

# EL PAPEL DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL FUNCIONAMIENTO DE LOS HUMEDALES

La Alfranca – Pastriz (Zaragoza) · 22 octubre 2009



[Índice](#)

[Prólogo](#)

[Organismos Patrocinadores](#)

[Comité Organizador y Científico](#)

Editores: Luis Javier Lambán  
Javier Heredia  
Margarida Valverde



ASOCIACIÓN INTERNACIONAL  
DE HIDROGEÓLOGOS  
GRUPO ESPAÑOL

# EL PAPEL DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL FUNCIONAMIENTO DE LOS HUMEDALES

La Alfranca – Pastriz (Zaragoza) · 22 octubre 2009

TEXTOS Y PRESENTACIONES DE LAS PONENCIAS  
INVITADAS, PÓSTERS Y RESÚMENES, MESA REDONDA

Editores:  
Luis Javier Lambán  
Javier Heredia  
Margarida Valverde

Asociación Internacional de Hidrogeólogos – Grupo Español  
Barcelona 2010





**ORGANIZADA POR:**

ASOCIACIÓN INTERNACIONAL DE HIDROGEÓLOGOS – GRUPO ESPAÑOL  
(AIH-GE)

**CON EL PATROCINIO DE:**

AGÈNCIA CATALANA DE L' AIGUA

**OTROS COLABORADORES**

CENTRO INTERNACIONAL DEL AGUA Y DEL MEDIO AMBIENTE (CIAMA) – LA ALFRANCA

CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO – MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO  
RURAL Y MARINO

CONSEJO DE PROTECCIÓN DE LA NATURALEZA DE ARAGÓN

FUNDACIÓN BIODIVERSIDAD – CENTRO ESPAÑOL DE HUMEDALES (CEHUM)

FUNDACIÓN CENTRO INTERNACIONAL DE HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA

GOBIERNO DE ARAGÓN – DEPARTAMENTO DE MEDIO AMBIENTE

INSTITUTO AGRONÓMICO MEDITERRÁNEO DE ZARAGOZA (CIHEAM)

INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA – MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN

INSTITUTO PIRENAICO DE ECOLOGÍA – CSIC

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUNYA

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA – DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA

WATER ASSESSMENT & ADVISORY GLOBAL NETWORK (WASA-GN)

ZARAGOZA GLOBAL



## COMITÉ ORGANIZADOR Y CIENTÍFICO

Luis Javier Lambán  
Marisol Manzano  
Emilio Custodio  
Javier Heredia  
Margarida Valverde  
Cristina Pérez  
Victoria Lafuente  
Raúl Alberto Velasco Gómez  
Jorge Molinero  
África de la Hera  
Juan José Durán Valsero  
Maite Aguinaco  
Blas Valero  
Miguel Ángel García Vera  
Carlos Fernández-Jauregui  
José Ángel Sánchez Navarro

## **PRÓLOGO**

Durante los últimos años se han realizado diversas investigaciones sobre el funcionamiento de las zonas húmedas con objeto de mejorar su gestión y conservación. Dichos estudios se centran en la génesis y el análisis funcional de los mismos, es decir, en el conocimiento de las funciones (procesos) geomorfológicas, hidrológicas y ecológicas. De estos tres factores, los hidrológicos son los que definen el carácter y funcionamiento del humedal. Los humedales que dependen de las aguas subterráneas son aquellos en los que el origen del agua es parcial, dominante o exclusivamente agua subterránea y se caracterizan por ser menos fluctuantes que los que sólo dependen del agua superficial. Suelen ser áreas de descarga que corresponden a flujos locales, intermedios o regionales y que manifiestan una gran diversidad de formas, circunstancias, salinidades y hábitats. España es el país de Europa Occidental con más humedales que dependen del agua subterránea.

El principal objetivo de esta Jornada, organizada por el Grupo Español de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH-GE) con el apoyo económico de la Agencia Catalana del Agua, ha sido reunir a la comunidad científico-técnica relacionada con la materia para compartir experiencias, desarrollos y metodologías que permitan un mayor entendimiento de las interacciones entre el agua subterránea y las zonas húmedas. Todo ello junto a la difusión de los trabajos realizados hasta la fecha, contribuirán a una mejor gestión y protección de las zonas húmedas.

La Jornada tuvo lugar el jueves 22 de octubre de 2009 en el Centro Internacional del Agua y del Medio Ambiente (CIAMA) Finca de la Alfranca, en Pastriz – Zaragoza, con una alta participación, alrededor de 80 expertos.

Su desarrollo fue posible gracias a la activa intervención de Luis Javier Lambán y Javier Heredia del IGME; Emilio Custodio de la Universidad Politécnica de Cataluña; Marisol Manzano de la Universidad Politécnica de Cartagena; Josep Fraile y Teresa Garrido de la Agencia Catalana del Agua y Helena Dorca y Margarida Valverde de la Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea.

