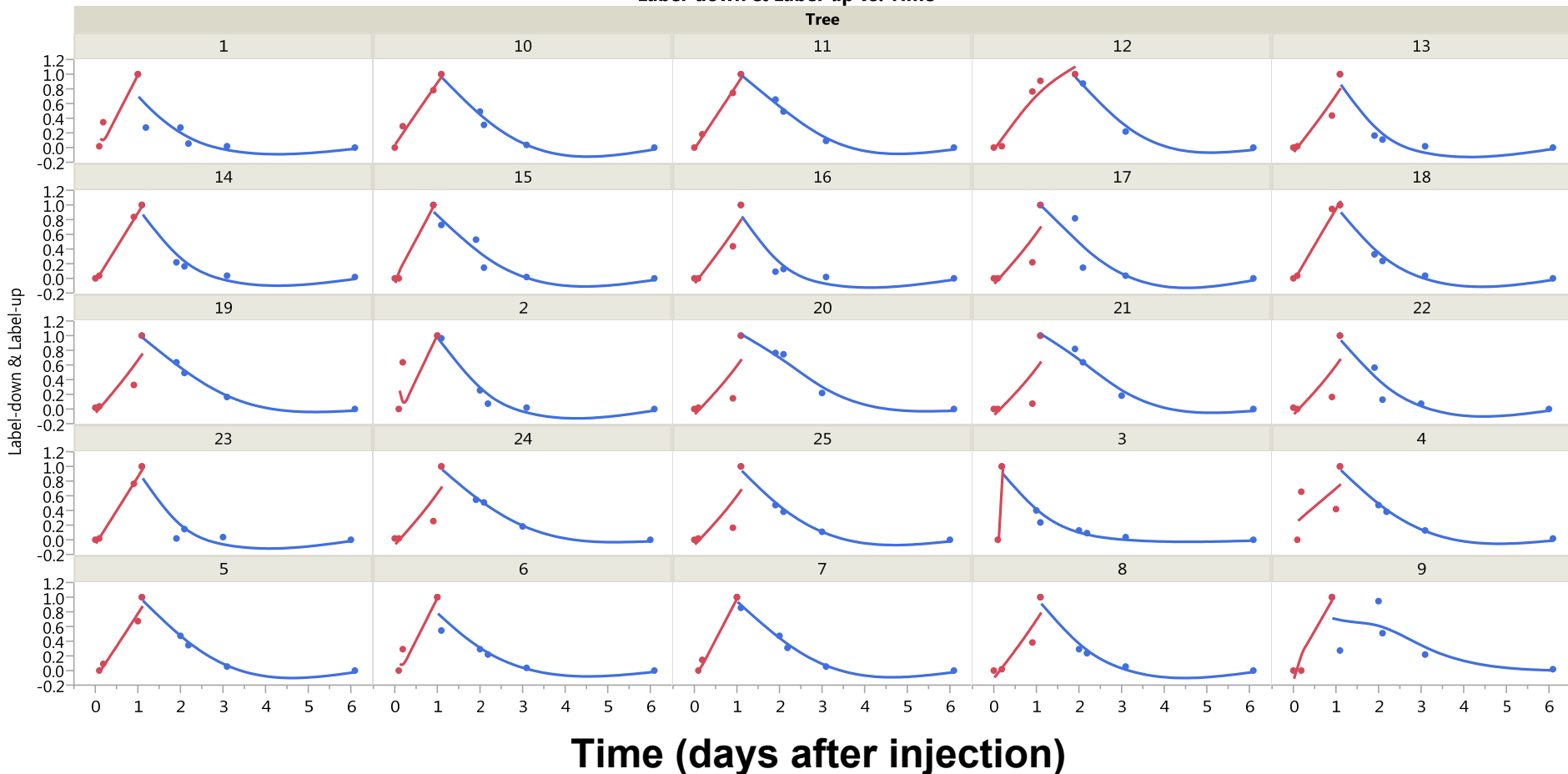


Inyección de traza
(D_2O)



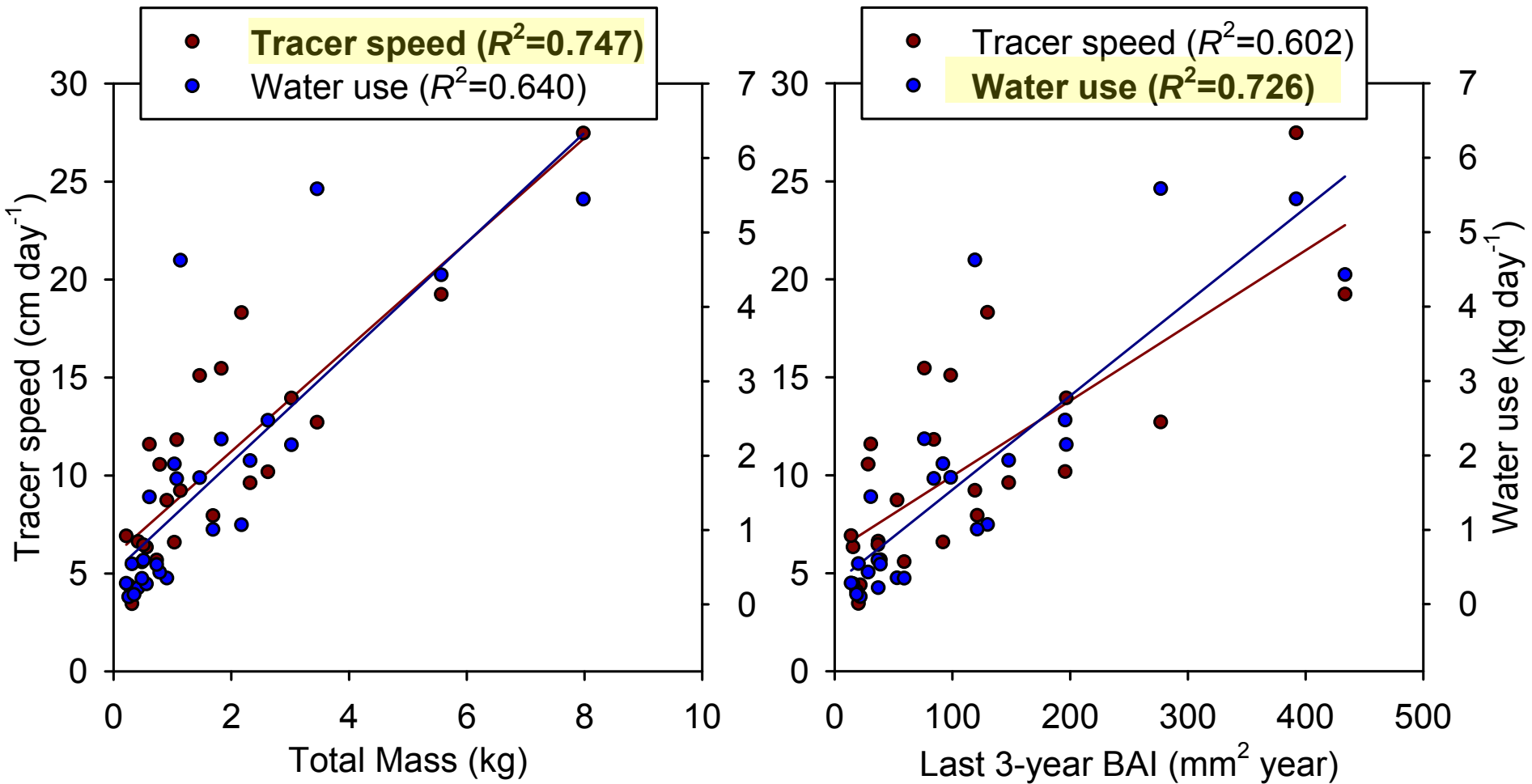
Medida de transpiración por “dilución de traza”

Standardized (0-1) tracer peak over time of all individuals measured



- Traza aparece en 3-6h, máximo en 24-28h
- Señal desaparece en aprox. 1 semana

Medida de transpiración por “dilución de traza”



- Velocidad relacionada con tamaño del árbol (masa total)
- Uso de agua (caudal) relacionado con tasa de crecimiento

Ideas principales

1) Ciclo hidrológico da lugar a fuentes de agua con distintos valores

- evaporación / condensación

2) Agua del xilema refleja el agua obtenida por la planta

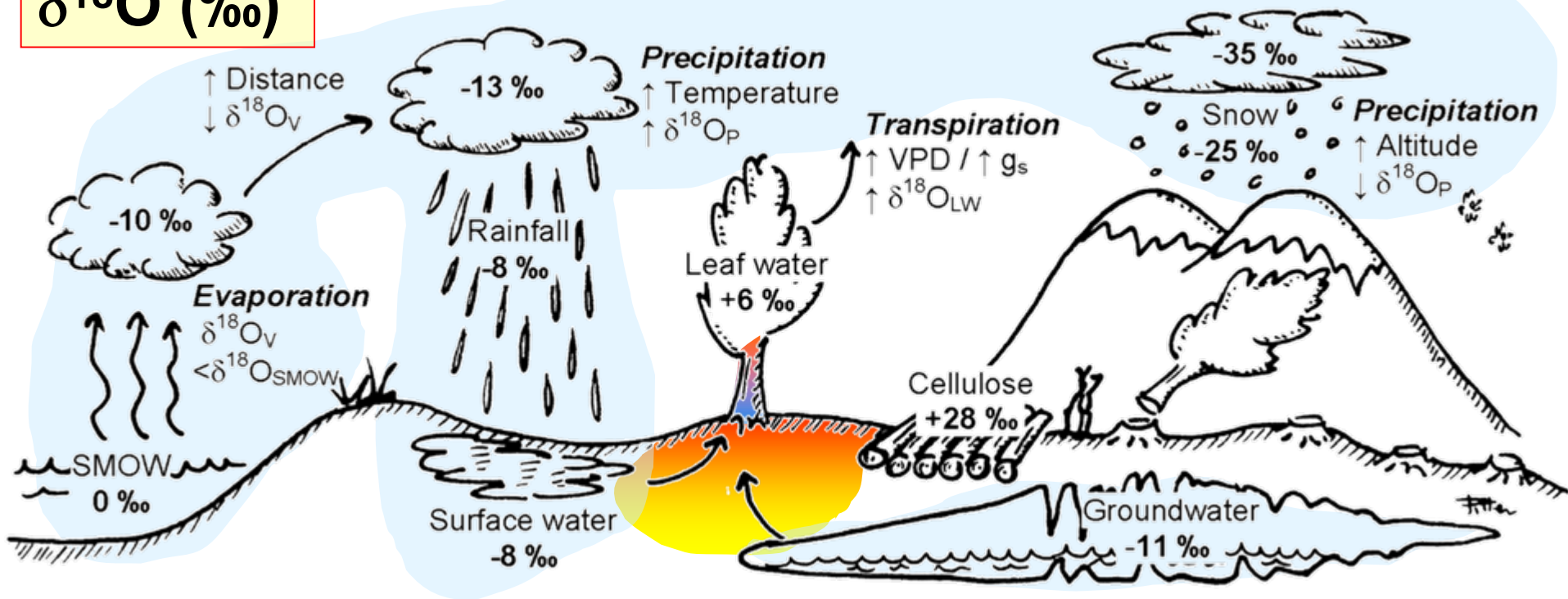
- permite distinguir las posibles fuentes

