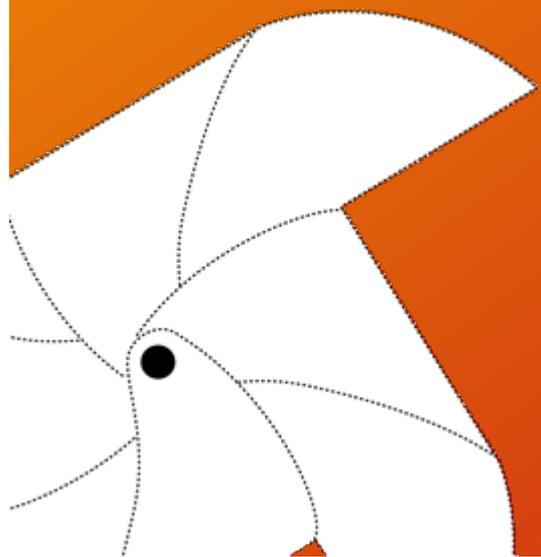


# Isótopos estables y la ecología del cambio global: una cuestión de escala

Juan Pedro Ferrio

ARAID - Unidad de Recursos Forestales, CITA



08/11/2018

Seminario *Plantas y cambio global*

**Máster en Agrobiología Ambiental**

*Facultat de Biologia, Universitat de Barcelona*

**araid**



## Conceptos generales

- Isótopos, fraccionamiento
- Pares de isótopos, notación diferencial

## Isótopos de agua (hidrógeno, oxígeno)

- Ciclo hidrológico
- Fuente de agua en plantas
- Caso 1: interacciones en bosque mixto

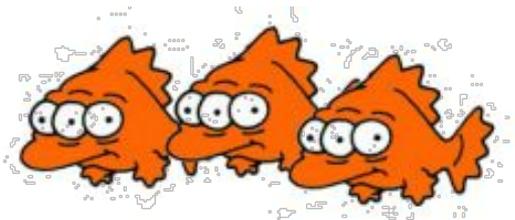
## Isótopos de carbono

- Fuentes de variación
- Discriminación y eficiencia hídrica
- Caso 2: respuesta espacial al clima
- Caso 3: estudio retrospectivo del decaimiento
- Caso 4: sostenibilidad en inicio agricultura

# Los isótopos: ¿qué son?



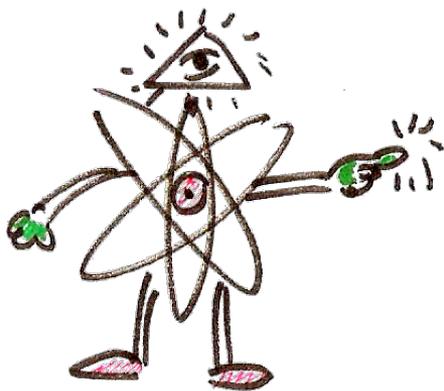
¿Un equipo de baseball?



¿Algo malo y radiactivo?



# Los isótopos: ¿qué son?

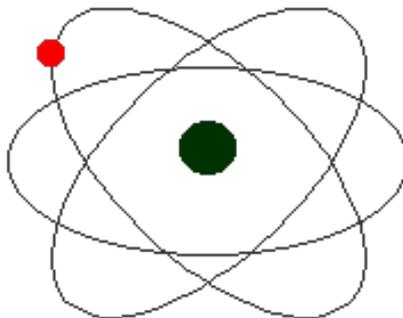


**Isótopos:** formas de un mismo elemento químico que difieren en el número de neutrones

- **Inestables** (radioactivos) se desintegran espontáneamente en el tiempo  $\rightarrow$   $^{14}\text{C}$
- **Estables** (no radioactivos) no decaen en una escala de tiempo geológica

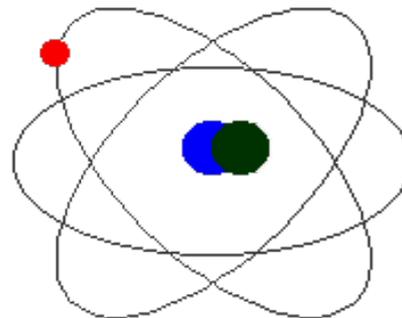
## Hydrogen

1 Proton (green)  
1 Electron (red)



## Deuterium

1 Proton  
1 Electron  
1 Neutron (blue)



# Isótopos estables en la biosfera



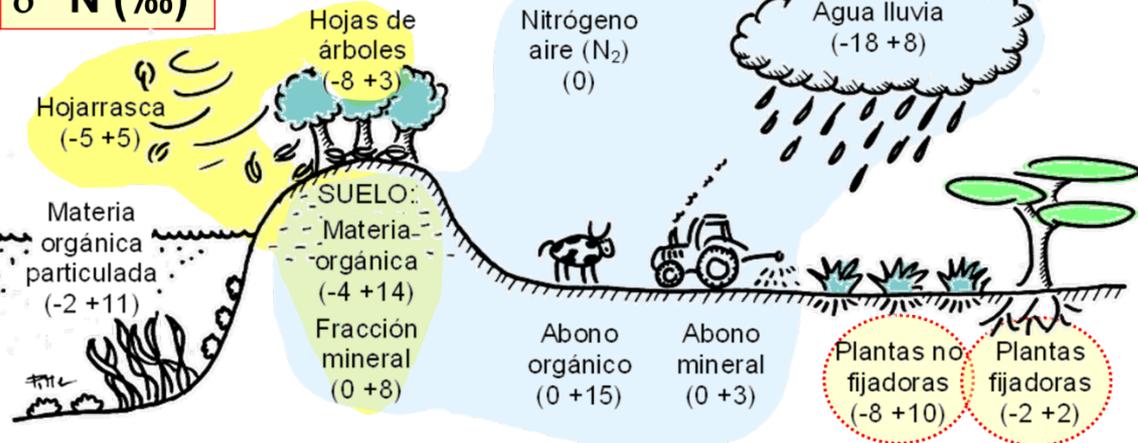
	Par de isótopos			
	$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$	$^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$	$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$	$^2\text{H}(\text{D})/^1\text{H}$
Estándar	PDB <sup>b</sup>	N <sub>2</sub> aire	SMOW <sup>c</sup>	SMOW <sup>c</sup>
Notación	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$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

<sup>a</sup> Abundancia del isótopo pesado respecto al total del elemento

<sup>b</sup> PDB, Pee-Dee Belemnite (calcita)

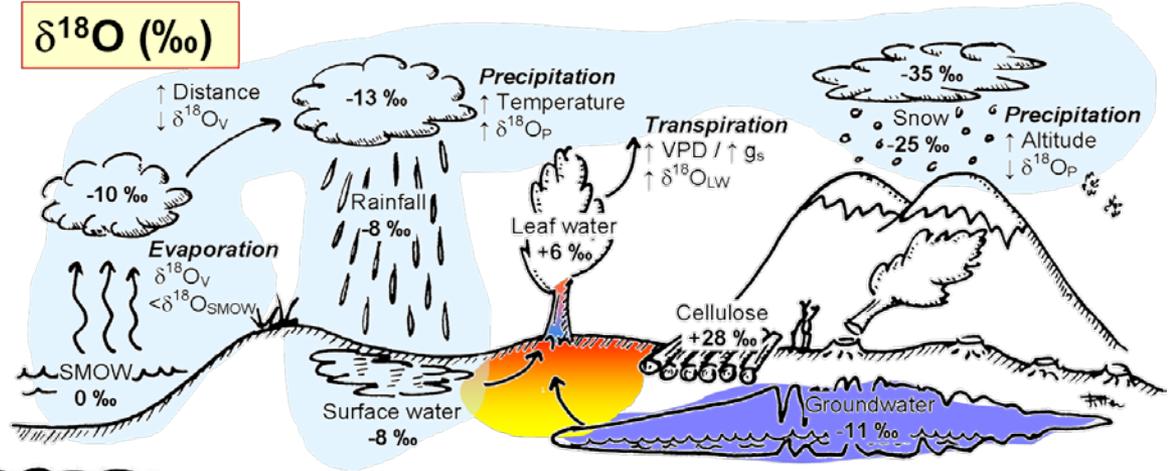
<sup>c</sup> SMOW, Standard Mean Ocean Water

# $\delta^{15}\text{N}$ (‰)

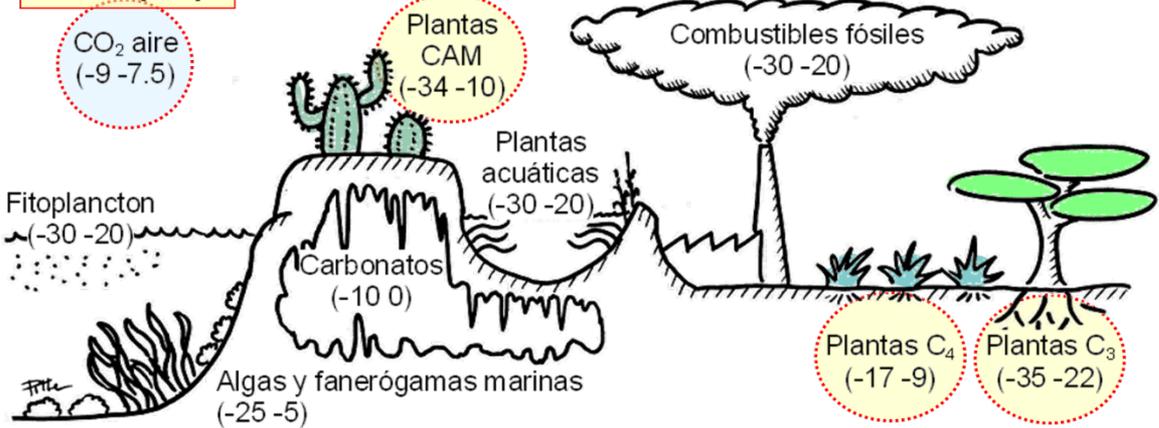


Estables, pero no constantes

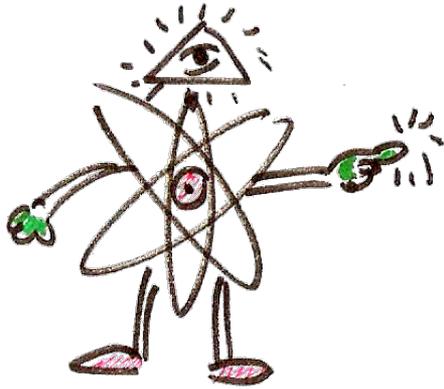
# $\delta^{18}\text{O}$ (‰)



# $\delta^{13}\text{C}$ (‰)



# Estables, pero no constantes



**Fraccionamiento:** todos los **procesos** químicos y físicos alteran las proporciones entre isótopos

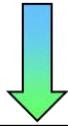
**Enriquecimiento vs. empobrecimiento:** Incremento o disminución de la proporción del isótopo menos abundante (pesado)

# ¿Para qué sirven?: Integración procesos

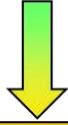


## Tiempo

Asimilados



Azúcares hoja



Floema

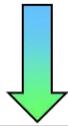


Tejidos sumidero  
(madera, granos)



## Espacio

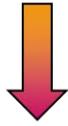
Hoja



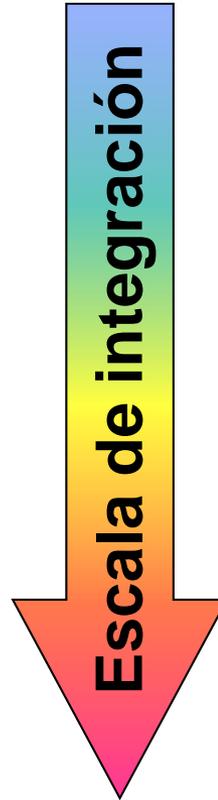
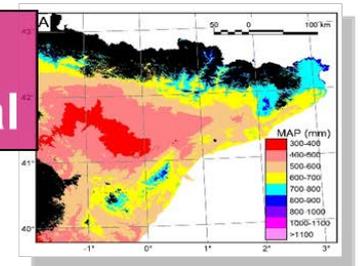
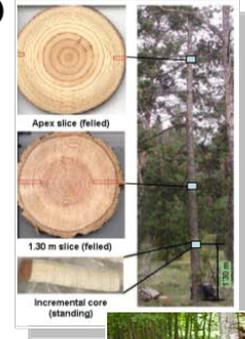
Planta



Ecosistema



Paisaje Regional



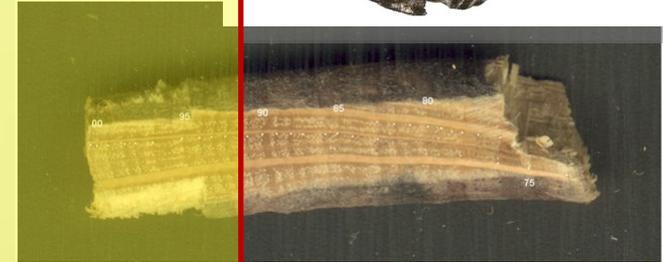
# ¿Para qué sirven?: Integración procesos



**Reconstrucción paleoambiental**



**Respuesta de las plantas al cambio climático**



**Mejora de cultivos**

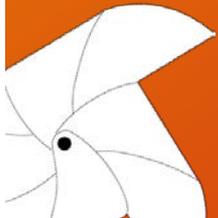


**Dieta de animales  
Migraciones**



**Fraude alimentario**

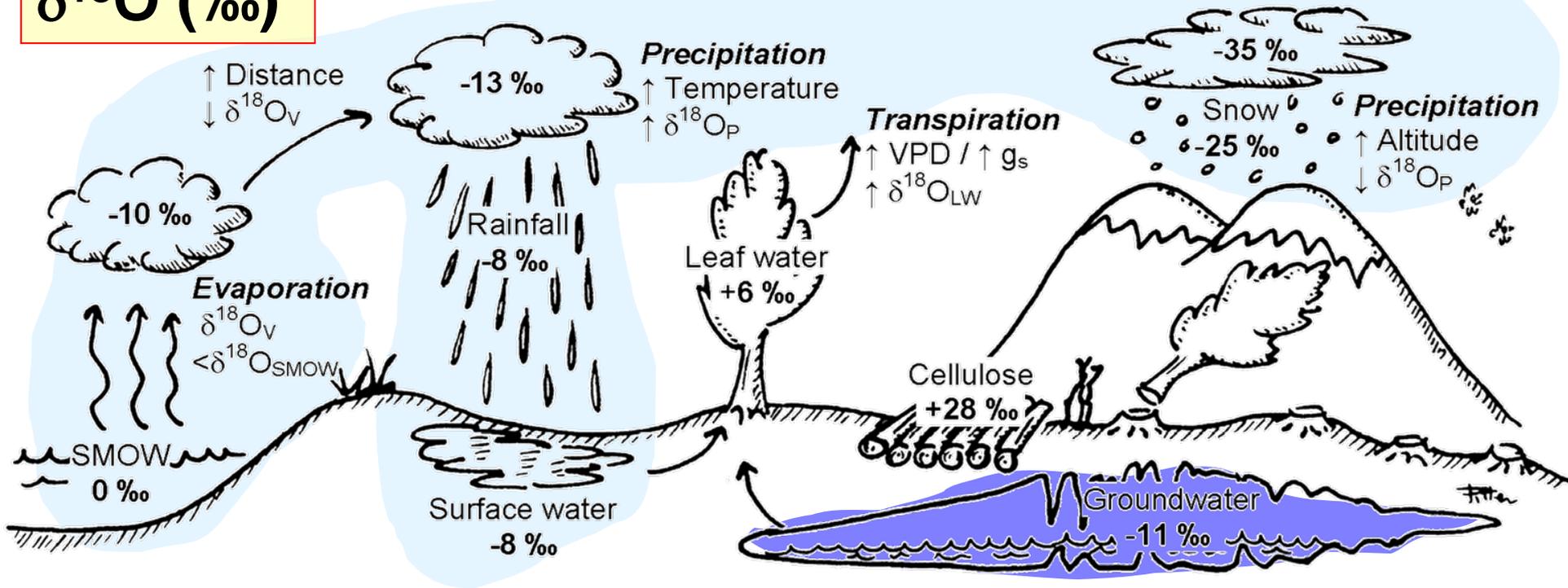
# Isótopos de agua (oxígeno / hidrógeno)



# Variación en el ciclo hidrológico



$\delta^{18}\text{O}$  (‰)

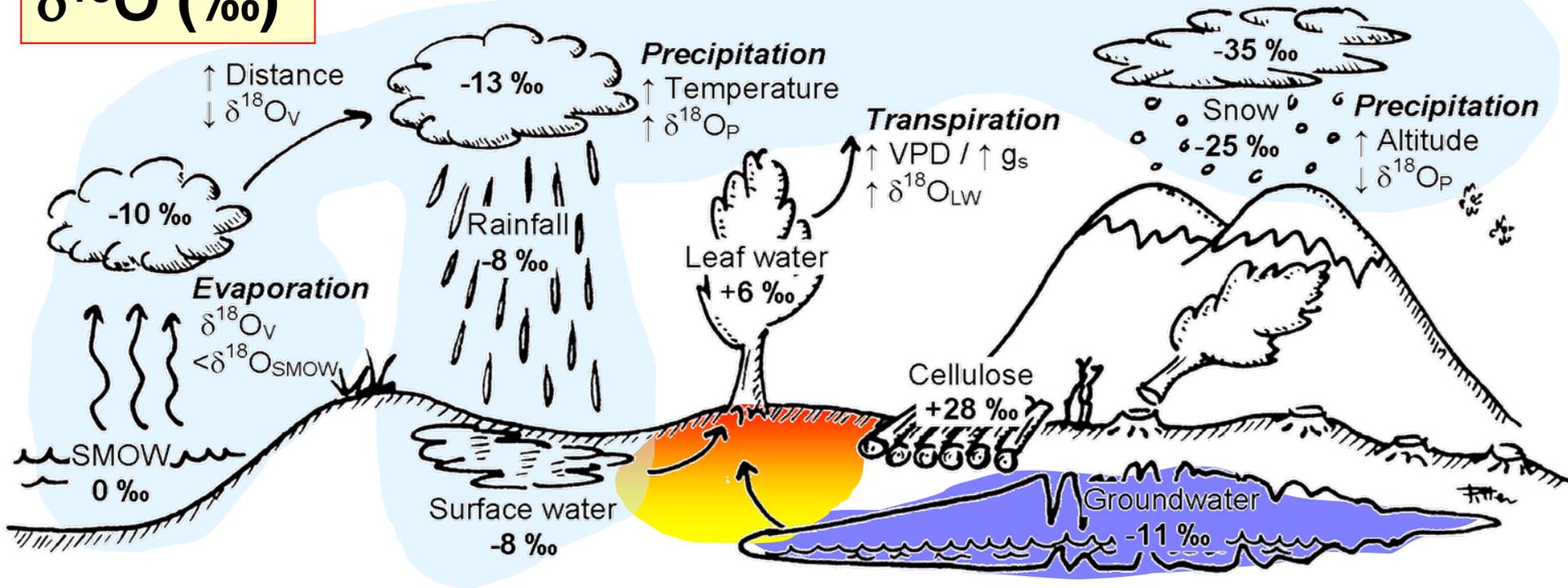


- $\delta^{18}\text{O}$  (‰) varía durante el ciclo hidrológico

# Variación en el ciclo hidrológico

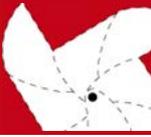


$\delta^{18}\text{O}$  (‰)

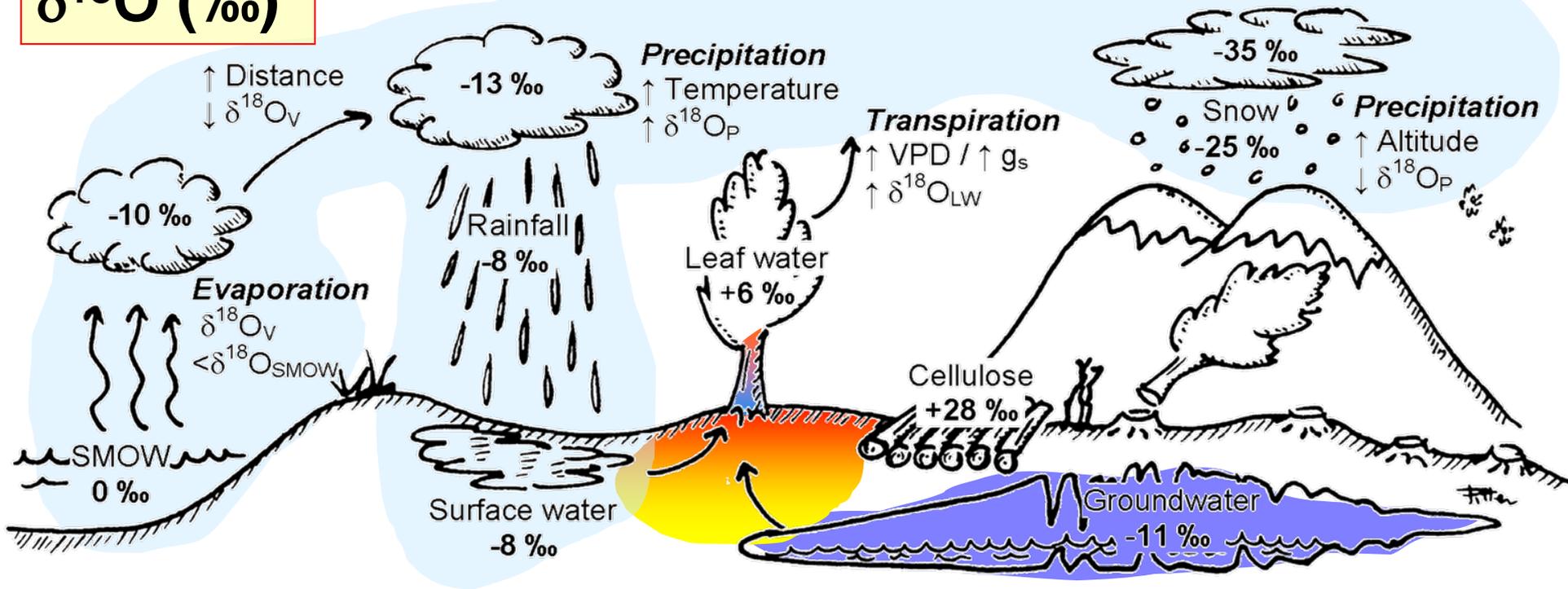


- $\delta^{18}\text{O}$  (‰) varía durante el ciclo hidrológico
- + gradiente por evaporación en el suelo

# Variación en el ciclo hidrológico

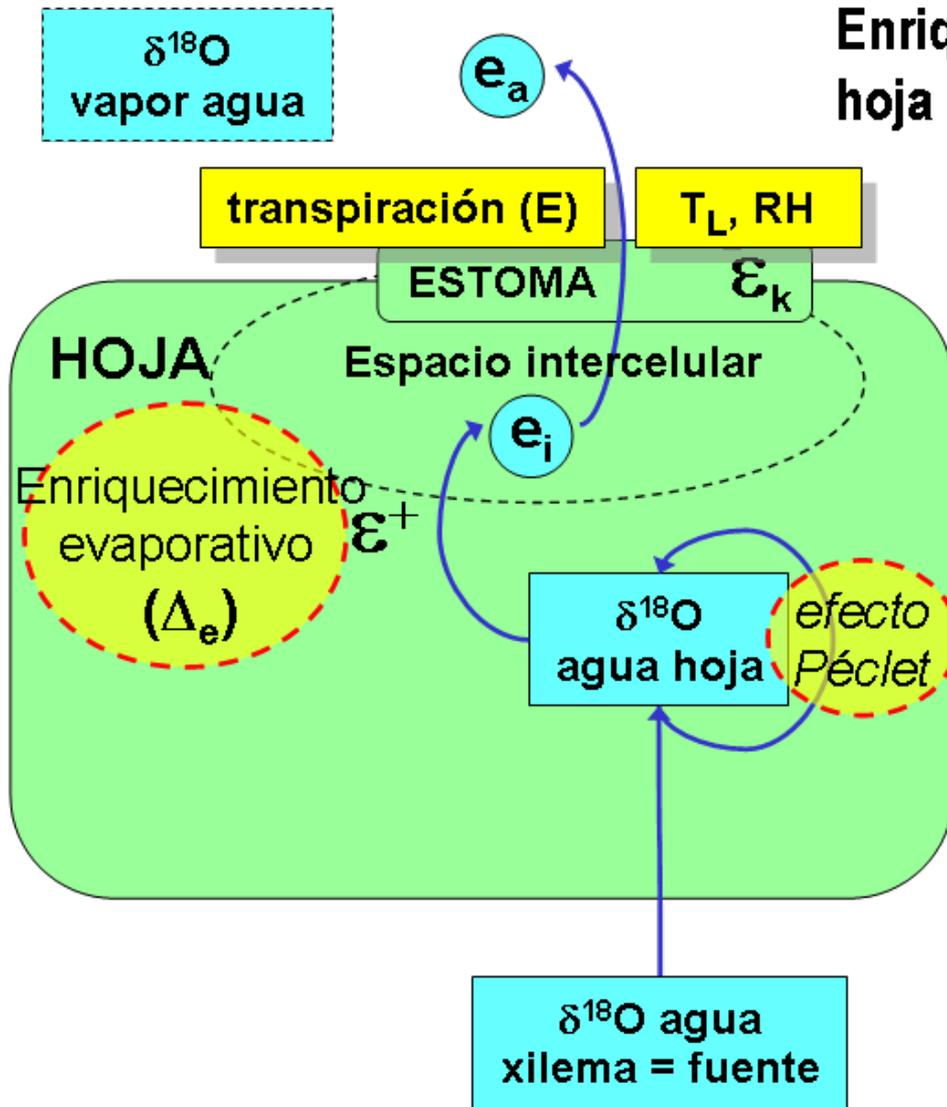


$\delta^{18}\text{O}$  (‰)

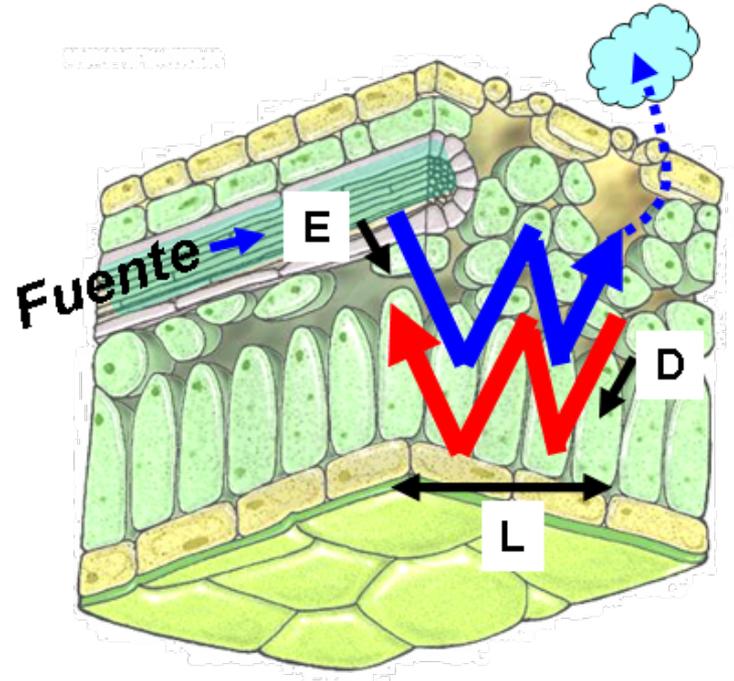


- $\delta^{18}\text{O}$  (‰) varía durante el ciclo hidrológico
- + gradiente por evaporación en el suelo
- $\delta^{18}\text{O}$  (‰) del xilema refleja la del agua fuente

# Enriquecimiento isotópico en la hoja



Enriquecimiento isotópico del agua de hoja respecto a la fuente ( $\Delta_L$ )\*





- **Fuente de agua**

- Gradiente del suelo, precipitación, freático

→ agua meteórica =  
 $f(T_{\text{aire}}, \text{altitud, continentalidad})$

- **Enriquecimiento en la hoja**

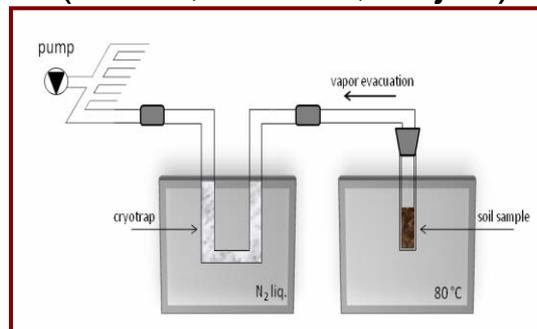
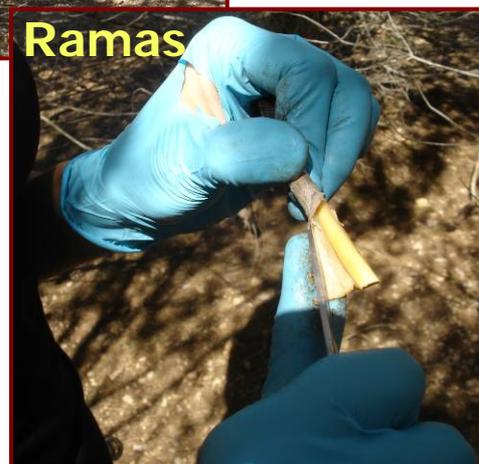
- Depende de HR, temperatura foliar ( $\approx T_{\text{aire}} + g_s$ )  
y transpiración ( $E$ )

# Origen del agua de las plantas



Extracción criogénica  
(suelo, xilema, hojas)

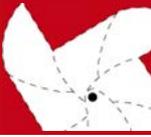
Pirólisis  
Equilibrado con  $\text{CO}_2 / \text{H}_2$



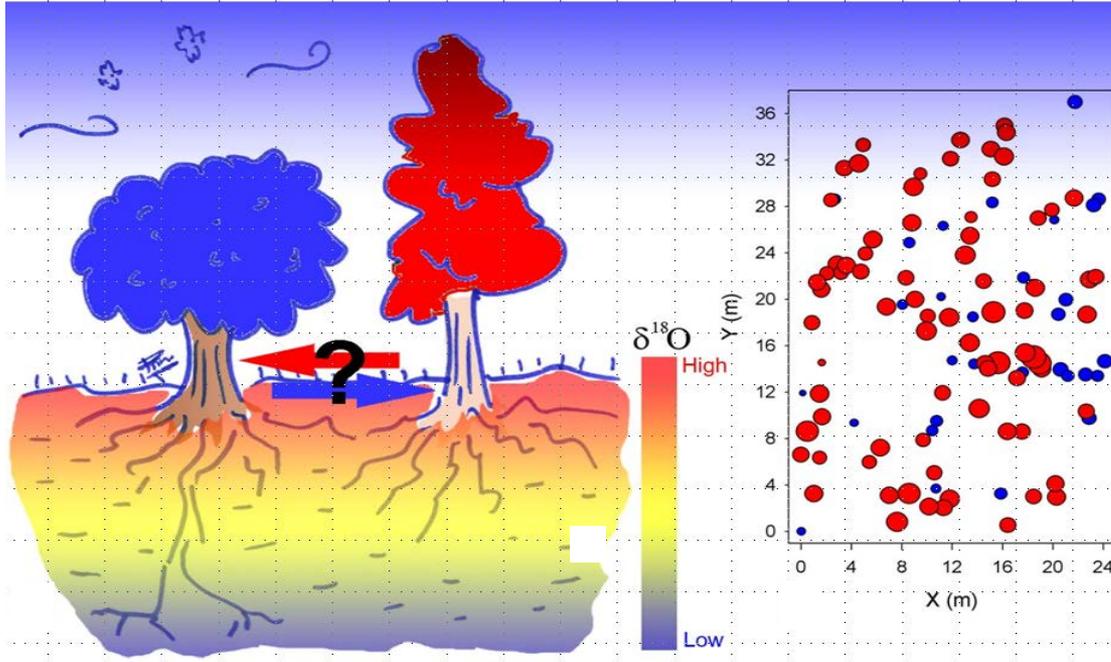
Muestras líquidas (lluvia, pozos)  
Agua libre suelo: equilibrado con  $\text{H}_2\text{O}$   
Micro-inducción (suelo, xilema, hojas)



# Caso 1: relaciones inter-específicas



*Quercus ilex* L. *Pinus halepensis* Mill.