Asimismo se agradece la colaboración de:

Centro Internacional del Agua y del Medio Ambiente (CIAMA) – La Alfranca  
Confederación Hidrográfica del Ebro – Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino  
Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón  
Fundación Biodiversidad – Centro Español de Humedales (CEHUM)  
Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea  
Gobierno de Aragón – Departamento de Medio Ambiente  
Instituto Agronómico Mediterráneo de Zaragoza (CIHEAM)  
Instituto Geológico y Minero de España – Ministerio de Ciencia e Innovación



Instituto Pirenaico de Ecología – CSIC  
Universidad Politécnica de Cartagena  
Universidad Politécnica de Catalunya  
Universidad de Zaragoza – Departamento de Ciencias de la Tierra  
Water Assessment & Advisory Global Network (WASA-GN)  
Zaragoza Global

Durante la Jornada se presentaron 5 ponencias invitadas, 14 pósters y 1 mesa redonda. Igualmente, se presentaron 3 publicaciones relacionadas con la temática de la Jornada: el libro “Las aguas subterráneas en el área de Doñana: implicaciones ecológicas y sociales” editado por la Junta de Andalucía y presentado por Emilio Custodio; el número monográfico del Boletín Geológico y Minero “La investigación hidrogeológica en los humedales españoles” que fue presentado por Javier Heredia y el libro “La geología e hidrogeología en la investigación de humedales” editado por el IGME y la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía y presentado por Juan Fornés.

En el marco de esta Jornada, el viernes 23 de octubre se realizó una visita guiada a la Reserva Natural de los Galachos de la Alfranca.

En este libro se publican las 5 ponencias invitadas; los 14 pósters en formato pdf y las presentaciones y el resumen de la mesa redonda.

Zaragoza-Barcelona, marzo de 2010

Luis Javier Lambán, Javier Heredia y Margarida Valverde

## ÍNDICE

	Pág
<b>TEXTO PONENCIA INVITADA: Relationships between groundwater and surface water in the prairie wetlands of North America</b> Marios SOPHOCLEOUS (Kansas Geological Survey).....	1
<b>POWERPOINT PONENCIA INVITADA: Relationships between groundwater and surface water in the prairie wetlands of North America</b> Marios SOPHOCLEOUS (Kansas Geological Survey).....	20
<b>POWERPOINT PONENCIA INVITADA: Hydrogeological assessment of wetlands in England and Wales for WFD</b> Mark WHITEMAN (Environment Agency in England and Wales - UK).....	64
<b>POWERPOINT PONENCIA INVITADA: Las aguas subterráneas como elemento básico de la existencia de numerosos humedales</b> Emilio CUSTODIO (Universidad Politécnica de Cataluña).....	105
<b>POWERPOINT PONENCIA INVITADA: Paleohidrología y cambio global en el pasado: los registros de los lagos en la península ibérica y su relación con el agua subterránea / <i>Palaeohydrology and past global changes: iberian lacustrine records and groundwaters</i></b> Blas VALERO GARCÉS (Instituto Pirenaico de Ecología – CSIC).....	133
<b>POWERPOINT PONENCIA INVITADA: Los desafíos de la gestión de los recursos hídricos y el rol del agua subterránea - humedales</b> Carlos FERNÁNDEZ-JAUREGUI (Director Water Assessment & Advisory Global Network).....	196
<b>MESA REDONDA: El papel del agua subterránea en el funcionamiento de los humedales</b>	
<b>PRESENTACIÓN POWERPOINT: El papel del agua subterránea en el funcionamiento de los humedales</b> Juan José DURÁN VALSERO (Instituto Geológico y Minero de España) .....	226
<b>PRESENTACIÓN POWERPOINT: El papel del agua subterránea y las necesidades de conocimiento para una adecuada gestión</b> Marisol MANZANO (Universidad Politécnica de Cartagena) .....	248
<b>PRESENTACIÓN POWERPOINT: Los humedales andaluces</b> Manuel RENDÓN (Reserva Natural Laguna de Fuente de Piedra - Málaga) .....	267

<b>RESUMEN DE LA MESA REDONDA: El papel del agua subterránea en el funcionamiento de los humedales</b> Juan José DURÁN, Miguel Ángel GARCÍA VERA, Marisol MANZANO, Manuel RENDÓN y María José VIÑALS Moderador y relator Javier HEREDIA (Instituto Geológico y Minero de España).....	281
<b>PÓSTER: Contexto hidrogeológico de humedales andaluces. Las lagunas del sur de las provincias de Córdoba y Jaén</b> B. ANDREO, F. CARRASCO, L. LINARES, M. RENDÓN y F. ORTEGA.....	290
<b>PÓSTER: Funcionamiento hidrogeológico del sistema lagunar del margen E del Salar de Atacama (Chile)</b> Ona CORNELLÀ, Joaquín SALAS, Ramón ARAVENA, Edwin GUZMÁN, Jordi GUIMERÀ, Corrado TORE, Wolf VON IGEL, Álvaro HENRÍQUEZ y Andrés FOCK .	292
<b>PÓSTER: Primeros resultados sobre el estudio hidrogeológico del sinclinal de fuentes y su relación con los complejos lagunares de Arcas y del río Moscas (Cuenca, España)</b> A. DE LA HERA PORTILLO, M. MARTÍNEZ PARRA, E. LÓPEZ-PAMO y E. SANTOFIMIA PASTOR.....	294
<b>PÓSTER: Implicaciones ambientales y socioeconómicas del relleno y degradación de los humedales de origen kárstico del valle del Ebro</b> J.P. GALVE, F. GUTIÉRREZ, J.A. SÁNCHEZ, P. LUCHA y J. GUERRERO.....	296
<b>PÓSTER: Génesis y funcionamiento de las zonas húmedas de Baleares en relación con las aguas subterráneas</b> Begoña GARCÍA PARDO, Margarita JUNCOSA DARDER, Concepción GONZÁLEZ CASASNOVAS, María Teresa MAESTRO SALMERÓN y Loreto RUIZ HERRERO.....	298
<b>PÓSTER: Caracterización de un sistema hidrogeológico complejo mediante múltiples técnicas: Laguna de Fuente de Piedra (Málaga, sur de España)</b> Javier HEREDIA, José M <sup>a</sup> RUIZ y Alfredo GARCÍA DE DOMINGO .....	300
<b>PÓSTER: Hydrodynamics and Hydrochemistry of the Salburua Wetland (Álava, Basque Country)</b> Miryam MARTÍNEZ LÓPEZ DE SABANDO, Miren MARTÍNEZ SANTOS, Jesús Ángel URIARTE e Iñaki ANTIGÜEDAD AUZMENDI.....	302
<b>PÓSTER: Contexto hidrológico e hidrogeológico de la Laguna de Los Prados (Málaga)</b> Matías MUDARRA MARTÍNEZ, Bartolomé ANDREO NAVARRO y Manuel RENDÓN MARTOS.....	304
<b>PÓSTER: Estudio hidrogeológico de las Lagunas de Estaña y el acuífero de Estopiñán (Huesca, España)</b> C. PÉREZ BIELSA y L.J. LAMBÁN JIMÉNEZ.....	306