3) Es un proceso dinámico

- varía entre especies y estacionalmente

Isótopos de oxígeno / hidrógeno

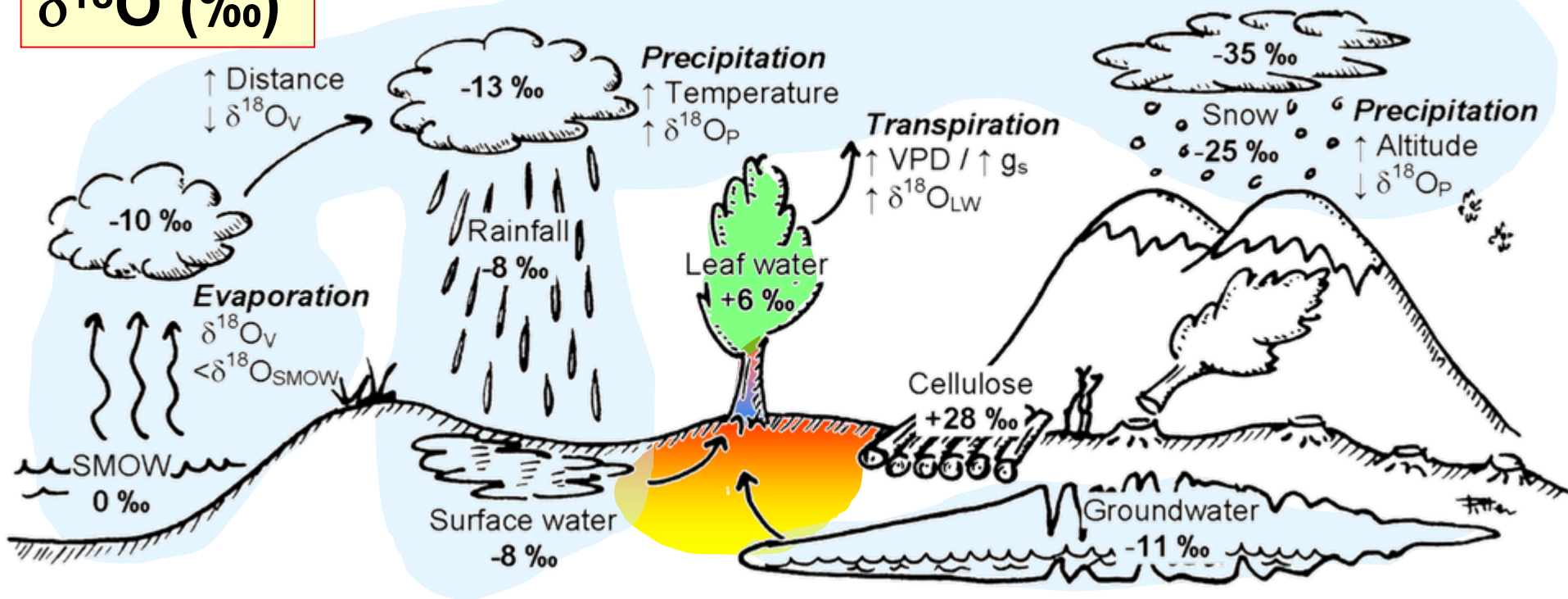
$\delta^{18}\text{O}$ (‰)



- $\delta^{18}\text{O}$ (‰) varía durante el ciclo hidrológico

Isótopos de oxígeno / hidrógeno

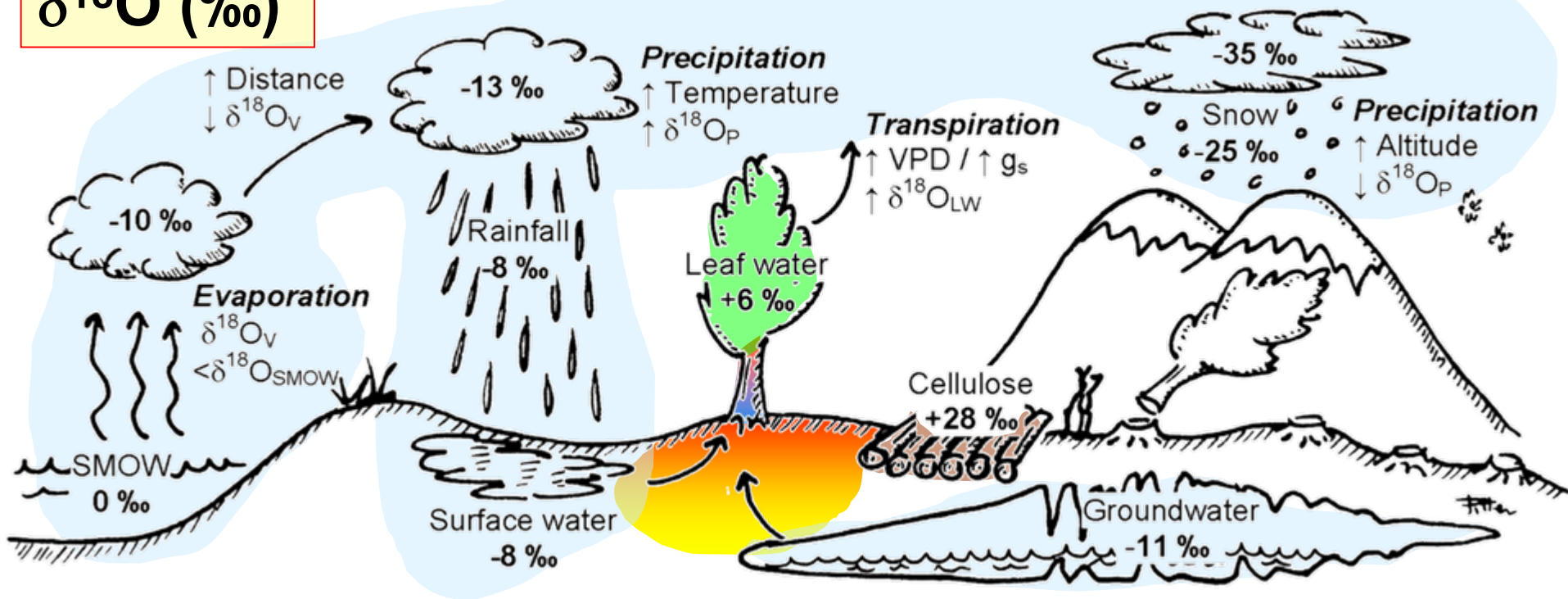
$\delta^{18}\text{O}$ (‰)



- $\delta^{18}\text{O}$ (‰) varía durante el ciclo hidrológico
- $\delta^{18}\text{O}$ (‰) aumenta en la hoja por evaporación
→ **Enriquecimiento isotópico**

Isótopos de oxígeno / hidrógeno

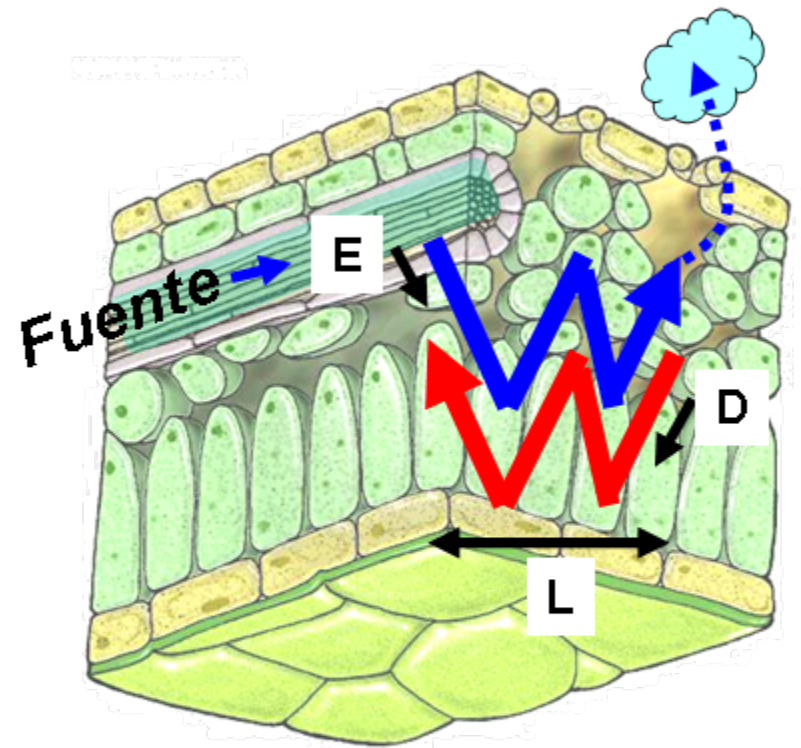
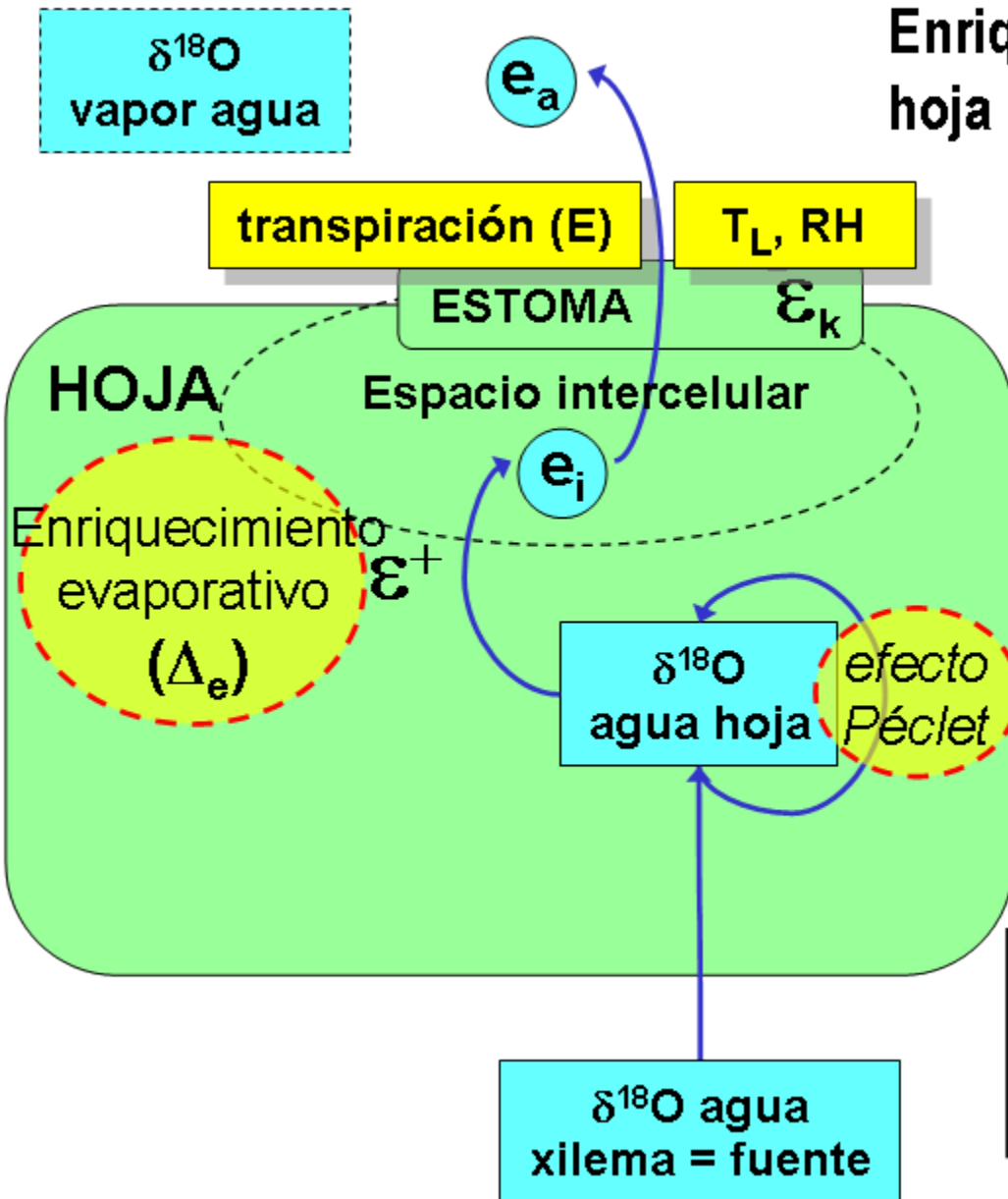
$\delta^{18}\text{O}$ (‰)