Ulldemolins, Serra de Montsant

Bosque mixto sobre suelos calcáreos someros



# Pino y encina: nicho hidrológico

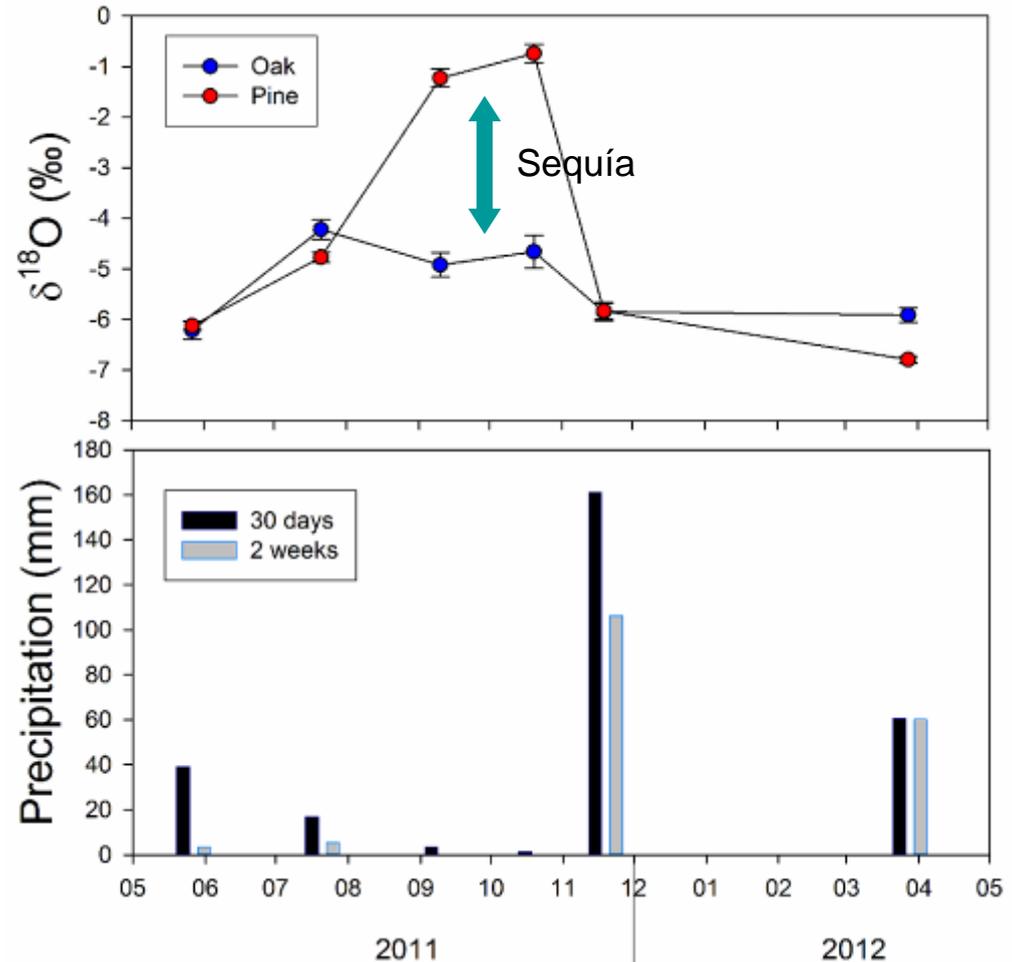
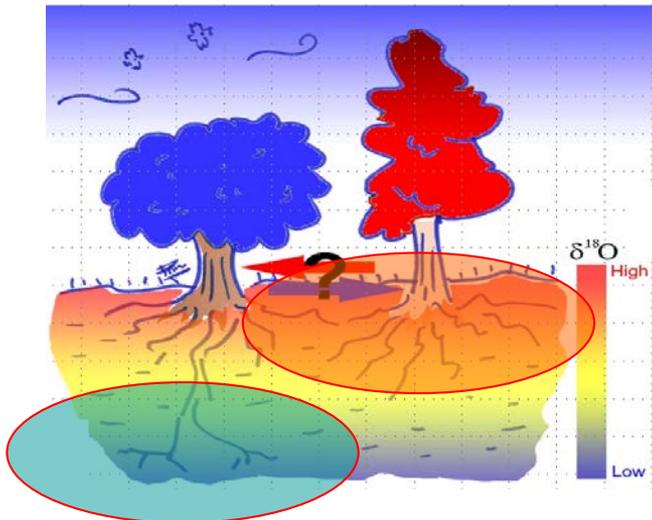


¿Diferente uso del agua?

**Sí!!**

Especialmente  
en sequía

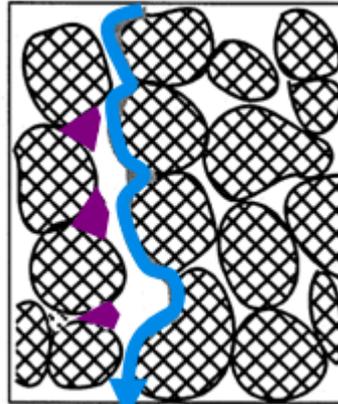
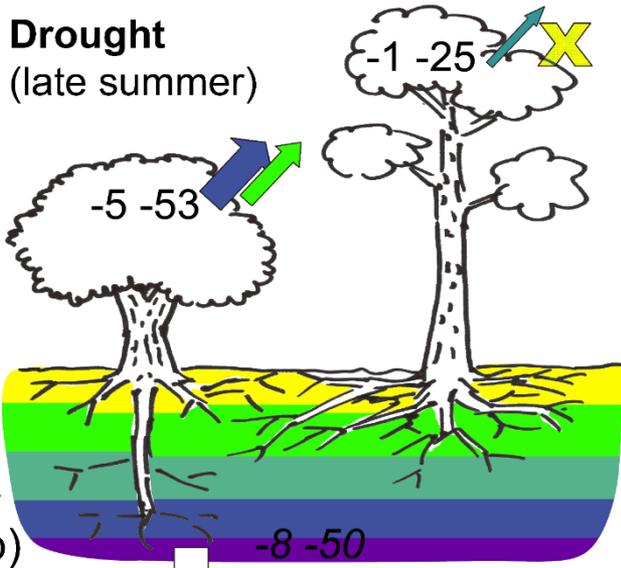
Las encinas captan agua  
a mayor profundidad



# Pino y encina: respuesta a sequía

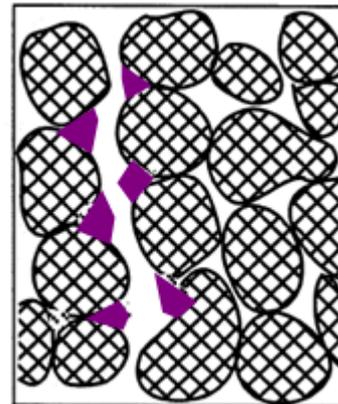
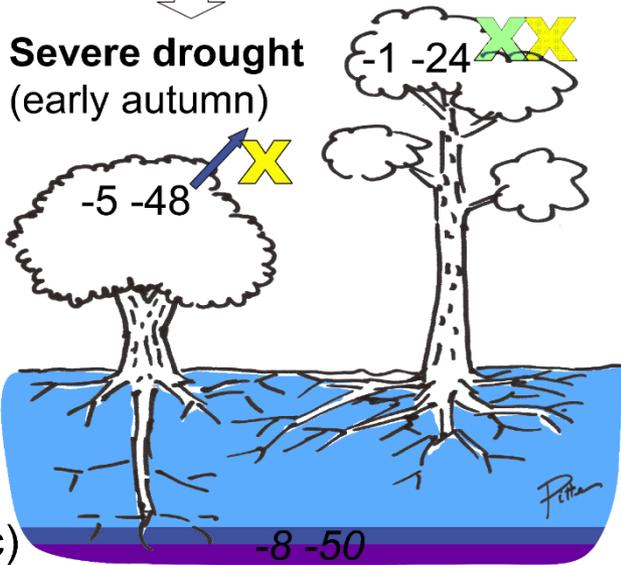


**Drought**  
(late summer)



Suficiente agua libre  
**Disponible para encinas**  
y (algunos) pinos

**Severe drought**  
(early autumn)



Únicamente queda agua retenida  
→ **Disponible sólo para**  
(algunas) encinas

 Soil particle

 Mobile water

 Water film around soil particles (immobile)

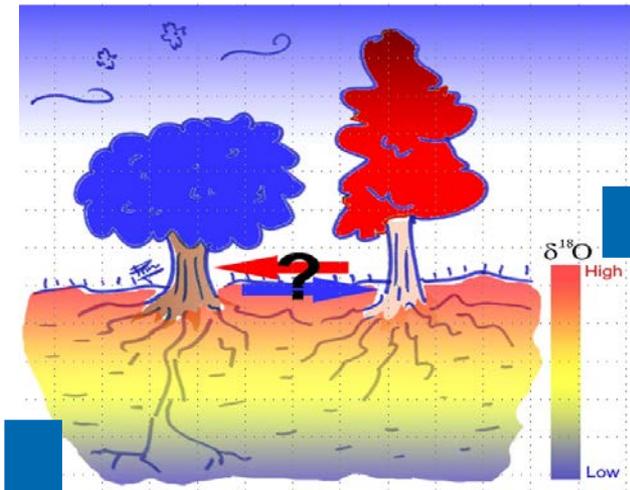
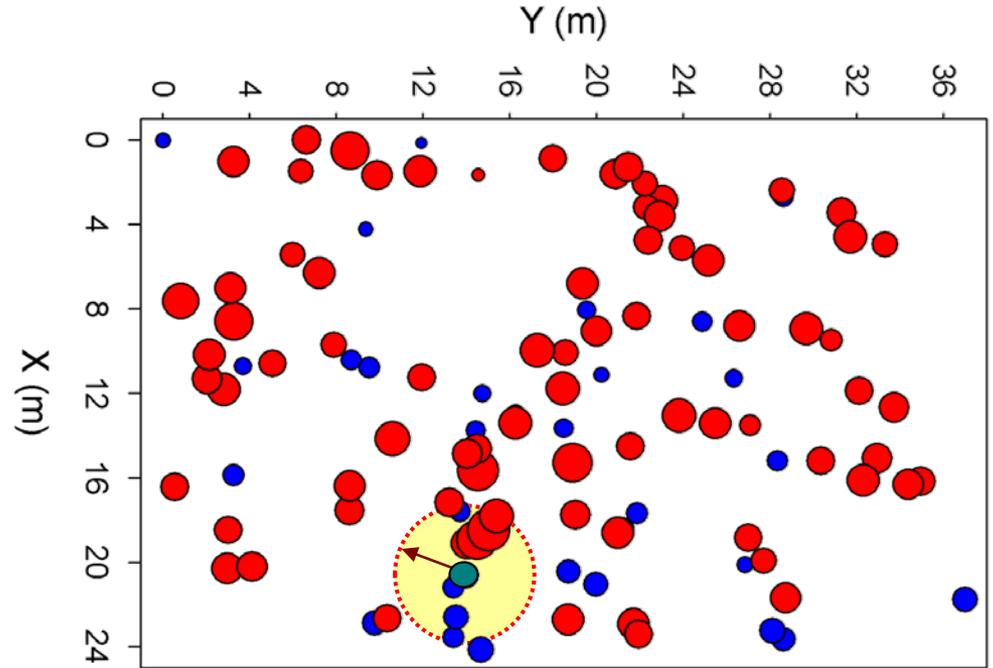
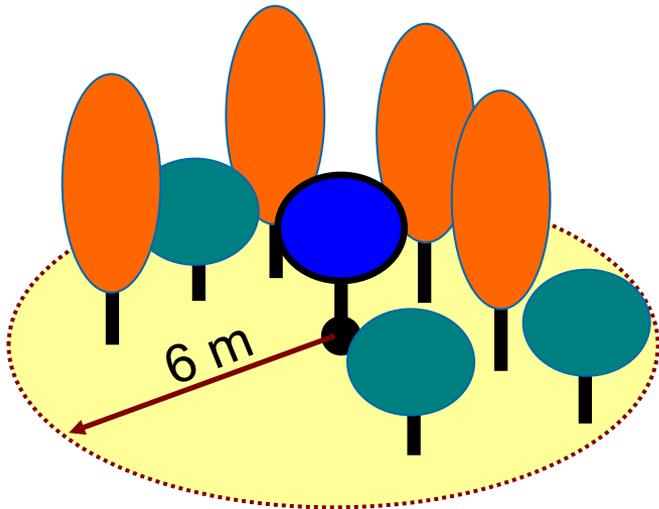
 Soil pore water (immobile)

# Pino y encina: ¿interacción?



¿Respuesta diferente a la competencia?

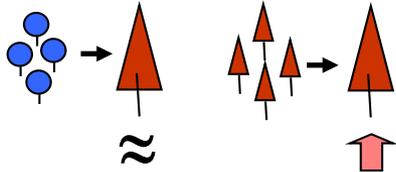
Compara  $\delta^{18}\text{O}$  xilema con el área basal (BA) de árboles vecinos



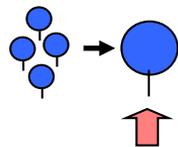
# Pino y encina: ¿interacción?



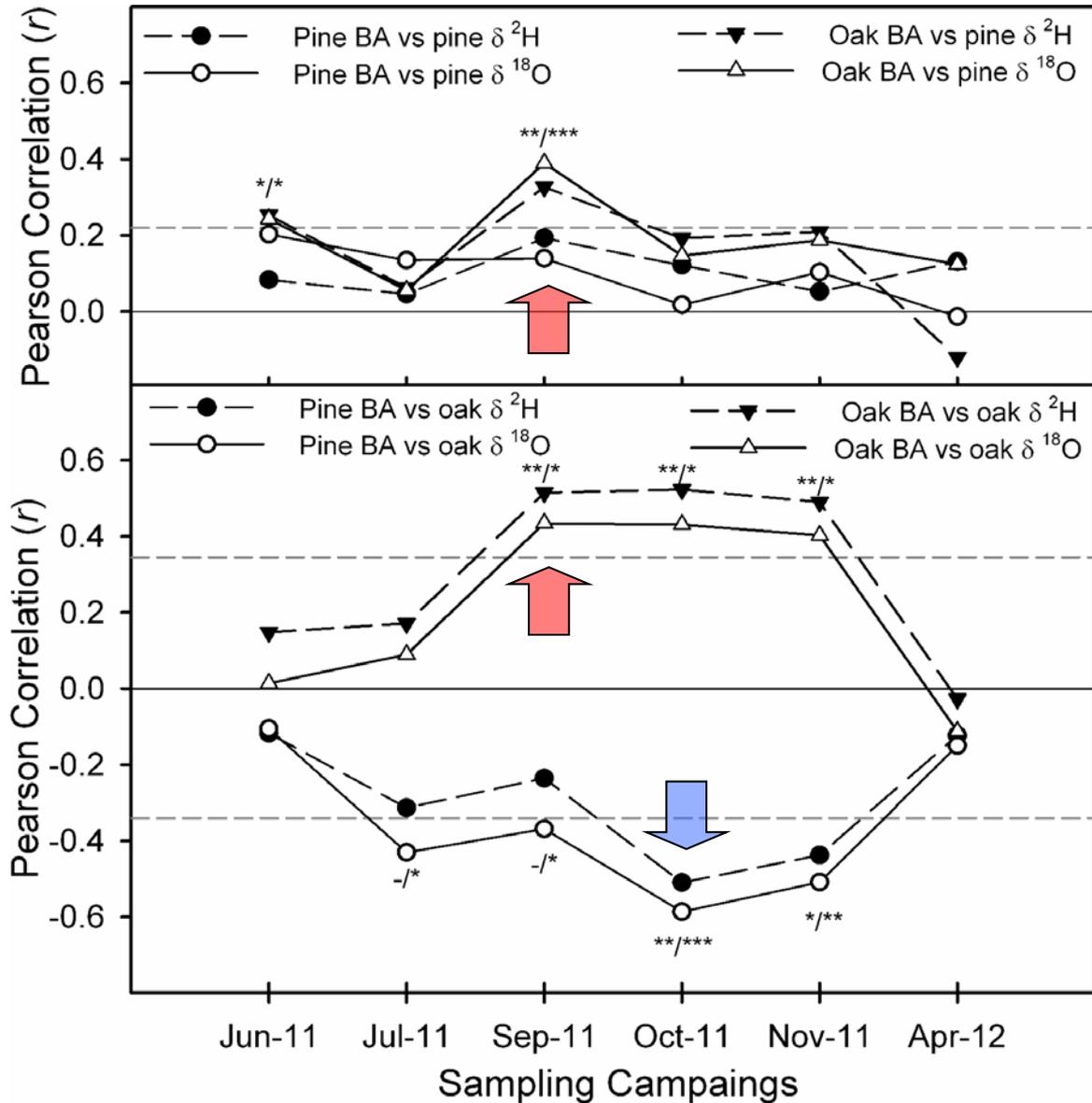
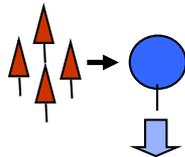
## ¿Respuesta diferente a la competencia?



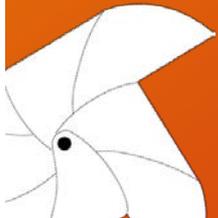
**Pino y encina:**  
más evaporación con alta densidad de la propia especie (estancamiento)



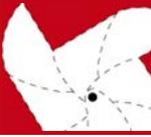
**Encina:**  
“baja más” en presencia de pinos



# Isótopos de carbono

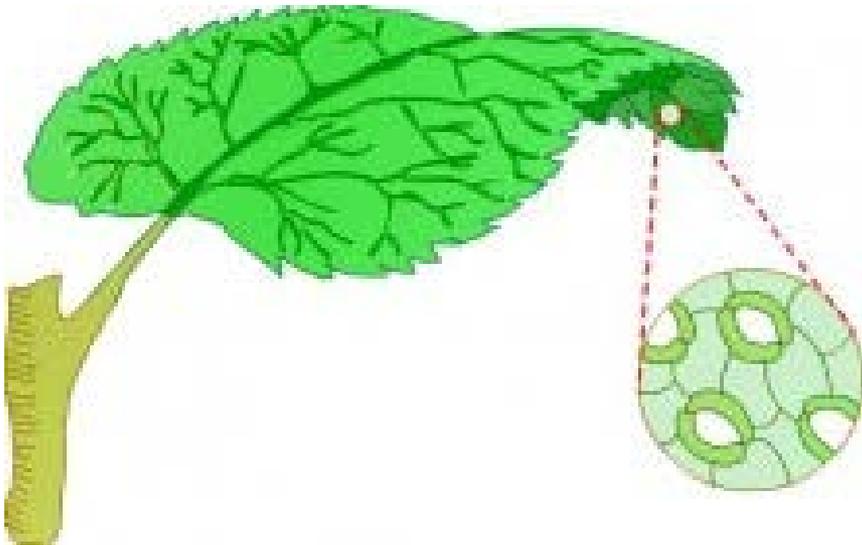
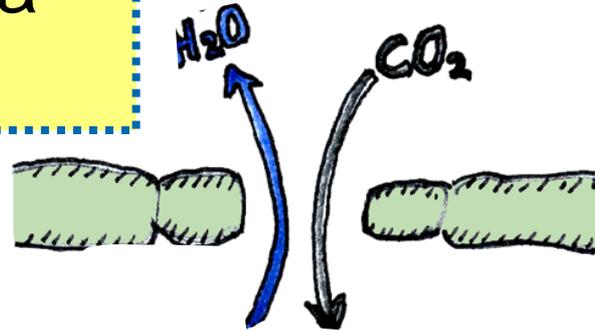


# 13C: EUA y respuesta ambiental



## Estomas:

Regulan la salida de agua y entrada de  $\text{CO}_2$



## EUA

**Eficiencia Uso del Agua**

Relaciona fotosíntesis y pérdida de agua

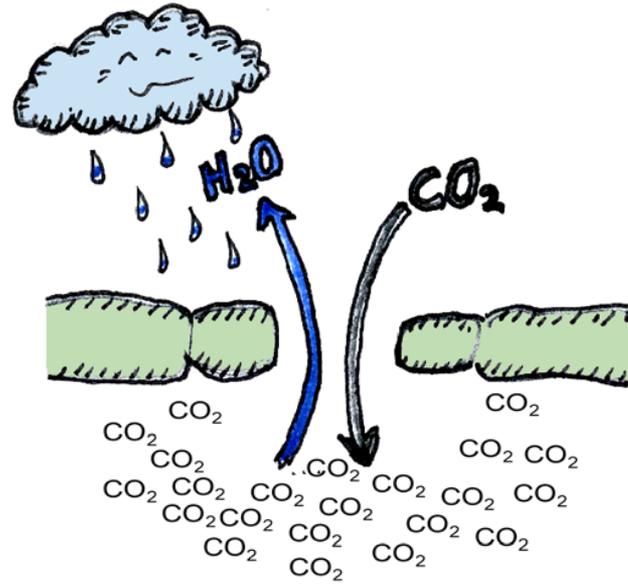
# 13C: EUA y respuesta ambiental



## Sin estrés:

estomas abiertos

CO<sub>2</sub> interno no limitado



# 13C: EUA y respuesta ambiental

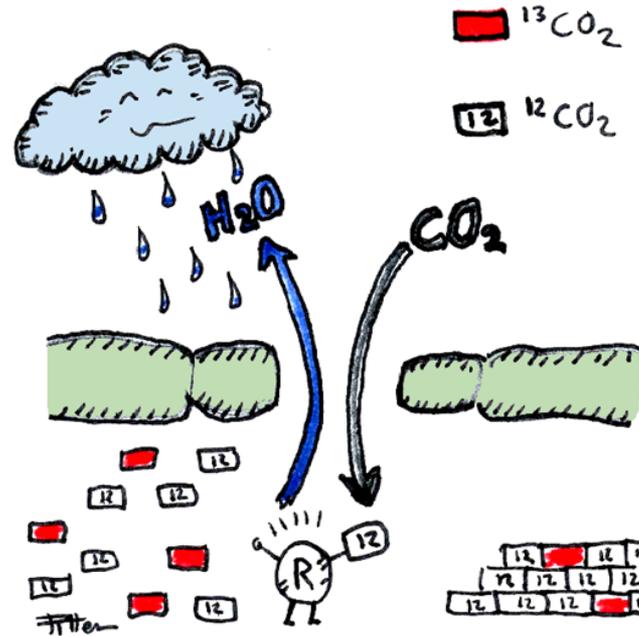


## Sin estrés:

estomas abiertos

CO<sub>2</sub> interno no limitado

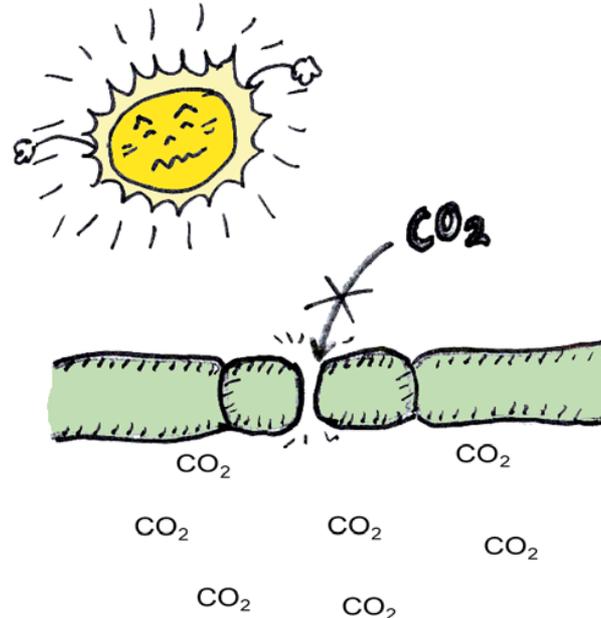
Planta 'prefiere' <sup>12</sup>CO<sub>2</sub>



## Sequía:

Cierre estomas

CO<sub>2</sub> interno limitado



# 13C: EUA y respuesta ambiental

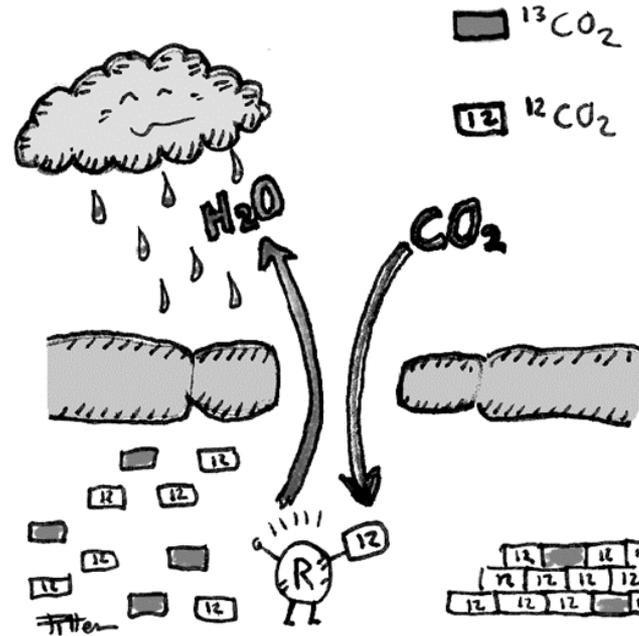


## Sin estrés:

estomas abiertos

CO<sub>2</sub> interno no limitado

Planta 'prefiere' <sup>12</sup>CO<sub>2</sub>

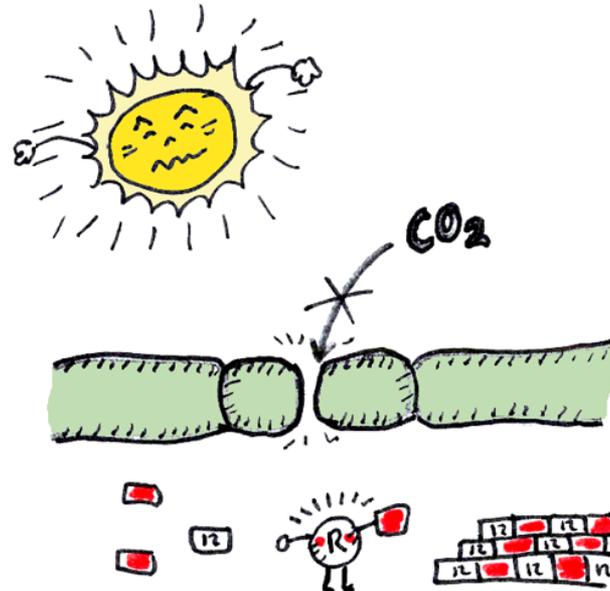


## Sequía:

Cierre estomas

CO<sub>2</sub> interno limitado

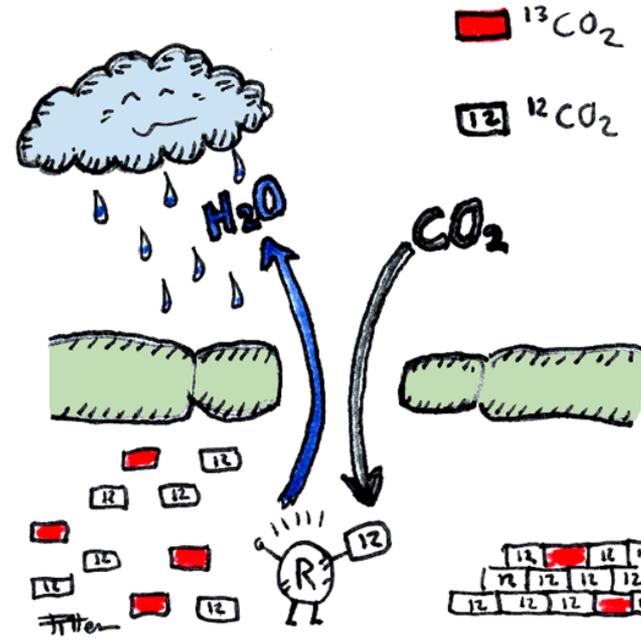
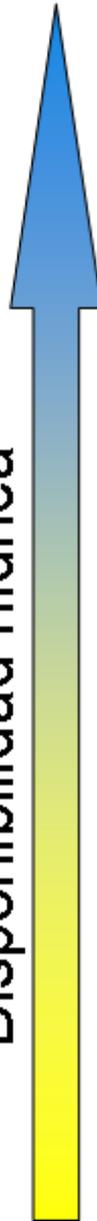
**'No hay dónde elegir'**



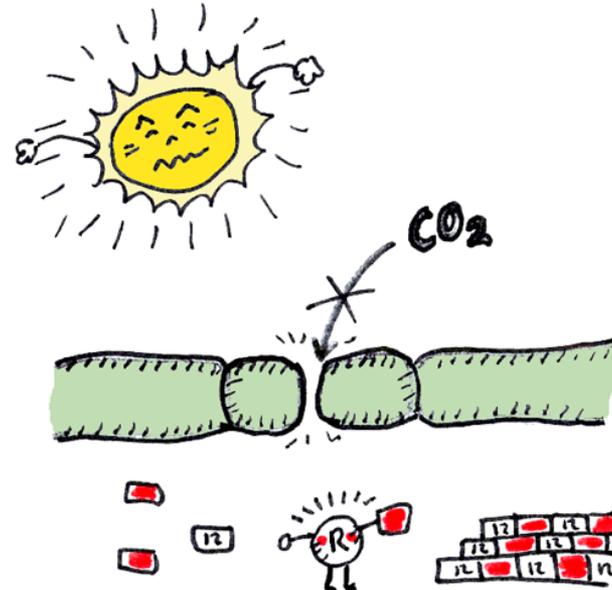
# 13C: EUA y respuesta ambiental



Disponibilidad hídrica



→ Poco  $^{13}\text{C}$   
Baja EUA

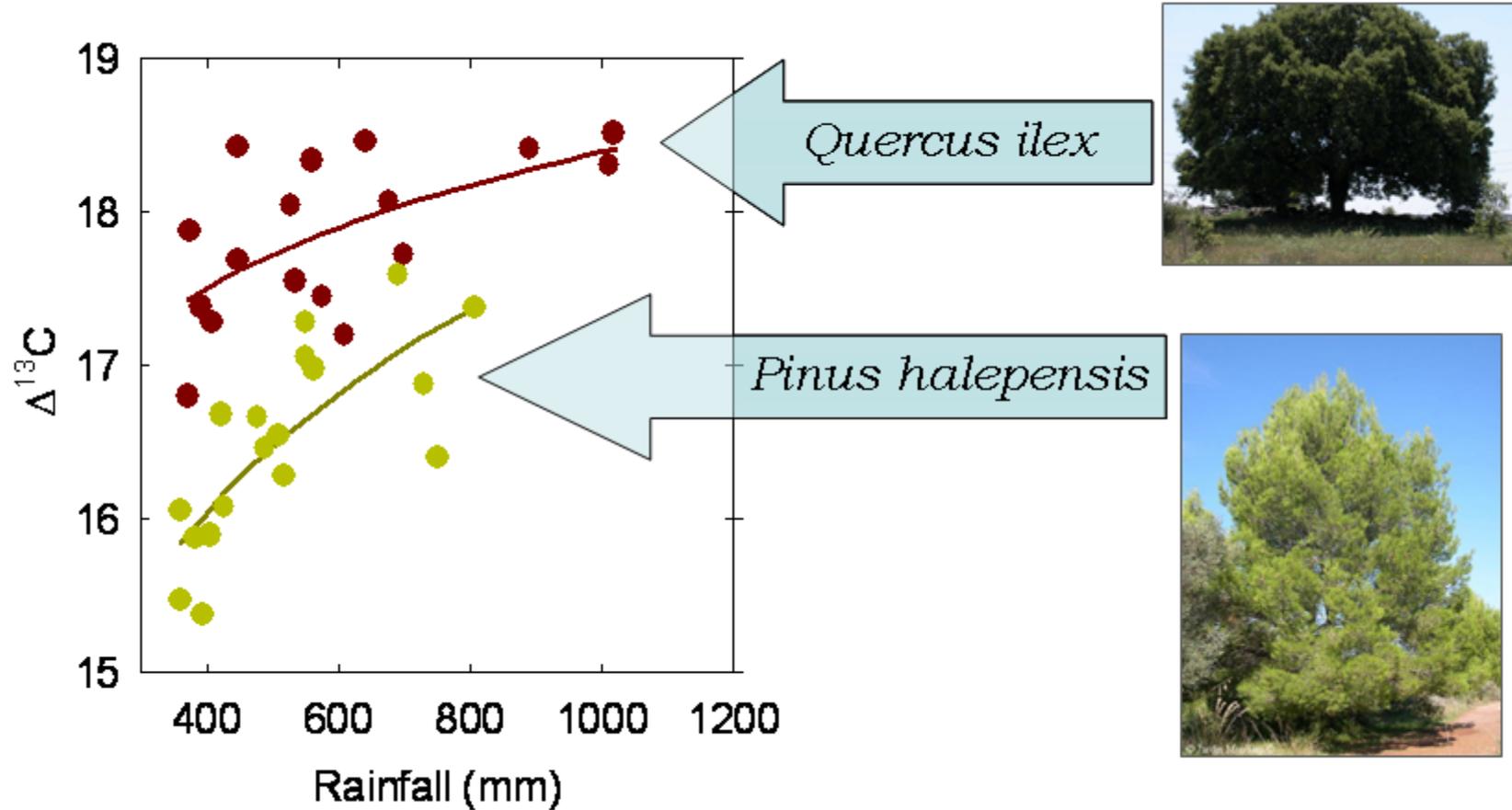


→ Más  $^{13}\text{C}$   
Alta EUA

# 13C: EUA y respuesta ambiental



$\Delta^{13}\text{C}$  en madera determinada por la cantidad de precipitación



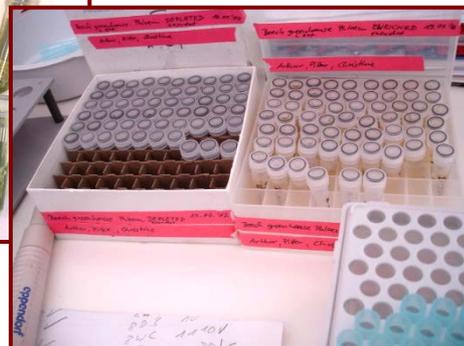
# ¿Cómo se mide?



