

Unidad de Suelos y Riegos; Laboratorio de
Agronomía y Medio Ambiente DGA-CSIC

Ciclo de seminarios 2002

Salinización de suelos y aguas.
Conceptos generales

Ramón Aragüés

Servicio de Investigación Agroalimentaria

Diputación General de Aragón

Zaragoza



15 febrero 2002

- Origen y causas de la salinidad de suelos

1/3 de los suelos agrícolas están afectados por salinidad. ¿Porqué?

1. Secano:

a) Precipitación < ET ⇒

- Lavado insuficiente de las sales.
- Evapo-concentración: en las zonas áridas, entre el 50% y el 95% de la P se evapora ⇒ el agua remanente en el suelo se concentra entre 2 y 20 veces ⇒ salinización del suelo.
- En general, este escenario es poco relevante, pues:
 - (a) la ET depende de la P
 - (b) hay pocas sales en la P

1. Secano:

b) Fuente subterránea de agua que alimenta la ET en las áreas de descarga \Rightarrow salinización del suelo

- Las áreas de recarga proporcionan agua (y sales) a las de descarga (áreas con drenaje limitado), donde la ET produce la evapo-concentración de la solución del suelo \Rightarrow salinización del suelo.

- Escenario mas relevante en secano, pues:

(a) la ET depende de la recarga (no de la P)

(b) el agua que abastece a la ET puede llevar muchas sales.

2. Regadío:

a) Riego $< ET \Rightarrow$

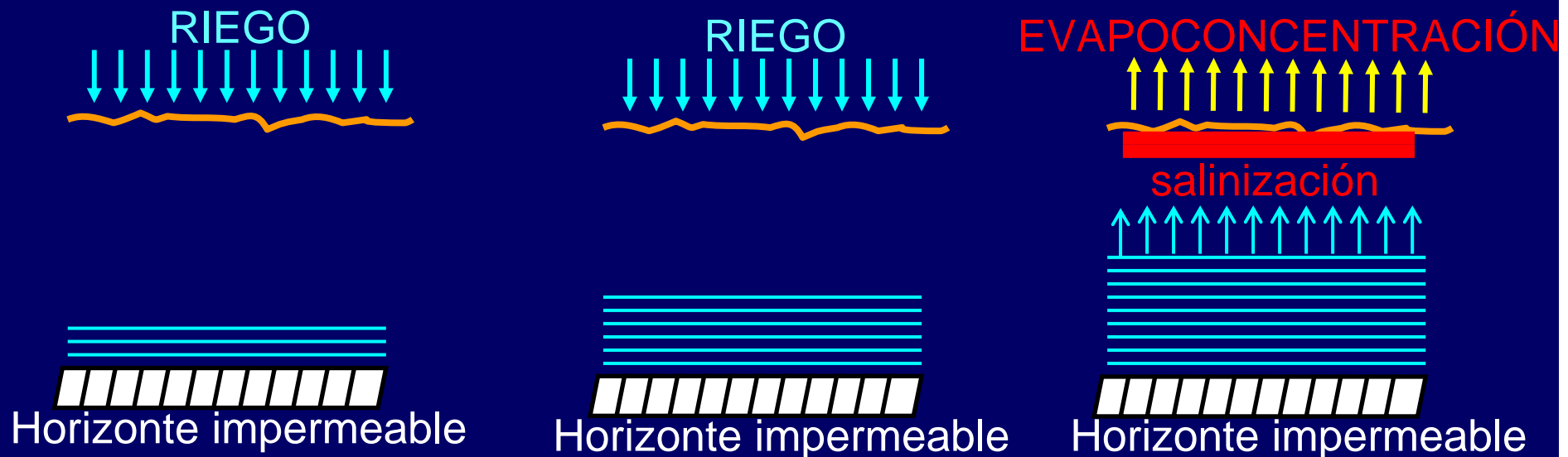
- Lavado insuficiente de las sales y acumulación en el suelo.
- Escenario infrecuente, salvo en regadíos infradotados o parcelas con riegos poco uniformes.
- Pero más serio que el escenario de $P < ET$, pues el agua de riego lleva más sales que la P: un agua de 500 mg/L y una dosis de riego de 5.000 m³/ha·año aporta al suelo 2.5 toneladas de sal anualmente.

b) Riego $\gg ET$ y drenaje limitado \Rightarrow

- Creación de capas freáticas superficiales \Rightarrow lavado insuficiente de sales + ascenso capilar de agua y sales \Rightarrow evapo-concentración \Rightarrow salinización del suelo.
- **Escenario más relevante en la agricultura de regadío.**

LA SALINIZACIÓN DE LOS SUELOS

- La causa principal de salinización de los suelos en la agricultura de regadío es la aplicación excesiva de agua de riego en suelos con drenaje limitado
- Esta situación conduce a la creación de capas freáticas superficiales que
 - (1) impiden el lavado de las sales del suelo
 - (2) inducen el ascenso capilar de agua y sales y subsiguiente evapo-concentración



✓ **Fuente primaria de las sales: meteorización de los minerales/sales y redistribución con el agua**

✓ **Fuente secundaria de sales:**

1. Lluvia: aerosoles salinos ⇒ redistribución ⇒ deposición en la superficie terrestre.

- Masa anual de sales depositadas:

Costa: 100 kg NaCl /ha

Interior: 10-20 kg NaCl /ha

2. Salinización antrópica ⇒ modificación hidrológica del sistema:

a) Efecto evapo-concentración

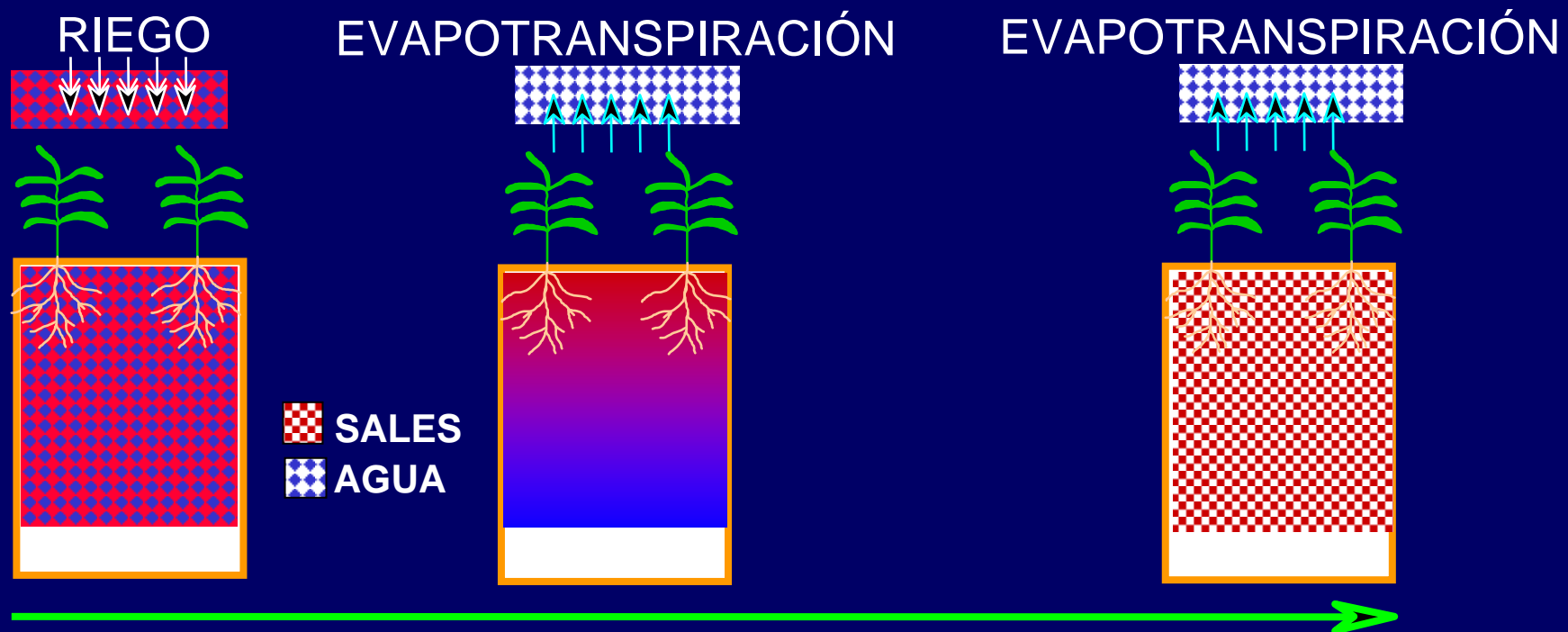
b) Efecto meteorización

c) Efecto intrusión

LA SALINIZACIÓN DE LOS SUELOS

“Acumulación de sales solubles en la zona de raíces de los cultivos que producen un descenso de su rendimiento”