- $\delta^{18}\text{O}$ (‰) varía durante el ciclo hidrológico
- $\delta^{18}\text{O}$ (‰) aumenta en la hoja por evaporación
→ **Enriquecimiento isotópico**
- Señal se transfiere a la materia orgánica

Enriquecimiento isotópico en la hoja

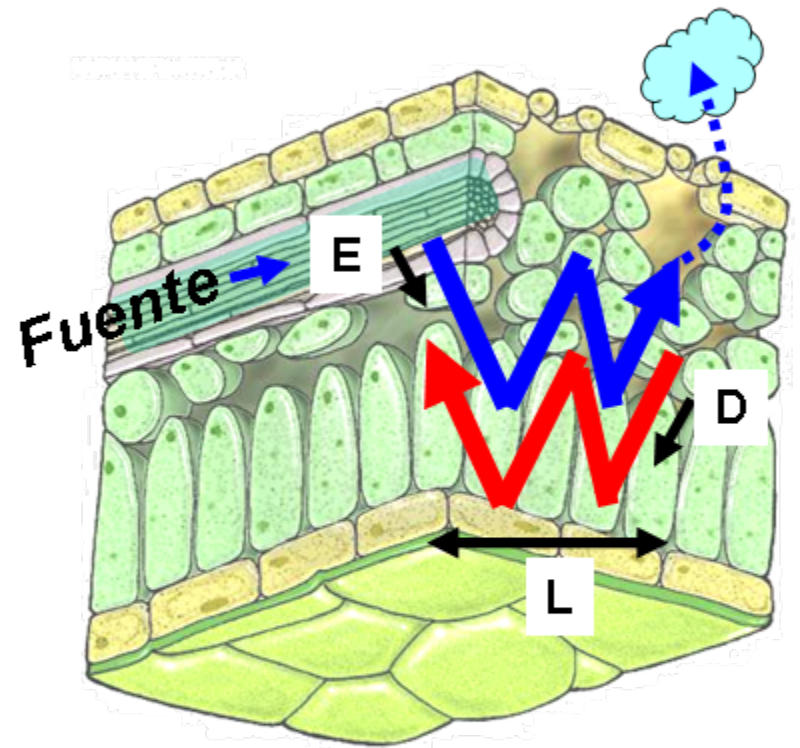
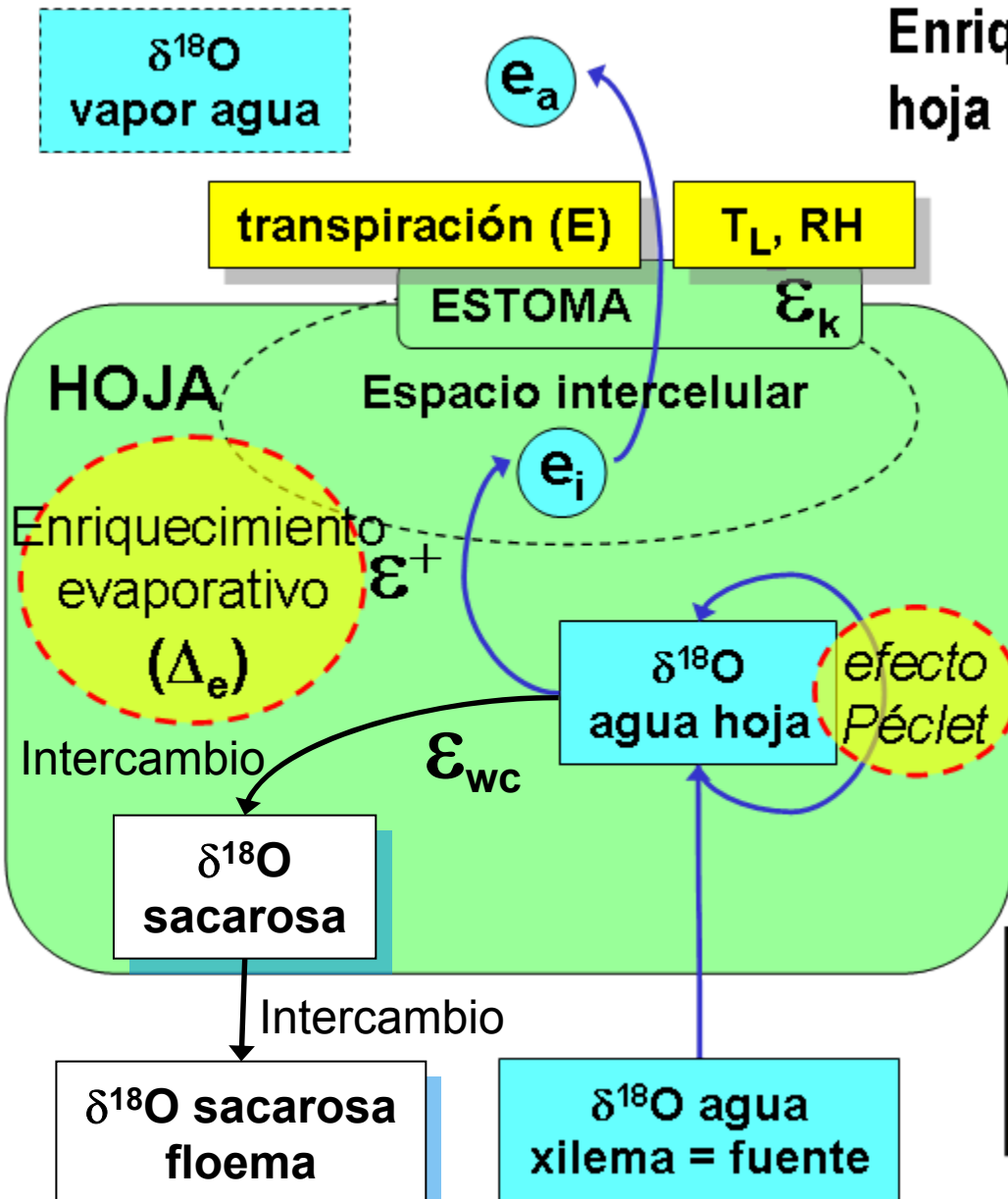
Enriquecimiento isotópico del agua de hoja respecto a la fuente (Δ_L)*



$$\begin{aligned} \uparrow \Delta^{18}\text{O}_L &\approx \downarrow e_a/e_i \approx \uparrow T_L \downarrow \text{RH} \\ \uparrow \Delta^{18}\text{O}_L &\approx \downarrow E \end{aligned}$$

Enriquecimiento isotópico en la hoja

Enriquecimiento isotópico del agua de hoja respecto a la fuente (Δ_L)*



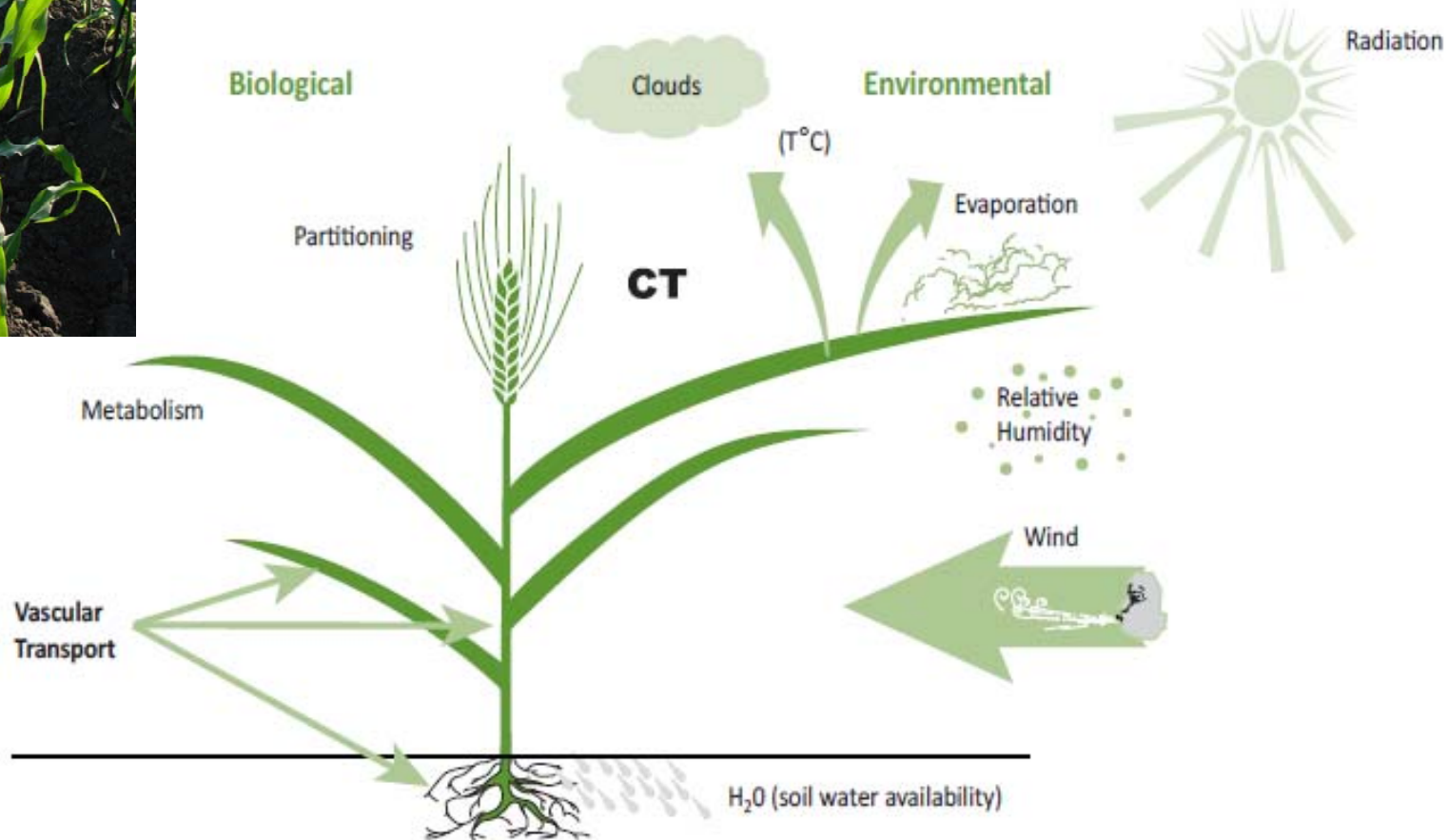
$$\begin{aligned} \uparrow \Delta^{18}\text{O}_L &\approx \downarrow e_a/e_i \approx \uparrow T_L \downarrow \text{RH} \\ \uparrow \Delta^{18}\text{O}_L &\approx \downarrow E \end{aligned}$$

Temperatura foliar y transpiración



Termómetro IR

Temperatura foliar depende del balance entre radiación y enfriamiento por transpiración:
más transpiración, más frío



Reynolds, Pask & Mullan 2012

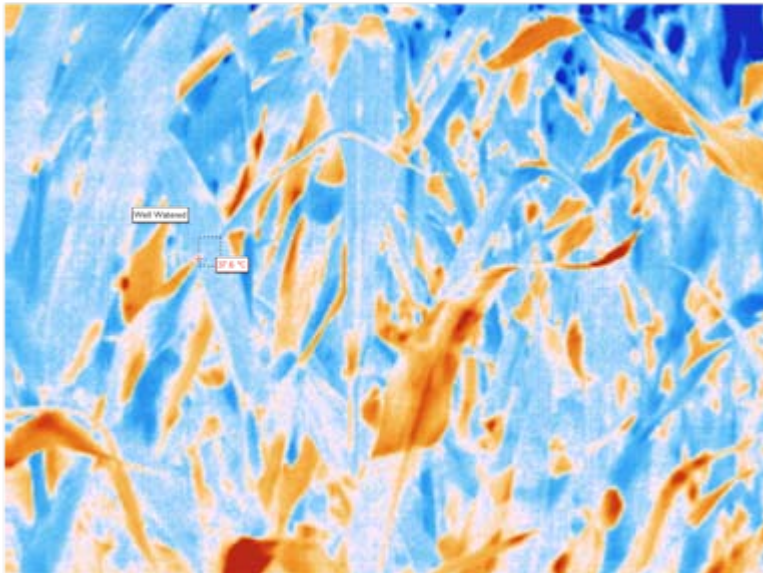
Figure 6.1. Biological (physiological) and environmental factors affecting canopy temperature (Adapted from Reynolds *et al.*, 2001).