**Materia Orgánica**



Homogenizado /  
Extracción compuestos



**Biocarbonatos**



Hidrólisis ácida  
carbonato

Encapsulado  
combustión/pirólisis



**CO<sub>2</sub> respirado**

Inyección

**IRMS**



**Laser (IRIS)**



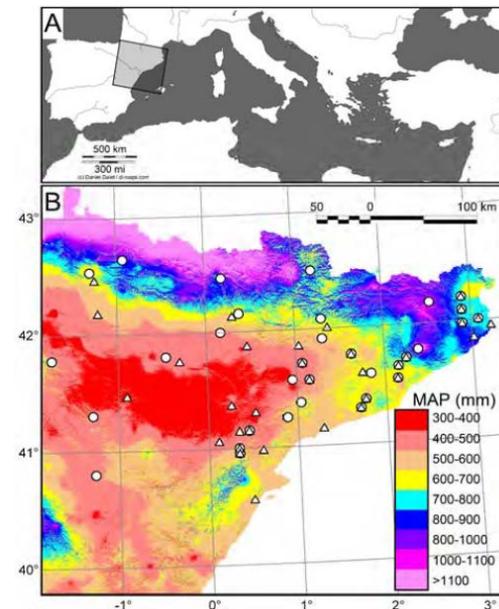


## *ISOSCAPES: Isotope landscapes*

**modelos espaciales ecoclimáticos a partir de series de isótopos de anillos de crecimiento**

**Isoscapes of tree-ring carbon-13 perform like meteorological networks in predicting regional precipitation patterns**

Jorge del Castillo,<sup>1</sup> Mònica Aguilera,<sup>1</sup> Jordi Voltas,<sup>1</sup> and Juan Pedro Ferrio<sup>1</sup>  
JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH: BIOGEOSCIENCES  
VOL. 118, 1–9, doi:10.1002/jgrg.20036, 2013



## Red de muestreos $\Delta^{13}\text{C}$ en anillos de crecimiento



**Encina (N=44)**  
*Quercus ilex* L.



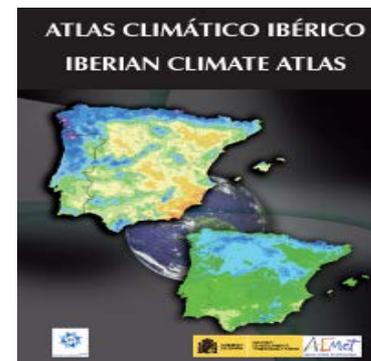
**Pino carrasco (N=38)**  
*Pinus halepensis* Mill.

## Modelos de regresión-interpolación

- basados en variables geográficas
- utilizados para interpolar datos climáticos



<http://opengis.uab.es/wms/iberia/>

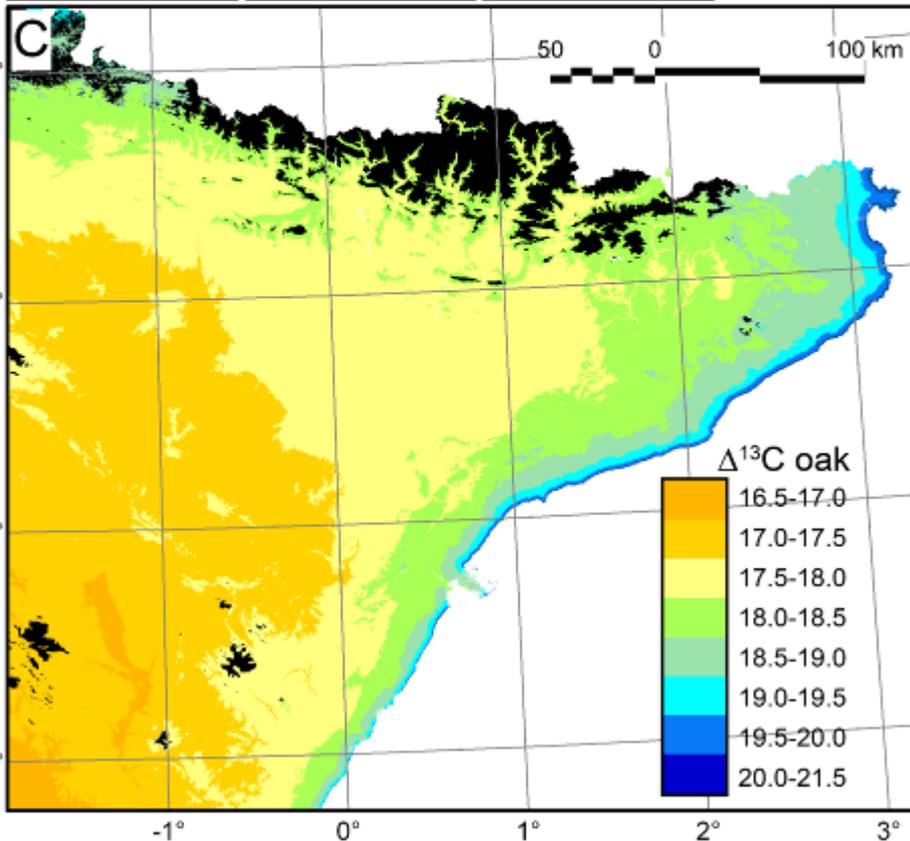
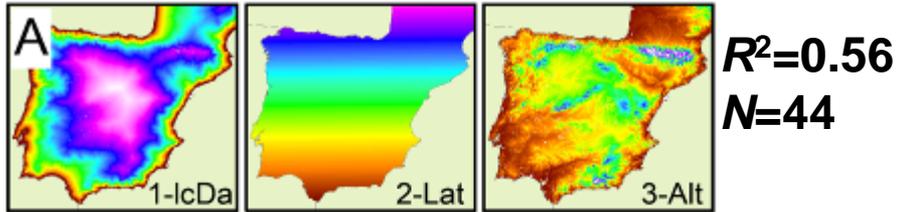


<http://www.aemet.es/>

# Isoscapes: pino vs. encina

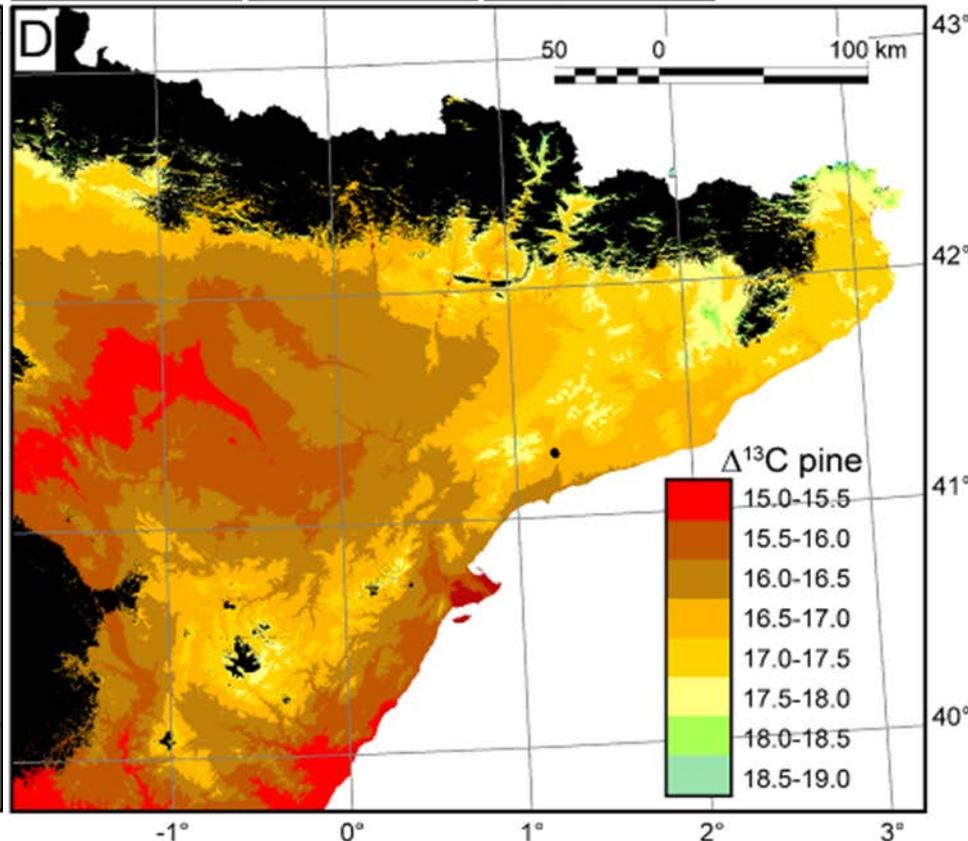
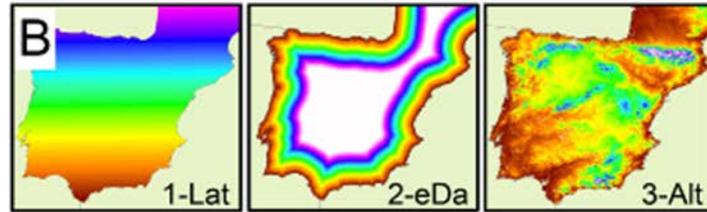
*Q. ilex*

Cont >>> Lat > Alt



*P. Halepensis*

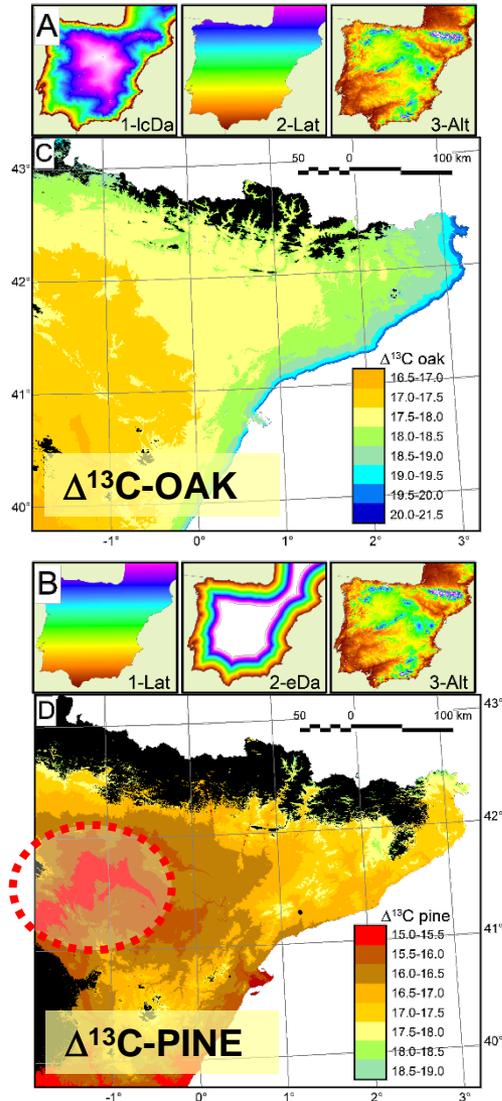
Lat > Cont > Alt



# Isoscapes: pino vs. encina

Patrones espaciales de  $\Delta^{13}\text{C}$  muestran limitación geográfica de cada especie  
→ define ‘zonas de riesgo’ potencial

Complementa los tradicionales ‘índices de idoneidad’, basados en la distribución de especies,  
→ ‘vulnerabilidad fisiológica’



# Caso 3: estudio del decaimiento



Sierra de Gúdar (Teruel)  
sequía + frío



**Decaimiento selectivo**  
Mortalidad selectiva

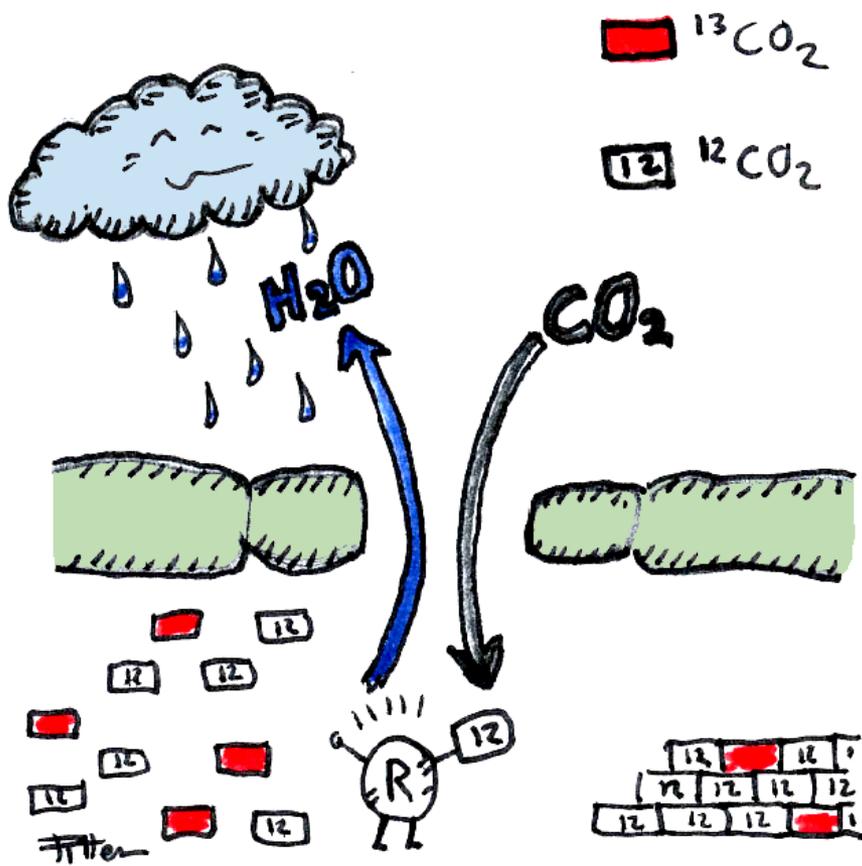
2002 → present

Ishinomaki (Japón)  
Tsunami 2011



**Decaimiento general**  
Descenso brusco crecimiento

2011 → present



**Dos escenarios posibles:**  
¿cómo aumenta EUA ( $A/g_s$ )?

## ESCENARIO 1

Baja  $g_s$  (ahorro de agua)  
→ **asociación negativa entre EUA y crecimiento**

## ESCENARIO 2

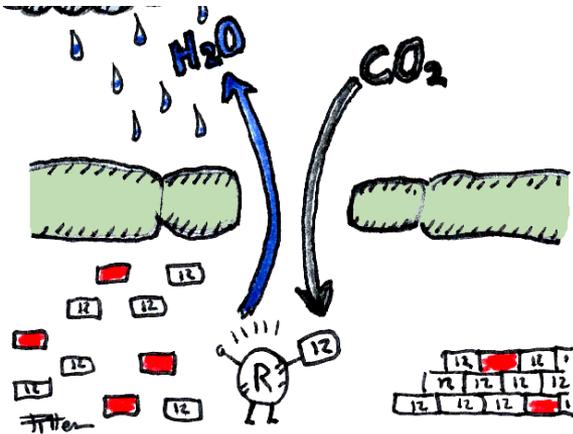
Alta  $A$  (fijación eficiente de C)  
→ **asociación positiva entre EUA y crecimiento**

# Análisis isotópico dual: $^{13}\text{C}$ y $^{18}\text{O}$

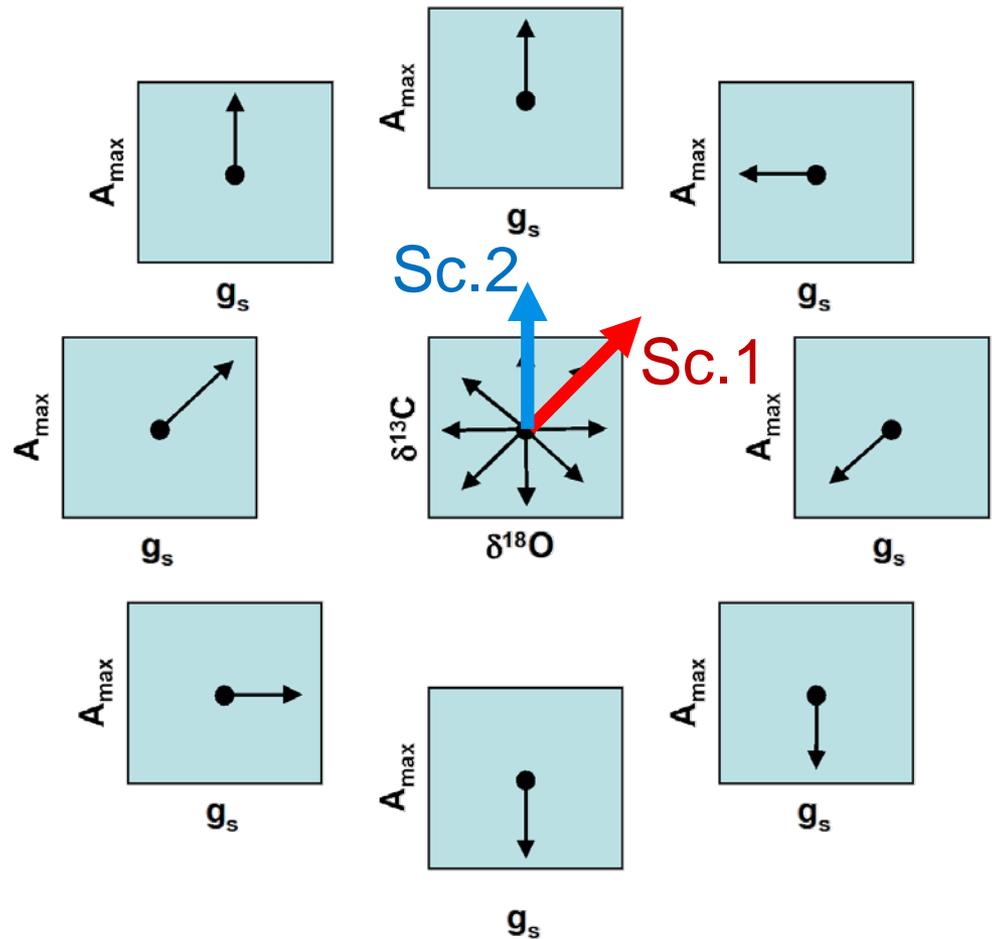
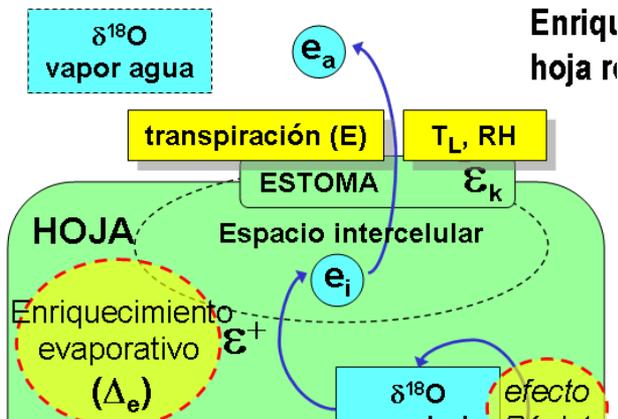


$\delta^{18}\text{O}$  separa efecto  $g_s$  y  $A$  sobre  $\text{EUA}_i$  ( $^{13}\text{C}$ )

$^{13}\text{C} \approx A/g_s$



$^{18}\text{O} \approx g_s$

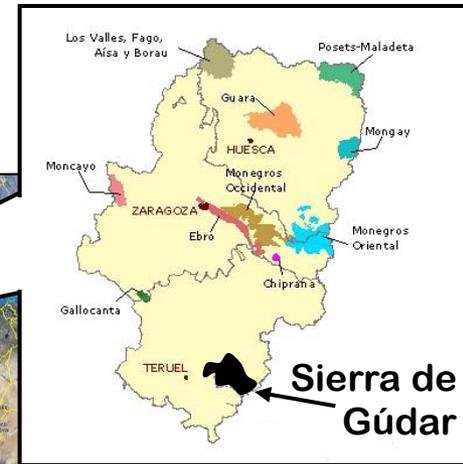


Scheidegger et al. (2000)

# Pino albar en Gúdar



*Pinus sylvestris*



2002 → present



## Material vegetal y estrategia de muestreo

### Edad a 1.30m (y)

<i>Healthy</i>	93.8% ( $\pm 7.52$ )
<i>Declining</i>	79.8% ( $\pm 7.51$ )
	$P=0.380$

### Edad en ápice (y)

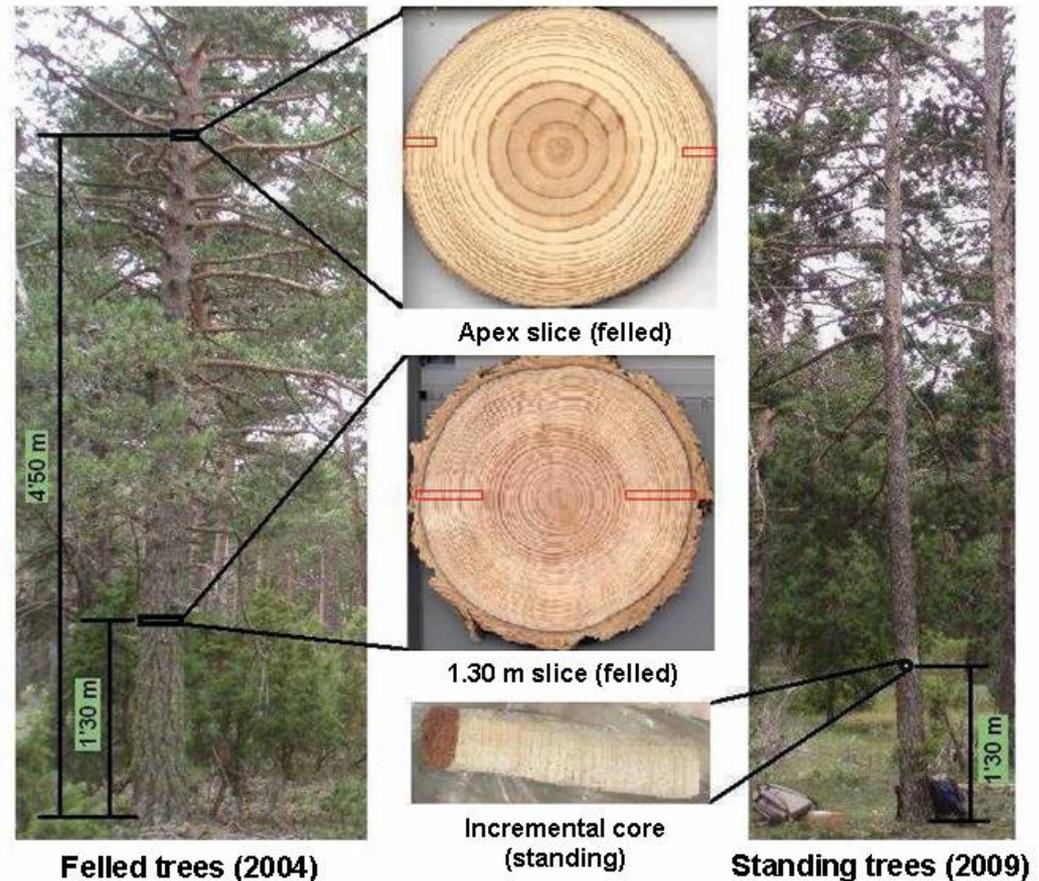
<i>Healthy</i>	27.0% ( $\pm 2.76$ )
<i>Declining</i>	33.0% ( $\pm 4.18$ )
	$P=0.394$

### DBH (cm)

<i>Healthy</i>	14.4% ( $\pm 0.41$ )
<i>Declining</i>	15.8% ( $\pm 1.92$ )
	$P=0.535$

### Defoliación (%)

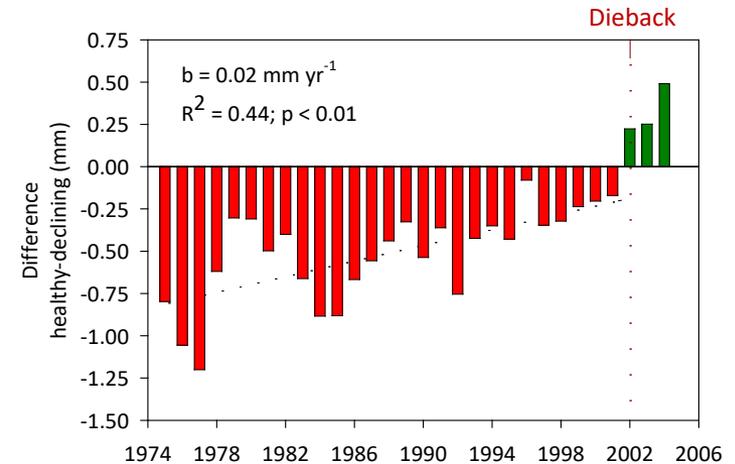
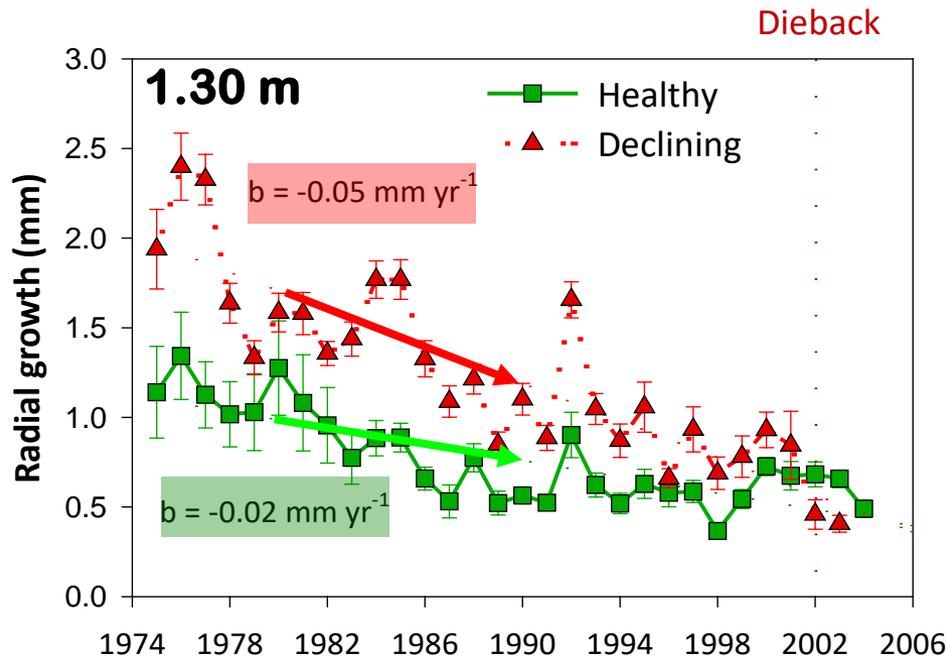
<i>Healthy</i>	11.7% ( $\pm 8.66$ )
<i>Declining</i>	65.0% ( $\pm 4.41$ )
	$P=0.003$



**Análisis del crecimiento +  $^{13}\text{C}$  y  $^{18}\text{O}$**



## Diferencias pre-decaimiento: crecimiento

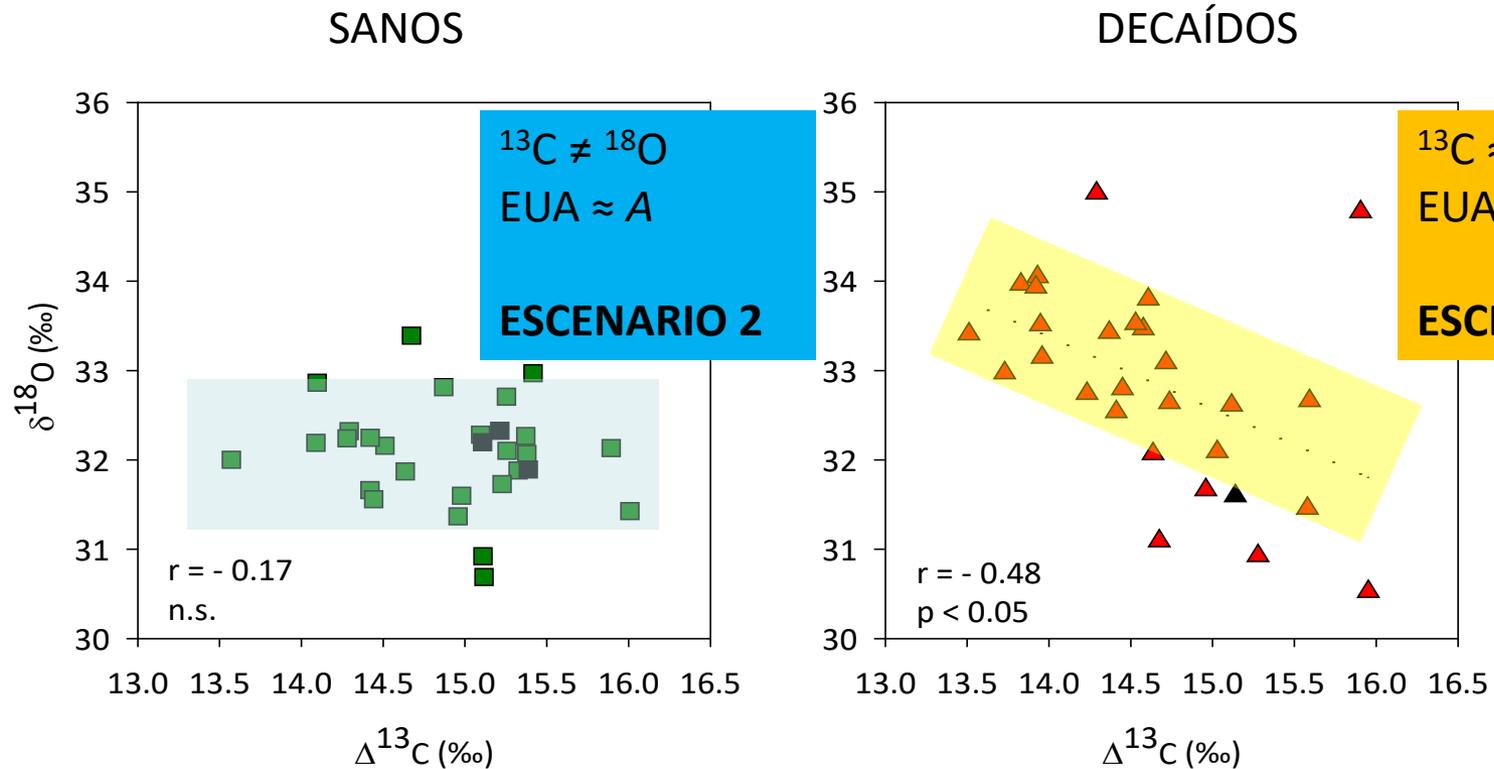


Until mid 90s,  
declining trees grew faster  
...but more erratic

Reducción en crecimiento, pero a distinto ritmo

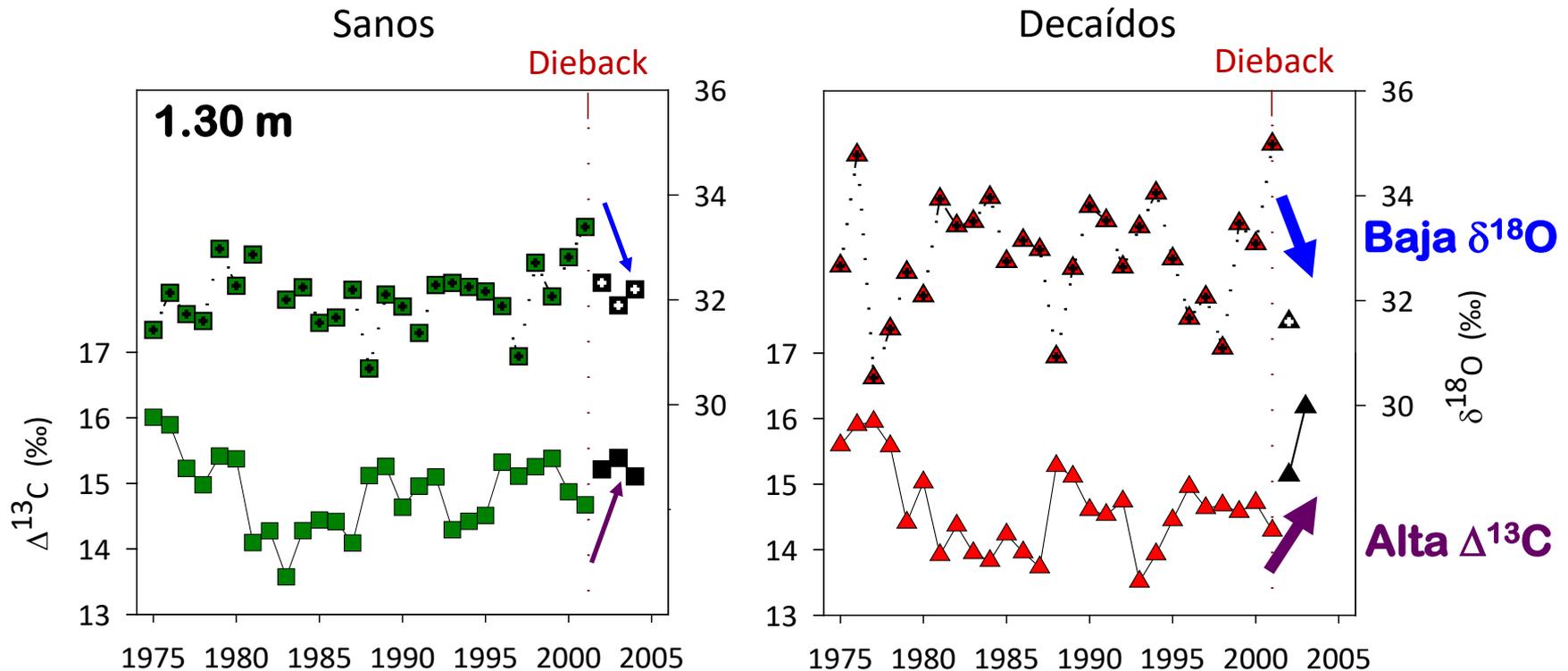


## ISÓTOPOS ESTABLES (1,30m)





## Respuesta post-decaimiento: $\Delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$



**ESCENARIO 'X': Reducción en EUA y temperatura foliar**

# Bosque costero tras Tsunami



Ishinomaki  
Prefectura de Miyagi  
(Japón)