<b>PÓSTER: Evaluación de la influencia humana en la distribución de radionúclidos en las aguas de la marjal de Peñíscola</b> V. RODELLAS, J. GARCIA-ORELLANA, E. GARCIA-SOLSONA, P. MASQUÉ, J.A. DOMÍNGUEZ, B. BALLESTEROS y M. MEJÍAS .....	308
<b>PÓSTER: Grado de dependencia de las aguas subterráneas e índice de funcionamiento hidrológico en los principales humedales continentales de la depresión del Guadalquivir</b> Miguel RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ, Francisco MORAL y José BENAVENTE.....	310
<b>PÓSTER: Contexto hidrogeológico de las lagunas de Palos, las Madres y El Portil (sur de la provincia de Huelva)</b> D. SÁNCHEZ, B. ANDREO, F. CARRASCO, L. LINARES, M. RENDÓN y F. ORTEGA.....	312
<b>PÓSTER: Dependencia aguas superficiales-aguas subterráneas en la cuenca del río Andarax (Almería)</b> F. SÁNCHEZ-MARTOS, J. GISBERT GALLEGO, L. MOLINA SÁNCHEZ y A. PULIDO-BOSCH.....	314
<b>TEXTO Y PÓSTER: Las aguas subterráneas y los humedales: el caso del humedal de la laguna de El Hito (Cuenca)</b> A. SASTRE MERLÍN, A. JURADO GAMO y S. MARTINEZ PEREZ.....	316

## **RELATIONSHIPS BETWEEN GROUNDWATER AND SURFACE WATER IN THE PRAIRIE WETLANDS OF NORTH AMERICA**

**Marios SOPHOCLEOUS\***

(\*) Kansas Geological Survey. The University of Kansas. 1930 Constant Ave. Lawrence. KS 66047. USA. marios@kgs.ku.edu

### **OUTLINE**

After an introduction on wetland losses and wetland restoration efforts, this presentation will delve into wetland hydrology, groundwater flow systems, and groundwater-surface water interactions. Prairie wetlands from the semiarid North American interior will be emphasized and some key field studies there will be highlighted. Wetland salinity and the impacts of vegetation and land use change on wetlands in the northern prairie region of the U.S. and Canada will also be briefly addressed, and the presentation will end up with a number of conclusions.

### **INTRODUCTION: WETLAND LOSSES AND PROTECTIVE LAWS**

#### **Wetland losses**

The World Conservation Monitoring Centre (WCMC) estimates that 5.7 million km<sup>2</sup> (roughly 6% of Earth's land surface) is presently composed of wetlands, of which 30% are bogs, 26% fens, 20% swamps, 15% floodplains, and 2% lakes (Thorsell et al., 1997). However, extensive wetland areas have been lost to anthropogenic disturbances including agricultural development, drainage projects and flood control projects.

It has been estimated that 53% of the wetlands of the conterminous U.S. have been lost since European settlement in the 1700s (Hunt et al., 1996). Six of those States (California, Illinois, Indiana, Iowa, Missouri, and Ohio, shown in Figure 1) have lost more than 85% of their original wetlands.

Kansas, this author's home state, has already lost at least 48% of its original wetlands (Dahl, 1990). Draining and conversion to cropland have caused most of the wetland losses in Kansas; 40 percent of the losses occurred between 1955 and 1978 (Tiner, 1984).

In Europe, France had lost 67% of its wetland area during 1900-1990, the Netherlands had lost 55% during 1950-1985, Greece had lost 63% during 1920-1991, Italy had lost 66%



during 1938-1984, and Spain had lost 60% during 1948-1990 (Commission of EU, 1995).



Figure 1. U.S. States with notable wetland losses (adapted from Dahl, 1990).