- **Efecto evapo-concentración**: salinización de la solución del suelo debida a la evapotranspiración (ET) de los cultivos



SALINIZACIÓN DEL SUELO EN LA ZONA DE RAÍCES

✓ **El efecto evapo-concentración es inevitable:**

- Las plantas absorben agua cuasi-dulce.
- La evaporación y la transpiración son en forma de agua destilada.
- Por lo tanto, las sales disueltas en el agua remanente en el suelo se concentran ($C = M/V$; M cte. y $V \downarrow \Rightarrow C \uparrow$)

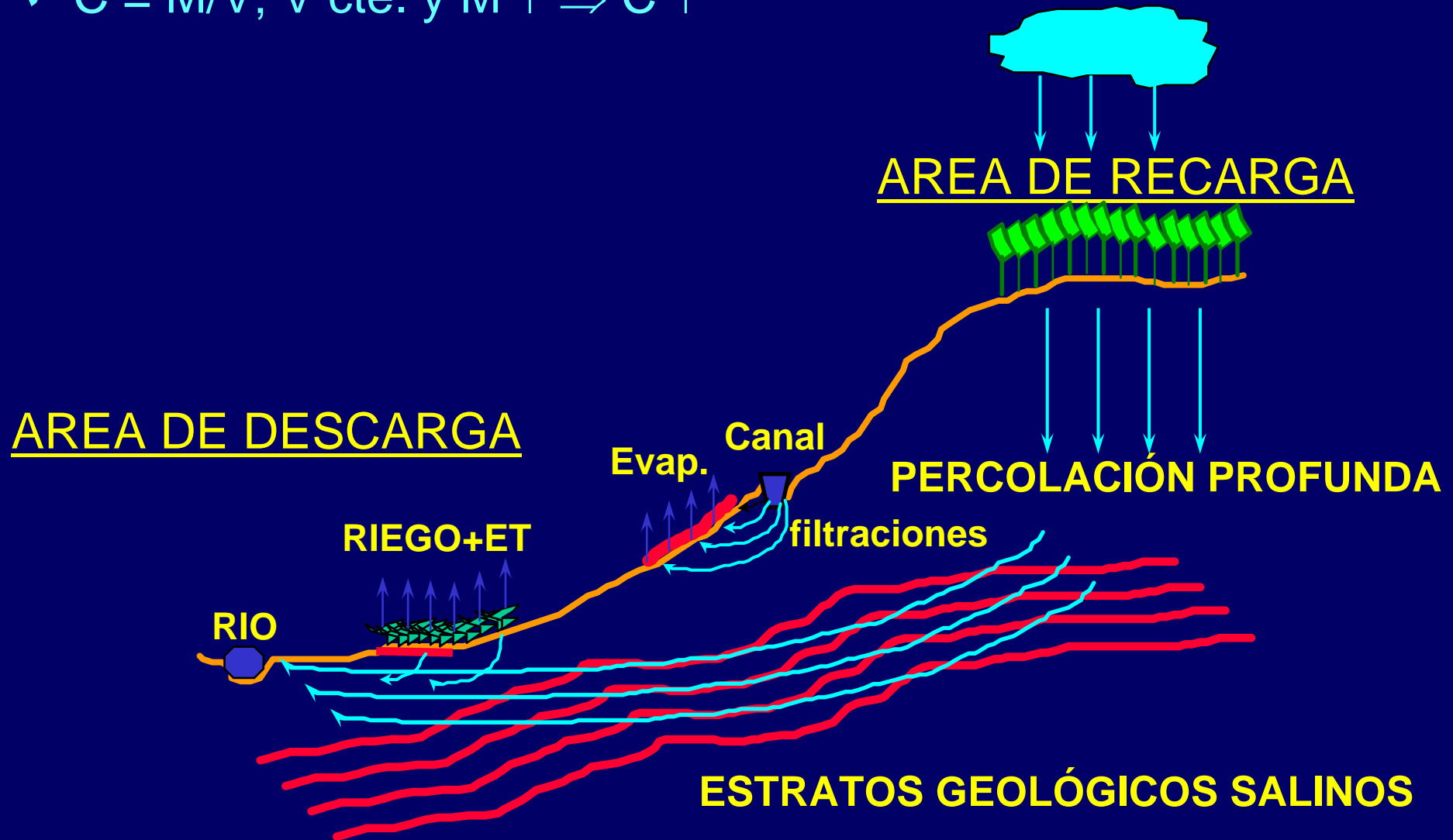
✓ **En régimen permanente y ausencia de precipitación y disolución de sales, el incremento de salinidad de la solución del suelo es igual a la inversa de la fracción de lavado (FL):**

Factor de Concentración del agua de riego en el suelo = $1/FL$

(FL = fracción del agua infiltrada en el suelo que percola por debajo de la zona de raíces)

● **Efecto meteorización**: disolución por las aguas de percolación profunda de las sales/minerales presentes en el suelo/subsuelo

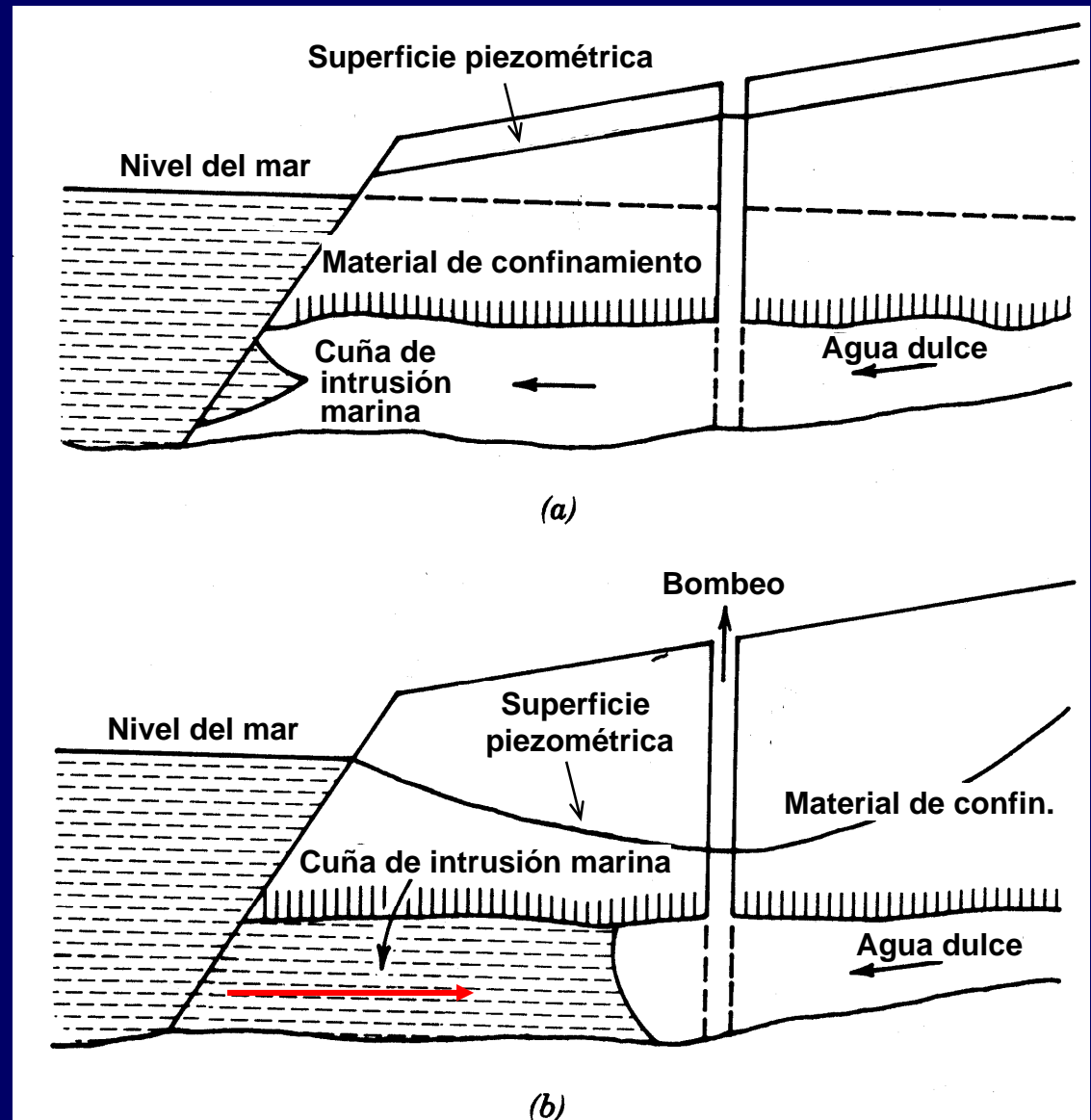
✓ $C = M/V$; V cte. y $M \uparrow \Rightarrow C \uparrow$