*Pinus thunbergii*



# Cambios isotópicos tras tsunami en Japón



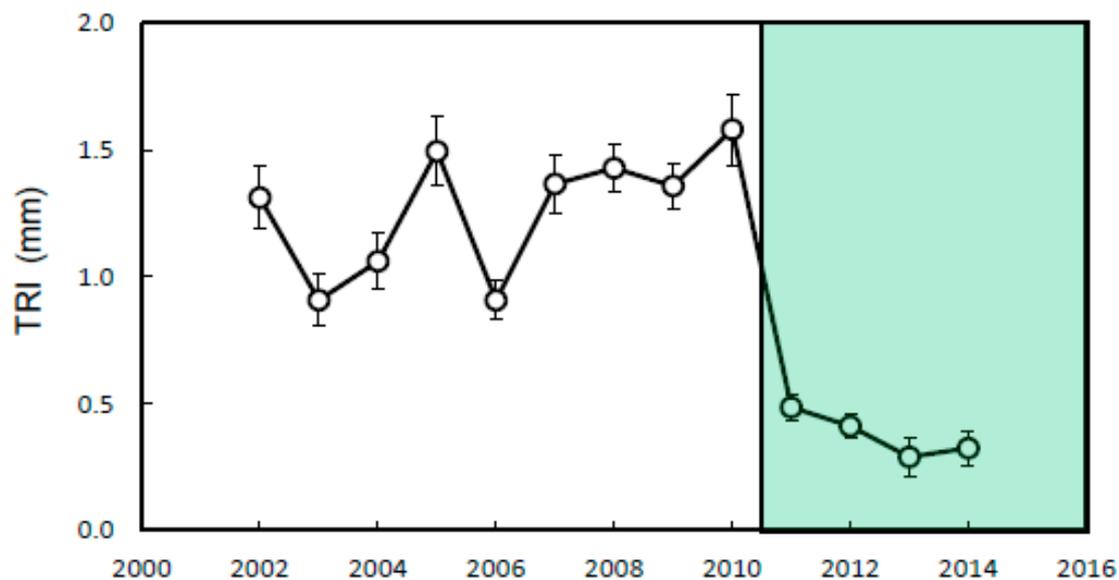
Parcela de bosque costero en Ishinomaki  
**Sin daños físicos debido al tsunami**



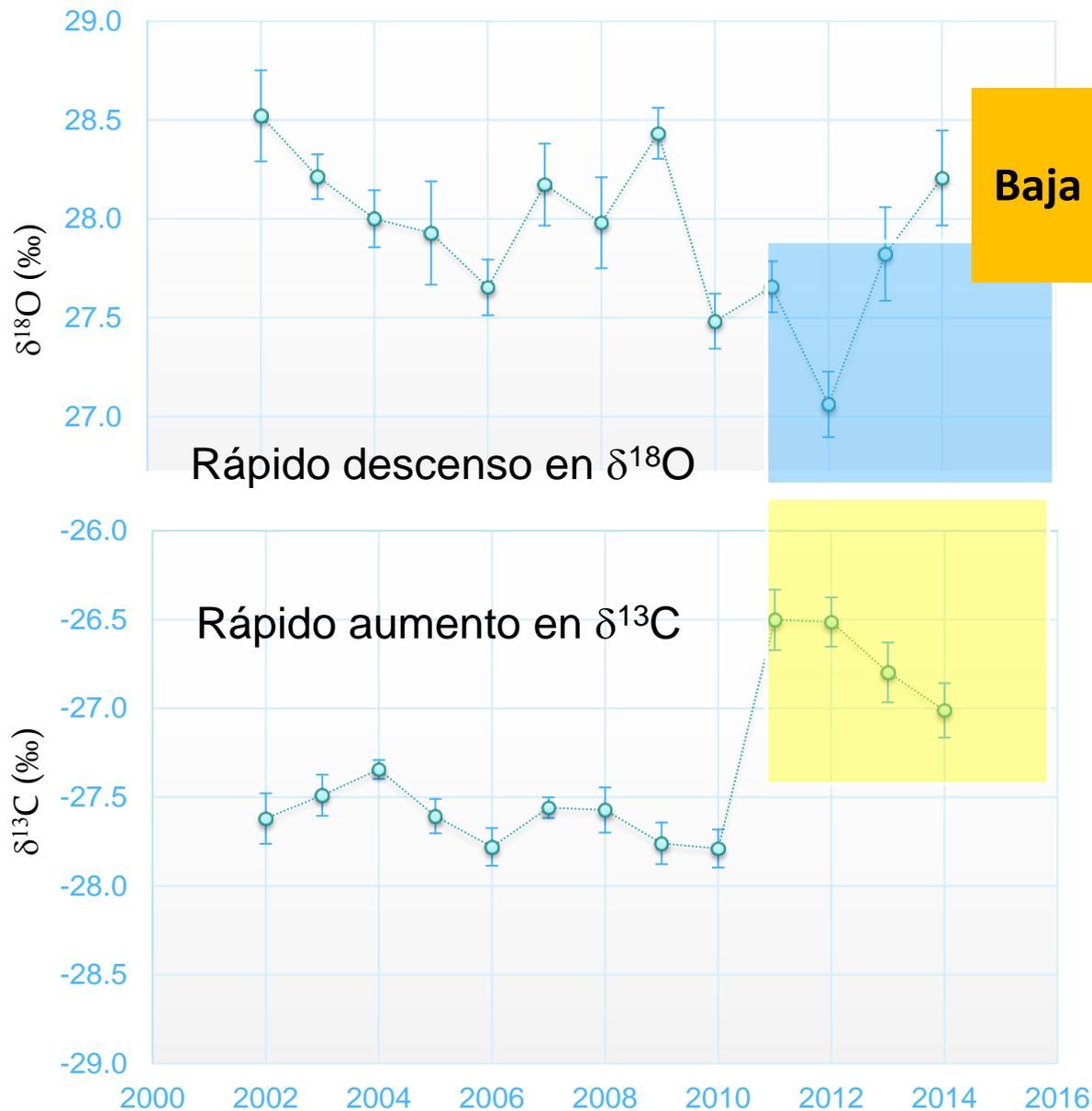
**... pero rápido descenso  
en crecimiento**

**¿Daño por intrusión marina?**

- Estrés salino
- Pérdida de nutrientes
- Debilitación y ataque patógenos

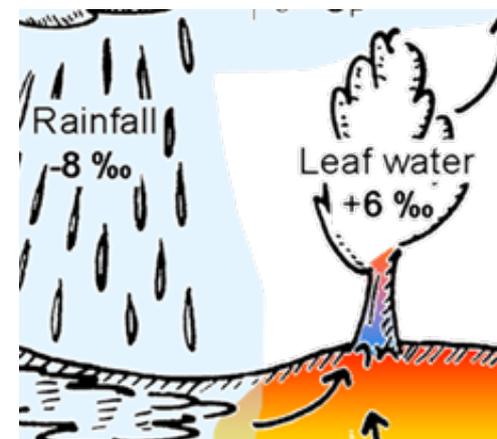


# Cambios isotópicos tras tsunami en Japón



**ESCENARIO 1:**  
Baja crecimiento y alta EUA  
(... pero 18O baja)

**¡Ojo! Señal agua Fuente  
en xilema (tifón 2011)**



# Caso 4: sostenibilidad de la agricultura



Tell Halula, Neolítico, Eúfrates medio (10.000-8.000 BP)

**Halula, poblado actual**  
(región de Aleppo, NO Siria)



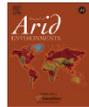
**Tell Halula, Yacimiento neolítico**



Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Journal of Arid Environments

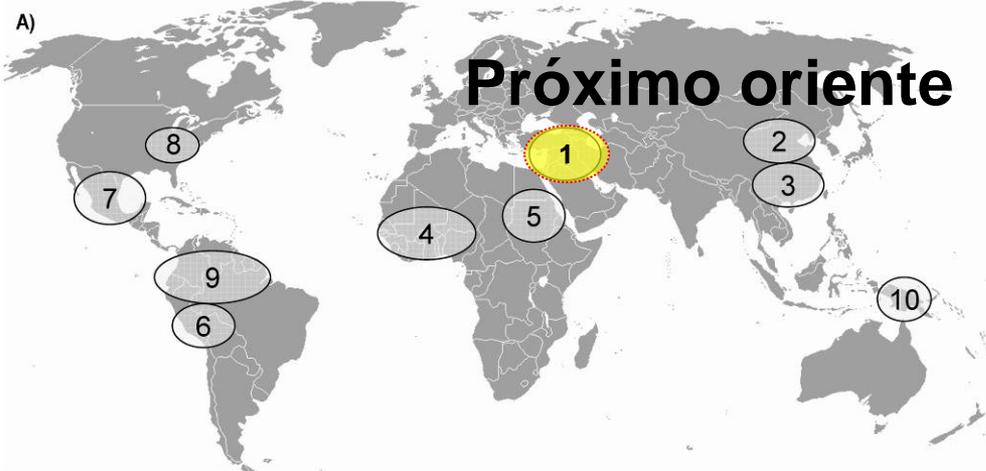
journal homepage: [www.elsevier.com/locate/jaridenv](http://www.elsevier.com/locate/jaridenv)



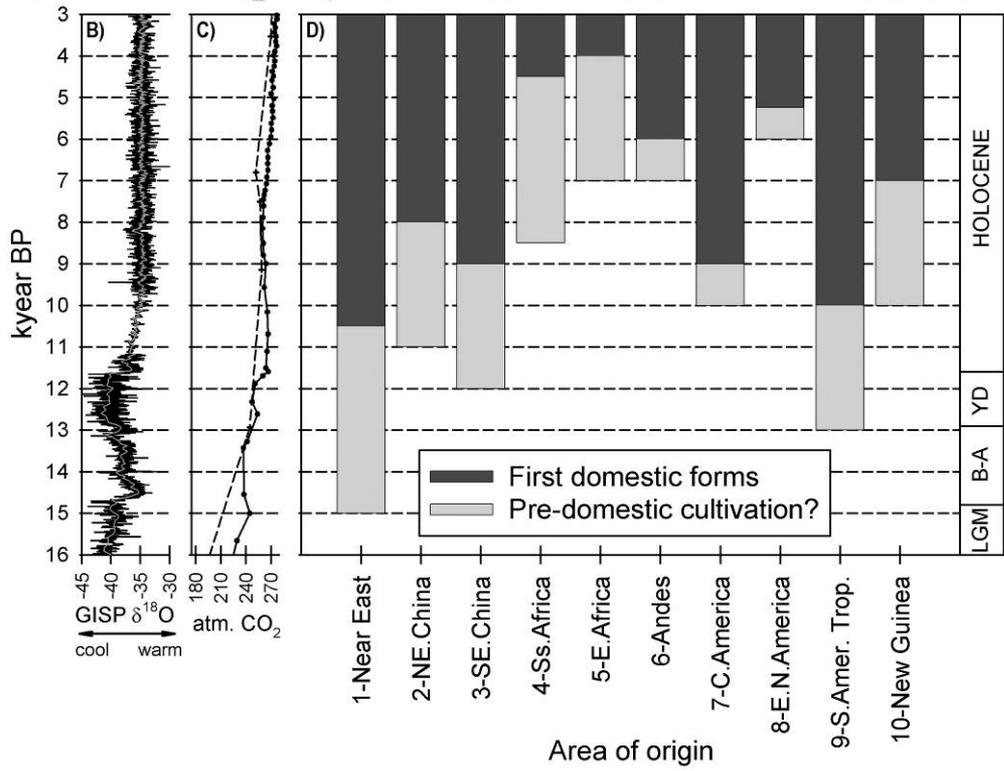
Agricultural expansion and settlement economy in Tell Halula  
(Mid-Euphrates valley): A diachronic study from early Neolithic to present

J.P. Ferrio <sup>a,\*</sup>, G. Arab <sup>b</sup>, R. Buxó <sup>c</sup>, E. Guerrero <sup>d</sup>, M. Molist <sup>d</sup>, J. Voltas <sup>a</sup>, J.L. Araus <sup>e</sup>

# Sostenibilidad en inicios agricultura



¿Hasta qué punto era sostenible la agricultura del pasado?



# Restos arqueobotánicos



Carbones en el sedimento, *Tell Halula*, Siria (J.L.Araus, Univ. Barcelona)

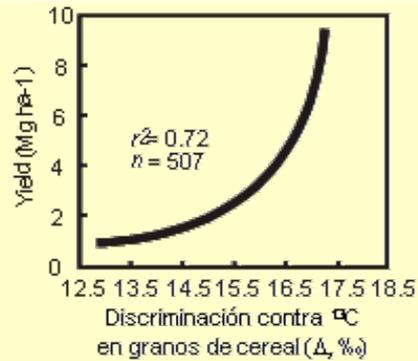
# Rendimiento a partir de $\Delta^{13}\text{C}$ y tamaño del grano

Granos actuales



$\delta^{13}\text{C}$

$\Delta$



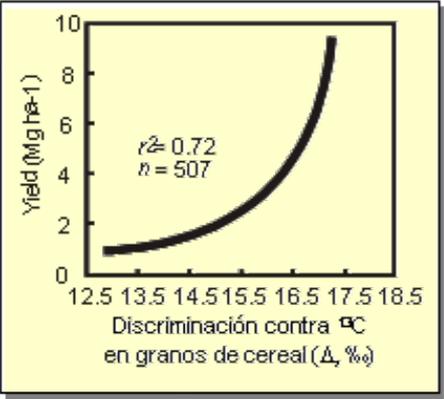
$\Delta^{13}\text{C}$  y rendimiento

$$\text{Yield} = 0.0054 e^{0.40 \cdot \Delta}$$

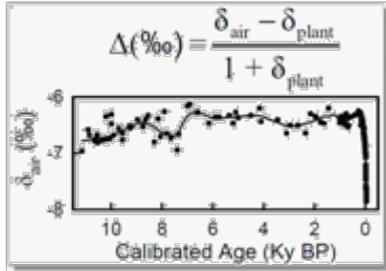
# Rendimiento a partir de $\Delta^{13}\text{C}$ y tamaño del grano



$\delta^{13}\text{C}$   $\Delta$



Cambios  $\delta^{13}\text{C}$  aire



$\Delta^{13}\text{C}$  y rendimiento

$\text{Yield} = 0.0054 e^{0.40 \cdot \Delta}$



$\delta^{13}\text{C}$   
-23.35 ‰  
-23.62 ‰

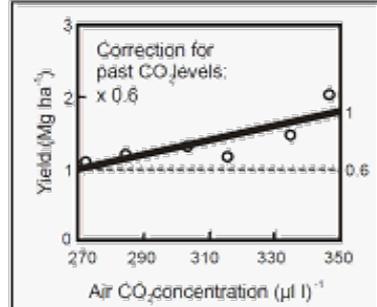
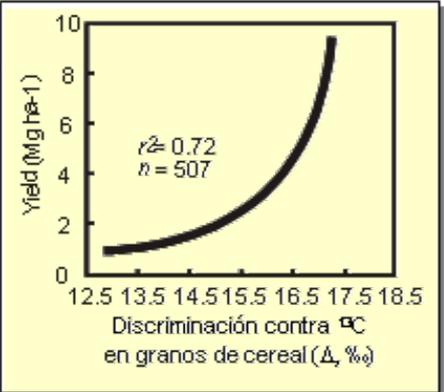
$\Delta$   
17.17 ‰  
17.46 ‰

Rendimiento cond. actuales:  
  
5.36 Mg ha<sup>-1</sup>  
6.02 Mg ha<sup>-1</sup>

# Rendimiento a partir de $\Delta^{13}\text{C}$ y tamaño del grano

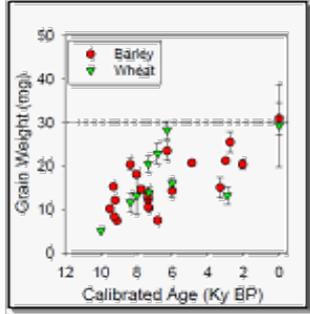


$\delta^{13}\text{C}$   $\Delta$

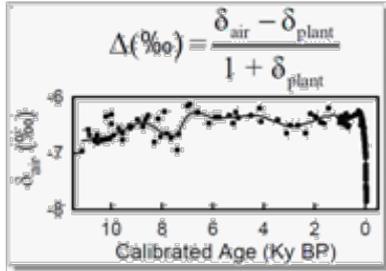


Cambios conc. CO<sub>2</sub>  
Índice de cosecha

Cambios peso potencial

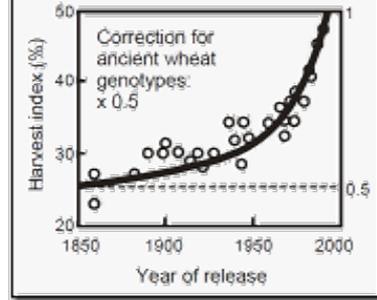


Cambios  $\delta^{13}\text{C}$  aire



$\Delta^{13}\text{C}$  y rendimiento

$\text{Yield} = 0.0054 e^{0.40 \cdot \Delta}$



Corrección:  
0.6 x 0.5 = 0.3

Corrección por tamaño potencial pasado / presente



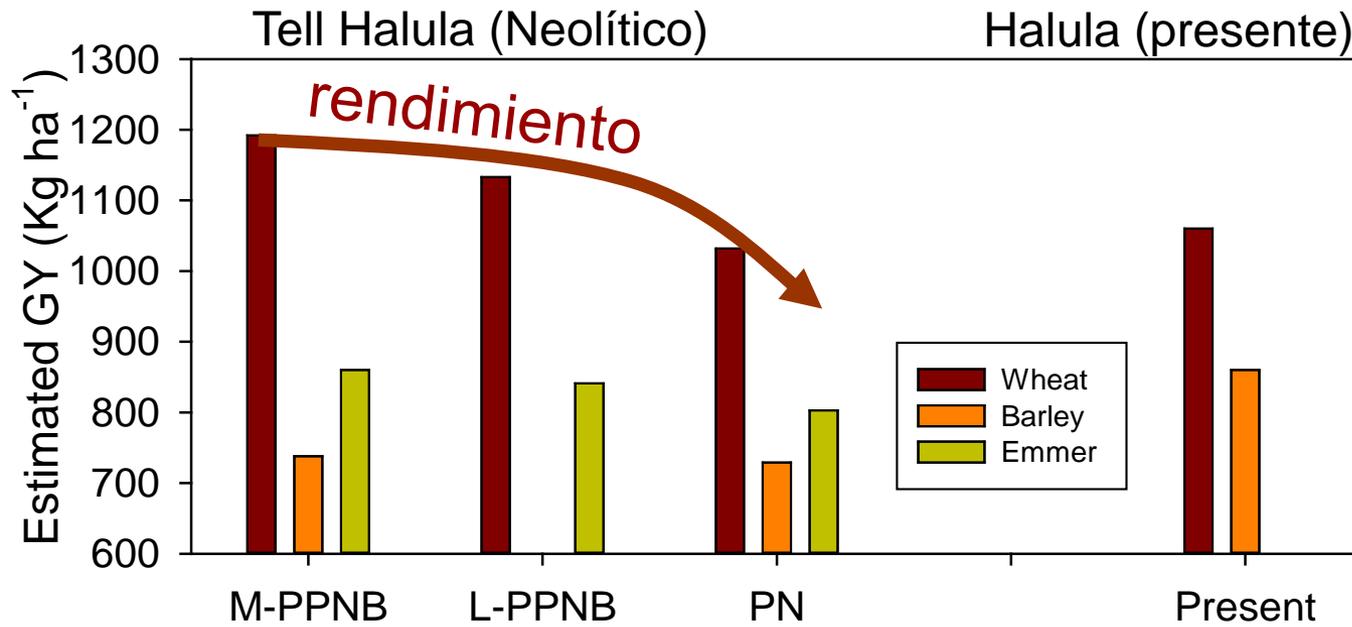
$\delta^{13}\text{C}$   
-23.35 ‰  
-23.62 ‰

$\Delta$   
17.17 ‰  
17.46 ‰

Rendimiento cond. actuales:  
5.36 Mg ha<sup>-1</sup>  
6.02 Mg ha<sup>-1</sup>

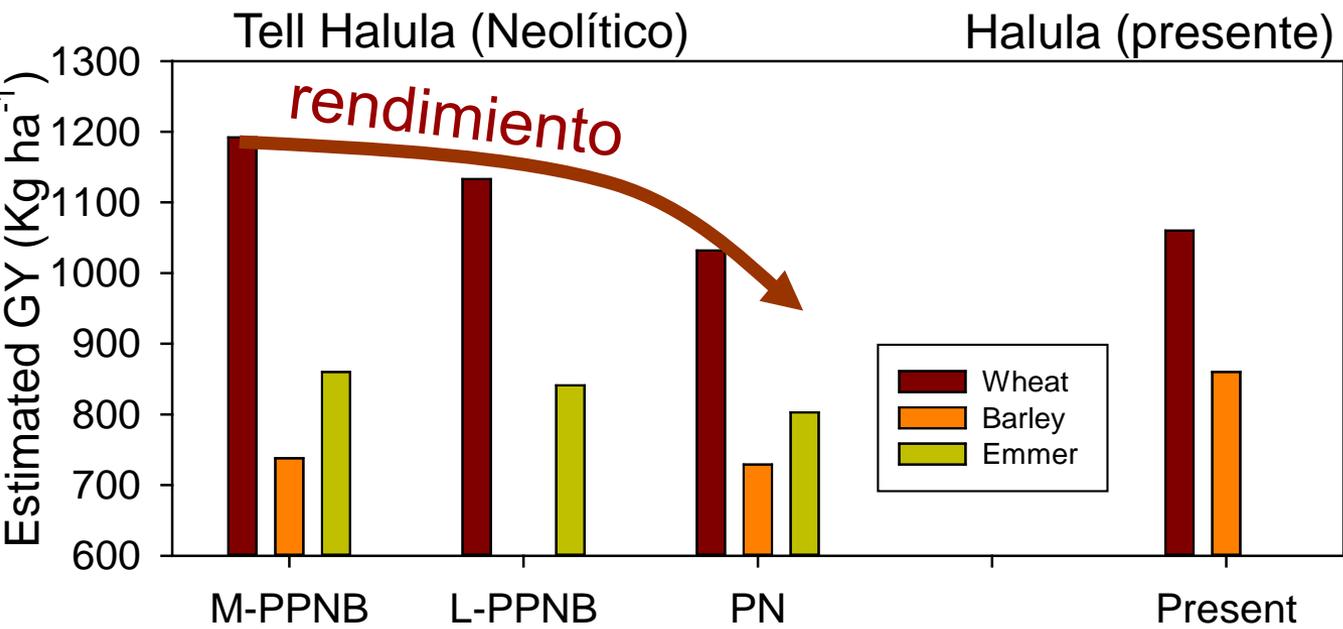
Rendimiento en antigüedad:  
1.61 Mg ha<sup>-1</sup>  
1.81 Mg ha<sup>-1</sup>

# Descenso en producción de grano

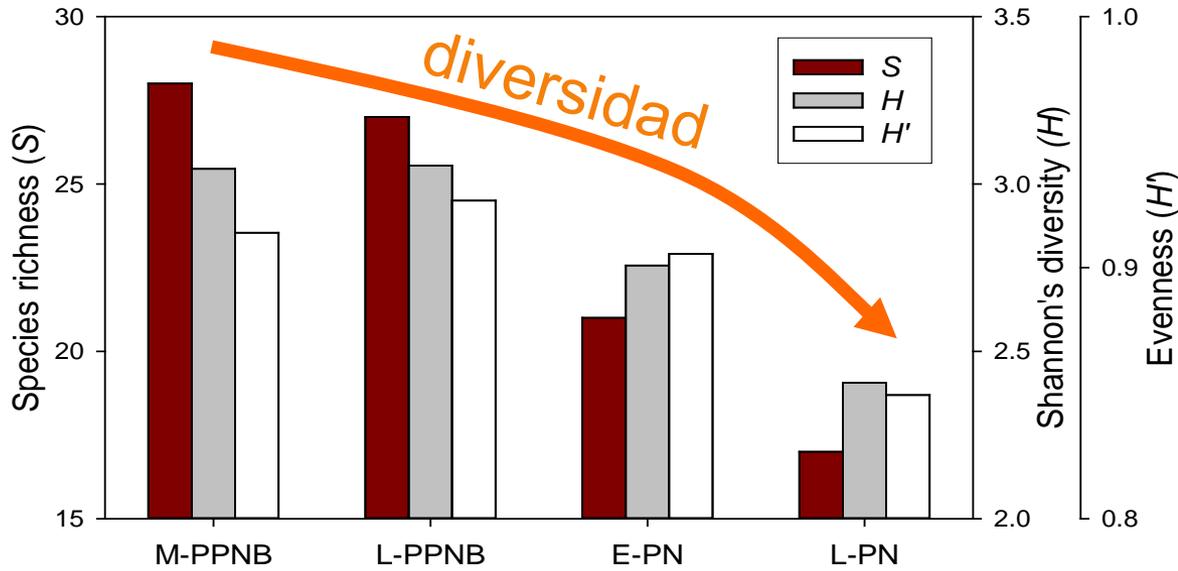


**Descenso en Rendimiento de trigo (según 13C)**

# Descenso en la diversidad

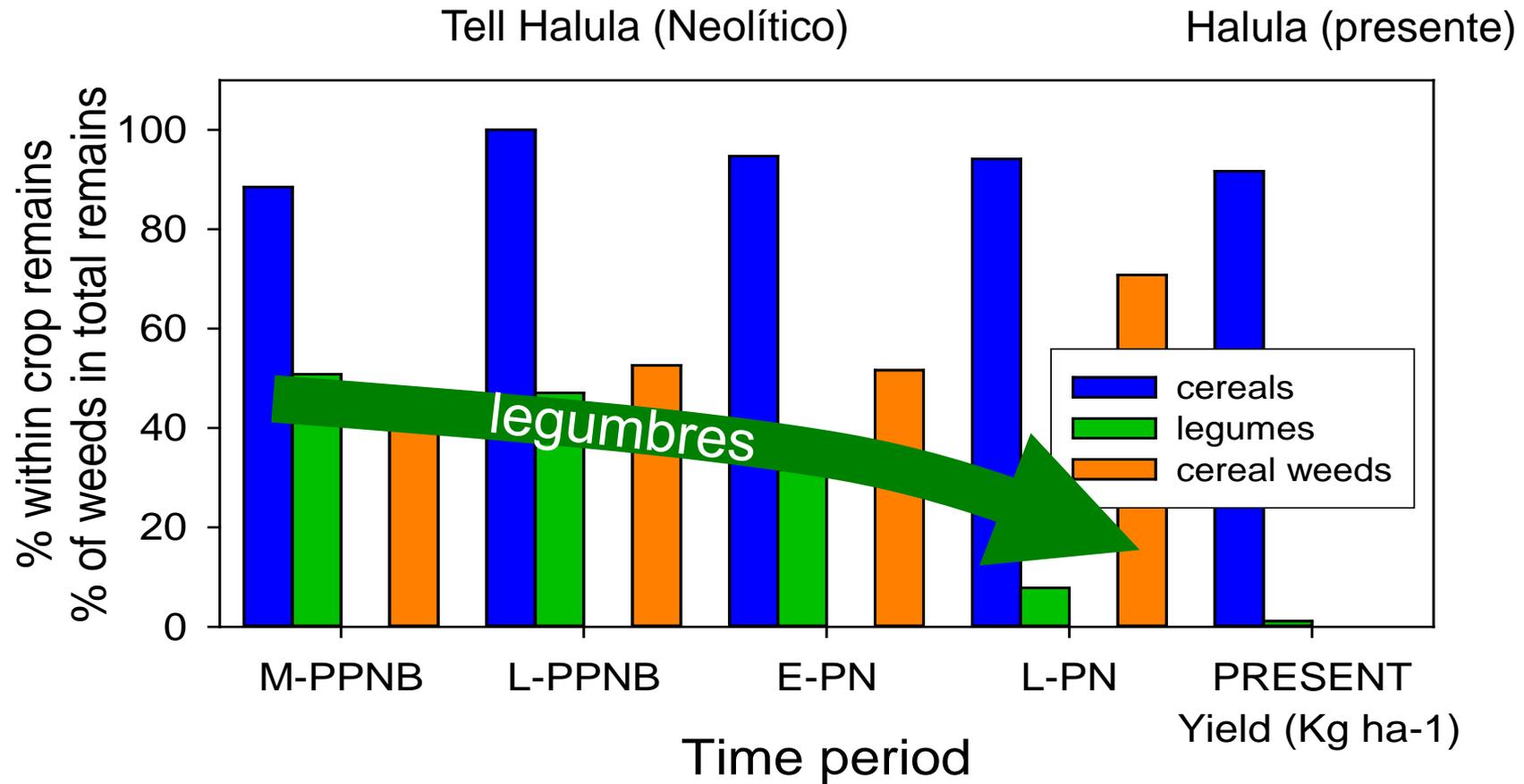


**Descenso en Rendimiento de trigo (según 13C)**



**Descenso en Diversidad**

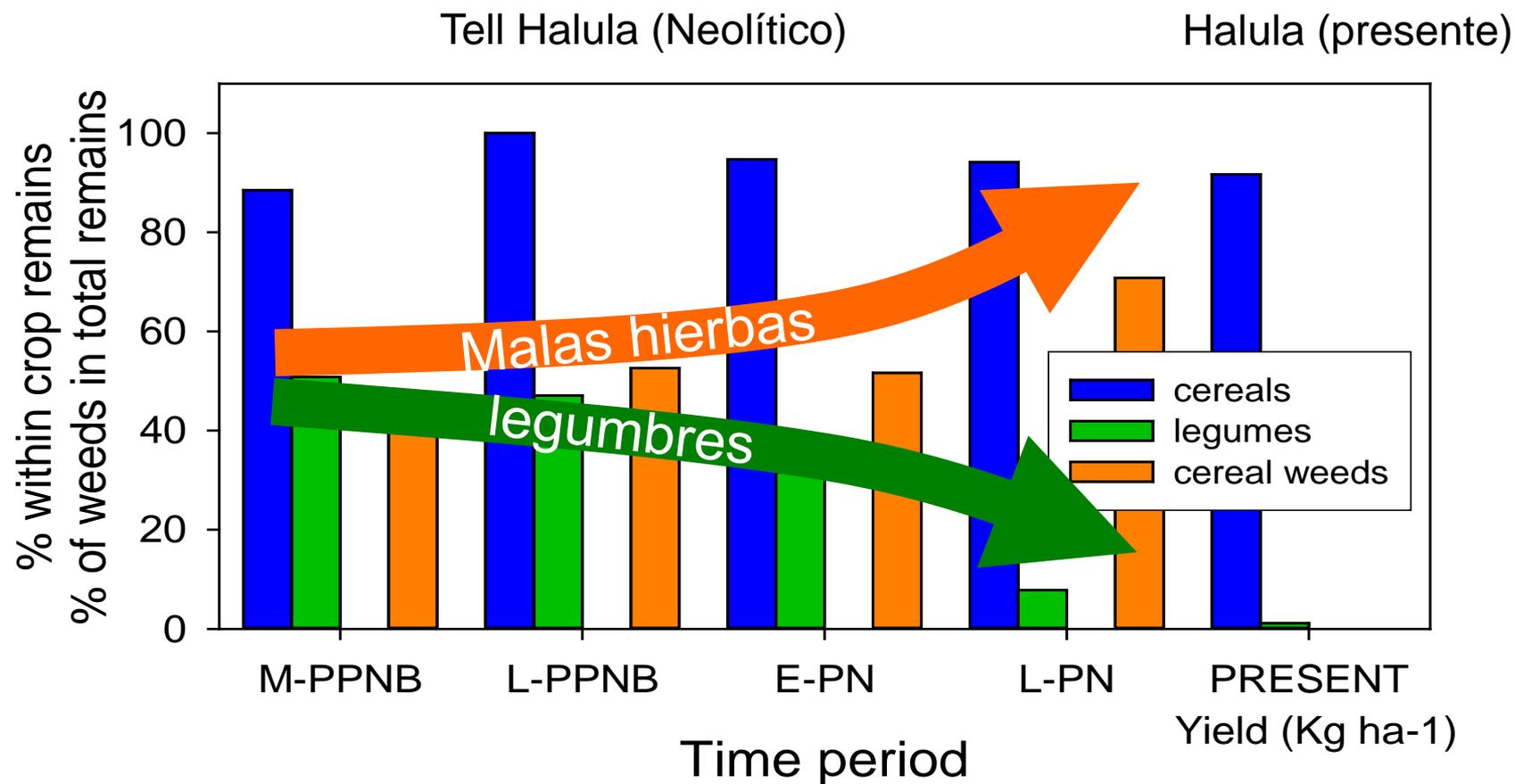
# Posible causa: Transición hacia el monocultivo