### Protective laws

The effects of wetland losses and recognition of their societal value, graphically illustrated in Figure 2, has led to the adoption of laws that attempt to protect wetlands. In North America, the northern prairie wetlands or prairie potholes, highlighted in Figure 3, and also the sandhill wetlands and playas in the semiarid Great Plains of the U.S., have traditionally provided critical water storage and waterfowl habitat. For example, it is estimated that prairie wetlands, shown in Figure 4, contribute more than half of the annual waterfowl population produced in North America (Ojima et al., 1999).

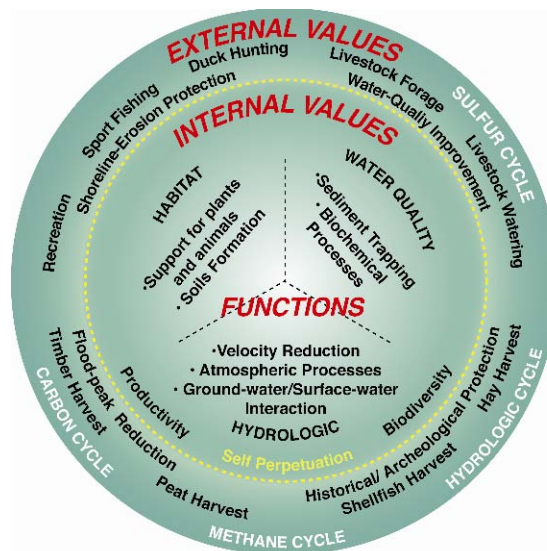


Figure 2. Wetland functions and societal values (from <http://water.usgs.gov/nwsun/WSP2425/functions.html>).



In the northern prairie wetland region of North America, where numerous small wetlands comprise 20-60% of the landscape (Figure 4), a massive restoration effort was undertaken and nearly 2,000 wetlands were restored during 1987-1991, totaling approximately 28 km<sup>2</sup> of wetland areas (Seabloom and van der Valk, 2003).



Figure 3. Northern Prairie wetlands of North America. SD is the location of the St. Denis National Wildlife Area in Saskatchewan, Canada.



Figure 4. Aerial view of Northern Prairie wetlands.

The U.S. Army Corps of Engineers has implemented the Kissimmee River Restoration Project in Florida (Figure 5), including the backfilling of approximately 35 km of artificial channel to recreate the “braided river” and restore the flood-plain marshes of the Kissimmee River (Colangelo and Jones, 2003).

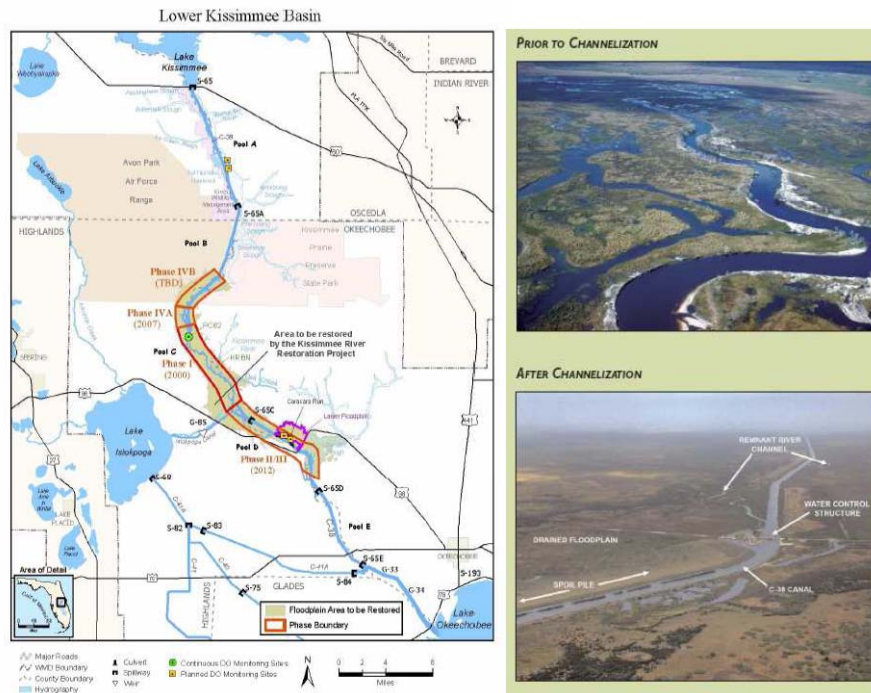


Figure 5. Kissimmee River restoration Project in Florida (from <http://www.sfwmd.gov>).

## WETLAND HYDROLOGY WITH EMPHASIS ON PRAIRIE WETLANDS

Wetlands are areas where water is the primary factor controlling the environment and the associated plant and animal life. Thus, wetland hydrology is widely recognized as a primary driving force influencing wetland ecology, development and conservation, and it is basic to evaluating wetland environments (Hunt et al., 1996).

One of the most common approaches for determining wetland hydrology is to calculate a water budget based on all sources and sinks to the system (Figure 6). However, difficulties in measuring water inflows, outflows, and changes in storage, and the relatively large errors associated with these components (Carter et al., 1979; Winter, 1981), especially for the seasonally flooded wetlands, where the ponded area that is subject to the conservation mass principle can vary in size, disappear, and reappear over the timeframe of the waterbudget analysis, make this water budget approach particularly complicated. An important but somewhat uncertain component of wetland hydrologic budgets is macrophyte evapotranspiration. Evapotranspiration represents significant losses of water from wetland ecosystems and can vary among systems based on differences in light, temperature, and macrophyte community composition (Mitsch and Gosseling, 2000; Wetzel, 1999).