- **Efecto intrusión**: entrada de agua de mar a la tierra inducida por la sobre-explotación de los acuíferos costeros \Rightarrow salinización del acuífero \Rightarrow riego y salinización del suelo

(a) Sin intrusión marina:
La superficie piezométrica del acuífero está por encima del nivel del mar \Rightarrow gradiente hidráulico tierra \rightarrow mar

(b) Con intrusión marina:
Bombeo \Rightarrow la superficie piezométrica del acuífero está por debajo del nivel del mar \Rightarrow gradiente hidráulico mar \rightarrow tierra



SUELOS AFECTADOS POR SALINIDAD EN ZONAS REGABLES DE LA CUENCA DEL EBRO DECLARADOS DE INTERES GENERAL (IRYDA)

| Zona regable | Sup. (ha) | Año estudio | CEe > 4 dS/m o RAS > 15 | |
|-----------------|-----------|-------------|-------------------------|-------------|
| | | | hectáreas | % del total |
| Bardenas | 98.300 | 1974-1976 | 26.784 | 27 % |
| Cinca | 95.435 | 1975-1976 | 19.027 | 20 % |
| Aragón y Catal. | 135.900 | 1981 | 34.700 | 25 % |
| Flumen | 27.488 | 1976 | 12.883 | 47 % |
| Monegros I | 44.670 | 1975 | 10.823 | 24 % |
| Monegros II | 133.896 | 1979-1984 | 46.479 | 35 % |

LA SALINIZACIÓN DE LAS AGUAS

Río aguas arriba de la detracción

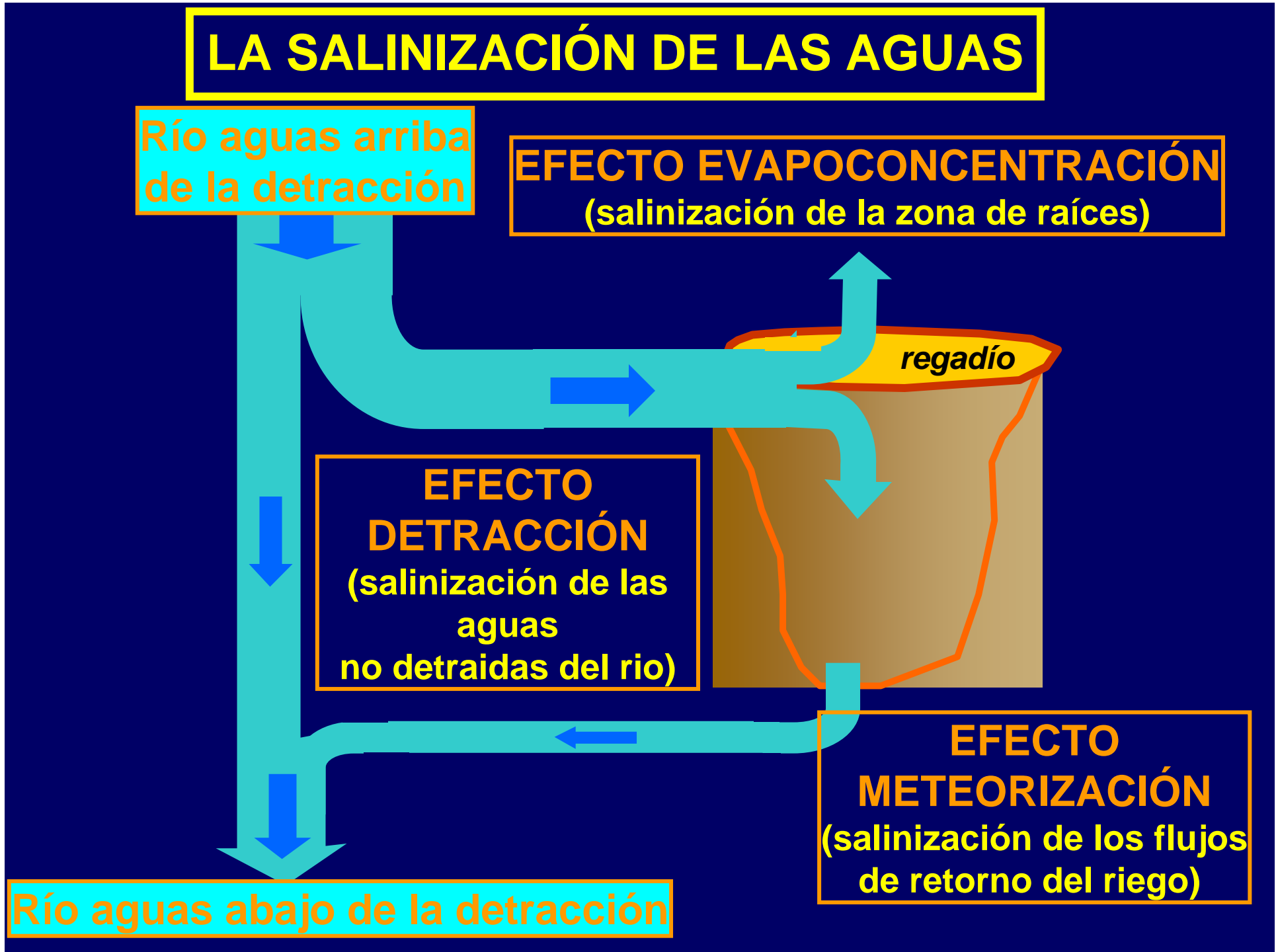
EFFECTO EVAPOCONCENTRACIÓN
(salinización de la zona de raíces)

regadío

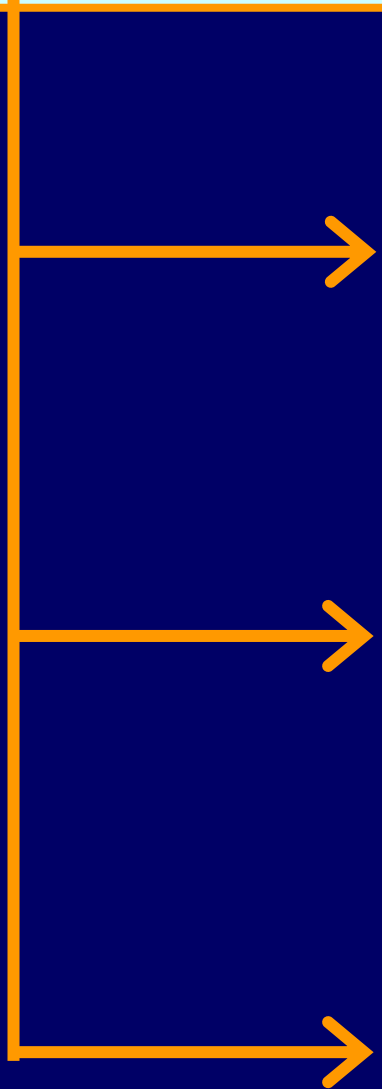
EFFECTO DETRACCIÓN
(salinización de las aguas no detraídas del río)

EFFECTO METEORIZACIÓN
(salinización de los flujos de retorno del riego)

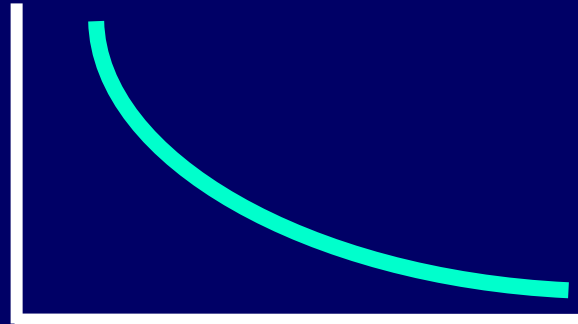
Río aguas abajo de la detracción



“Detracción+ Evapoconcentración+Meteorización”



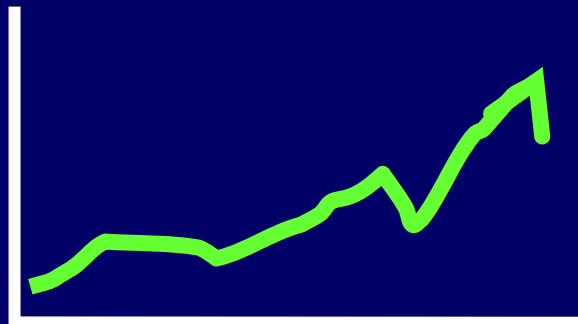
SALINIDAD



El uso consuntivo de agua en la cuenca de un río incrementa la salinidad de las aguas del río...