**Descenso en leguminosas**

≈ Presente (monocultivo cebada)

# Monocultivo = ¿ baja fertilidad y malas hierbas ?

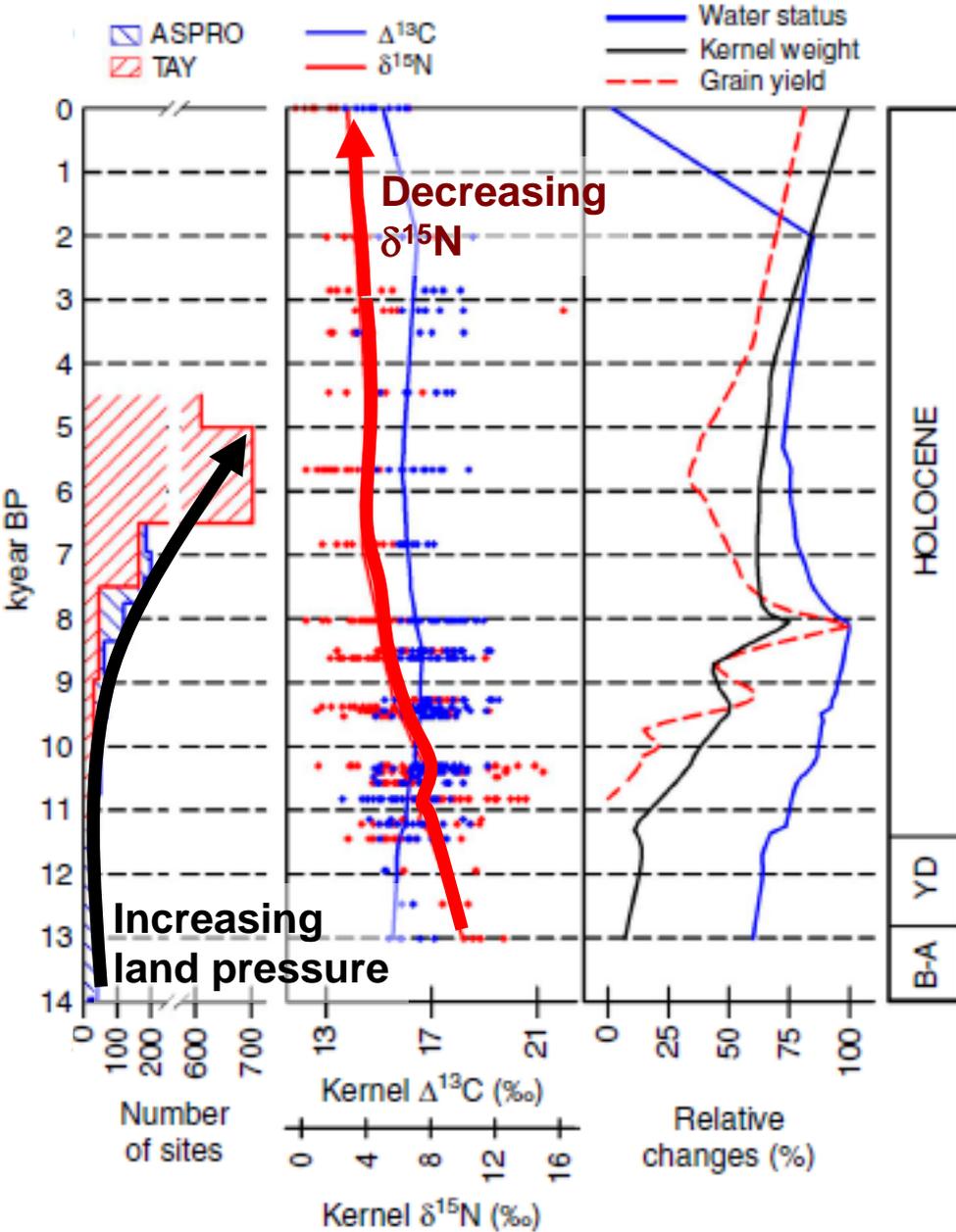


**Descenso en leguminosas**

≈ Presente (monocultivo cebada)

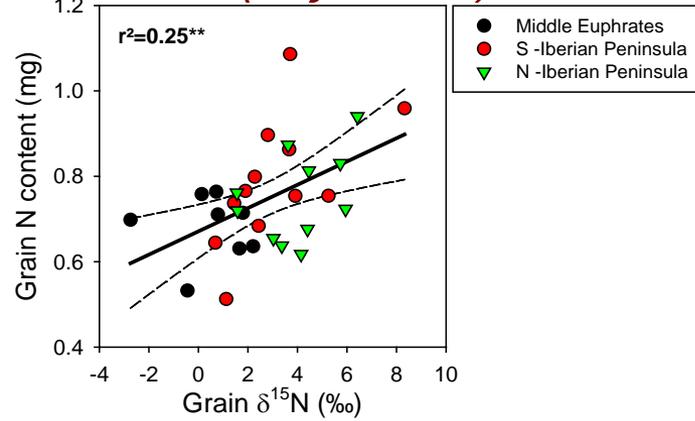
**Aumento de malas hierbas asociadas a cereal**

# Indicios de un descenso en fertilidad a largo plazo



**Gran expansión agrícola**  
(número de yacimientos)  
*(aumento presión demográfica)*

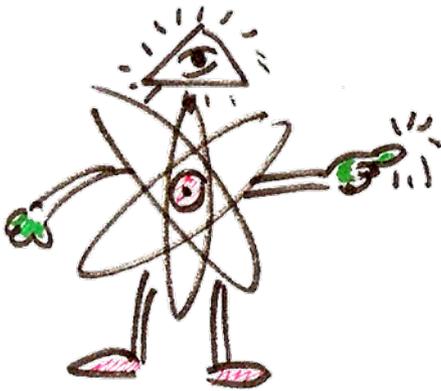
**Descenso en la fertilidad del suelo**  
*(baja δ<sup>15</sup>N)*



ARTICLE  
Received 24 Dec 2013 | Accepted 24 Apr 2014 | Published 23 May 2014  
DOI: 10.1038/ncomms4953

**Agronomic conditions and crop evolution in ancient Near East agriculture**

José L. Arous<sup>1,\*</sup>, Juan P. Ferrio<sup>2,\*</sup>, Jordi Voltas<sup>2,\*</sup>, Mònica Aguilera<sup>2</sup> & Ramón Buxó<sup>3</sup>



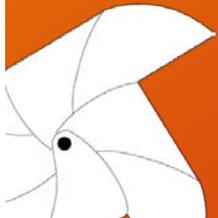
**BELIEVE IN ISOTOPES**

**Integración** a nivel temporal y espacial de distintos procesos físicos, químicos y biológicos

**Material de estudio:** cada fracción orgánica (azúcares, almidón, madera) o inorgánica ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) muestra una escala temporal distinta

**¡Ojo! procesos que alteran la señal isotópica**

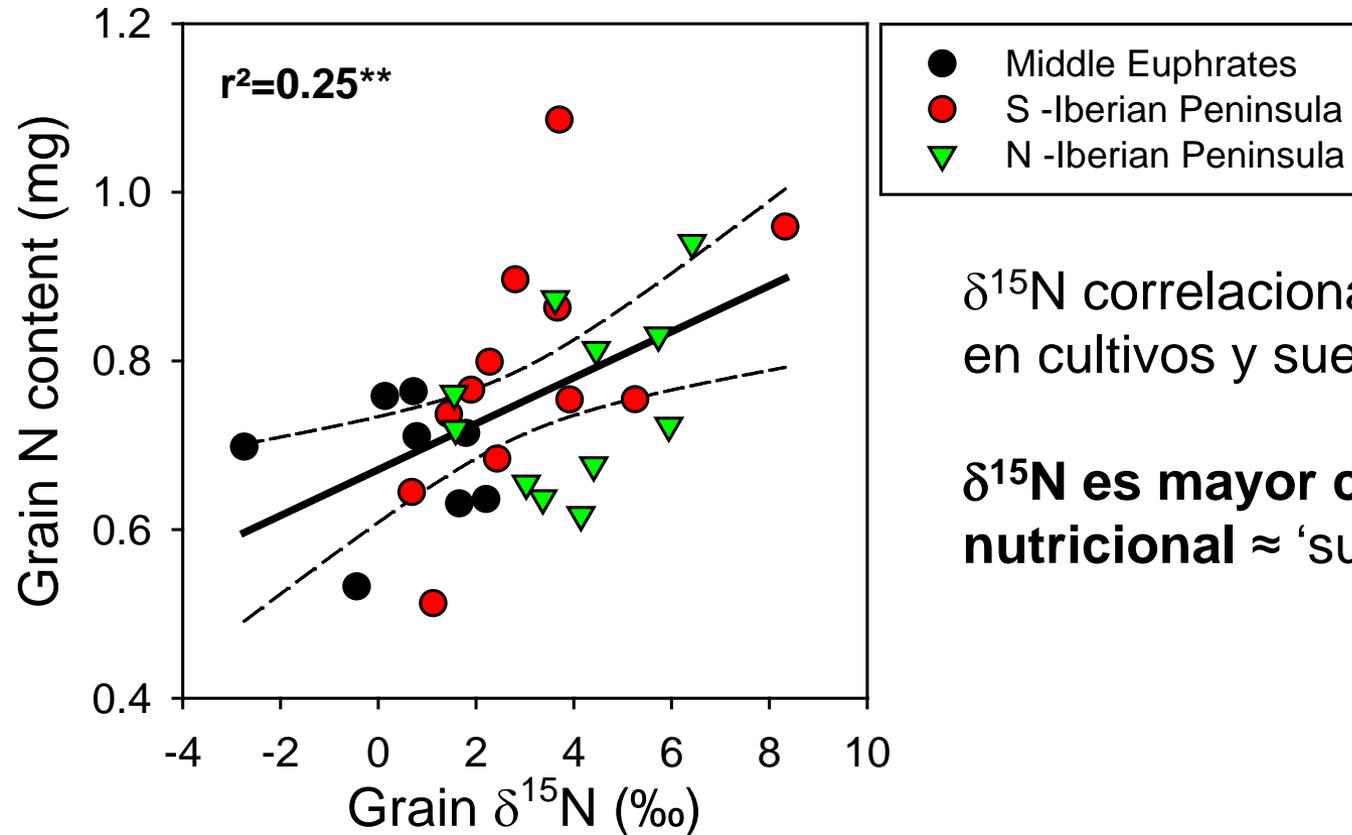
**¡Gracias!**



# $^{15}\text{N}$ y estado nutricional



## $\delta^{15}\text{N}$ y contenido de Nitrógeno por grano en cebada y trigo



$\delta^{15}\text{N}$  correlaciona positivamente con N en cultivos y suelo (sin fertil. Mineral\*):

**$\delta^{15}\text{N}$  es mayor con mejor estado nutricional  $\approx$  'suelos ricos'**

\*Bol et al. 2004. *Isotopes Environ. Health Stud.*; Bol et al. 2005. *Rapid Comm. Mass Spectrom.*

\*Choi et al. 2003. *Soil Biology & Biochemistry*

\*Bogaard et al. 2006. *Journal of Archaeological Science*

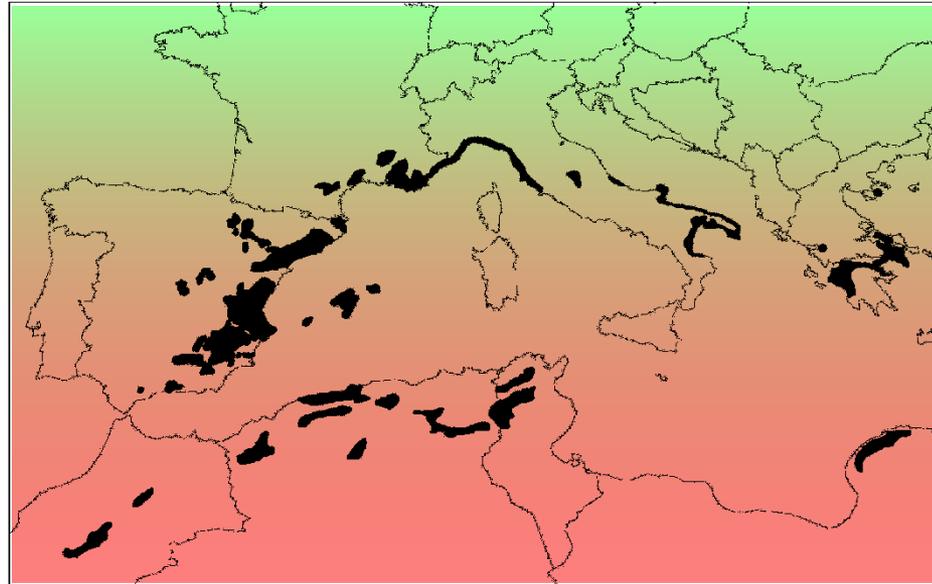
\*Aguilera et al. 2008. *Rapid Comm Mass Spec*



# Ejemplo: adaptación y EUA



Pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.)



**Diferente exposición al estrés hídrico actúa como fuerza de selección**

# Ensayo de procedencias

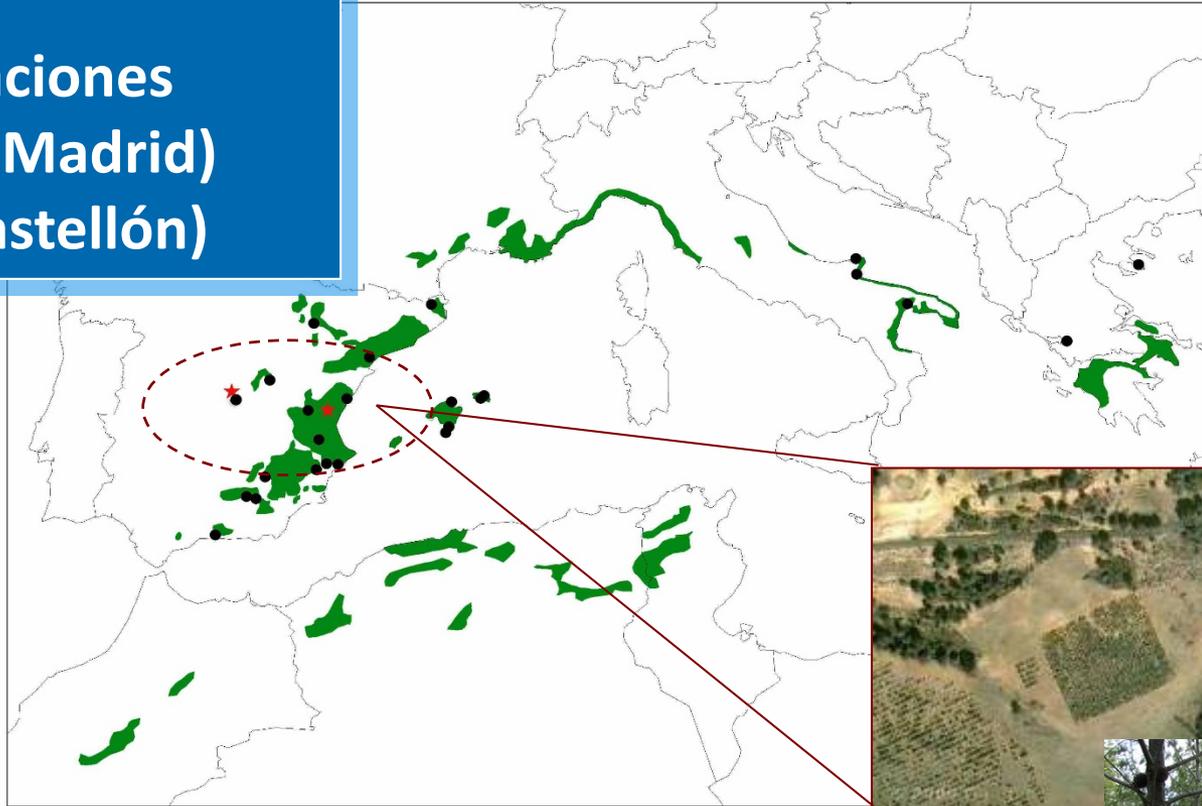


25 poblaciones

x 2 plantaciones

Arganda (Madrid)

Altura (Castellón)

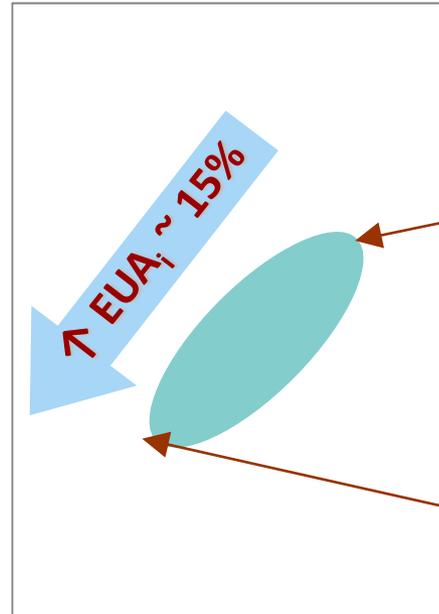
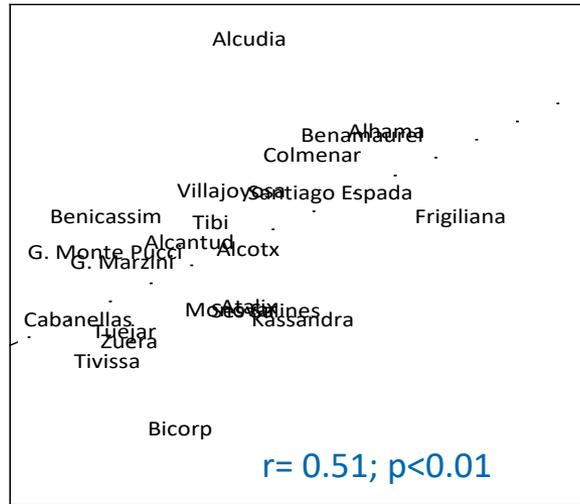


# Variación genética en $^{13}C$

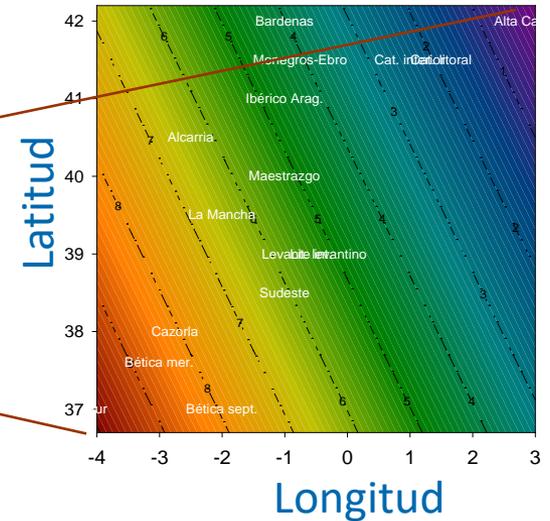


## Respuesta adaptativa: asociación con el clima en origen

+  
 $\delta^{13}C$  (EUA)  
-



Paisaje genotípico ( $EUA_i$ , %)



-  
Estacionalidad  
precipitación  
(aridez estival)



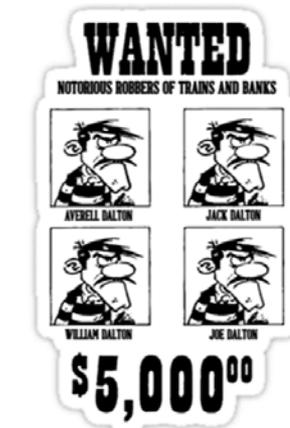
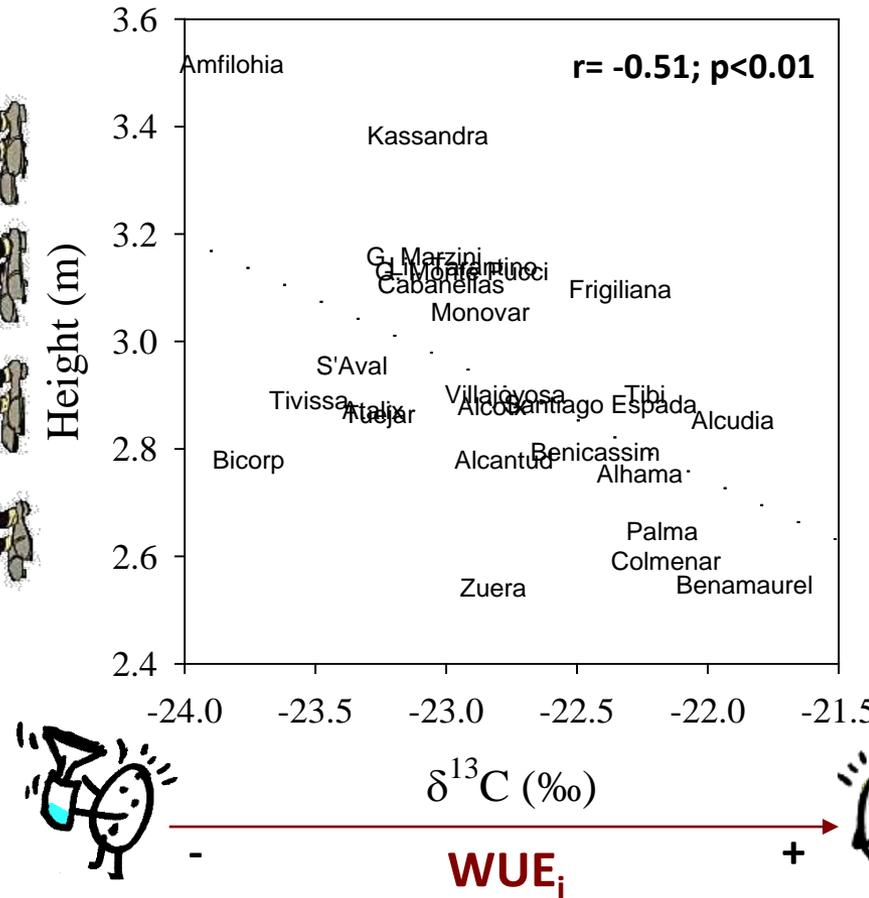
+

# Variación genética en 13C



pero... ¿a qué precio?

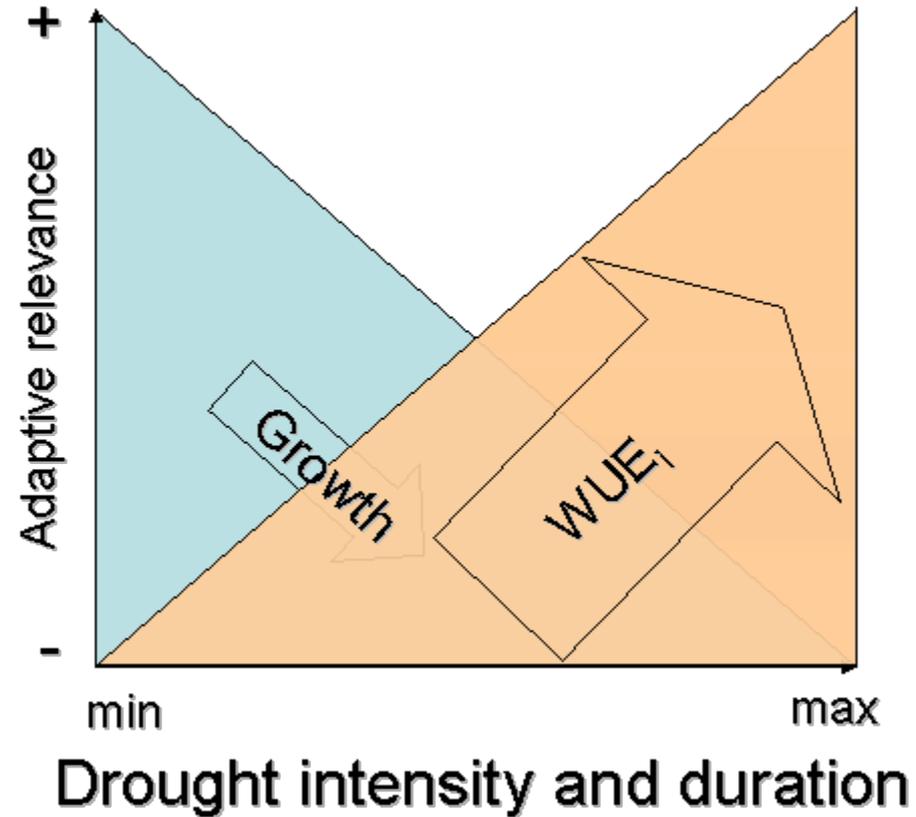
asociación negativa entre WUE y crecimiento



# Asociación EUA vs crecimiento



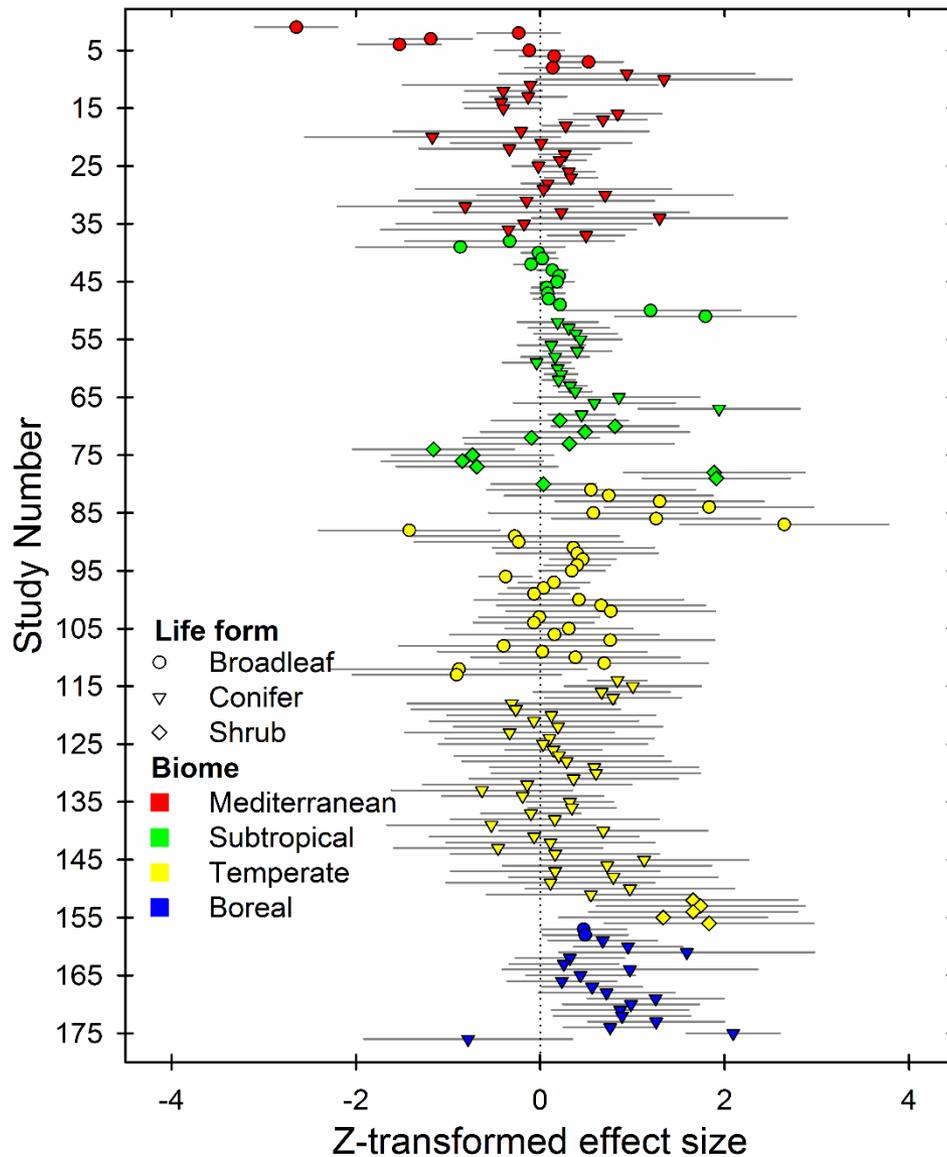
	Mésico	Xérico
EUA	-	++
Altura planta	++	-