Another, especially hard component of the water budget to quantify is groundwater flow to a wetland, especially as wetlands may form areas of either groundwater recharge or discharge (Siegel, 1988). It is rare for all hydrological components to be quantified in the field, and it is thus difficult to obtain a precise wetland water balance (Winter and Rosenberry, 1995).

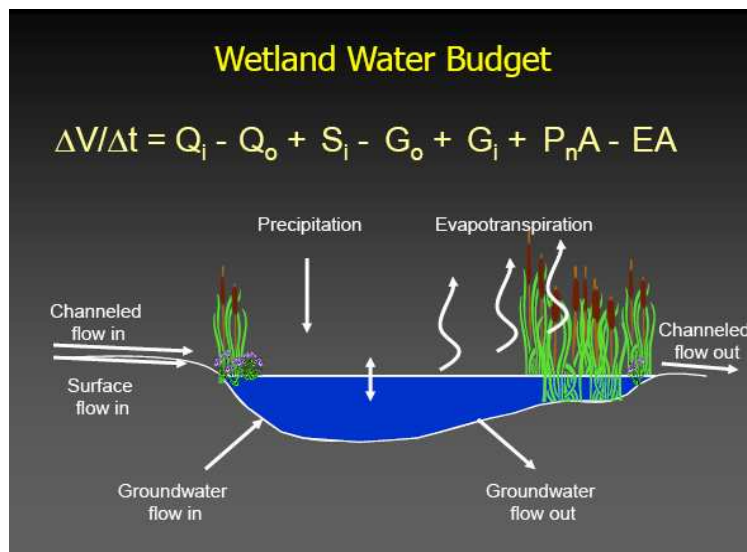


Figure 6. Wetland water budget schematic. (Water budget equation terms:  $Q$  = channel flows,  $S$  = surface flows,  $G$  = groundwater flows,  $P_n$  = precipitation,  $E$  = evapotranspiration, and  $A$  = area of the wetland. Inflows are indicated by the subscript  $i$ , and outflows by the subscript  $o$ .  $V$  = wetland water volume storage, and  $t$  = time).

Such difficulties in measuring water-budget components have led to the application of groundwater models to determine the relationship of wetlands to groundwater and surface water features (e.g. Gilvear et al., 1993). In addition, to overcome the limitations of conventional measurements by use of piezometers or water level gauges, a number of alternative approaches have been developed to investigate characteristics of wetland systems, such as analyzing and interpreting water chemistry to determine the origin of water, calculate a mixing ratio of groundwater and surface water, etc., using stable and radiogenic isotopes, such as oxygen-18 and deuterium, tritium, radon and others, as well as measuring temperature profiles.

## GW FLOW SYSTEMS

Groundwater systems are dynamic 3-D flow-fields, where movement of groundwater is driven by hydraulic potential gradients from recharge areas in the uplands, where water is added to the aquifer, to discharge areas in the lowlands, where it is lost from the aquifer.

Toth (1963), working in the prairies of Alberta, Canada, used theoretical analysis to develop the concept of groundwater flow systems (Figure 7). His analyses indicated that flow systems of different magnitudes could overlie one another, and that they have different characteristics. A local flow system is recharged at water-table highs and discharges to immediately adjacent lowlands; most shallow groundwater is part of local flow systems. Intermediate flow systems can underlie local flow systems, and regional flow systems can underlie both. Intermediate and regional flow systems are recharged at major topographic highs and discharge at major lowlands such as rivers, lakes, and wetlands. Toth (1966, 1971) also provided techniques for identifying field evidence of groundwater recharge and discharge, some of which are related to wetlands.



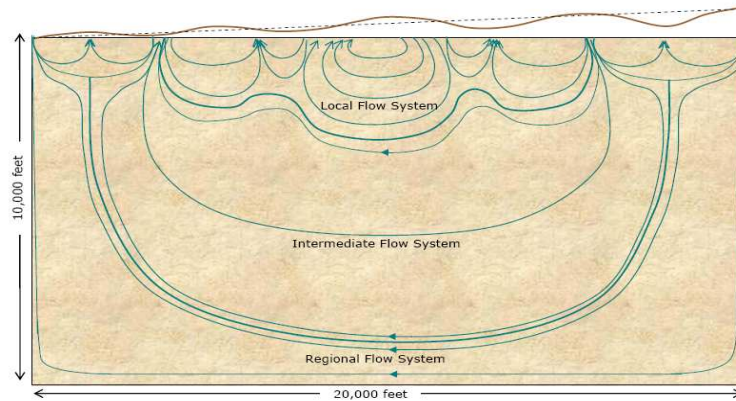


Figure 7. Groundwater flow systems (adapted from Toth, 1963).

Freeze and Witherspoon (1966, 1967) used numerical simulation to greatly expand and generalize the concepts of groundwater flow systems (Figure 8). They examined how complexities in the hydraulic conductivity distribution together with water table configuration influenced regional groundwater flow (Figure 8).