CAUDAL

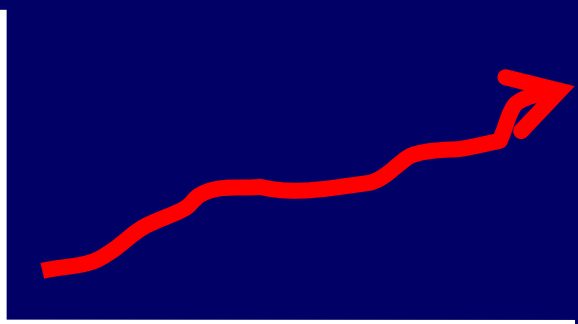
SALINIDAD



Las aguas de los ríos de zonas áridas o semi-áridas tienden a incrementar su salinidad con el tiempo...

TIEMPO (AÑOS)

SALINIDAD

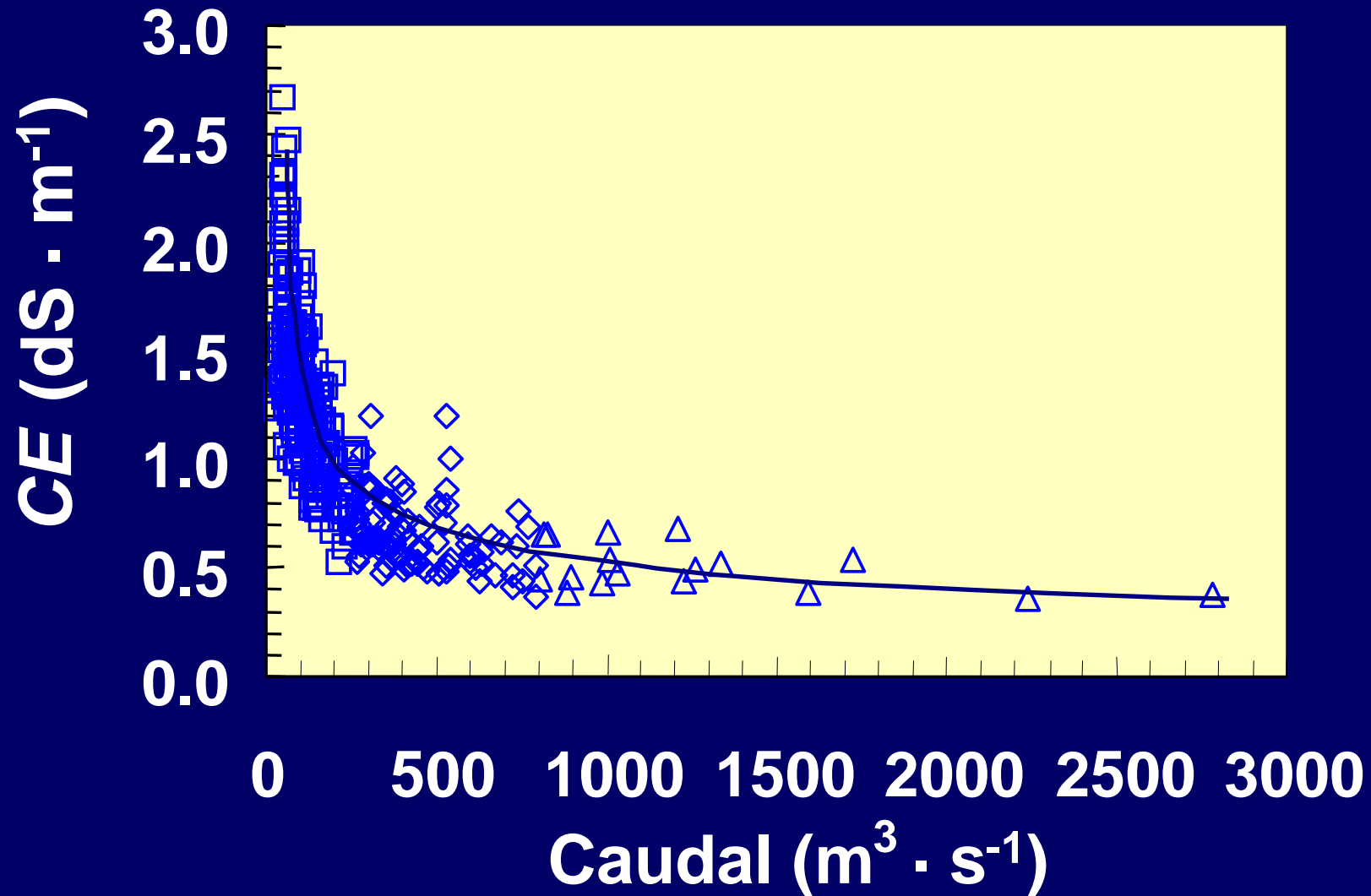


Las aguas de los ríos tienden a incrementar su salinidad desde su nacimiento hasta su desembocadura...

RÍO (KM)