## ESCENARIO 1:

Ahorro de agua = mayor EUA, menor crecimiento

# Pero... tendencia global positiva



**Relación positiva  
entre  
 $\delta^{13}\text{C}$  y crecimiento**

**ESCENARIO 2:**

**Fotosíntesis más eficiente  
(elevada  $A$ )**

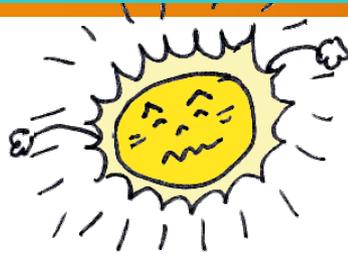


**Alta  $\text{EUA}_i (A/g_s)$**



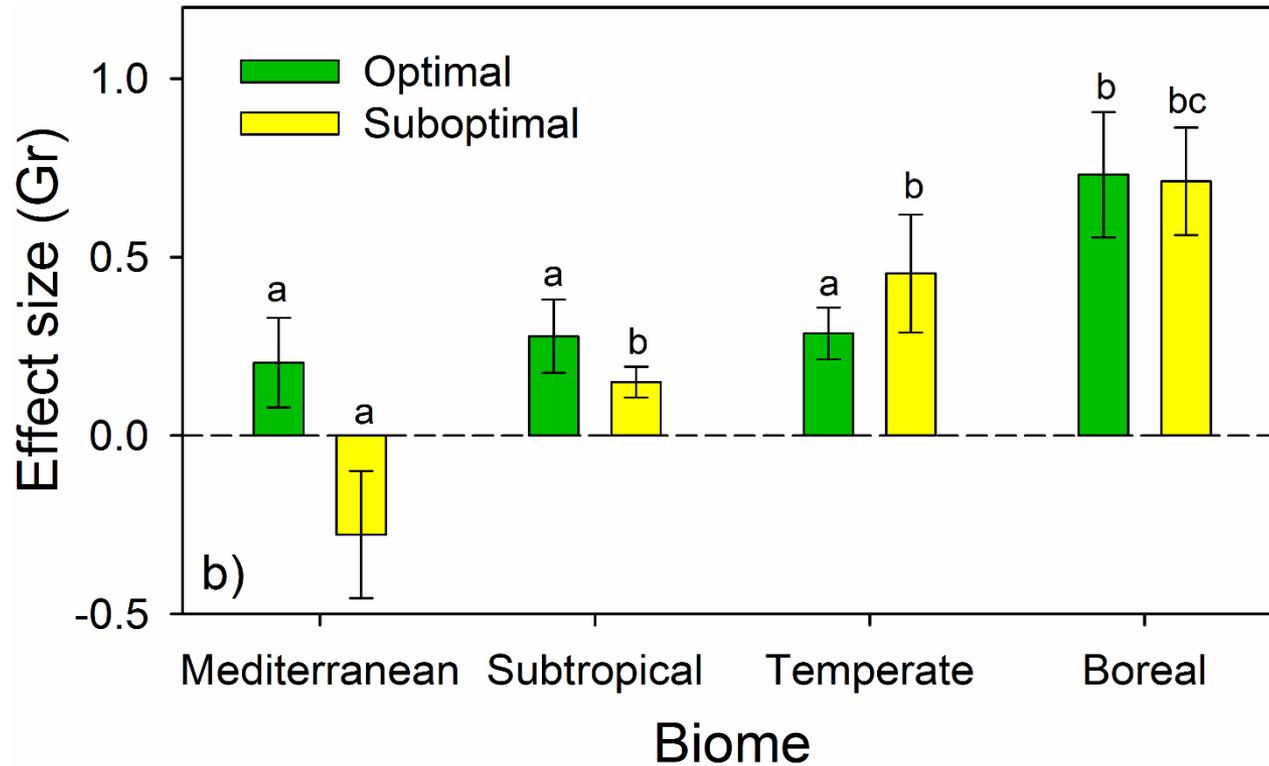
**Alto crecimiento**

# Pero... tendencia global positiva



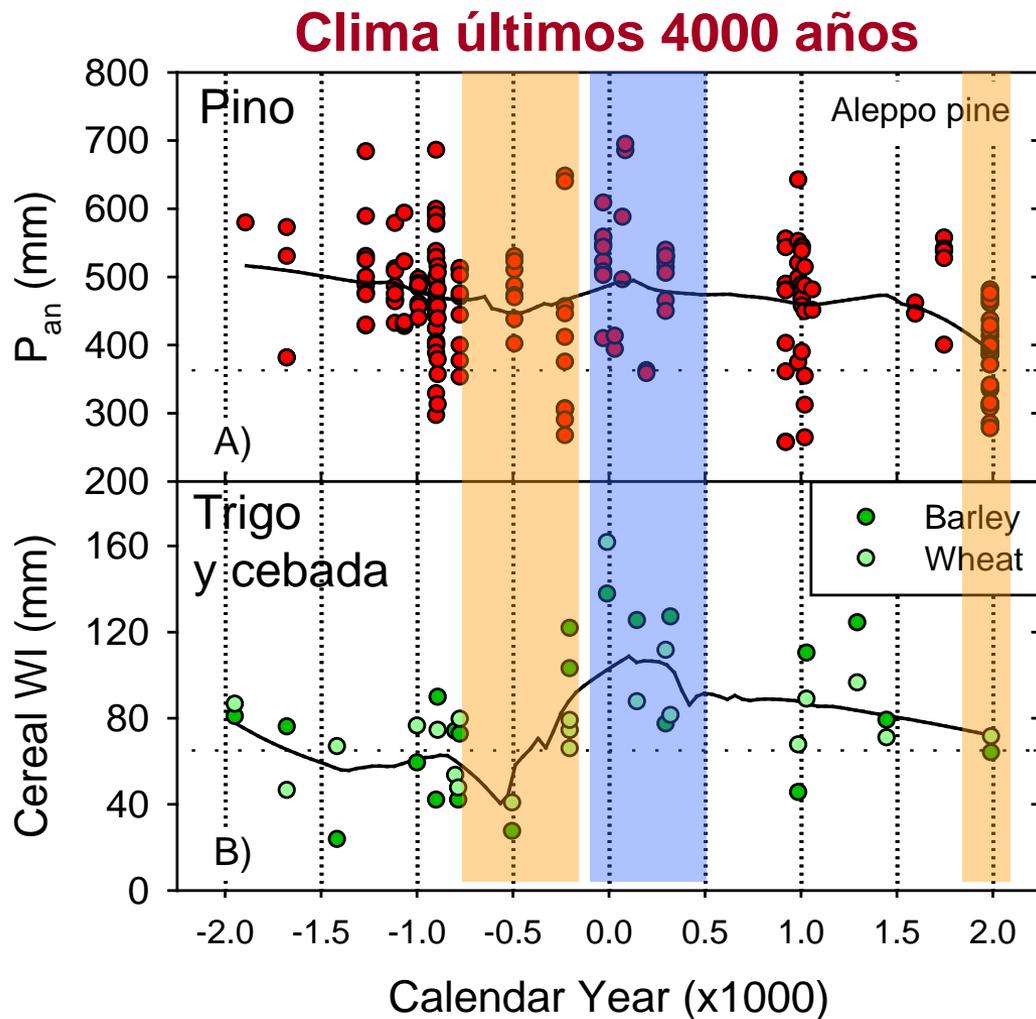
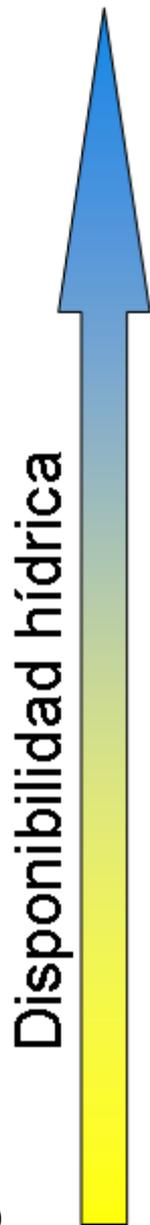
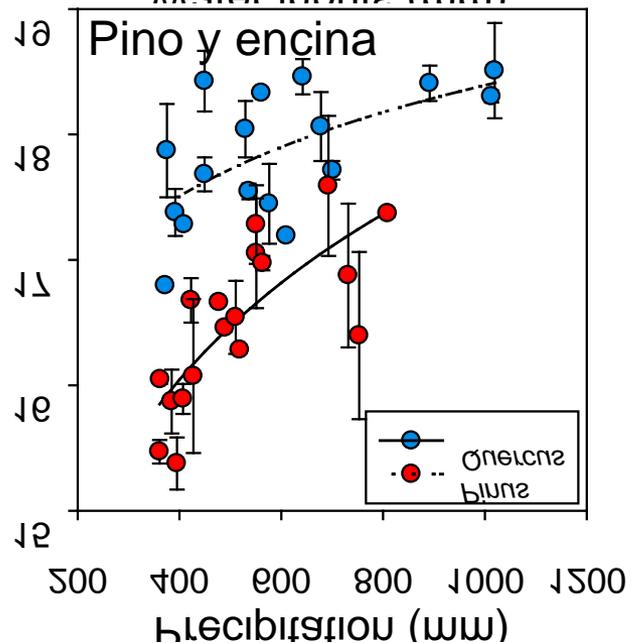
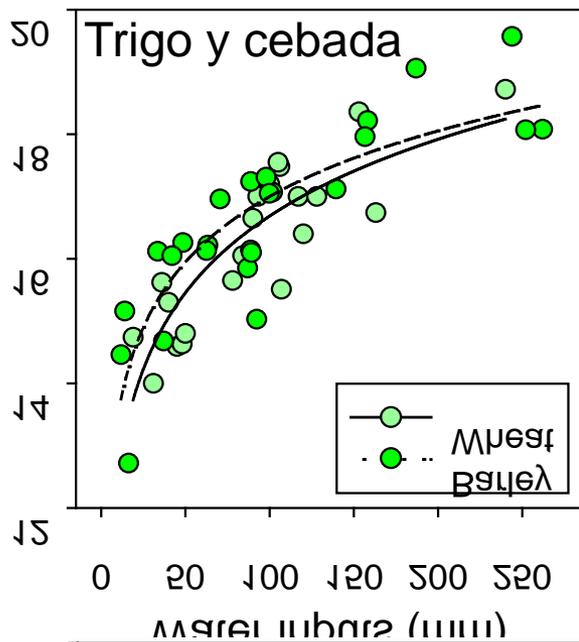
**LIMITACIÓN AGUA**

**LIMITACIÓN ENERGÍA**

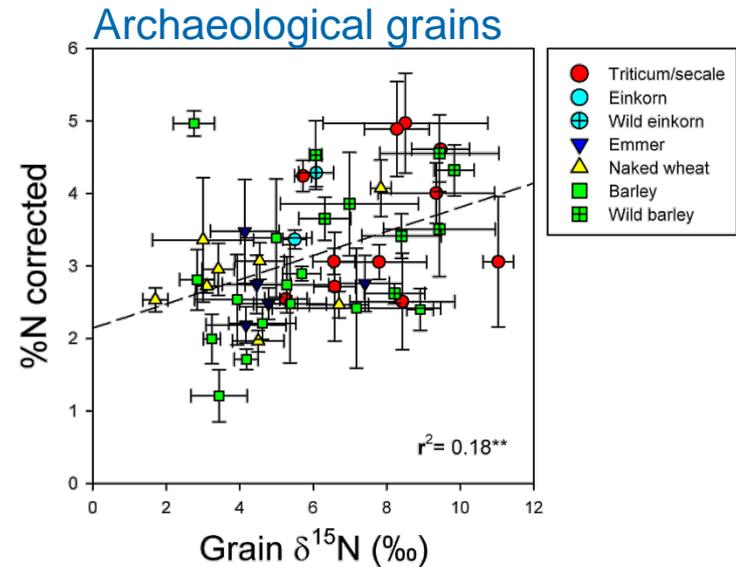
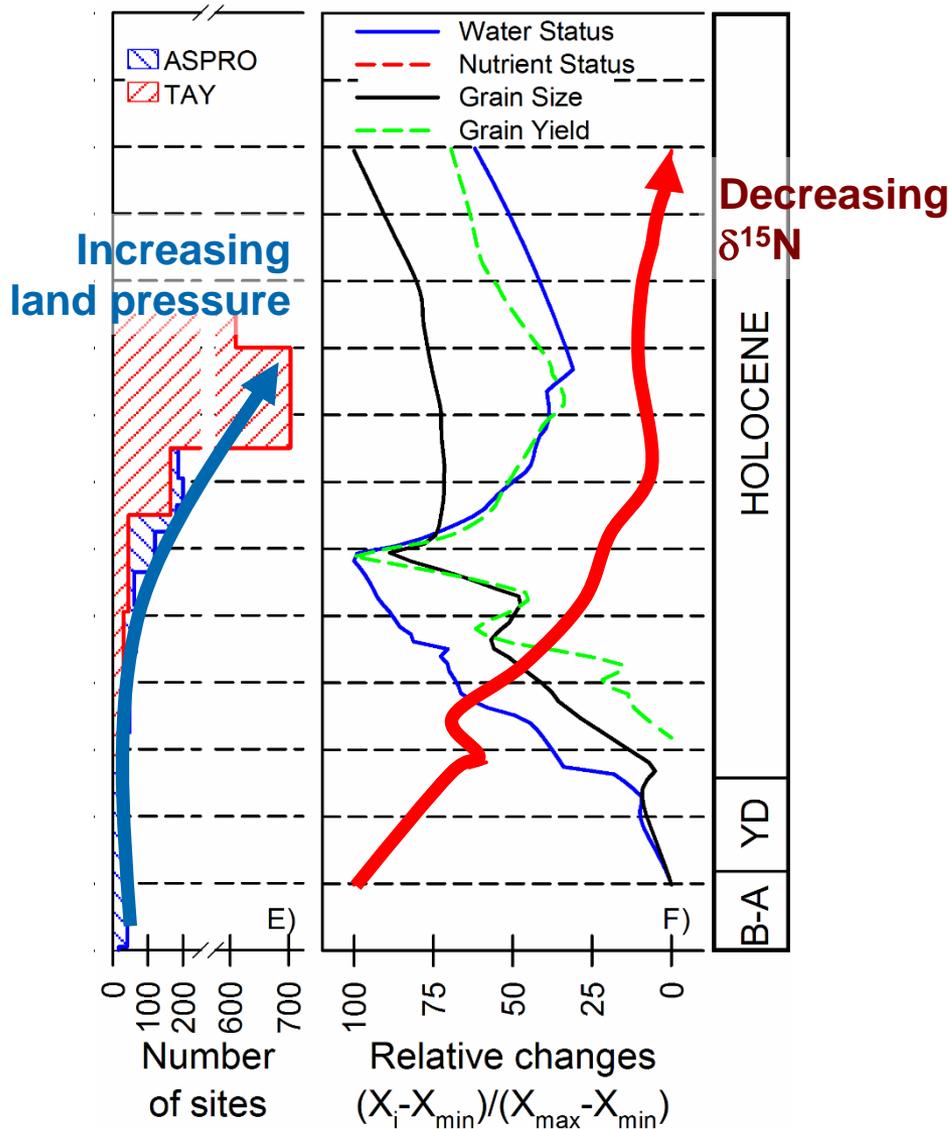


La asociación positiva aumenta del bioma Mediterráneo al Subtropical, Templado y Boreal

# Clima y condiciones de cultivo



# Past changes in nitrogen status?



-Highest  $\delta^{15}\text{N}$  in oldest sites,  
then relatively stable values  
**≈ Higher N status?**

-Expansion of agriculture  
increased land use pressure  
**≈ Cultivation in poorer soils**

# Ejemplo: plantas beben 'agua mineral'



## The “Monegros desert”

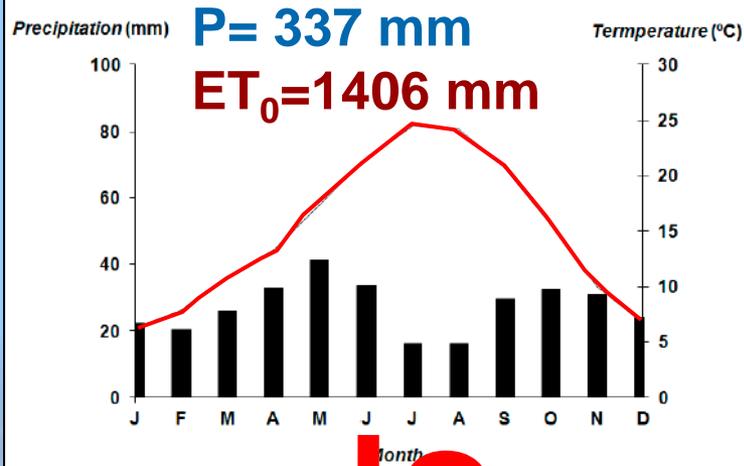
- Gypsum-rich soils (70-80%)
- High water deficit  
(Annual ETo-P = 1069 mm)



# Shallow-rooted plants flowering in summer



Saragosse, 320 m a.s.l.



## *Helianthemum squamatum*

- Small perennial shrub (camephyte)
- Shallow root
- Flowers in summer
- Exclusive of gypsum soils (gypsophyte)

# Gypsum as a source of water?



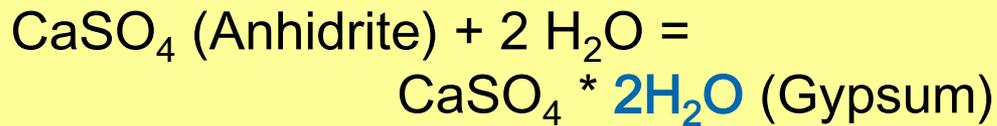
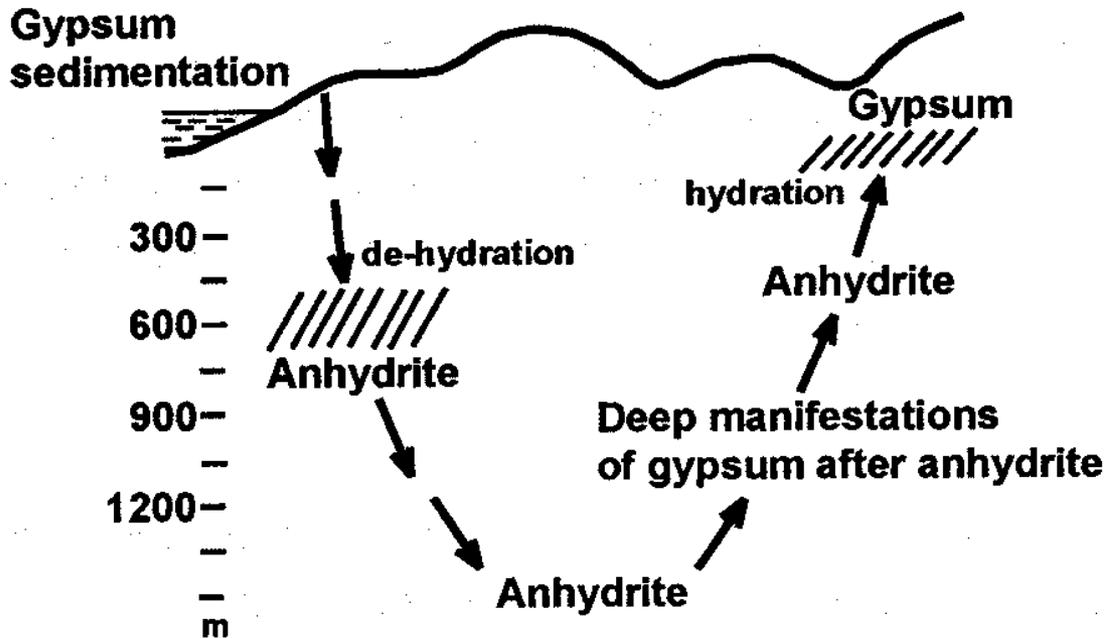
Gypsum-rich  
soils (70-80%)

“mineral water”  
(gypsum)

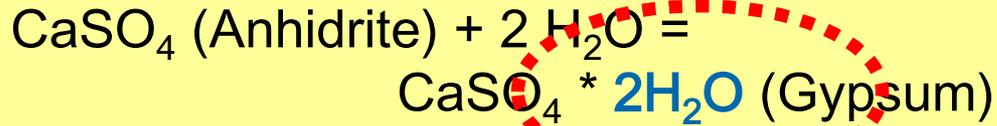
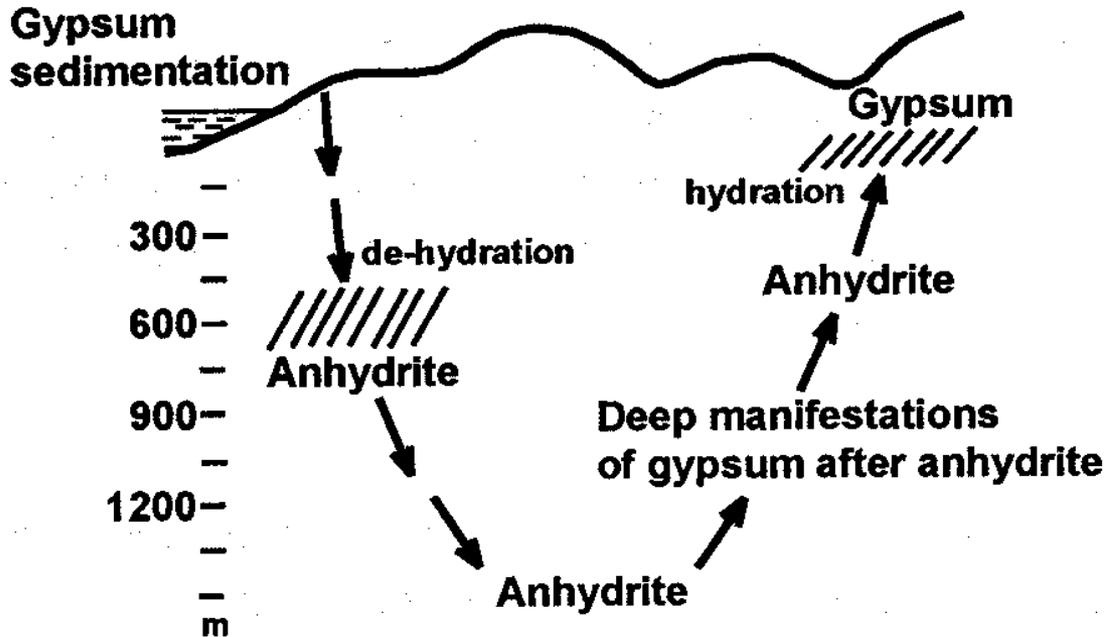


Meteorization of petrogypsic soil  
by fine roots of *H. squamatum*

# Why gypsum?



# Why gypsum?



Water is part of the crystalline structure (>20% of weight)

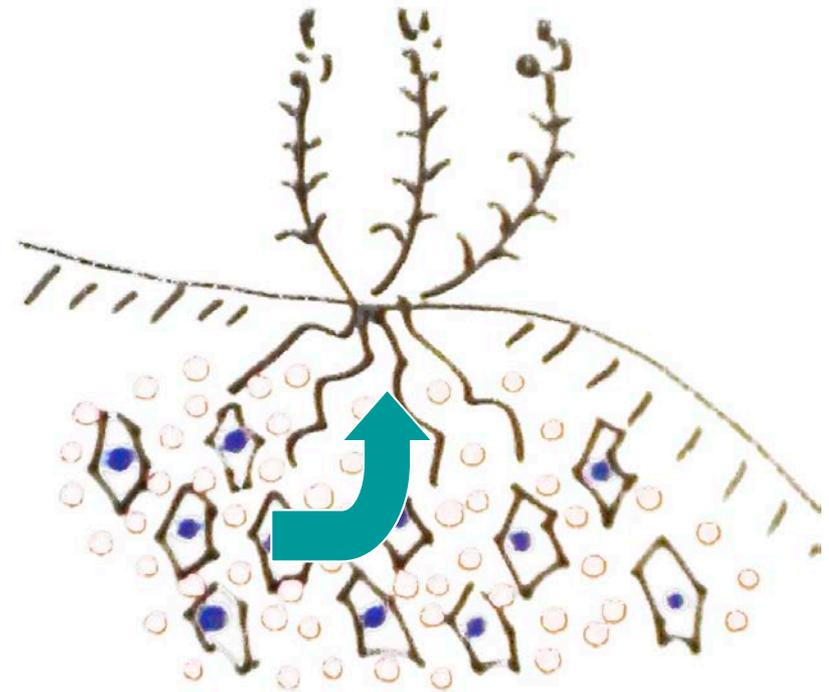
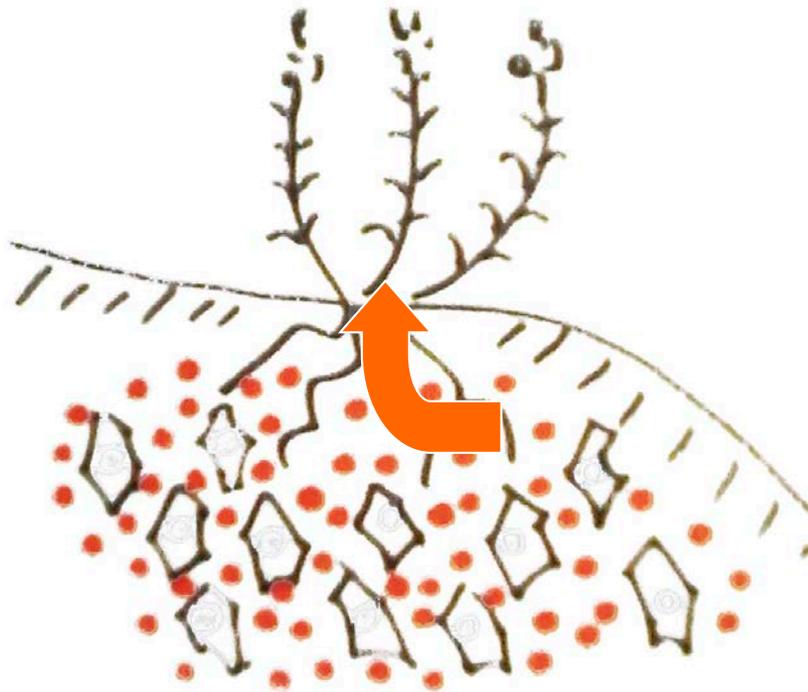


# Gypsum as a water reservoir



Two potential sources of water

- free water in the soil
- crystallization water in gypsum mineral



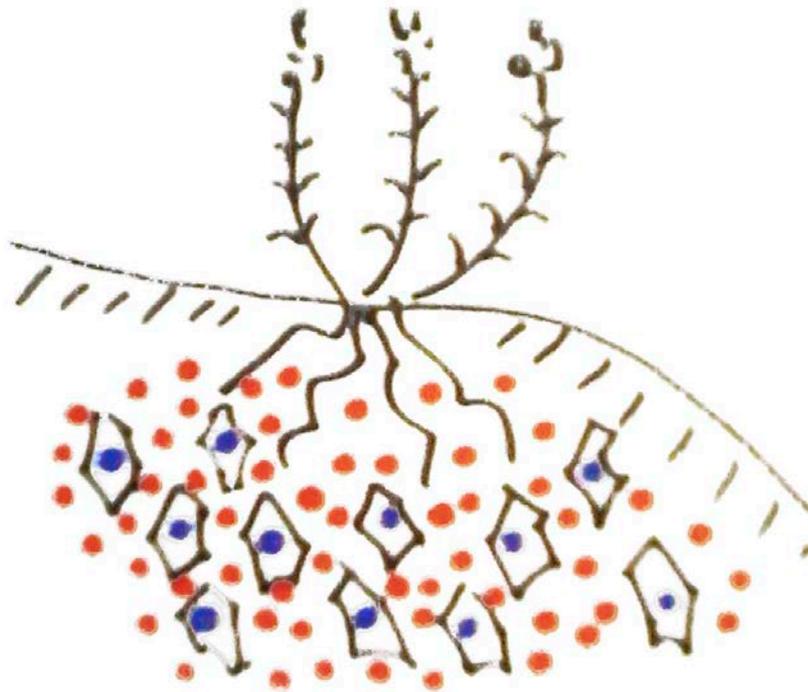
**We are lucky!!**

strong fractionation during crystal formation  
→ isotopic composition is very different

# Gypsum as a water reservoir



Sequential distillation to separate the two water pools from soil samples



Sequential (2 steps)  
cryogenic distillation

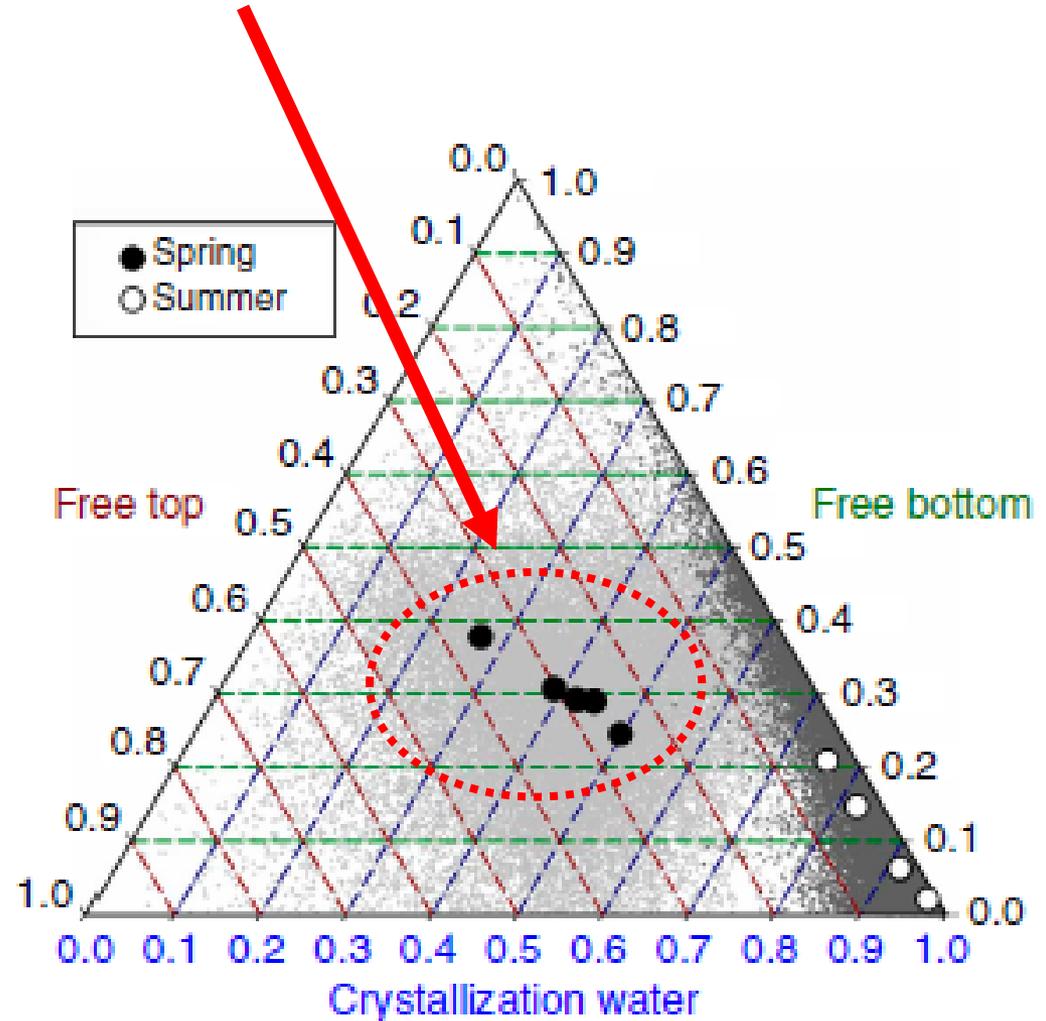
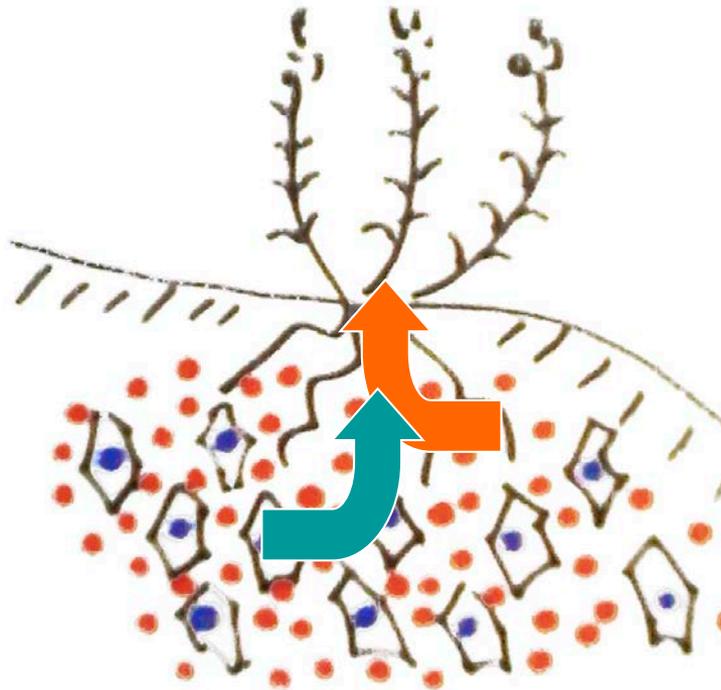
**35°C → free water**

**125°C → crystal water**

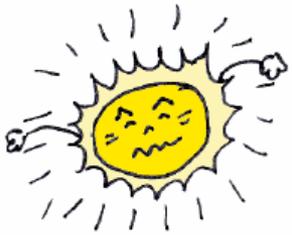
# 1st scenario, wet spring



Free water still available in the soil  
Mixed contribution of free & crystal water