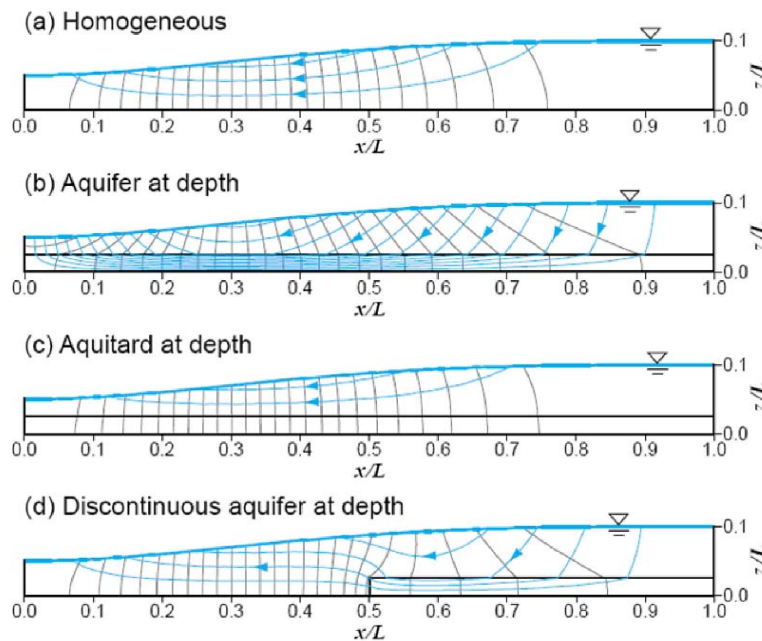


Figure 8. Groundwater flow systems in complex hydrogeologic systems (adapted from Freeze and Witherspoon, 1967).

Winter (1976) further expanded on Toth's and Freeze's work by incorporating surface-water bodies into the model domain analyzed (Figure 9). Toth, Freeze and Winter provide several examples of groundwater movement toward the land surface favoring wetland formation in complex, heterogeneous geologic terrain, such as the one shown in Figure 8d, where permeable rocks at depth pinch out.

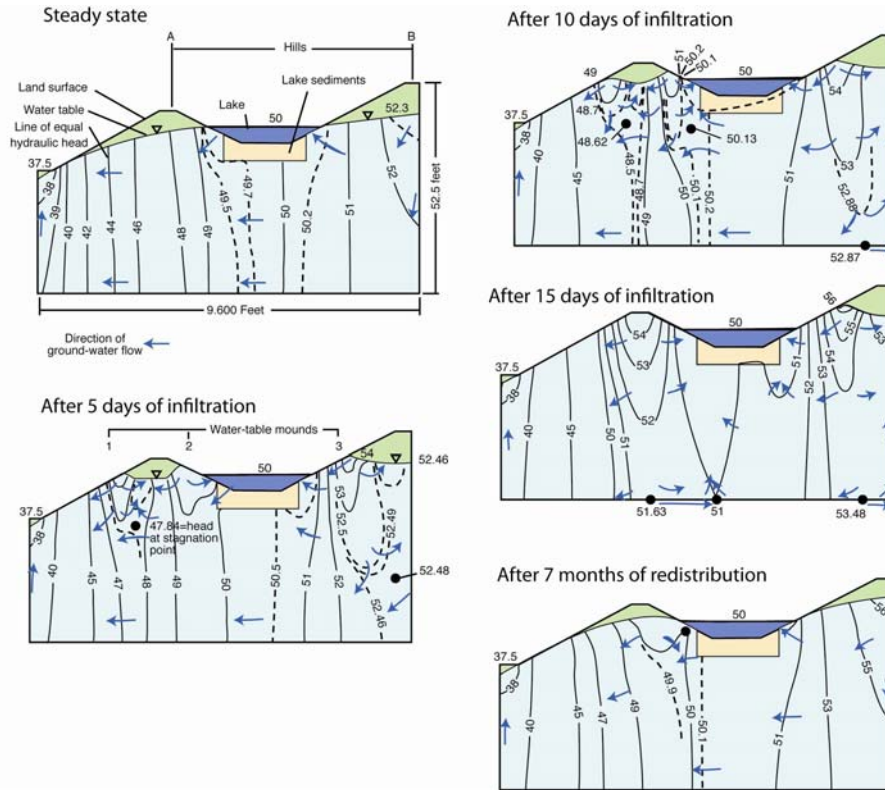


Figure 9. Impacts of water bodies on groundwater flow Systems. The heavy black dots indicate stagnation points (adapted from Winter, 1976).

## GROUNDWATER-SURFACE WATER INTERACTIONS (GW-SW)

GW-SW interaction is important to understand wetland processes, from water budgets to chemical transport to aquatic habitats and ecohydrology. Groundwater can be a major component of water balance of wetlands in arid/semiarid areas. Indeed, wetlands can be completely groundwater dependent, with no surface expressions of water. The proportion of surface and groundwater inputs, and a wetland's interaction with groundwater are governed by its position within the groundwater flow system, the hydrogeologic characteristics of soil and rock material, and their climatic setting (Toth, 1999; Winter, 1999, 2000; Sophocleous, 2002).

Studies of groundwater-surface water interactions of wetlands and other surfacewater bodies have shown that they are strongly controlled by the relative surface water and groundwater heads and these can vary significantly over both the short and long term (e.g. Rosenberry and Winter, 1997). Such studies have highlighted that GW-SW interactions in wetlands can be broadly classified into four types of flow regimes shown in Figure 10.