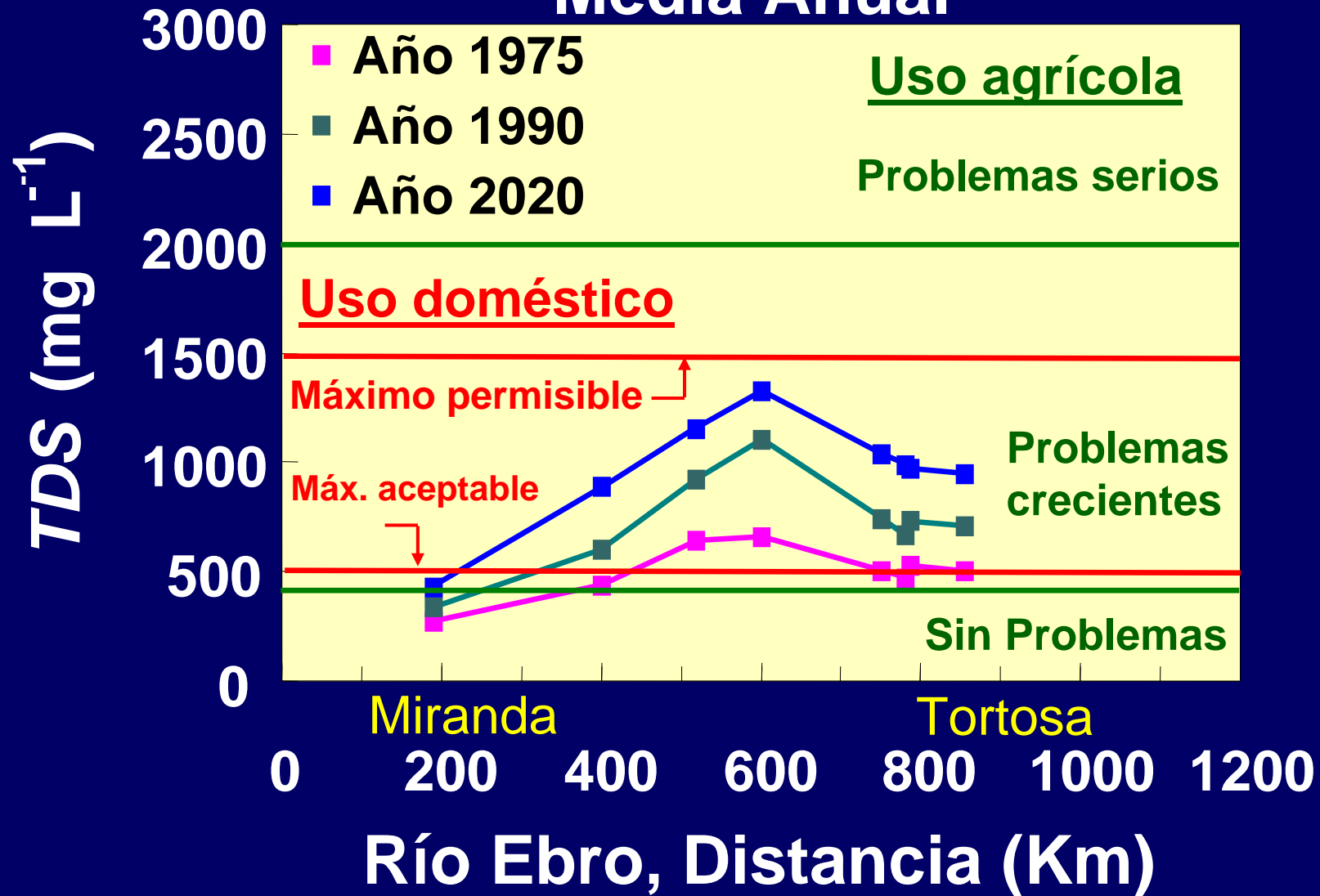
RELACIÓN SALINIDAD (CE) - CAUDAL

Ebro en Zaragoza

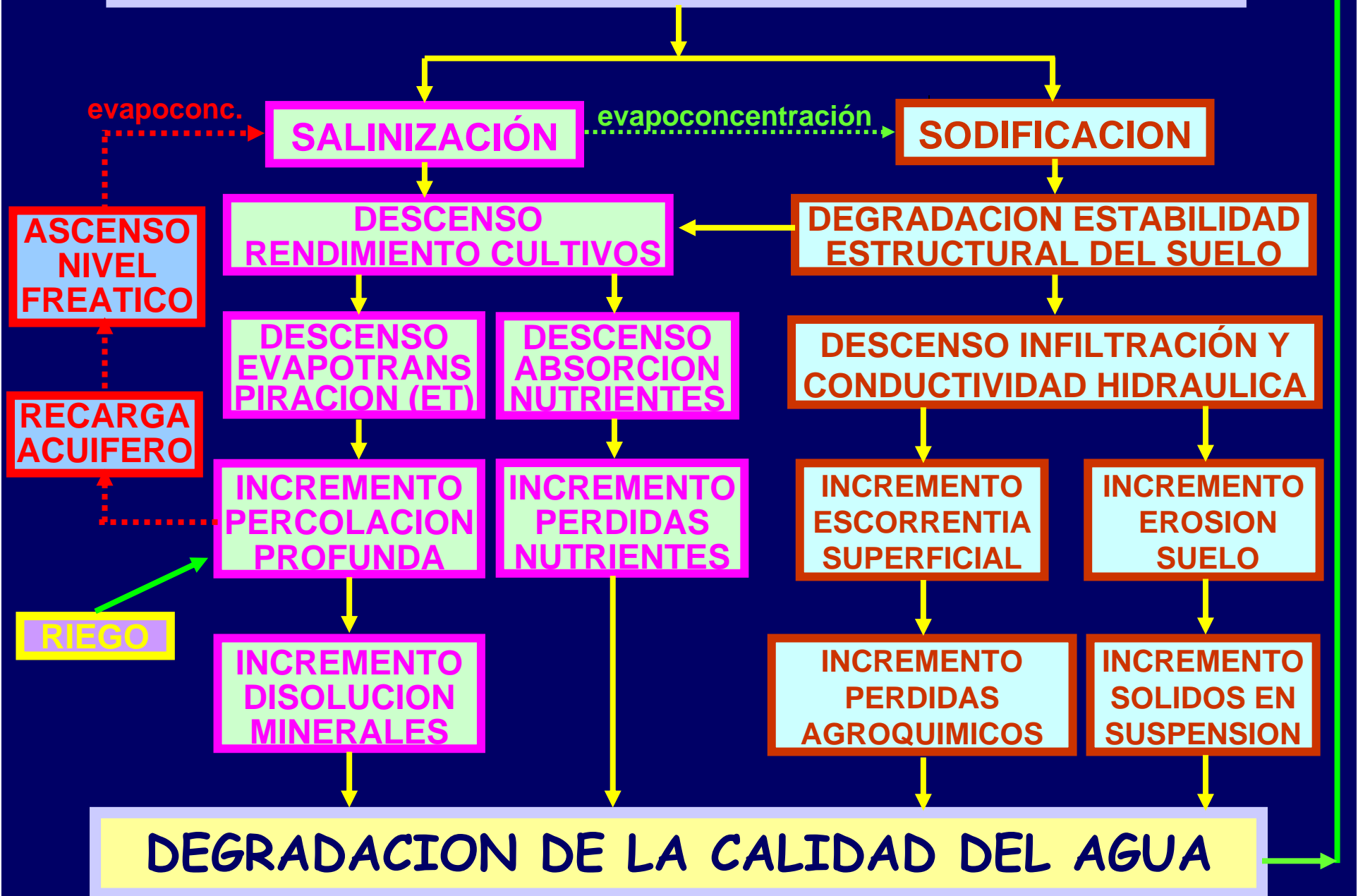


EVOLUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA SALINIDAD (TDS)

Media Anual



DEGRADACION DE LA CALIDAD DEL SUELO



VARIABLES QUE DEFINEN LA CALIDAD DE LAS AGUAS DE RIEGO

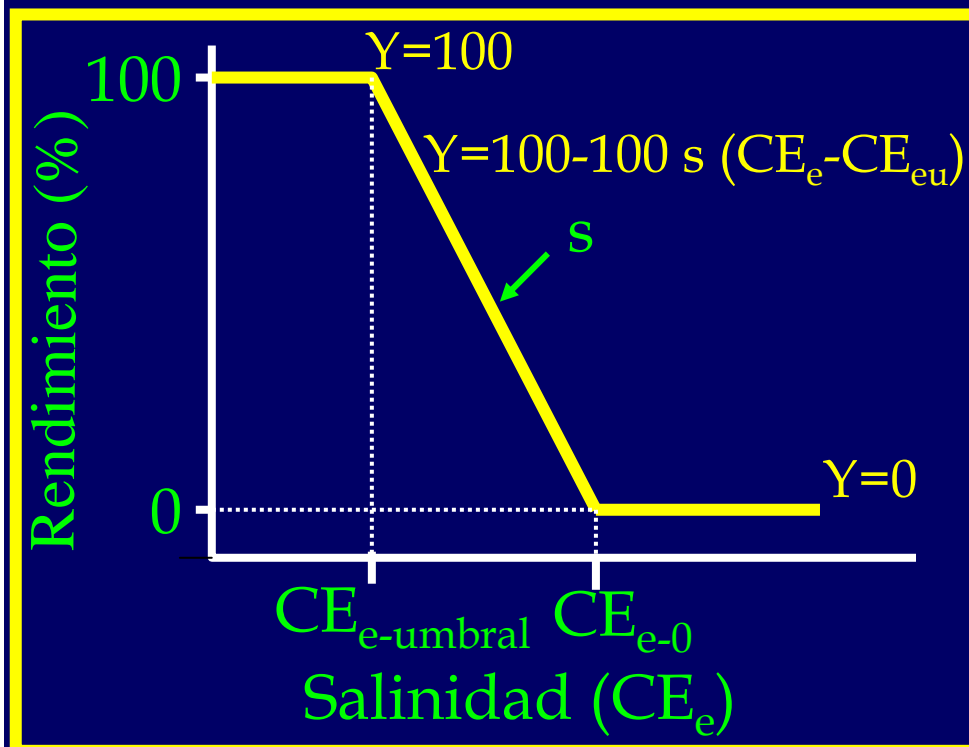
- 1 - SALINIDAD:**
 - Conductividad Eléctrica (CE)
 - Sólidos Disueltos Totales (SDT)
- 2 - SODICIDAD:**
 - Relación de Adsorción de Sodio (RAS)
 - RAS ajustado, RAS corregido...
- 3 - IONES ESPECÍFICOS:** Na, Cl (riego por aspersión...)
- 4 - TOLERANCIA DE LOS CULTIVOS A LA SALINIDAD:** CE_{umbral} , CE_{50} , etc.
- 5 - TOLERANCIA DE LOS SUELOS A LA SALINIDAD-SODICIDAD:** CE-RAS-pH
- 6 - MANEJO DEL RIEGO:**
 - Sistema de riego
 - Fracción de lavado (FL)

Clasificación de calidad de aguas para el riego (FAO,1985)

| Problema potencial | Grado de restricción de uso | | |
|--|-----------------------------|-----------------|---------|
| | Nulo | Ligero-Moderado | Elevado |
| 1. Salinidad (afecta al rendimiento de los cultivos) | | | |
| CE (dS/m a 25°C) | < 0,7 | 0,7 - 3,0 | > 3,0 |
| 2. Sodicidad (afecta a la estabilidad estructural de los suelos) | | | |
| RAS = 0 - 3 (meq/L) ^{0,5} y CE (dS/m) | > 0,7 | 0,7 - 0,2 | < 0,2 |
| RAS = 3 - 6 y CE | > 1,2 | 1,2 - 0,3 | < 0,3 |
| RAS = 6 - 12 y CE | > 1,9 | 1,9 - 0,5 | < 0,5 |
| RAS = 12 - 20 y CE | > 2,9 | 2,9 - 1,3 | < 1,3 |
| RAS = 20 - 40 y CE | > 5,0 | 5,0 - 2,9 | < 2,9 |
| 3. Toxicidad iónica específica (afecta al rendimiento de los cultivos susceptibles) | | | |
| a) Sodio (Na) | | | |
| - Riego por superficie (RAS) | < 3 | 3 - 9 | > 9 |
| - Riego por aspersión (meq/L) | < 3 | > 3 | |
| b) Cloruro (Cl) | | | |
| - Riego por superficie (meq/L) | < 4 | 4 - 10 | > 10 |
| - Riego por aspersión (meq/L) | < 3 | > 3 | |
| c) Boro (B) (mg/L) | < 0,7 | 0,7 - 3,0 | > 3,0 |
| 4. Otros problemas (afectan al rendimiento de los cultivos susceptibles) | | | |
| a) Nitrógeno (NO₃-N) (mg/L) | < 5 | 5 - 30 | > 30 |
| b) Bicarbonato (HCO₃) (mg/L) (asp) | < 1,5 | 1,5 - 8,5 | > 8,5 |