Temperatura foliar y transpiración



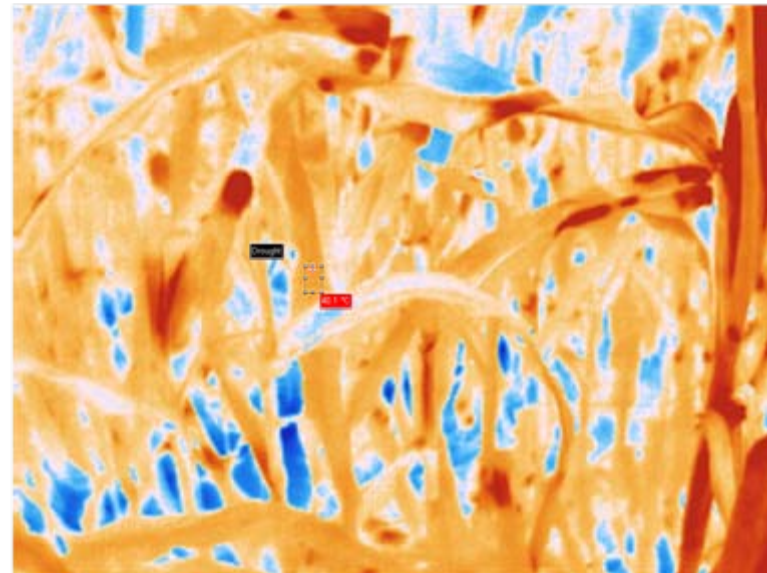
Irrigadas: alta transpiración

$$T_{\text{hoja}} < T_{\text{aire}}$$

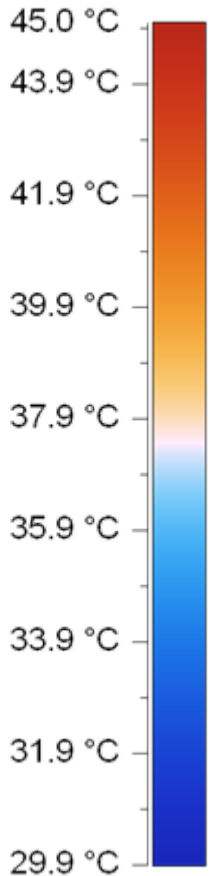


Sequía: baja transpiración

$$T_{\text{hoja}} > T_{\text{aire}}$$



 **DIAS**
Infrared Systems



Temperatura foliar y transpiración

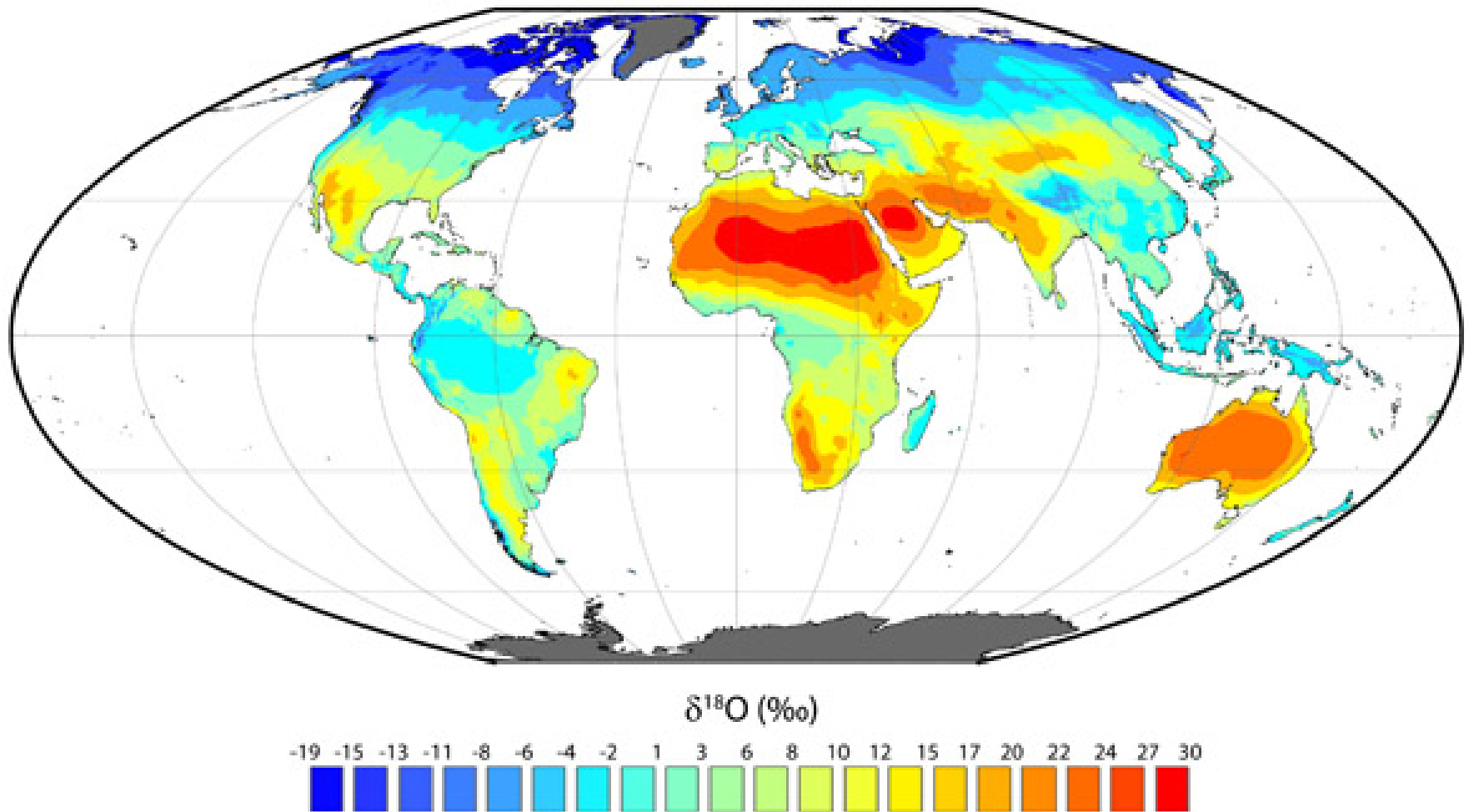
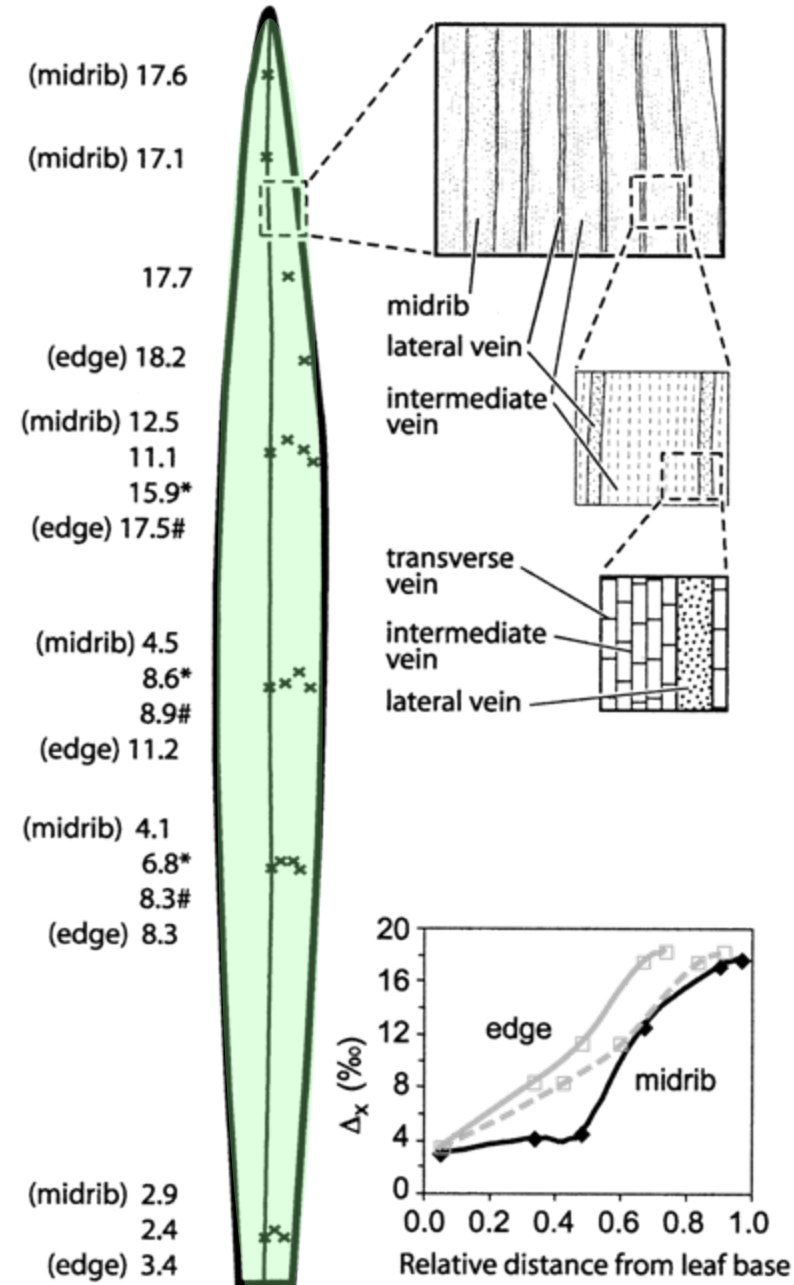


Figure 1. Global mean annual average leaf water $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ isoscapes for the sites of evaporation within leaves (Flat Polar Quartic projection; Two-pool and Péclet models gave similar, less enriched results).