- (1) connected losing wetland—where the water table slopes away from the wetland and surface water from the wetland recharges the underlying aquifer;
- (2) disconnected losing wetland—similar to (1) above except that leakage of surface water from the wetland is slow enough so that there is an unsaturated zone beneath the wetland;
- (3) flow-through wetland—where the water table slopes into some parts and away from the remainder of the wetland, thus the wetland gains water from the groundwater in some parts and loses water in other parts; and

- (4) gaining wetland—where the water table slopes into the wetland and thus gains water (i.e. receives discharge) from the underlying aquifer.

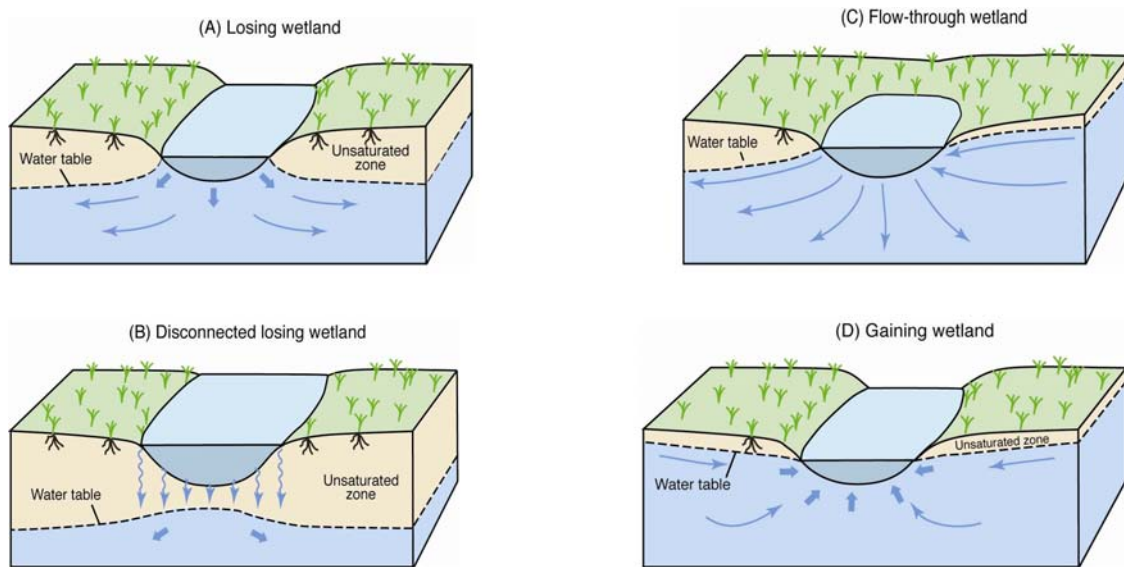


Figure 10. Classification of surface water-groundwater interactions: (A) connected losing wetland; (B) disconnected losing wetland; (C) flow-through wetland; and (D) gaining wetland.

However, it is important to note that individual wetlands may temporally change from one type to another depending on how the surface water levels in the wetland and the underlying groundwater levels change over time in response to climate, land use, and river management.

## KEY FIELD STUDIES IN THE N. AMERICAN PRAIRIES

### Meyboom's (1966, 1967) field studies

Using the concepts of groundwater flow systems, North American hydrologists studied a number of areas in the glaciated prairies of Canada and the U.S., many of which involved lakes and wetlands.

Meyboom made extensive use of piezometer nests (that is, small diameter wells open only at the bottom, and each completed at different depths as shown in Figure 11) to determine vertical flow directions within the groundwater system. By placing piezometer nests such as A, B, and C in Figure 11 at different locations along a transect, the entire cross-sectional profile of flow could be determined, as shown in this diagram. This led to considerable insight into where groundwater is recharged and discharged. This study approach was particularly effective in determining the hydrologic functions of wetlands with respect to groundwater.