Salinidad (afecta al rendimiento de los cultivos)

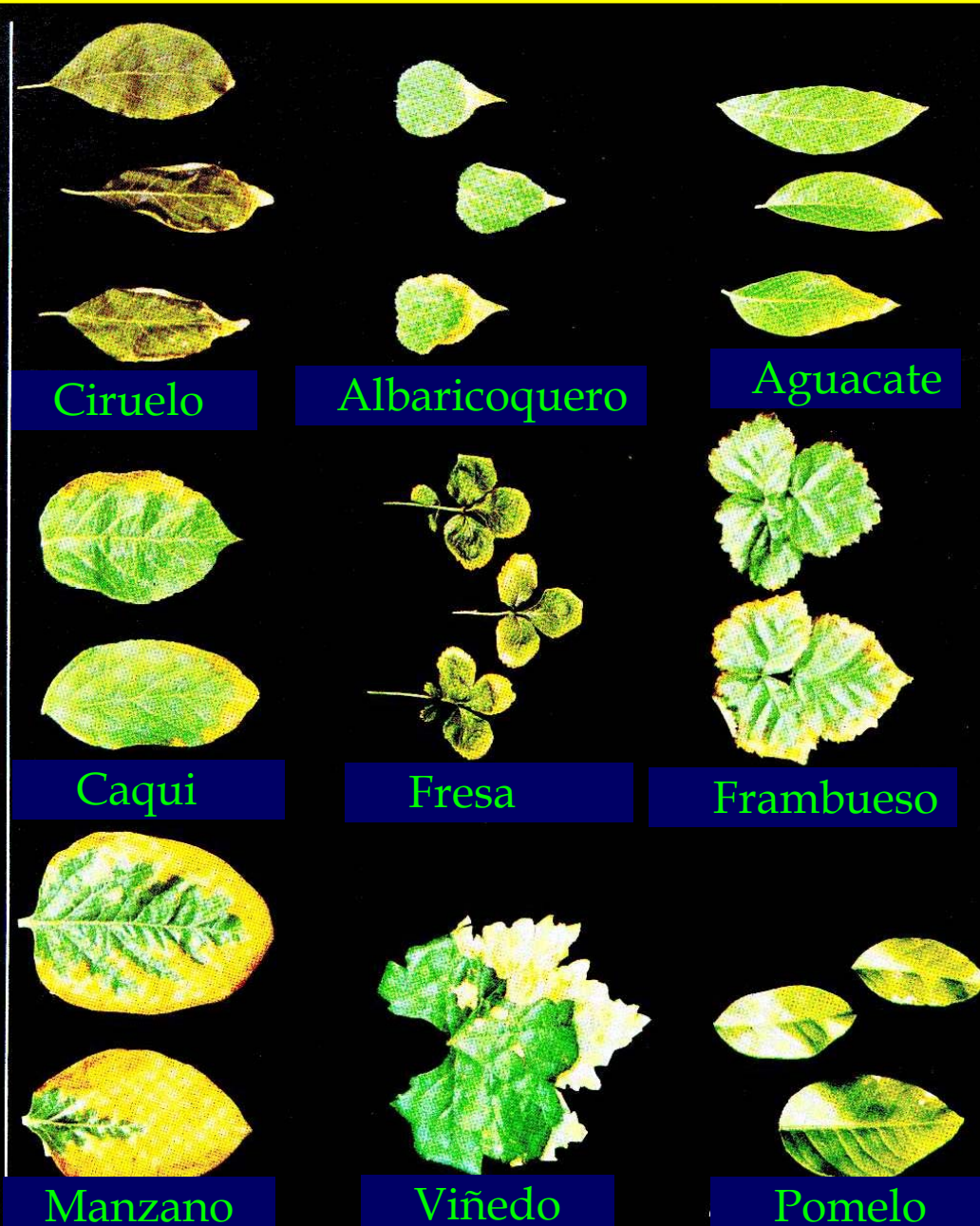
Modelo de respuesta de Maas y Hoffman



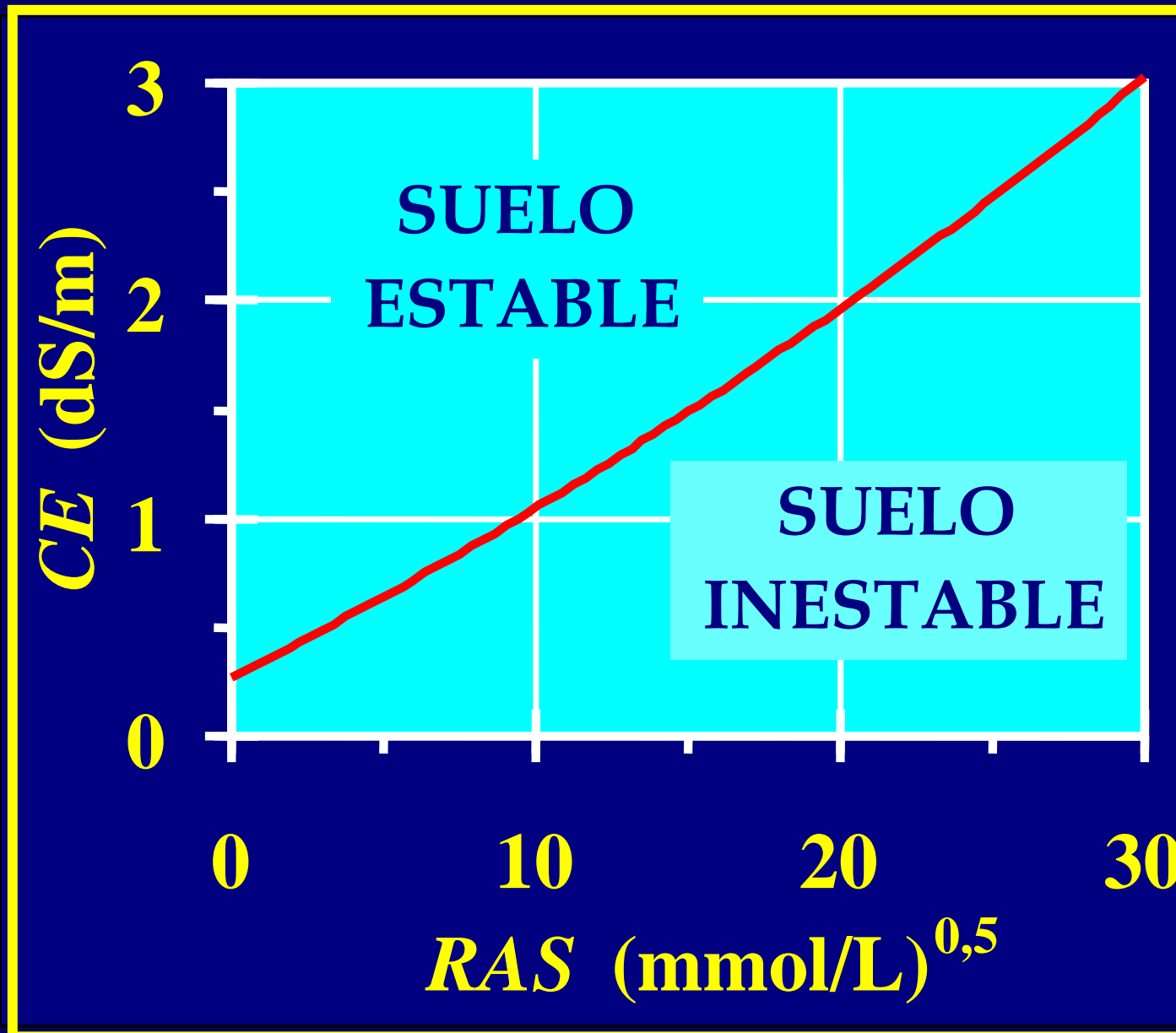
| Cultivo | CE_{eu} | s | Clase |
|---------------|-----------|------|-------|
| Albaricoquero | 1,6 | 24,0 | S |
| Alfalfa | 2,0 | 7,3 | MS |
| Algodón | 7,7 | 5,2 | T |
| Almendro | 1,5 | 19,0 | S |
| Arroz | 3,0 | 12,0 | MS |
| Cebada grano | 8,0 | 5,0 | T |
| Lechuga | 1,3 | 13,0 | MS |
| Maiz grano | 1,7 | 12,0 | MS |
| Melocotonero | 1,7 | 21,0 | S |
| Patata | 1,7 | 12,0 | MS |
| Soja | 5,0 | 20,0 | MT |
| Sorgo | 6,8 | 16,0 | MT |
| Tomate | 2,5 | 9,9 | MS |
| Trigo | 6,0 | 7,1 | MT |
| Vid | 1,5 | 9,6 | MS |