Enriquecimiento progresivo en hojas

- Enriquecimiento ($\Delta^{18}\text{O}$) aumenta de base al ápice
 - $1/K_m$ (tortuosidad) y $\text{RH}\%^1$

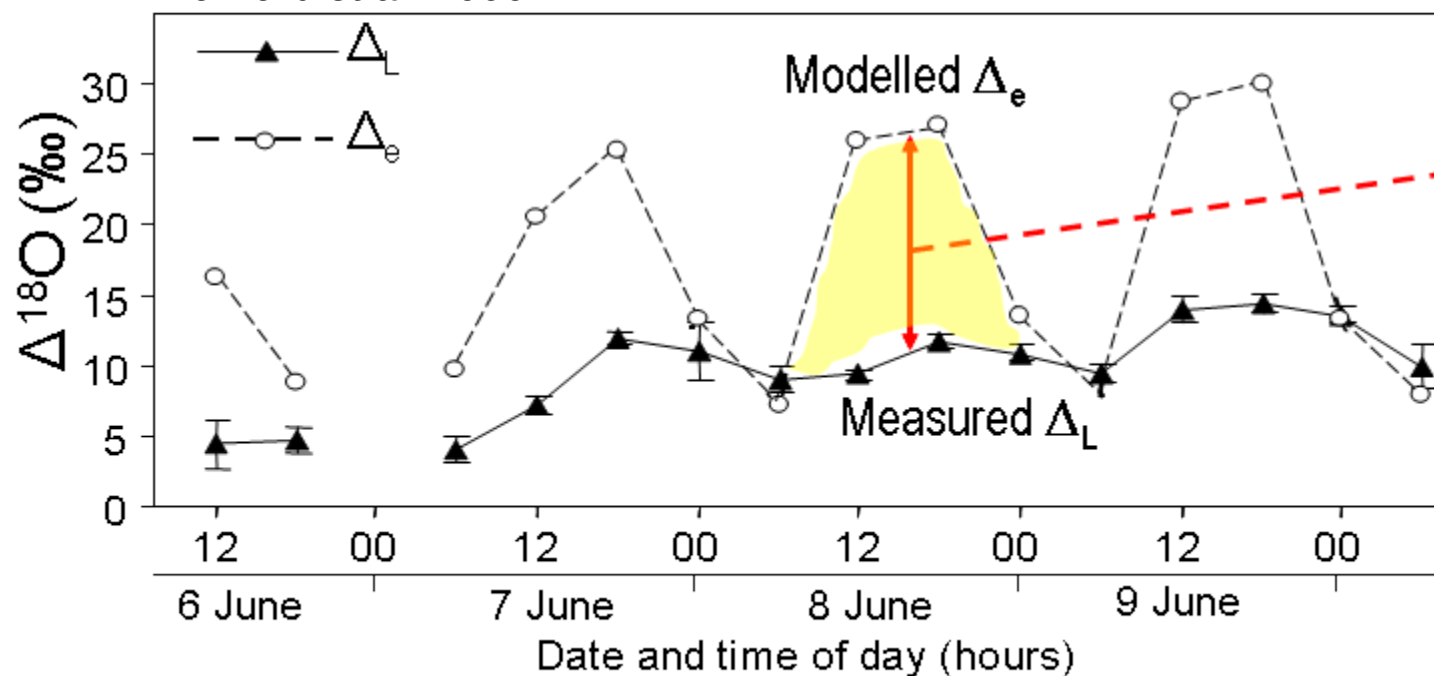


¹Gan et al. (2003); Ogee et al. (2007)

Isótopos de oxígeno y transpiración

- Difference between modelled Δ_e and measured Δ_L has been proposed as a proxy for transpiration rates (Wang and Yakir, 2000)

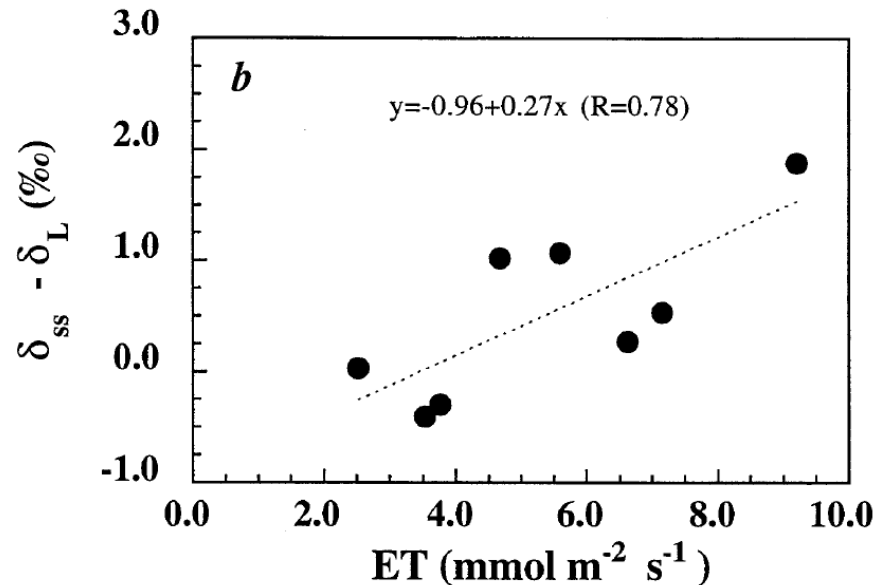
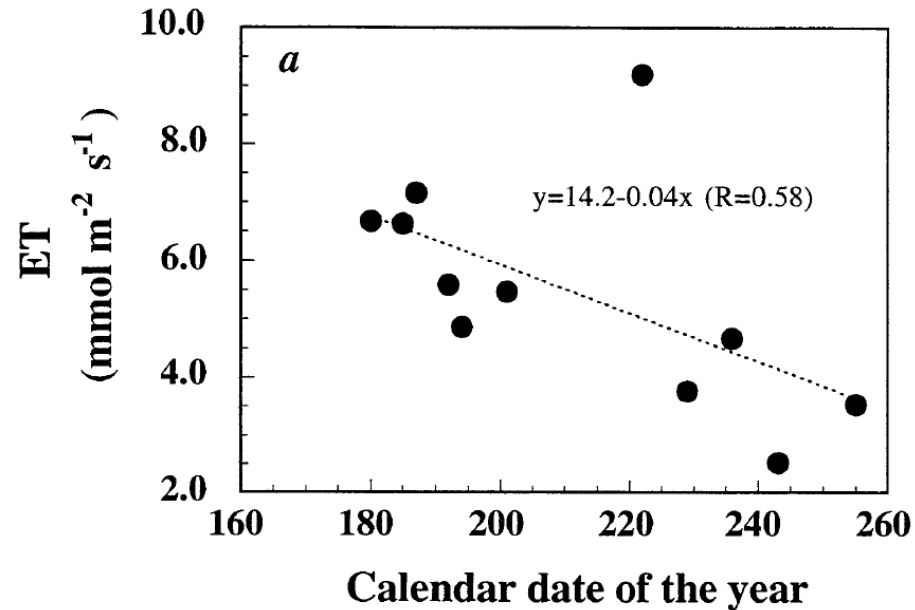
Barnard *et al.* 2006



Due to a
Péclet effect

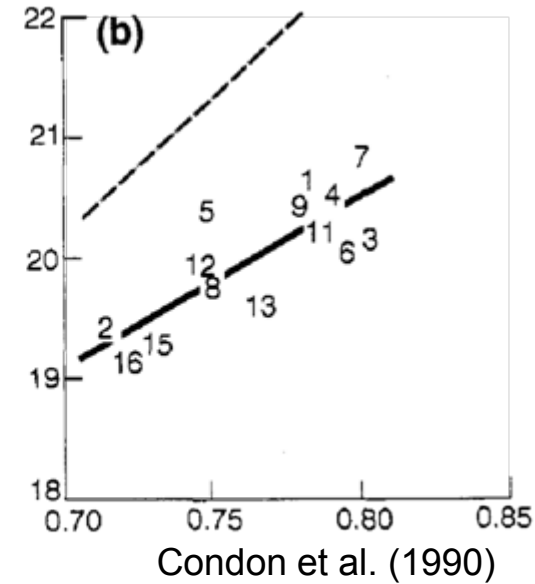
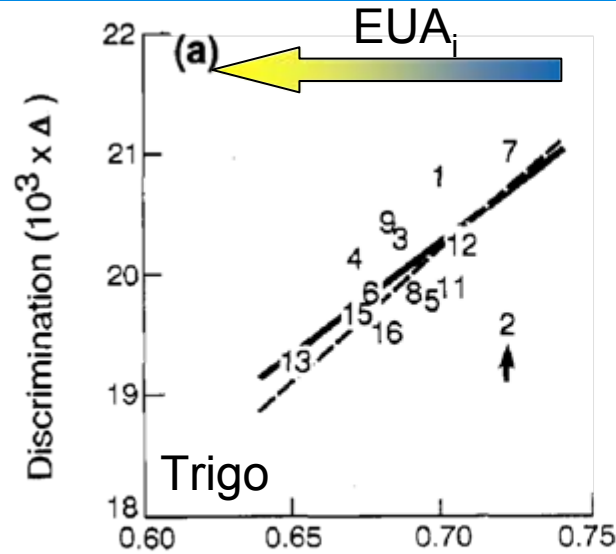
$$\delta p = \frac{E \times L}{C \times D}$$

Relación inversa transpiración y enriquecimiento



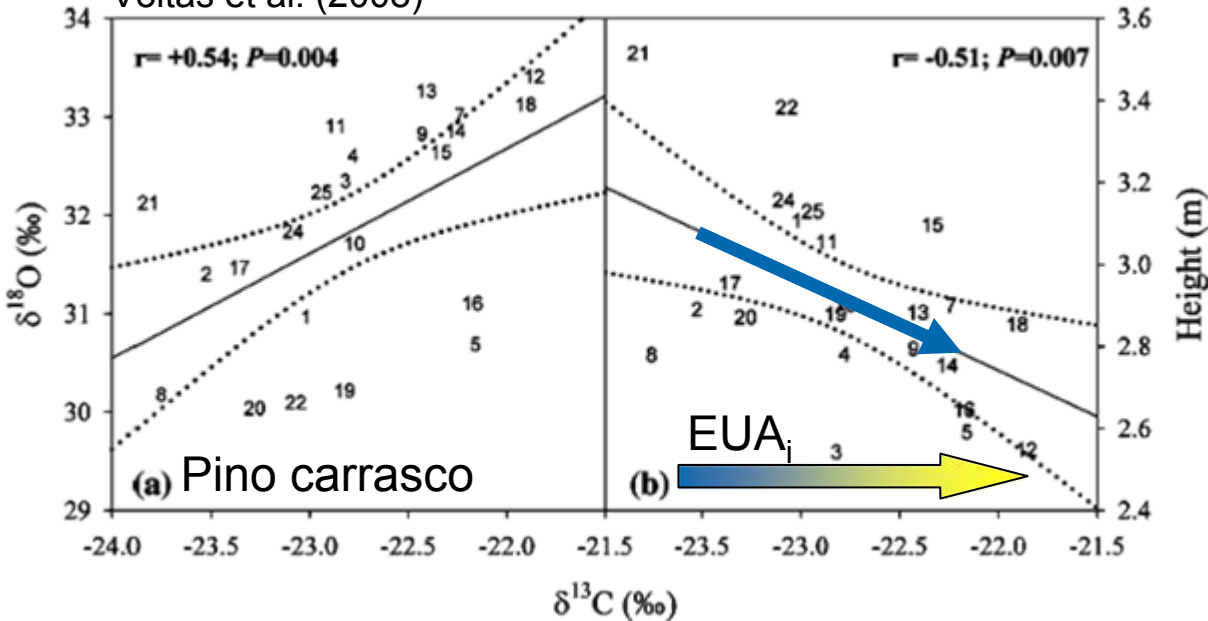
Variación genética en EUA_i

Correlación entre EUA_i y $\Delta^{13}C$ en genotipos de trigo



p_i/p_a Measured in Flag Leaves

Voltas et al. (2008)