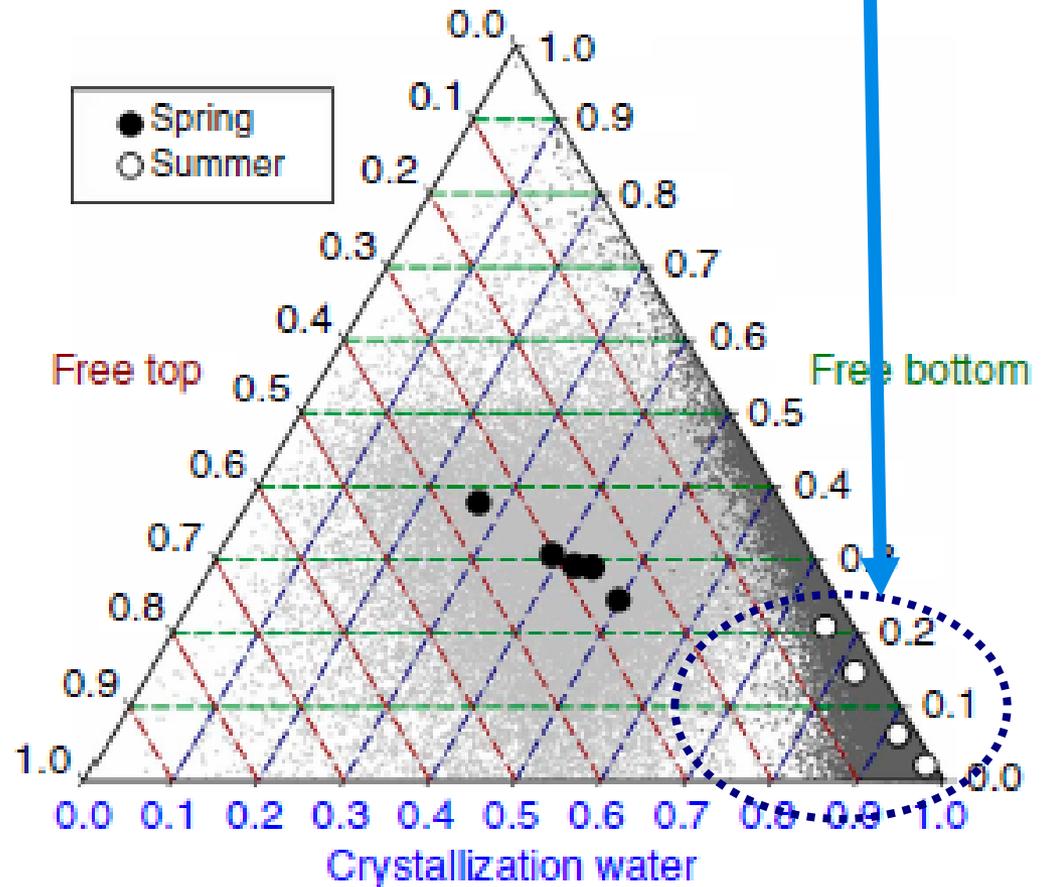
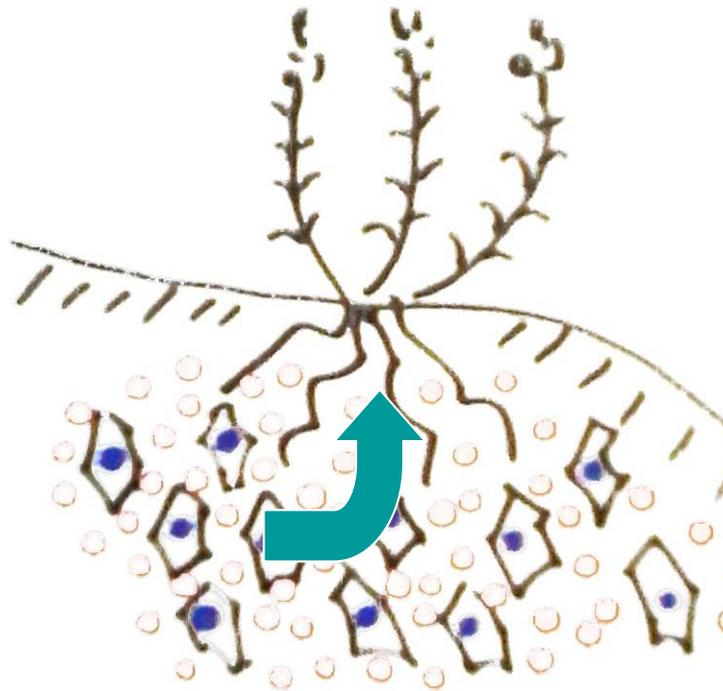


# 2nd scenario, dry summer



No free water available

Strong (70-90%) contribution of gypsum water





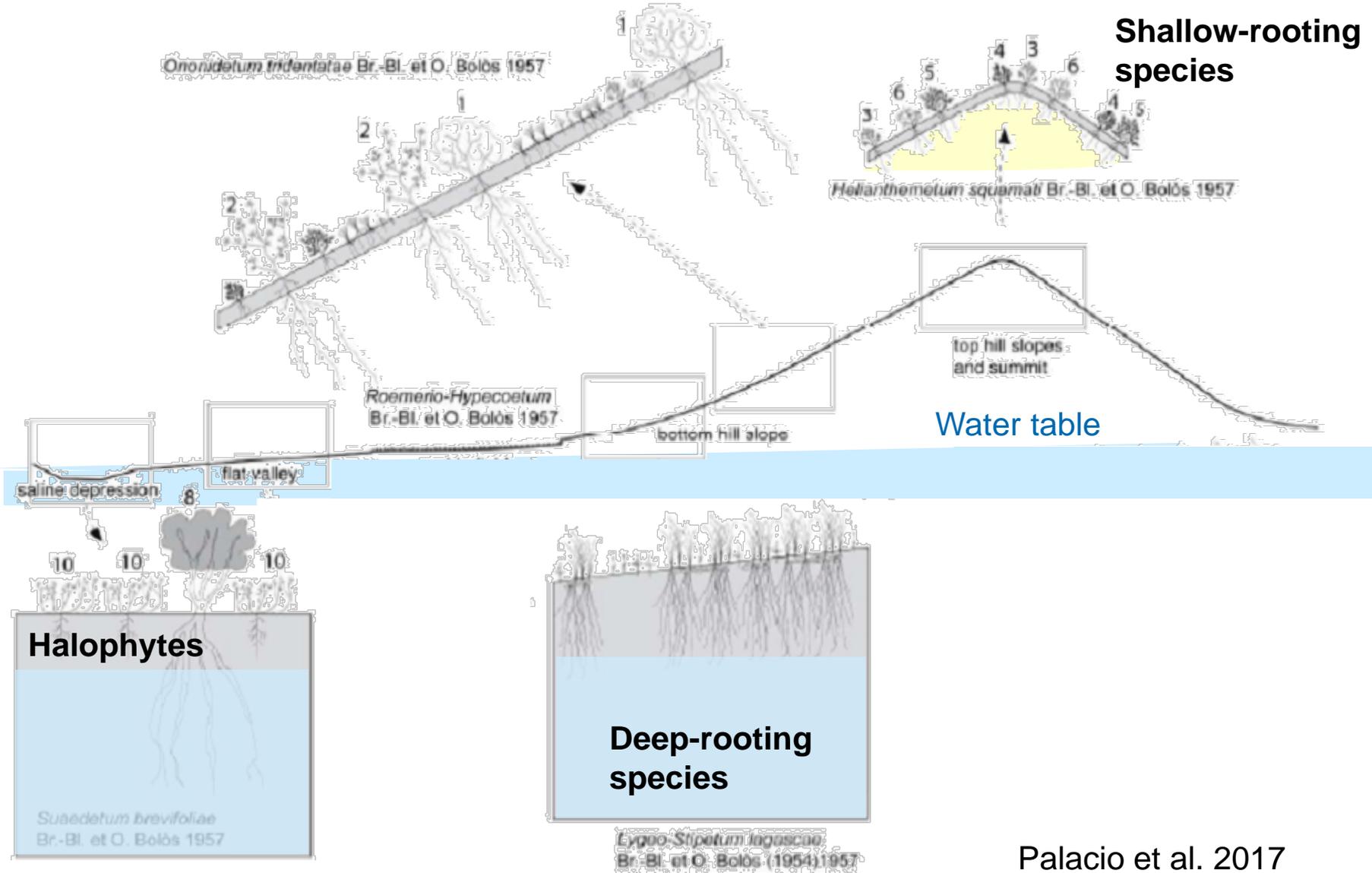
Salinity

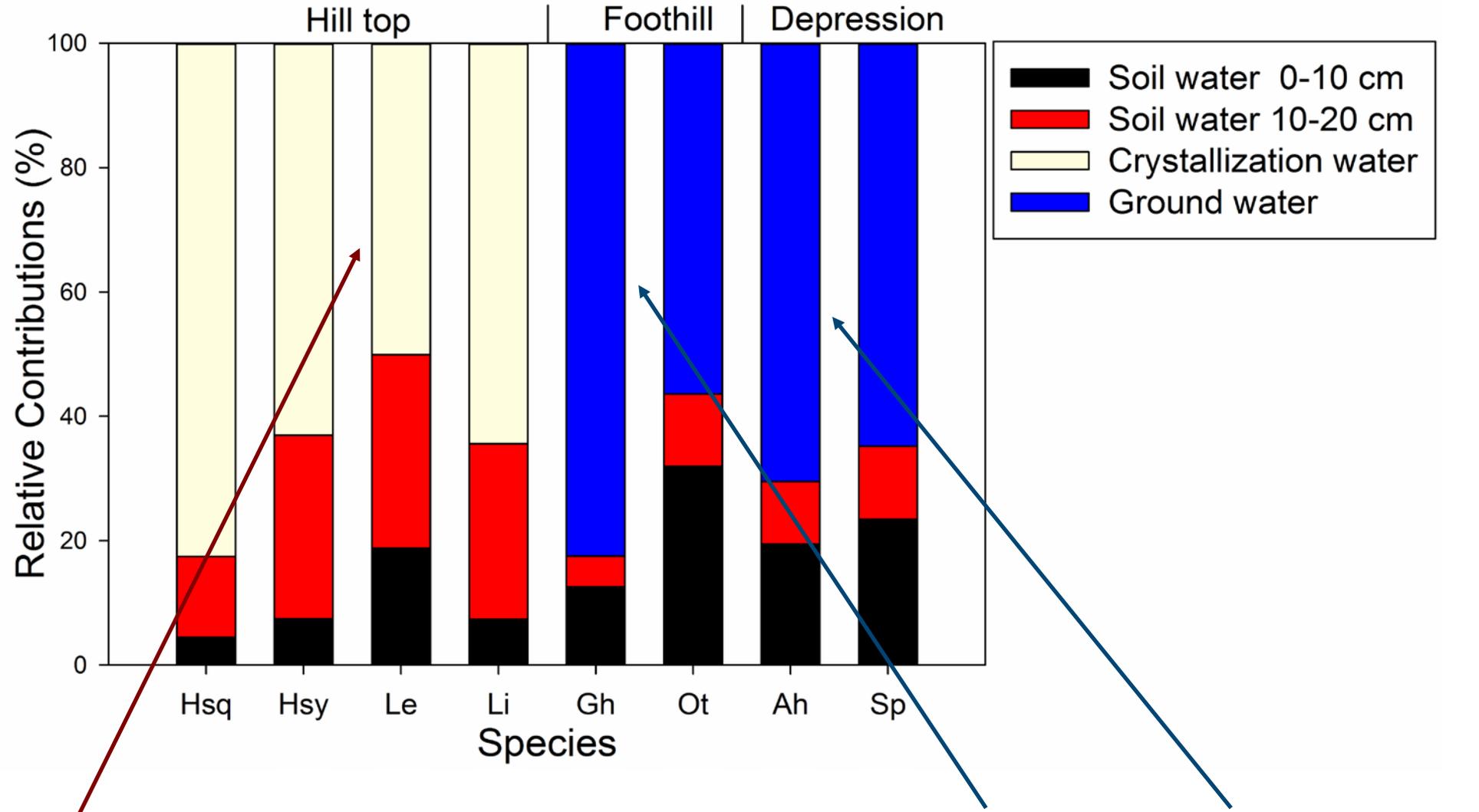
Depression

Plane

Foothill

Top hill





**ALL shallow-rooting species on hill top  
Rely on gypsum water during summer  
NOT ONLY GYPSOPHYTES!**

**Deep-rooting species on the hill  
rely on groundwater during summer  
(similar to plants from the depression)**

# Species-specific or community-level?



Use of gypsum water by non-specialized species  
¿General ability or nursing effect?

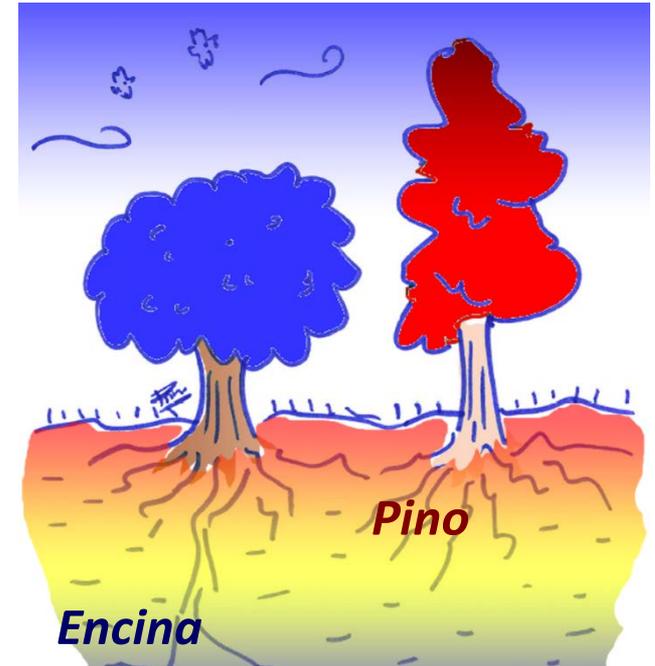
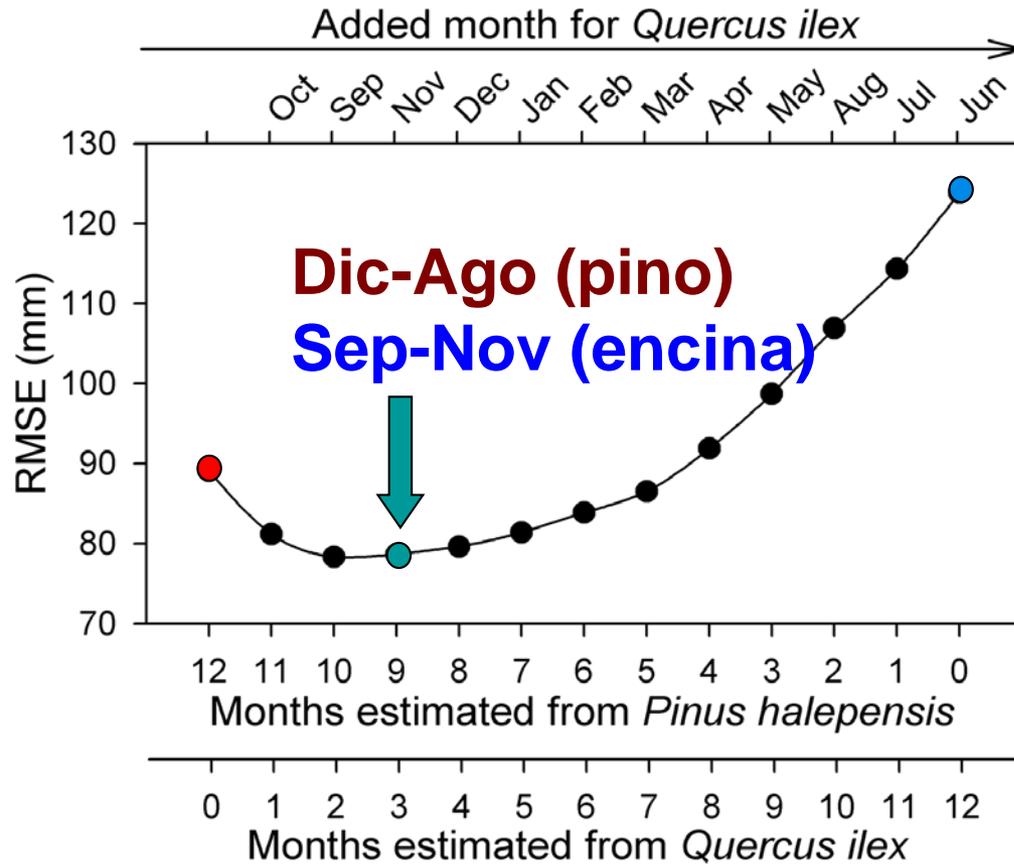


**Gypsophyte:**  
Specialized, only grows  
on gypsum soils

**Gypsovag:**  
Tolerant to gypsum,  
but not exclusive  
(grows elsewhere)

# Modelizando precipitación por isoscapes

## Función de transferencia ( $\Delta^{13}\text{C}$ vs. Precip.)



$$P_{s-n} = f(\Delta_{oak})$$

$$P_{d-a} = f(\Delta_{pine})$$

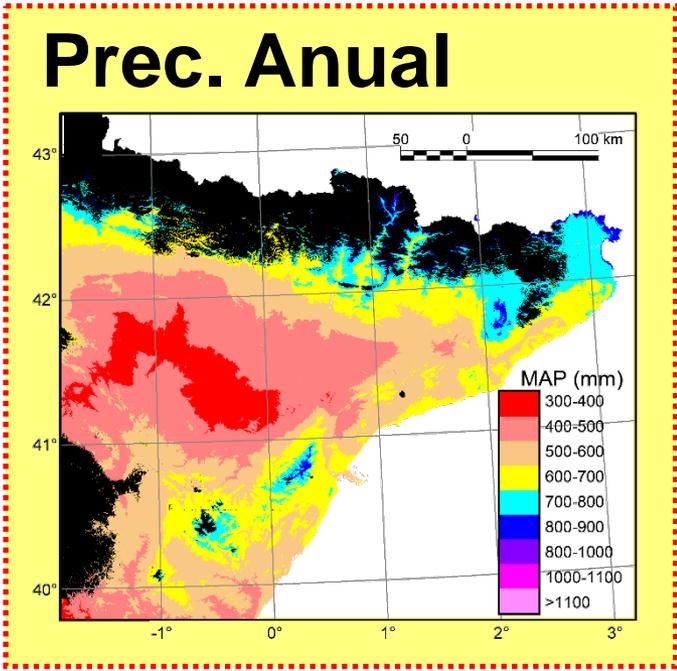
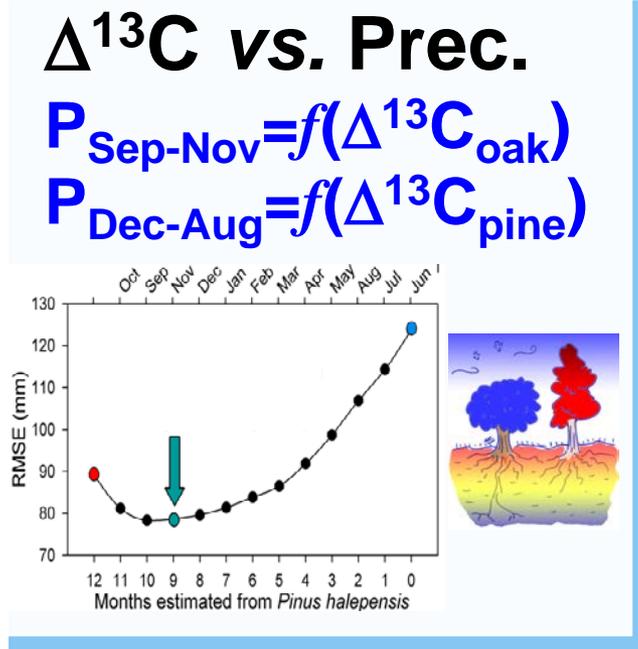
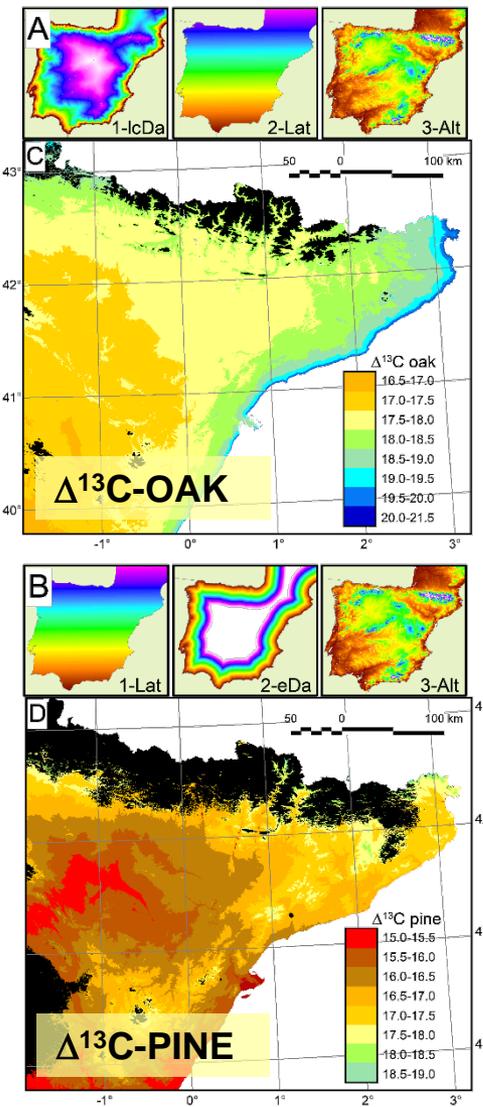
$$R^2 = 0.41$$

$$R^2 = 0.63$$

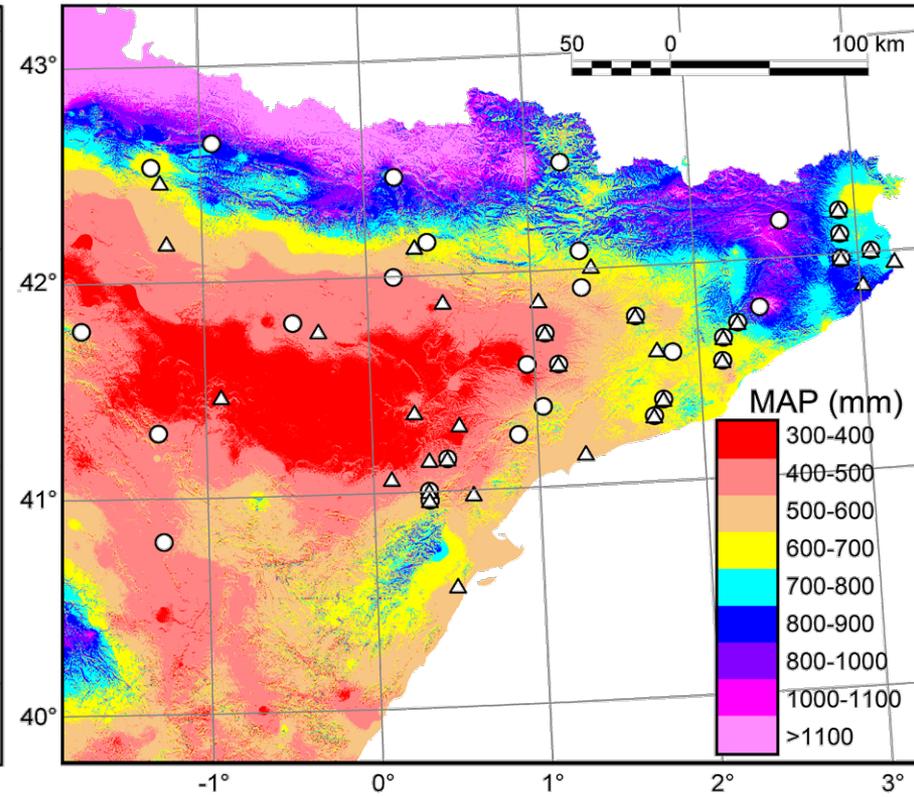
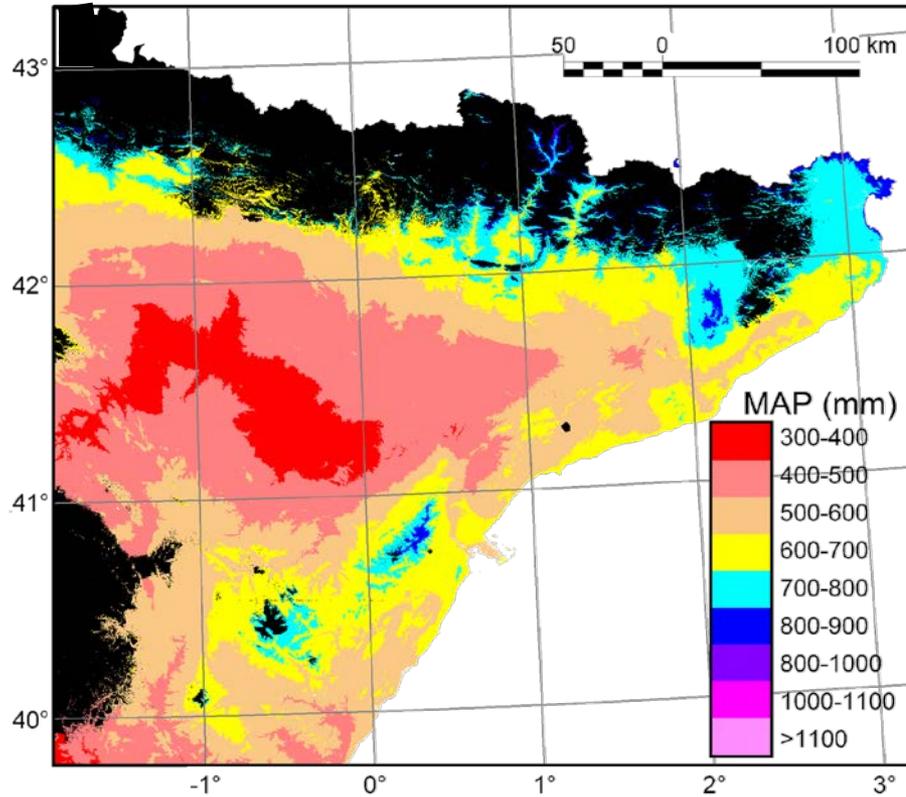
$$MAP = P_{s-n} + P_{d-a}$$

# Modelizando precipitación por isoscapes

## Isoscapes



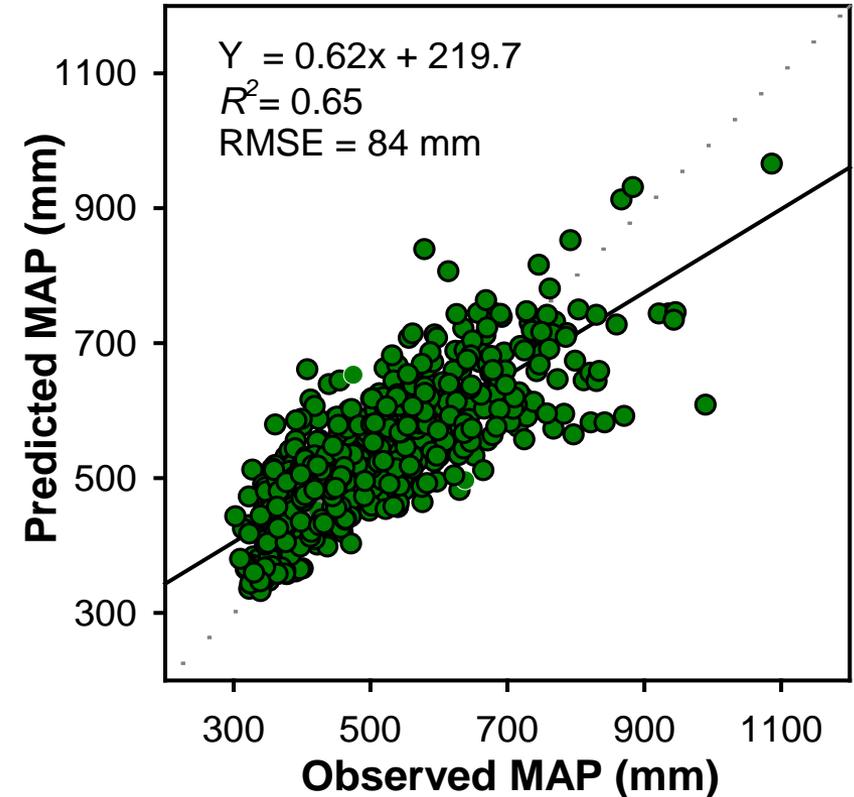
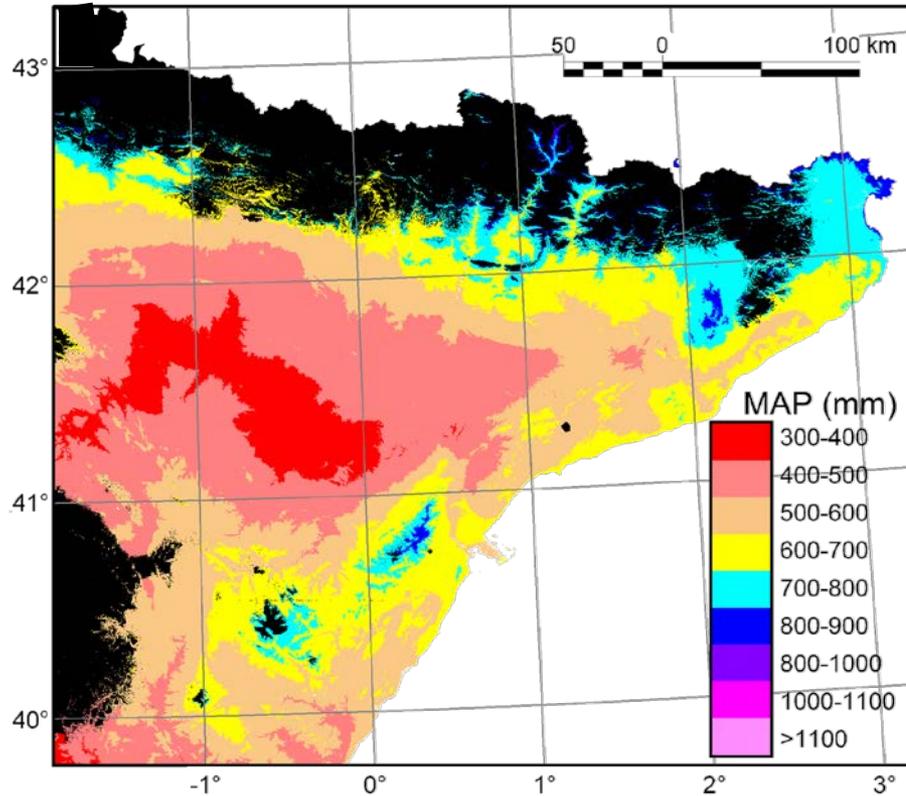
## Predicción espacial de la precipitación



**Patrones comparables a los del Atlas Climático**  
(basado en datos meteorológicos)



## Predicción espacial de la precipitación



**Buena capacidad predictiva** (valid. 573 estaciones climáticas)

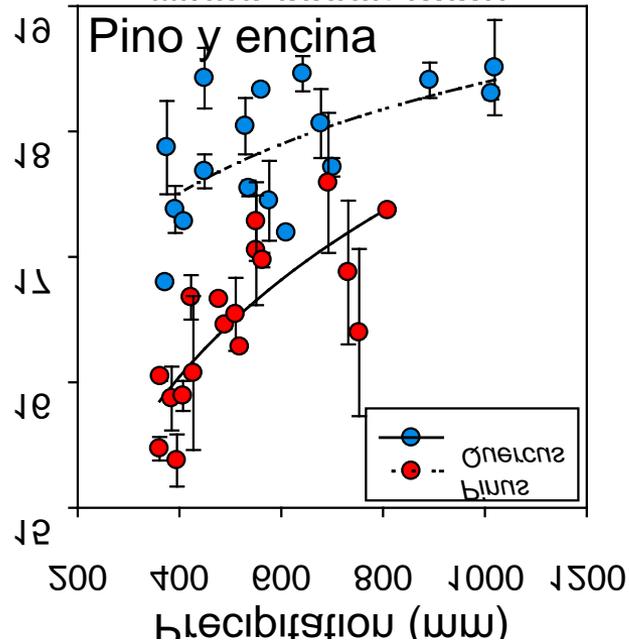
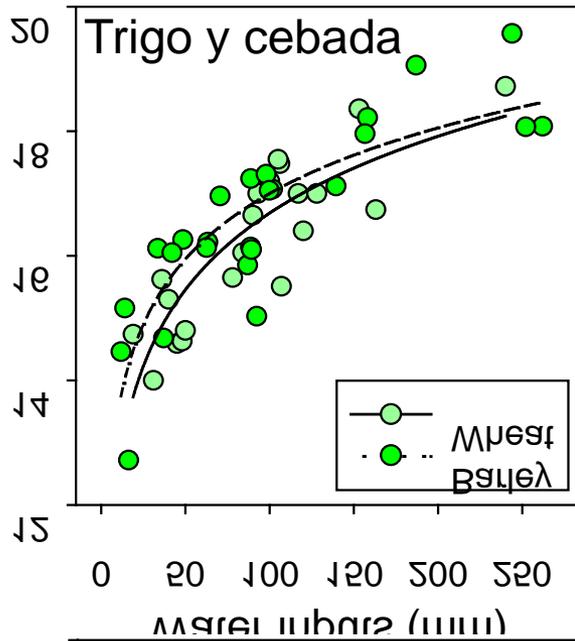
→ RMSE en el rango de los modelos basados en datos climáticos directos (ca. 50-150 mm)