Toxicidad iónica específica: sensibilidad de los frutales al Cl

- La acumulación excesiva de Cl (y Na) en las hojas produce quemaduras en las hojas. Los frutales se vuelven mas sensibles después de 2-3 años.
- La tolerancia de los frutales a la salinidad depende mucho de la variedad y del patrón.
- El tamaño de los frutos disminuye con la salinidad. Además, al disminuir el área foliar, los frutos pueden tener quemaduras por su exposición directa al sol, disminuyendo su valor en el mercado. Sin embargo, la salinidad puede incrementar el contenido en azúcares y mejorar el sabor de los frutos.
- En general, valores en hoja (peso seco) superiores al 0,2% de Na y 0,5% de Cl producen necrosis



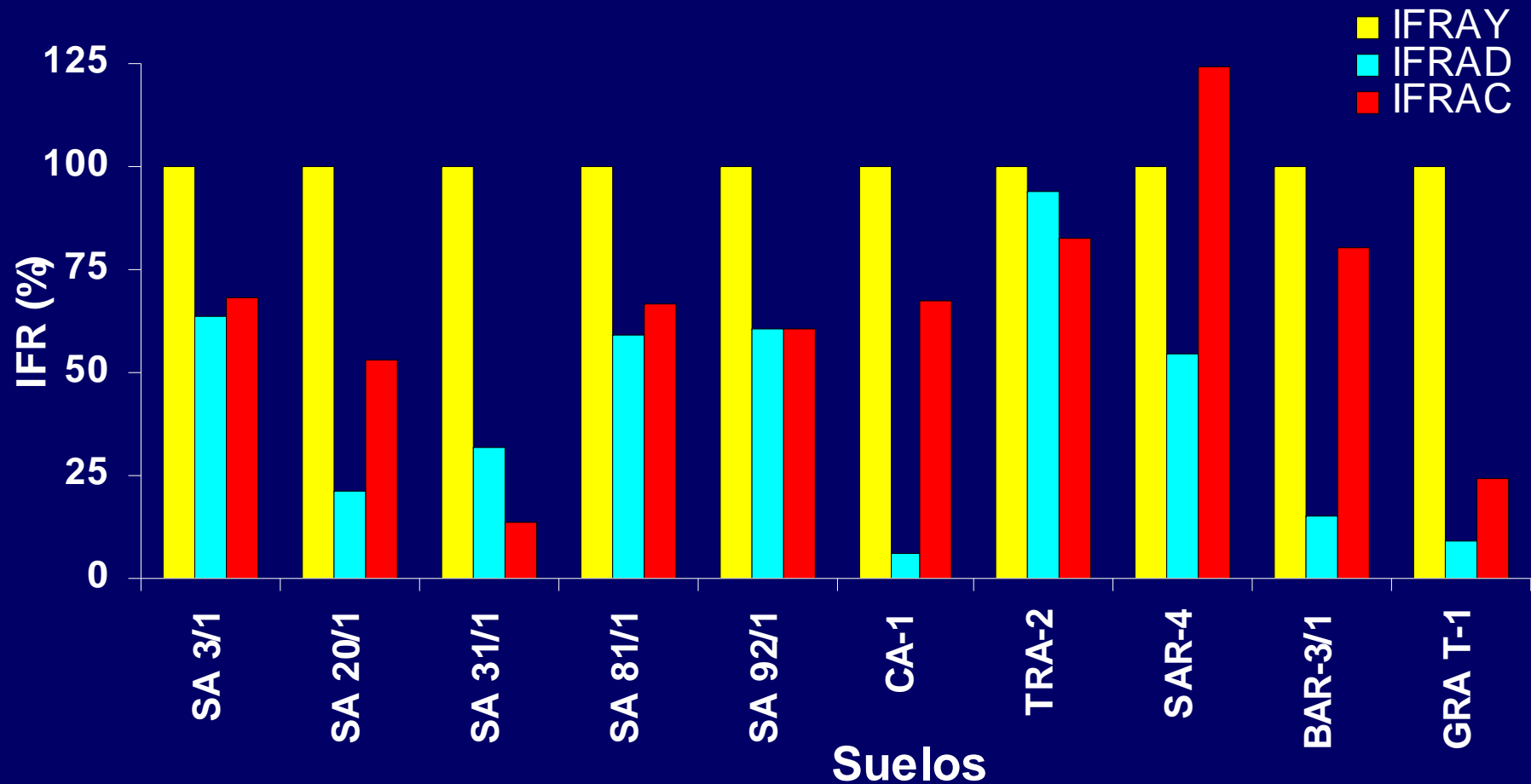
Sodicidad (afecta a la estabilidad estructural de los suelos)



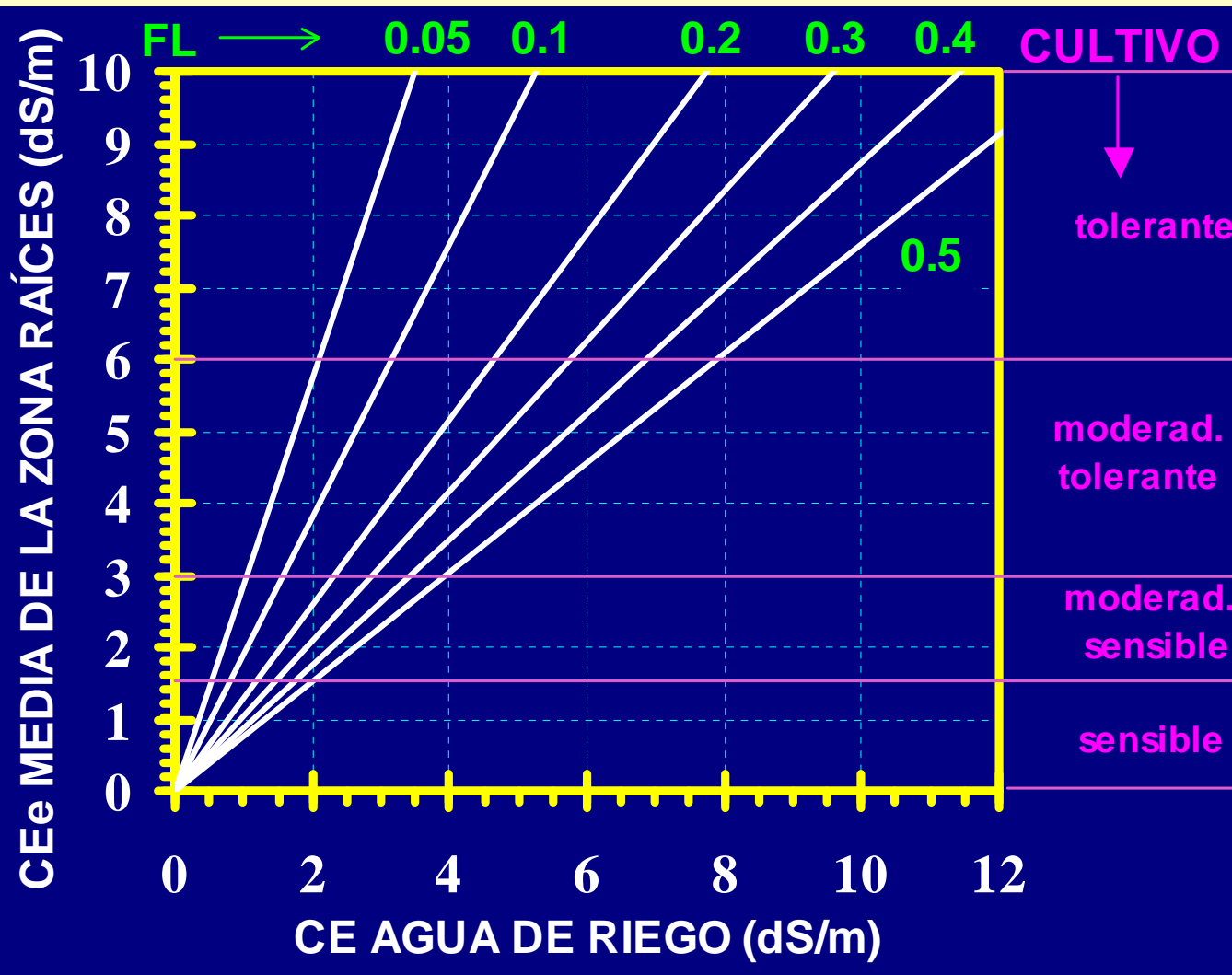
Susceptibilidad de los suelos a dispersión química: Efecto de la calidad del agua en la infiltración