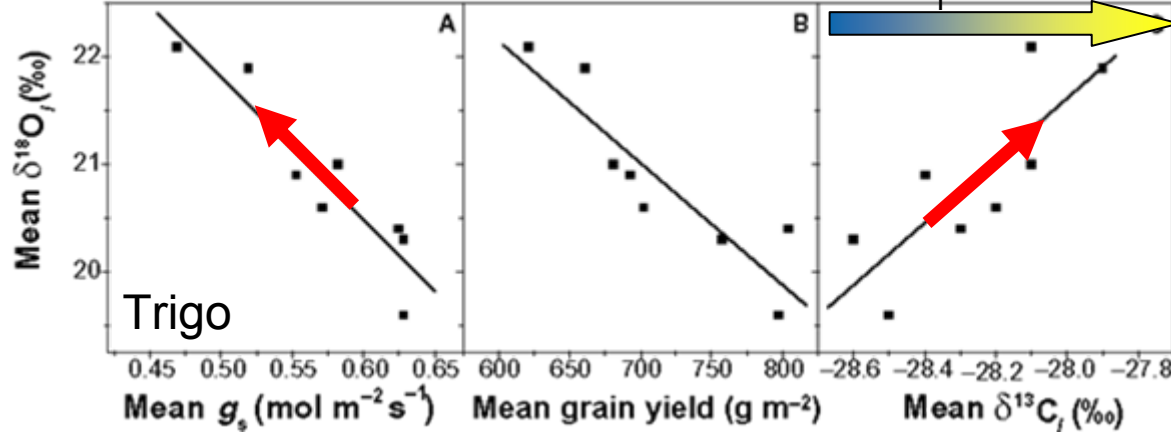


“Trade-off” entre EUA_i y crecimiento en procedencias de pino carrasco



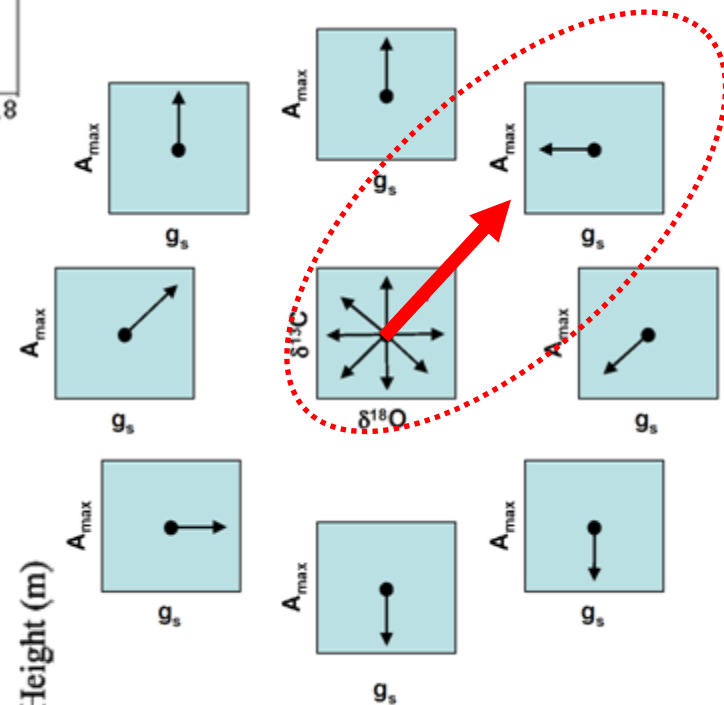
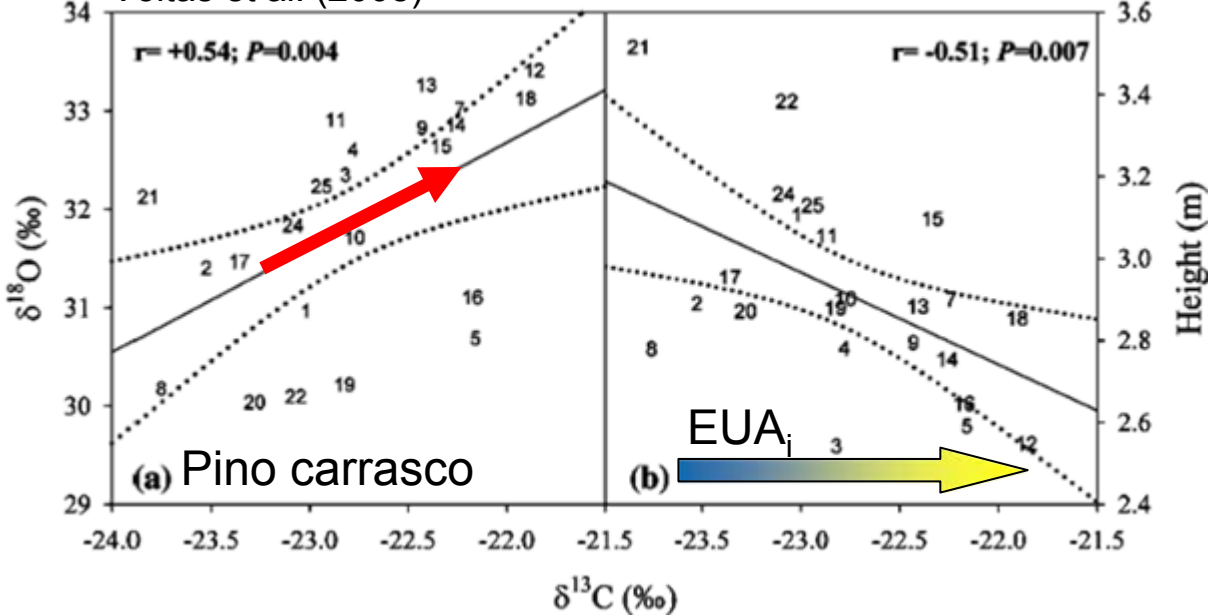
Variación genética en EUA_i

Barbour et al. (2001)



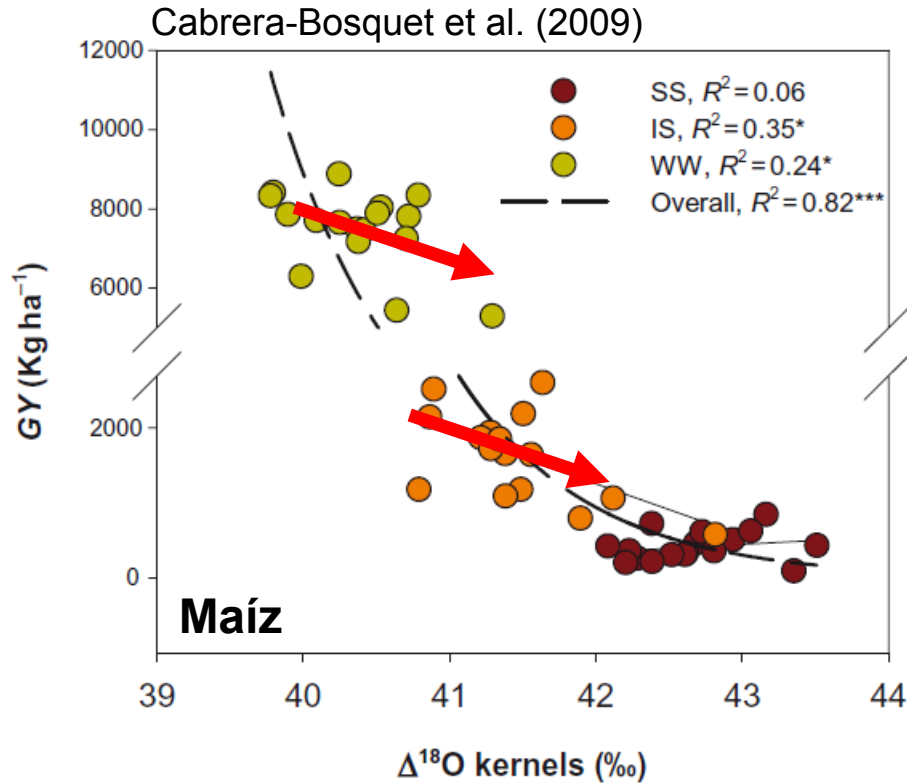
$\delta^{18}O$ separa efecto g_s y A sobre EUA_i

Voltas et al. (2008)



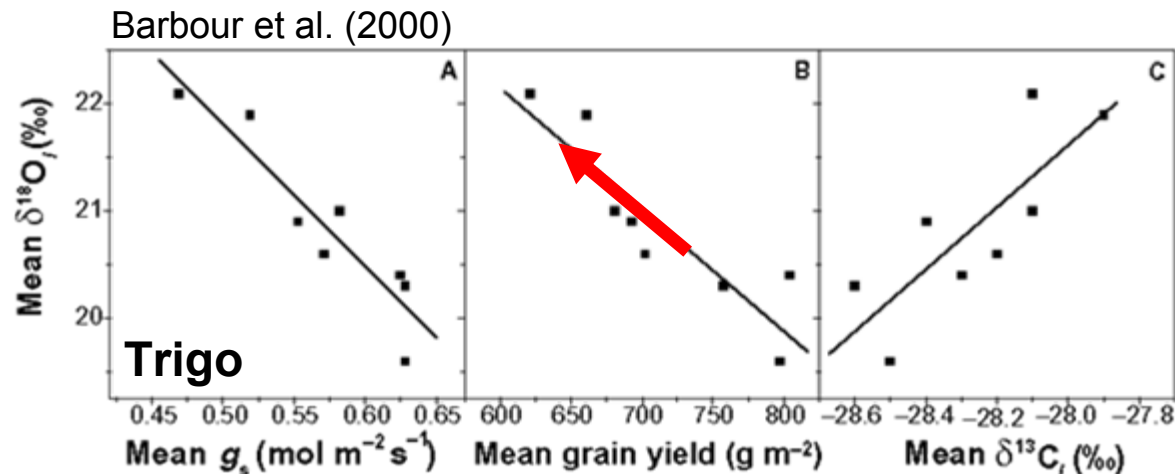
Scheidegger et al. (2000)

Isótopos de oxígeno y productividad: gs/temp



Genotipos con menor $\delta^{18}\text{O}$ tienen mayor rendimiento en ambientes favorables...