# Resultados: isoscapes vs. redes climáticas

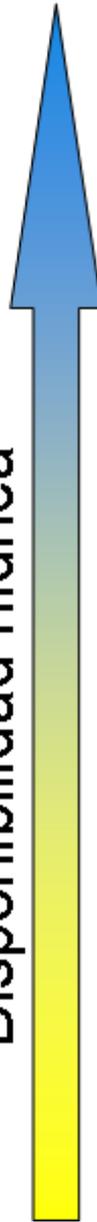
Calibration network	$N_{cal}$	$N_{val}$	MLR		MLR + RI	
			RMSE	CV	RMSE	CV
Tree-ring Sampling sites	44 38	573	101	19.7	84	16.4
Weather stations (Low-density)	65	508	111	22.1	80	15.9
Weather stations (High-density)	340	233	100	19.9	57	11.3

Capacidad de predicción **sólo** es superada por **red meteorológica con mayor densidad de puntos**

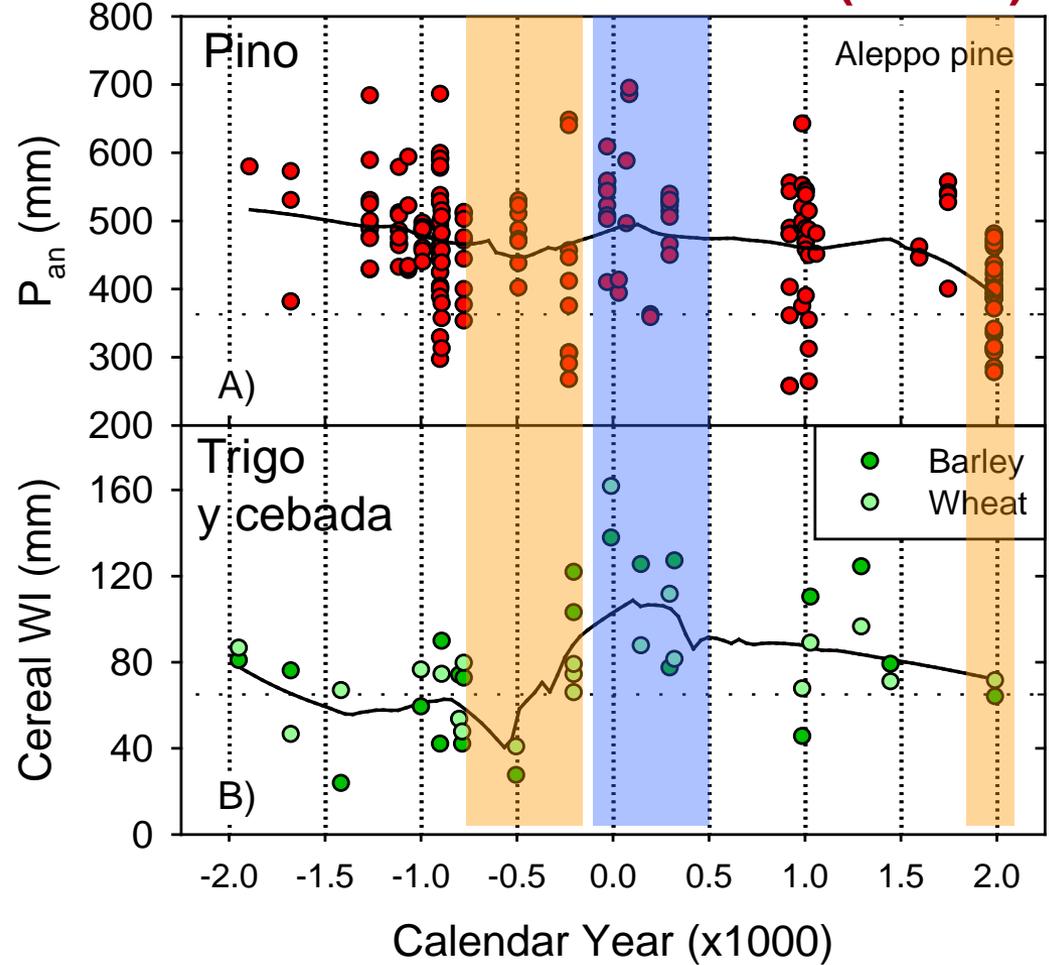
# 13C refleja respuesta al clima



Disponibilidad hídrica

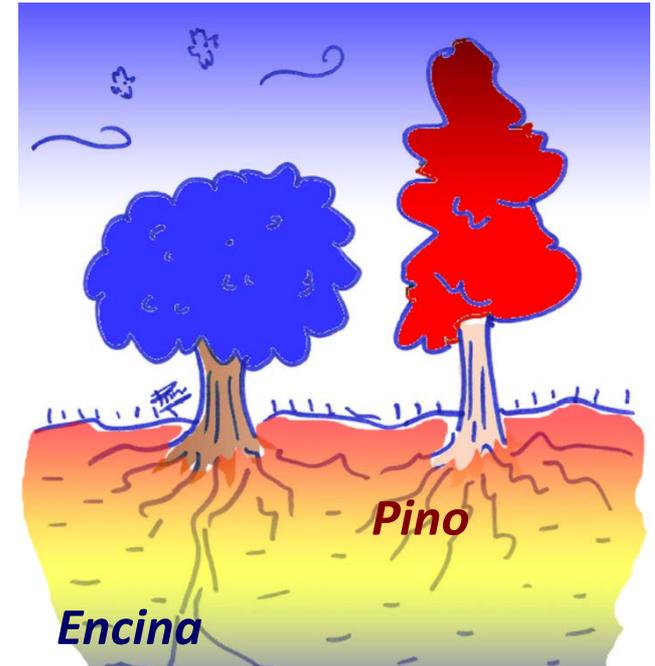
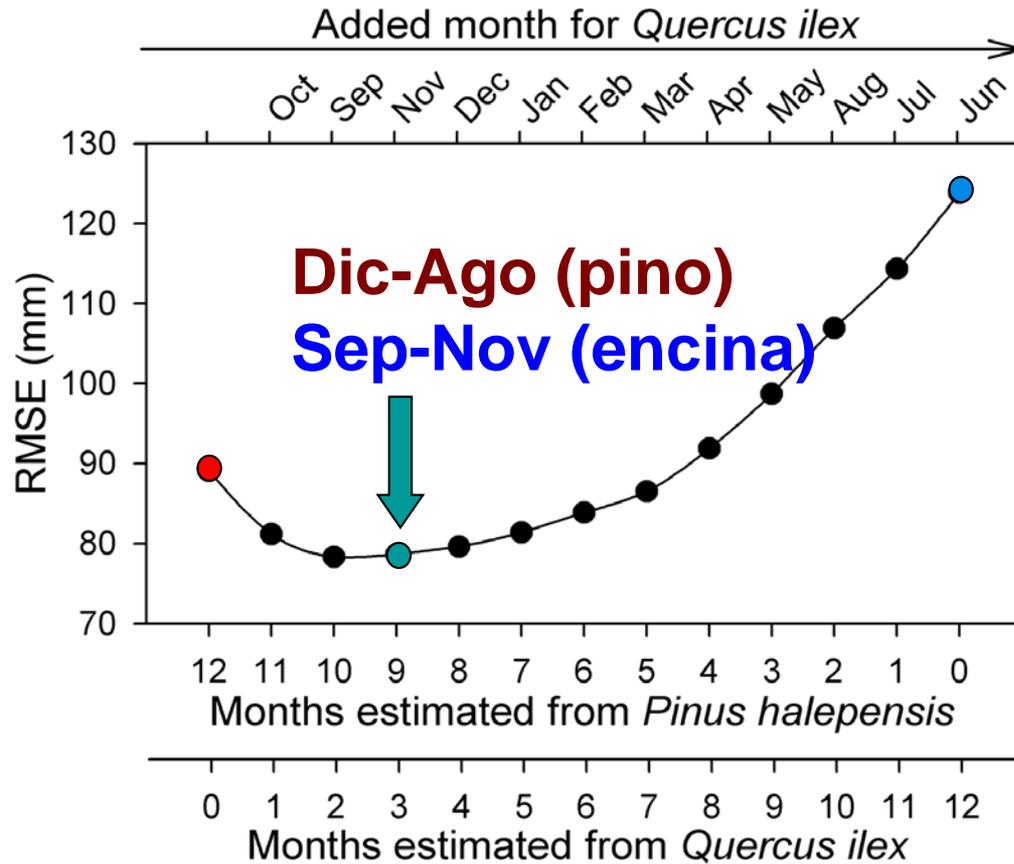


## Clima últimos 4000 años (Lleida)



# Modelizando precipitación por isoscapes

## Función de transferencia ( $\Delta^{13}\text{C}$ vs. Precip.)



$$P_{s-n} = f(\Delta_{oak})$$

$$P_{d-a} = f(\Delta_{pine})$$

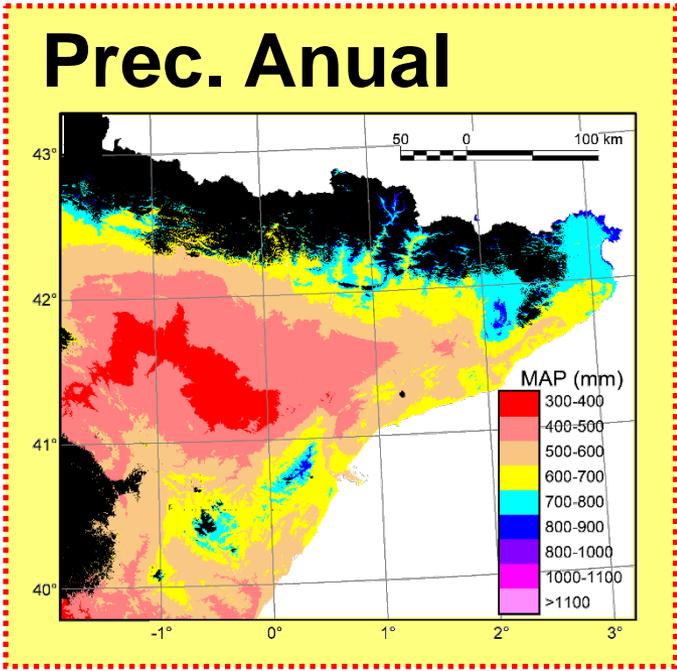
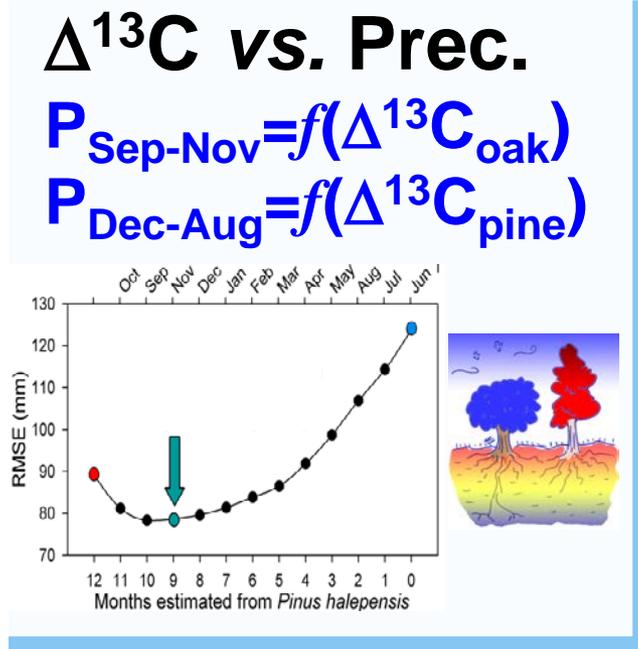
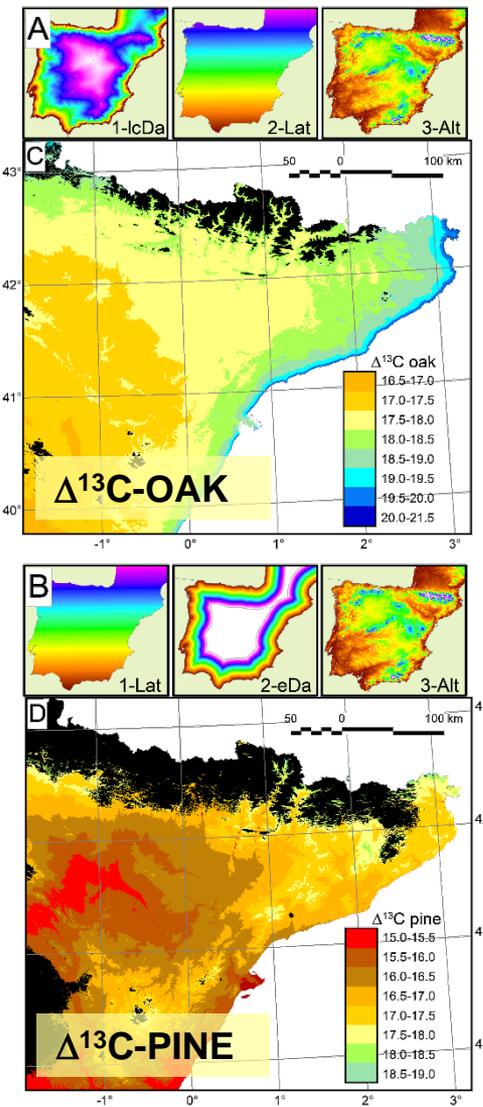
$$R^2 = 0.41$$

$$R^2 = 0.63$$

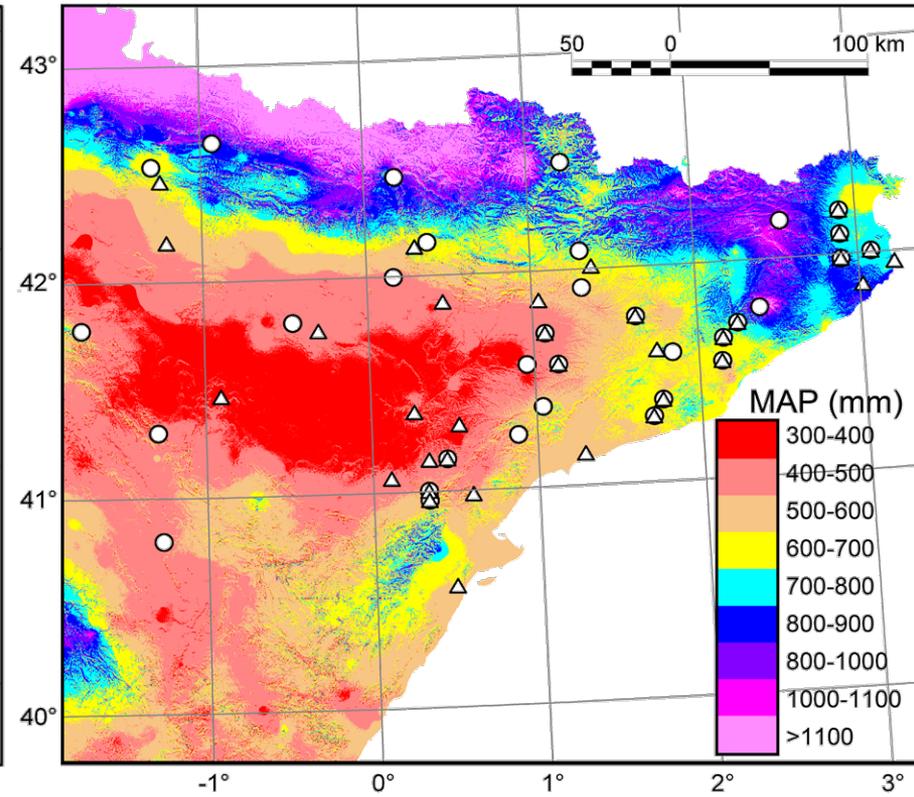
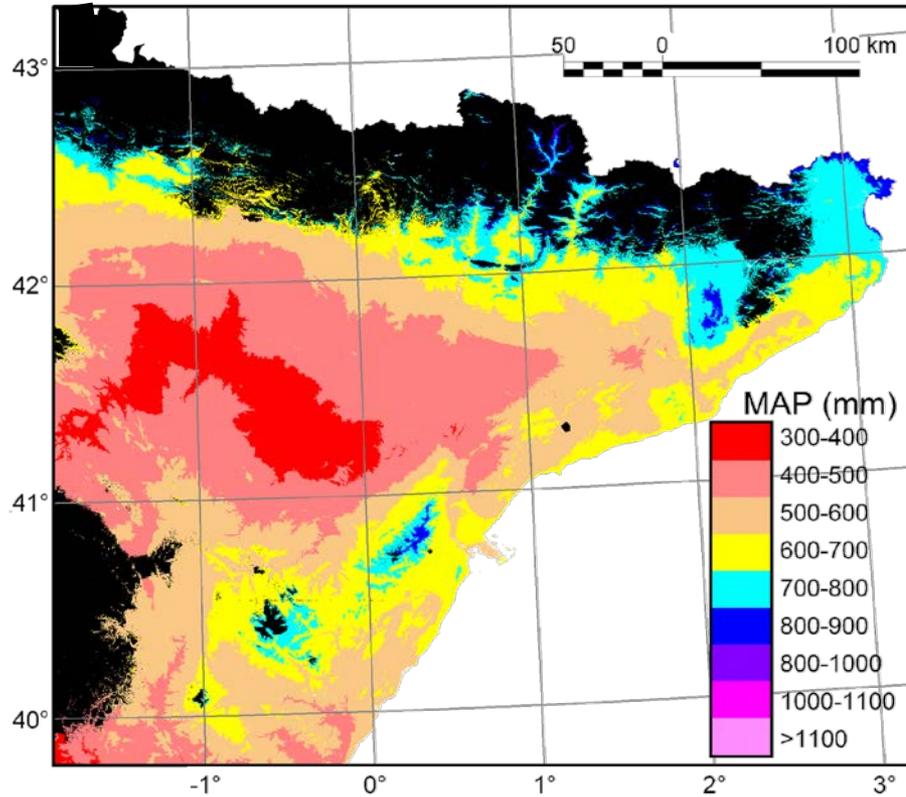
$$MAP = P_{s-n} + P_{d-a}$$

# Modelizando precipitación por isoscapes

## Isoscapes



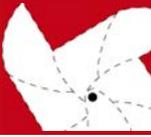
## Predicción espacial de la precipitación



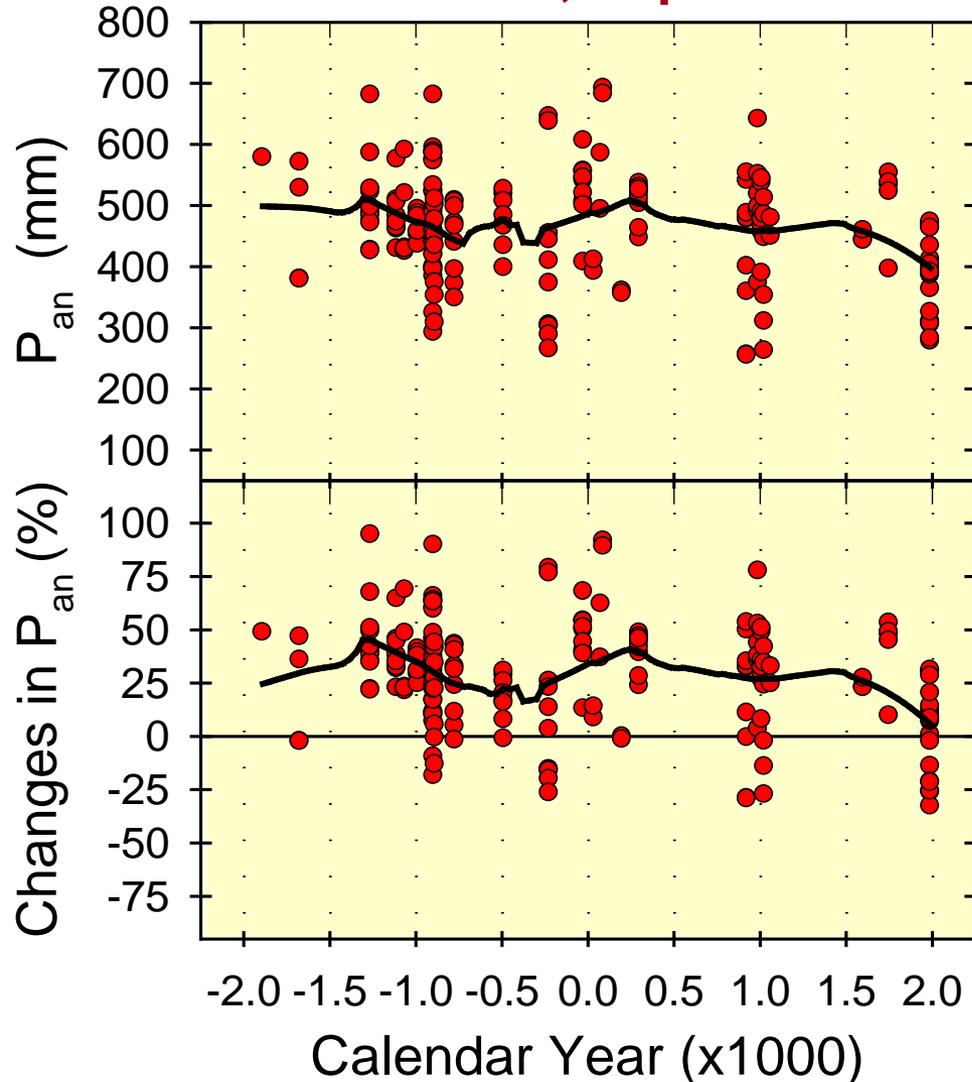
**Patrones comparables a los del Atlas Climático**  
(basado en datos meteorológicos)



# Restos arqueobotánicos: clima



## Pino carrasco, Depresión Central Ebro (NE Spain)

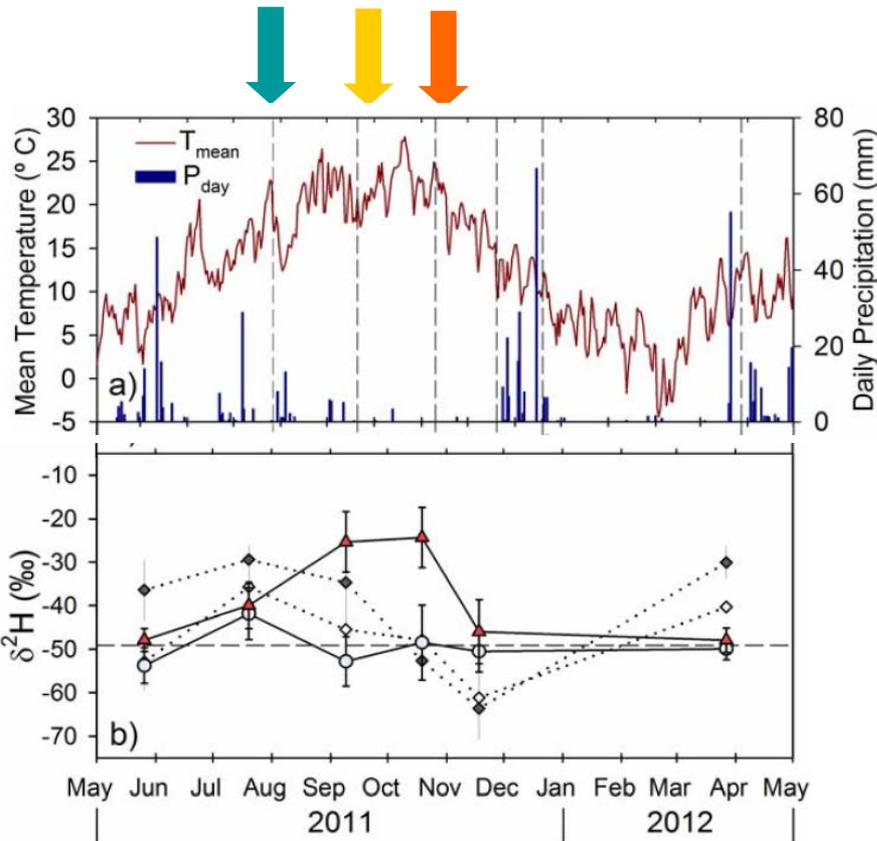


Estima de precipitación annual de los últimos **4,000 years**:

- **Pasado**= 450-520 mm
- **Presente**= 350-400 mm

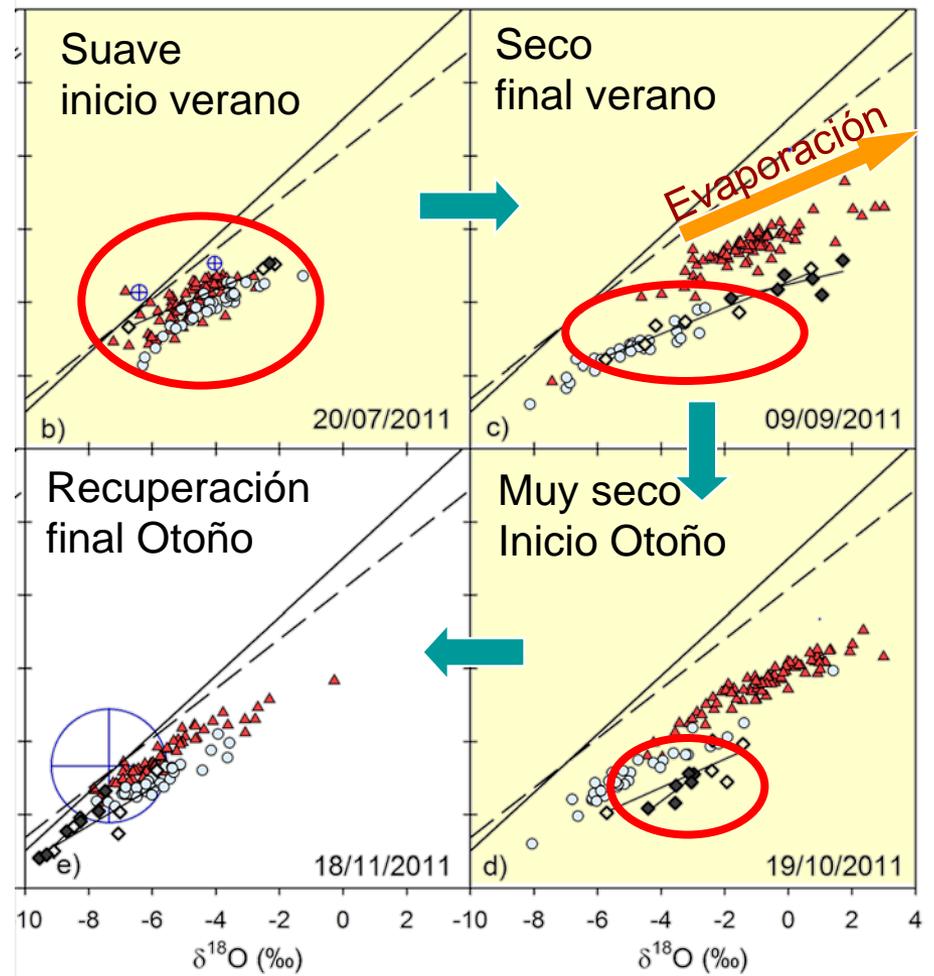
**En promedio, 20-40% más precipitación en el pasado**

# Cambios en agua de suelo



Cambios bruscos en la composición del agua del suelo

**-SIN NUEVO APOORTE DE AGUA**  
**-NO EXPLICABLE POR ENRIQUECIMIENTO**



# Restos arqueobotánicos



Sistema de flotación (Grup d'Investigació Prehistòrica, Univ. Lleida)

# Restos arqueobotánicos

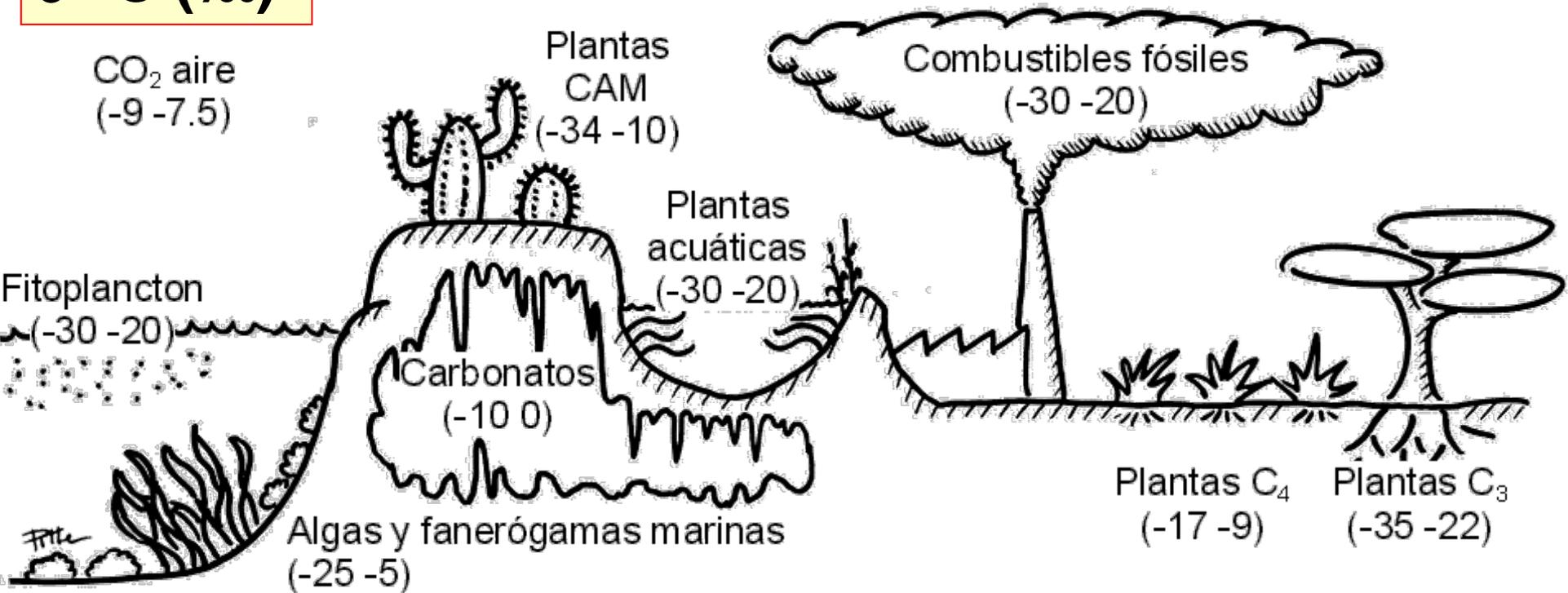


Semillas carbonizadas de cebada en *Ciutat de Lleida* (N. Alonso)  
carbones de Pino carrasco de *Tossal de les Tenalles* (J.P. Ferrio)

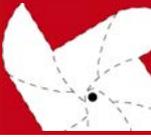
# Isótopos de carbono



$\delta^{13}\text{C}$  (‰)



# Isótopos de carbono



$\delta^{13}\text{C}$  (‰)

$\text{CO}_2$  aire  
(-9 -7.5)

Plantas  
CAM  
(-34 -10)

Combustibles fósiles  
(-30 -20)

Plantas  
acuáticas  
(-30 -20)

Fitoplancton  
(-30 -20)

Carbonatos  
(-10 0)

Algas y fanerógamas marinas  
(-25 -5)

Plantas  $\text{C}_4$   
(-17 -9)

Plantas  $\text{C}_3$   
(-35 -22)

- $\delta^{13}\text{C}$  (‰) en plantas es menor que en  $\text{CO}_2$   
→ **Discriminación isotópica ( $\Delta^{13}\text{C}$ )**

# Isótopos de carbono



$\delta^{13}\text{C}$  (‰)

$\text{CO}_2$  aire  
(-9 -7.5)

Plantas  
CAM  
(-34 -10)

Combustibles fósiles  
(-30 -20)

Plantas  
acuáticas  
(-30 -20)

Fitoplancton  
(-30 -20)

Carbonatos  
(-10 0)

Algas y fanerógamas marinas  
(-25 -5)

Plantas  $\text{C}_4$   
(-17 -9)

Plantas  $\text{C}_3$   
(-35 -22)

- $\delta^{13}\text{C}$  (‰) en plantas es menor que en  $\text{CO}_2$   
→ **Discriminación isotópica ( $\Delta^{13}\text{C}$ )**
- **Discriminación variable**  
→ **via fotosintética ( $\text{C}_3, \text{C}_4, \text{CAM}$ ) y fisiología**