AY = agua saturada en yeso; AD = agua destilada; AC =
agua del canal de riego

IFR = infiltración relativa a la obtenida con AY (100%)



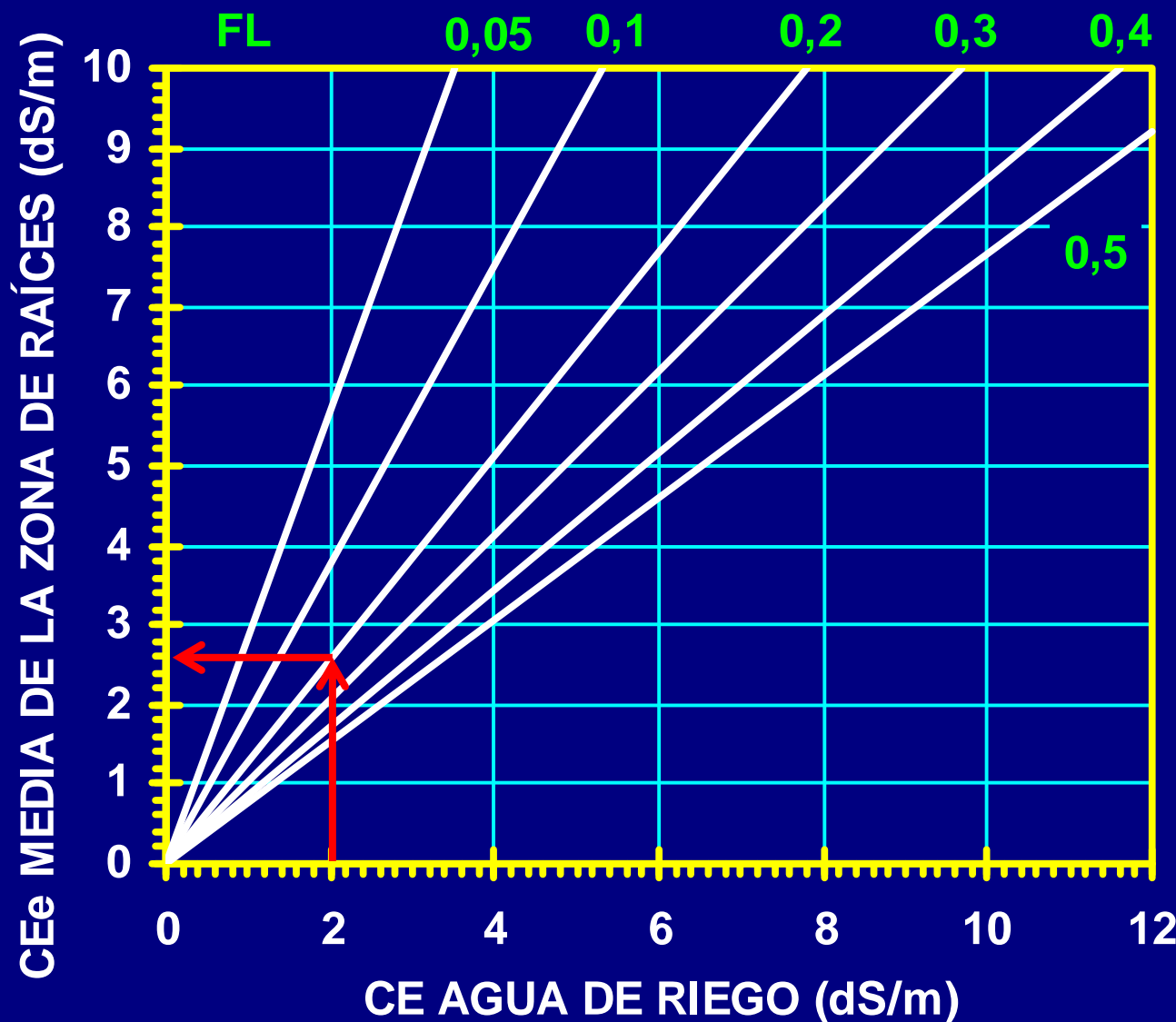
Nomograma para establecer la aptitud del agua de riego en función de la CE del agua, la Fracción de lavado (FL) y la tolerancia del cultivo a la salinidad



1. $CE_{ar} + FL$
 \Downarrow
 estimar CEE zona raíces
2. $CEE_{umbral} > CEE_{zona\ raíces}$
 \Rightarrow agua apta para riego
3. $CEE_{umbral} < CEE_{zona\ raíces}$
 \Rightarrow agua no apta para riego

Ejemplo de establecimiento de aptitud de un agua de riego

CE agua riego = 2 dS/m; Maíz; Riego est. = 800 mm; ET est. = 650 mm;
CEe umbral = 1.7 dS/m; CEe 90% = 2.5 dS/m



FL = fracción agua riego que percola por debajo de la zona de raíces

- $FL = (R-ET)/R = (800-650)/800 = 150/800 = 0.19$

CE ar = 2 dS/m y FL = 0.20 \Rightarrow CEe = 2.6 dS/m

CEe > CEe umbral \Rightarrow no apta

CEe \approx CEe 90% \Rightarrow apta (en el límite...)

Watsuit ("water suitability") (USSL-Riverside, USA)

- ✓ Programa de ordenador adecuado para evaluar la aptitud para el riego de aguas "no convencionales" (muy salinas, yesíferas, carbonatadas, etc.).
- ✓ **Watsuit predice, *en estado estacionario*, la CE, el pH y las concentraciones en equilibrio de los principales cationes y aniones de la solución del suelo en la zona de raíces en función de: (1) la composición del agua de riego, (2) la fracción de lavado (FL), (3) la presencia o ausencia en el suelo de CaCO_3 , y (4) la precipitación y/o disolución de los minerales calcita (CaCO_3) y yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).**
- ✓ **El efecto de la salinidad sobre los cultivos se evalúa en base a la CE media de la zona de raíces en el caso de riegos convencionales y en base a la CE media ponderada por la distribución de la tasa de extracción de los cultivos en el caso de riegos de alta frecuencia.**

Watsuit ("water suitability") (USSL-Riverside, USA)

Ejemplo de resultados obtenidos con el nomograma y con Watsuit en aguas de distintas características químicas

Salinidad (CE_e) media de la zona de raíces

| | Ebro superior $CE = 0.46 \text{ dS m}^{-1}$ Composición media | | Ebro inferior $CE = 1.2 \text{ dS m}^{-1}$ Composición Cl | | Arba $CE = 3.0 \text{ dS m}^{-1}$ Composición Cl-SO ₄ | | "Canarias" $CE = 1.2 \text{ dS m}^{-1}$ Composición HCO ₃ | |
|------|--|---------|--|---------|---|---------|---|---------|
| FL | Nomogr. | Watsuit | Nomogr. | Watsuit | Nomogr. | Watsuit | Nomogr. | Watsuit |
| 0.4 | 0.40 | 0.35 | 1.0 | 1.1 | 2.6 | 2.3 | 1.0 | 0.5 |
| 0.2 | 0.60 | 0.45 | 1.5 | 1.5 | 3.9 | 3.2 | 1.5 | 0.6 |
| 0.05 | 1.3 | 0.90 | 3.3 | 2.9 | 8.4 | 5.9 | 3.3 | 1.2 |

✓ Conclusiones:

- ❑ Las estimas de CE_e son similares en aguas de composición "media"
- ❑ El nomograma sobre-estima la CE_e en aguas salinas, sulfatadas y/o bicarbonatadas, especialmente para bajas fracciones de lavado (FL)
- ❑ Watsuit predice mejor la sodificación del suelo

Sistema de riego y salinidad del agua

- ✓ Riego por superficie en tablares: uniformidad...
- ✓ Riego por superficie en surcos: salinidad del caballón...
- ✓ Riego por aspersión: absorción iónica foliar...
- ✓ Riego localizado de alta frecuencia: generalmente recomendado para aguas salinas... pero también exige lavado, las sales se acumulan de forma localizada en el suelo, los emisores pueden obturarse, la lluvia puede desplazar las sales hacia la zona de raíces, y el riego subterráneo puede ser perjudicial...