...pero no bajo estrés severo



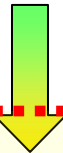
Un largo camino: relaciones fuente - sumidero

Tiempo

Asimilados



Azúcares hoja

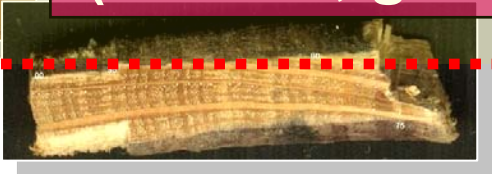


Floema



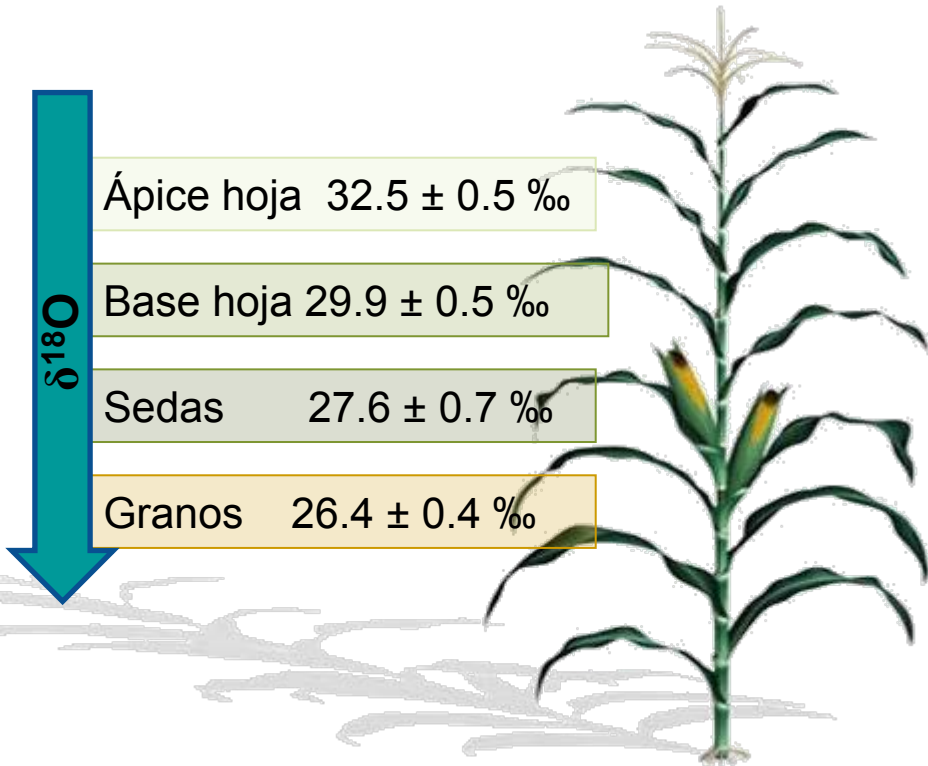
**Tejidos sumidero
(madera, granos)**

**Relaciones
fuente-sumidero**



Importante: distintos procesos alteran la señal

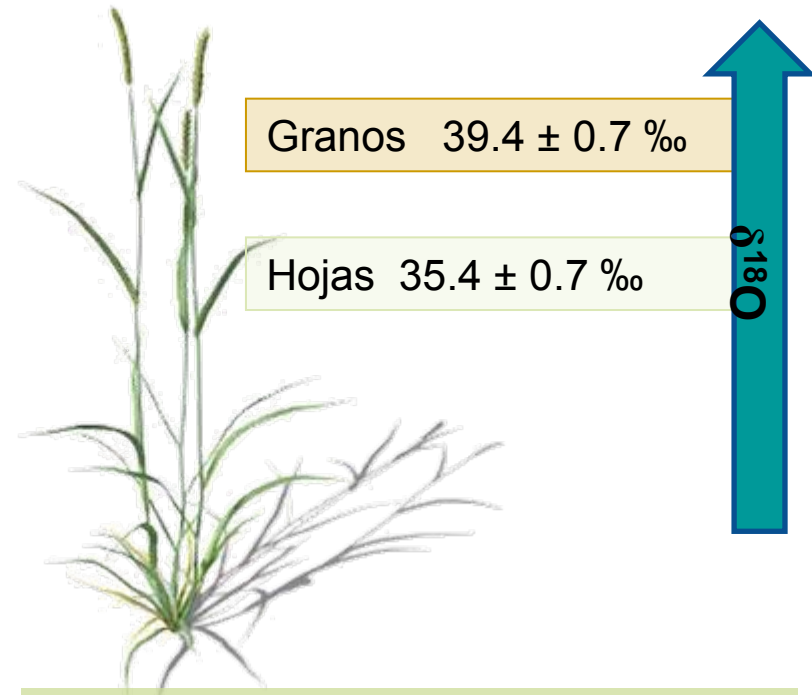
Maíz (Sánchez-Bragado et al., 2016)



Maíz: Descenso en $\delta^{18}\text{O}$ de las hojas a las sedas y granos

Intercambio de oxígeno con el agua durante la carga/descarga del floema

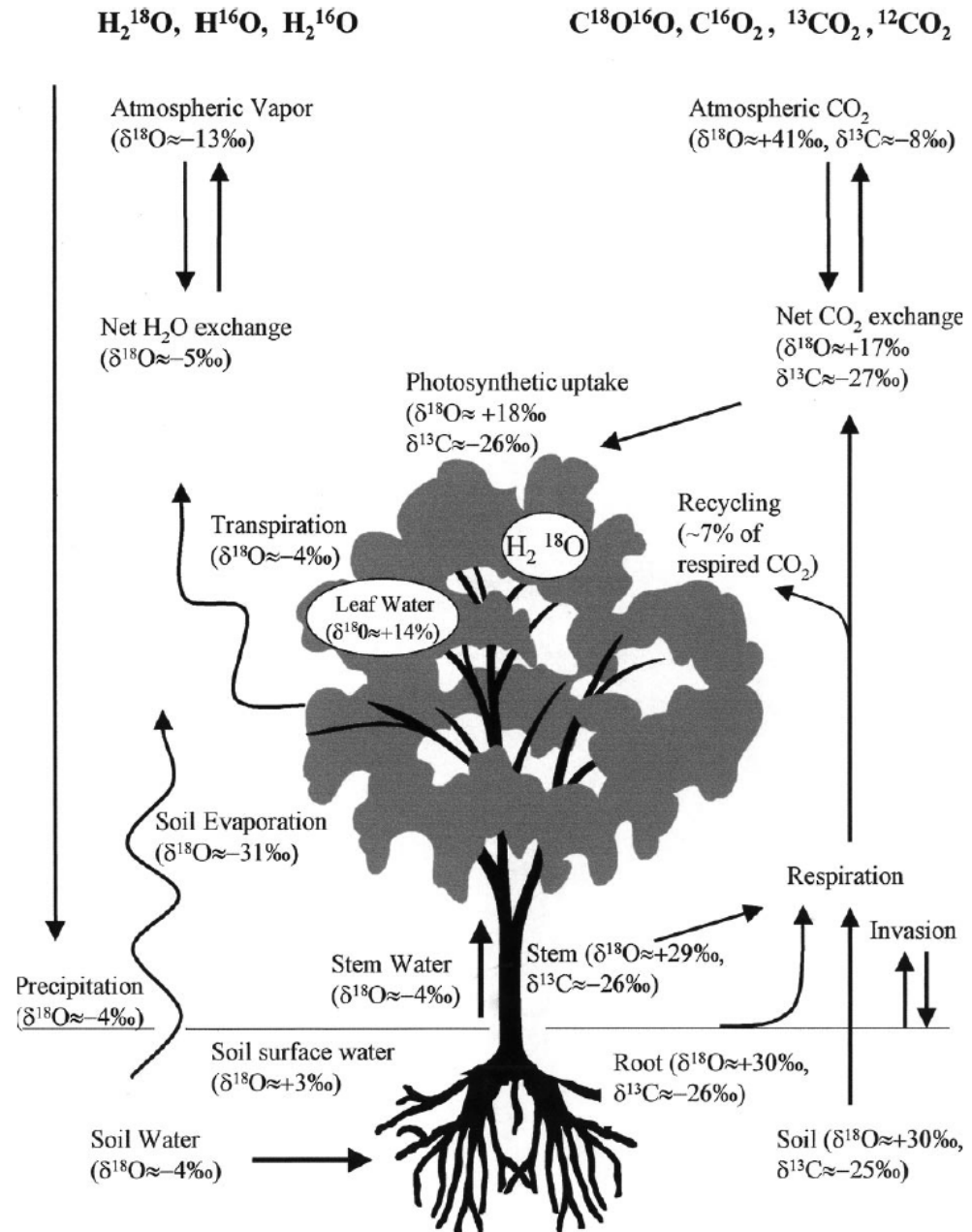
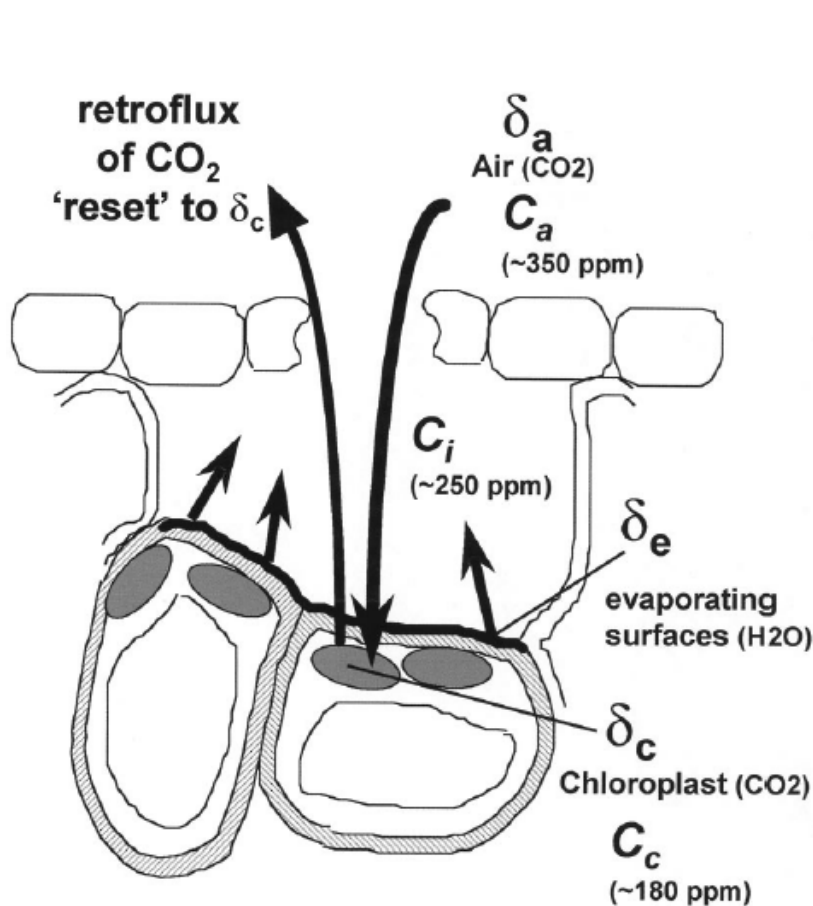
Trigo (Cabrera-Bosquet et al. 2011)



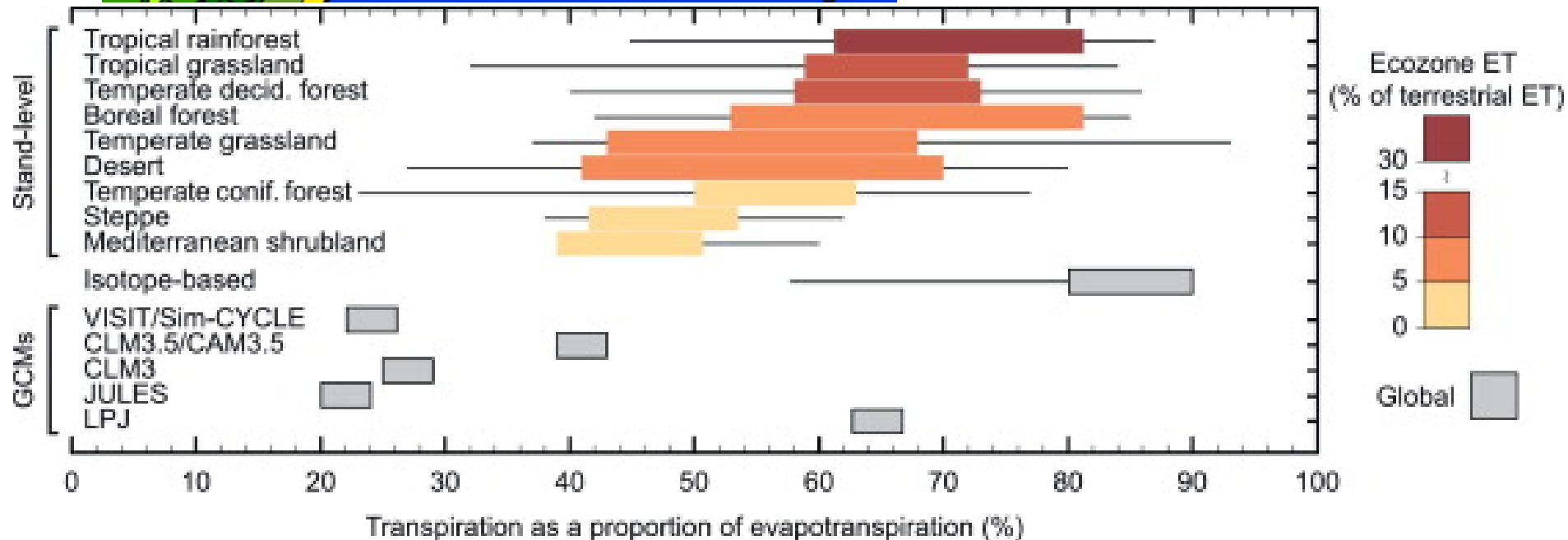
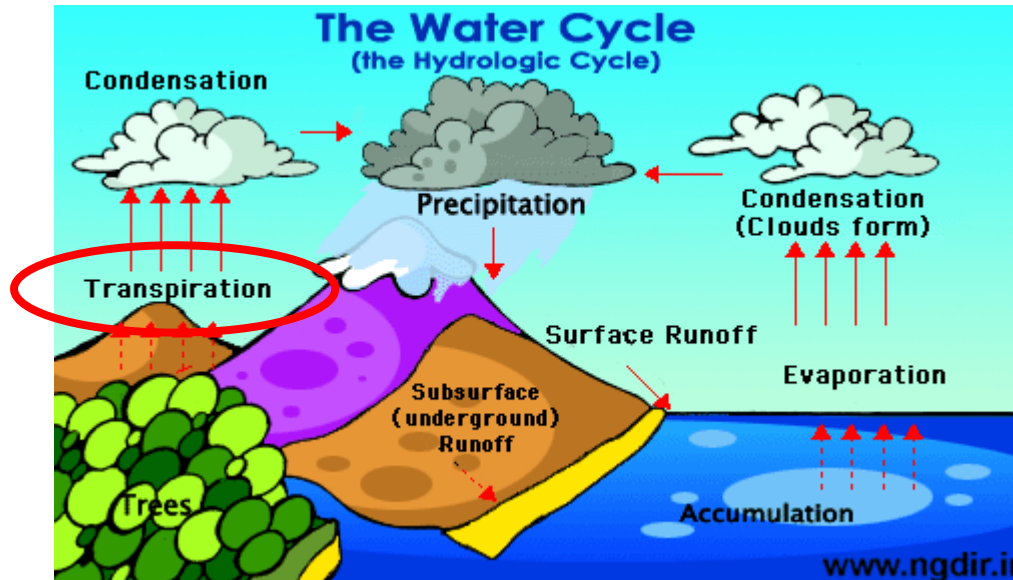
Trigo: $\delta^{18}\text{O}$ aumenta de las hojas a las espigas y granos

Posición apical: Enriquecimiento añadido en el grano

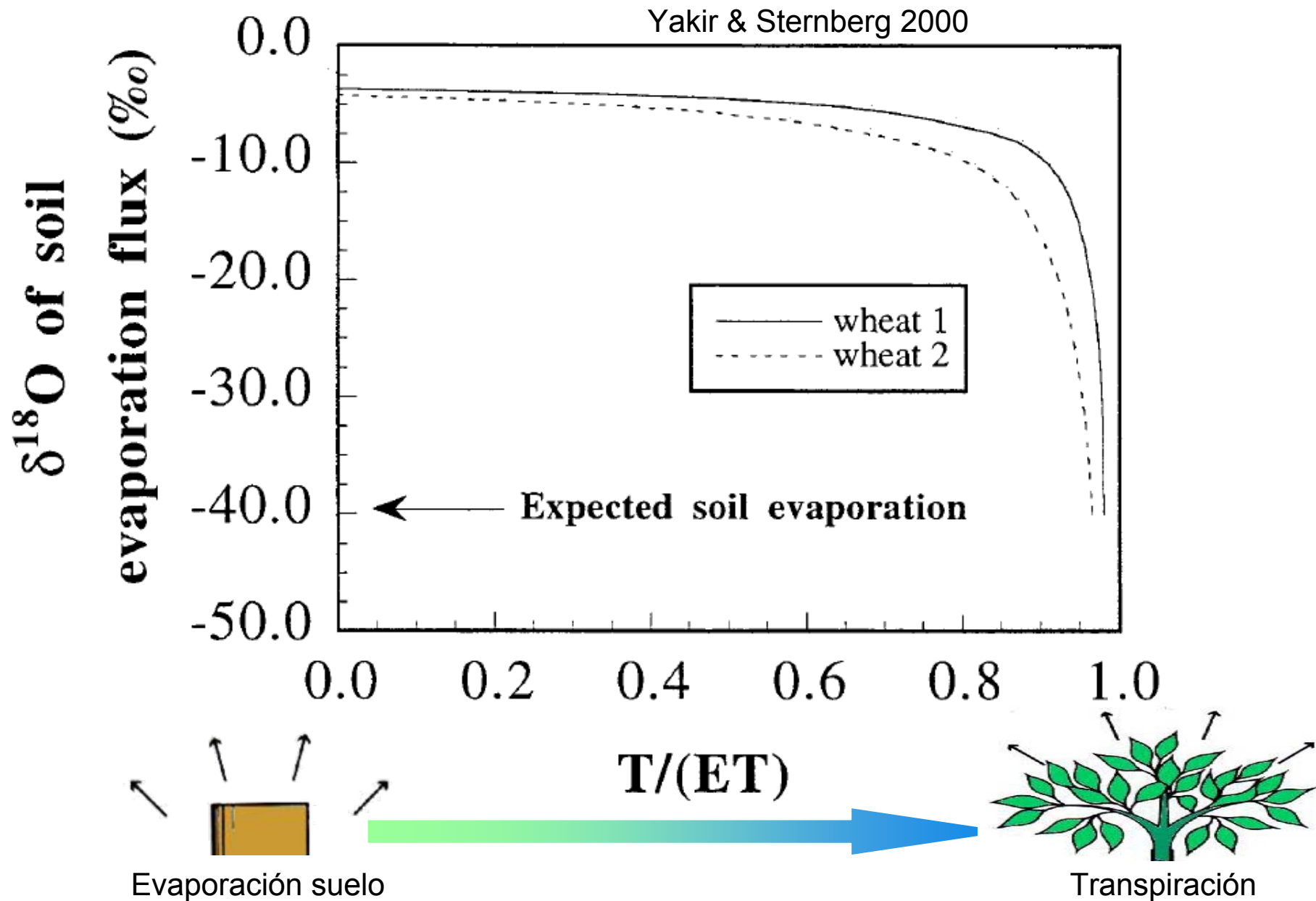
Intercambio de C y H₂O se refleja en la atmósfera



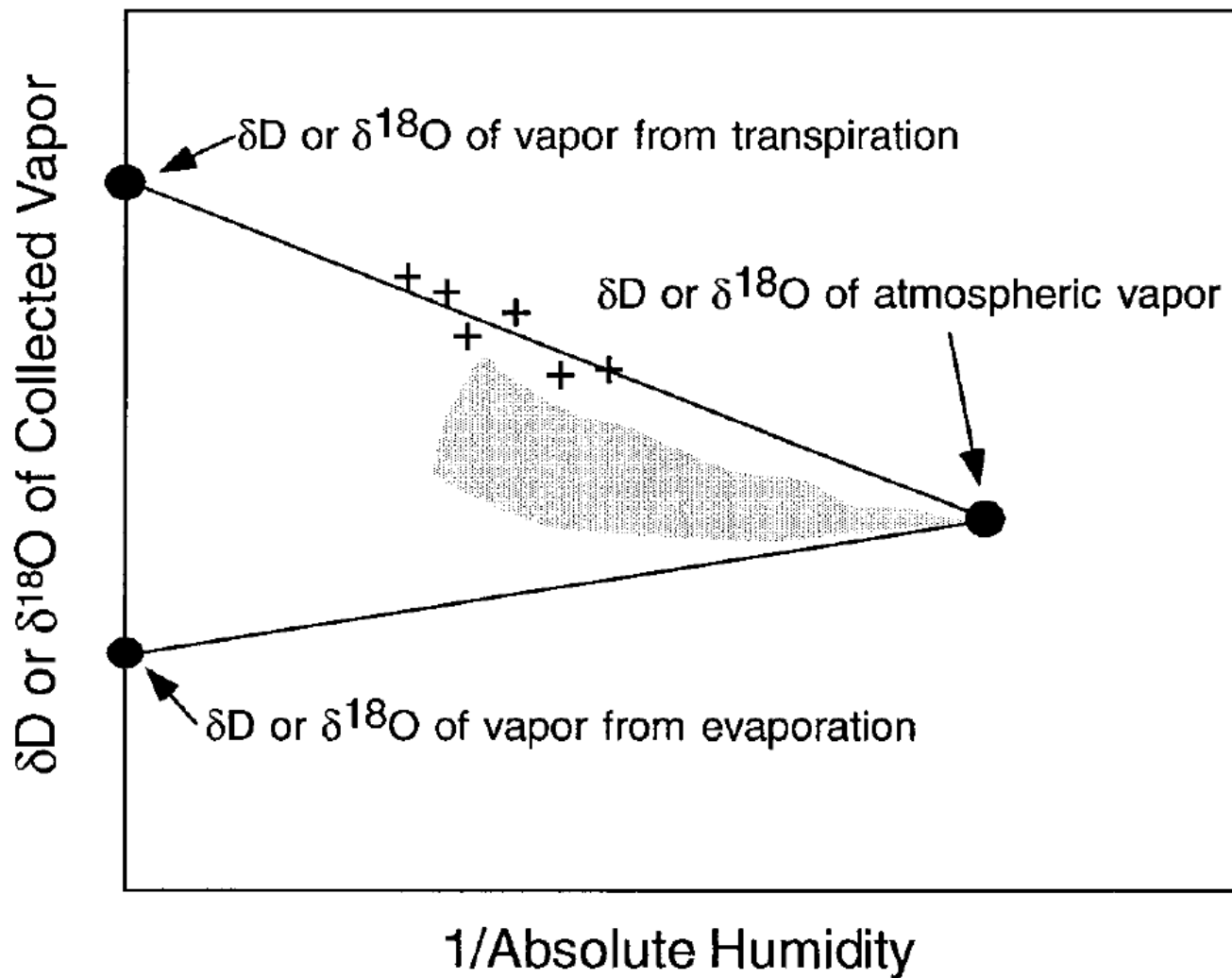
Transpiración: 40-80% pérdidas de agua



Partición transpiración / evaporación



Partición de flujos: “keeling plot”



Fuentes de variación de $\delta^{18}\text{O}$ / $\delta^2\text{H}$ en plantas

- **Fuente de agua**

- Gradiente del suelo, precipitación, freático
→ agua meteórica = $f(T_{\text{aire}}, \text{altitud}, \text{continentalidad})$

- **Enriquecimiento en la hoja**

- Depende de HR y temperatura foliar ($\approx T_{\text{aire}} + g_s$)

- **Intercambio de agua con materia orgánica en la hoja y en los tejidos de destino**

→ doble señal: hoja y agua fuente