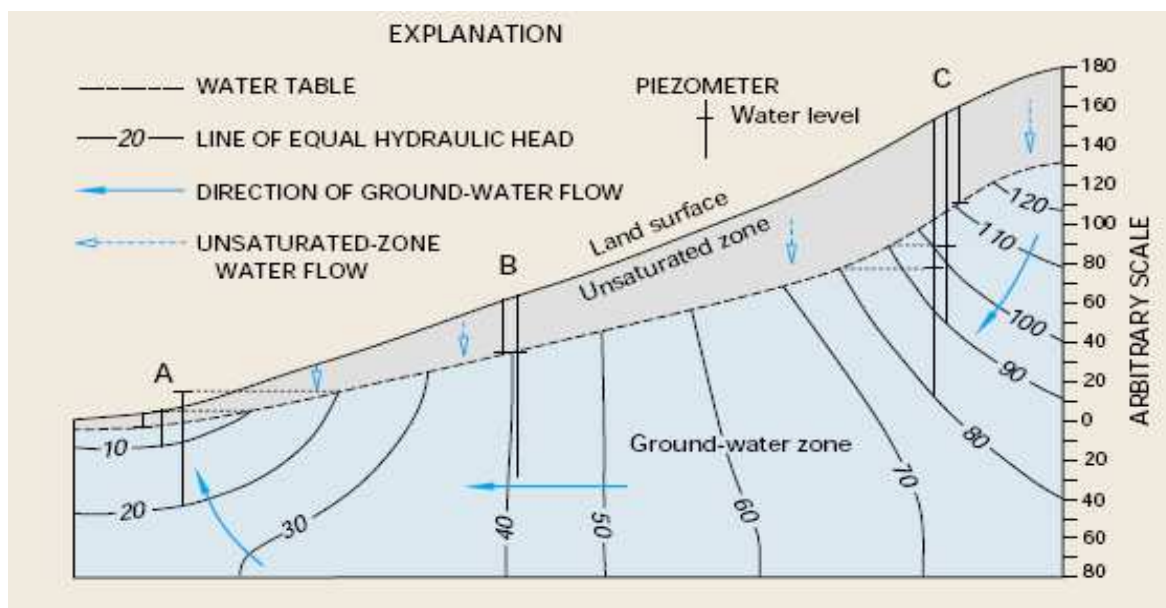


Figure 11. Piezometer nests along a transect (from <http://pubs.usgs.gov/circ/circ1139/htdocs/boxa.htm>).

Because of the shallow depth of groundwater near surface water, transpiration from groundwater by nearshore vegetation can intercept groundwater that would otherwise discharge to surface water. Furthermore, it is not uncommon for transpiration from groundwater to create cones of depression that cause surface water to seep out through the near-shore parts of its beds (Meyboom 1966; Winter and Rosenberry 1995).

Such studies have resulted in increased understanding of groundwater flow processes associated with surface water. For example, in areas of hummocky terrain, ephemeral water bodies have been found to function as recharge points during spring and early summer, and discharge points during late summer and fall. On the other hand, permanent lakes are usually areas of permanent groundwater discharge (Meyboom, 1966; 1967). Four typical flow conditions near prairie lakes have been demonstrated by Meyboom (Figure 12 that show 1) a spring condition of discharge from local and intermediate flow systems in part (a); 2) a summer condition of seepage toward the phreatophyte fringe surrounding the lake in part (b); 3) a deterioration of local flow owing to insufficient recharge, which produces shallow movement from lake A to B in part (c); and 4) a fall and winter condition for the deteriorated system, where there is shallow movement from lake to lake superimposed on the intermediate flow system in part (d).

These studies demonstrate that lakes and wetlands are dynamic bodies, and the movement of groundwater in their vicinity cannot be described in terms of static analysis.

### Lissey (1971)

To understand surface water-groundwater interactions in the context of the landscape setting, Lissey (1971), in the early seventies, proposed a conceptual model of groundwater flow systems, known as depression-focused flow systems (Figure 13), in which the wetlands



located on topographically high positions recharge groundwater, which discharges into wetlands located in lower positions (Euliss et al., 2004). Lissey's model shows the groundwater flow lines connecting wetlands at various landscape positions, implying that the long-range regional flow system represents a significant component of wetland water balance. However, Lissey's model may be misleading as the subsurface connectivity among wetlands depends largely on hydraulic conductivity of the geologic materials, in addition to landscape position (Winter and LaBaugh, 2003).

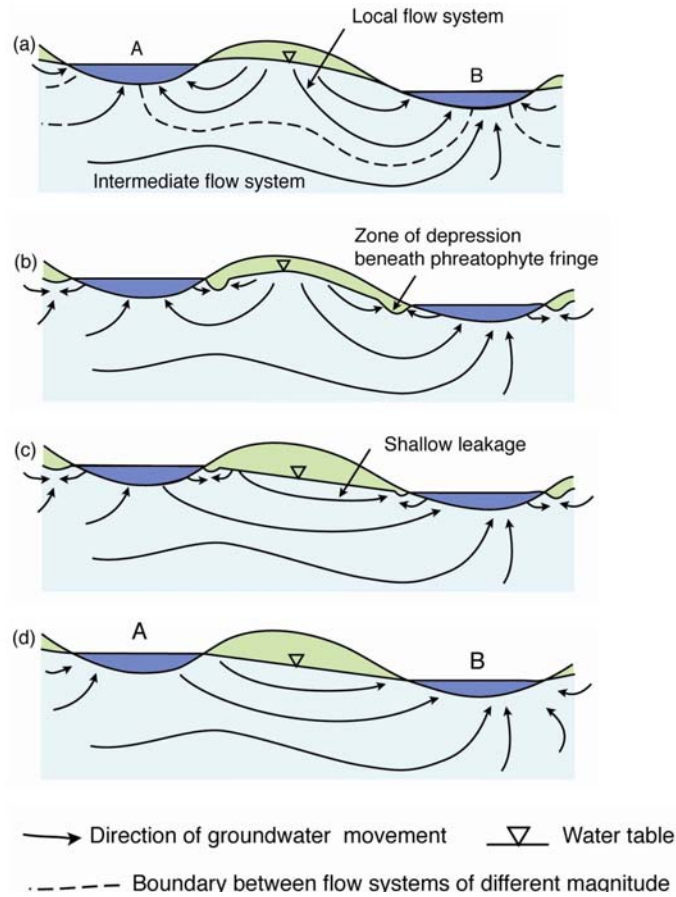


Figure 12. Four typical flow conditions near prairie lakes: (a) spring condition; (b) early summer condition; (c) late summer condition; (d) fall and winter condition (adapted from Meyboom, 1967).

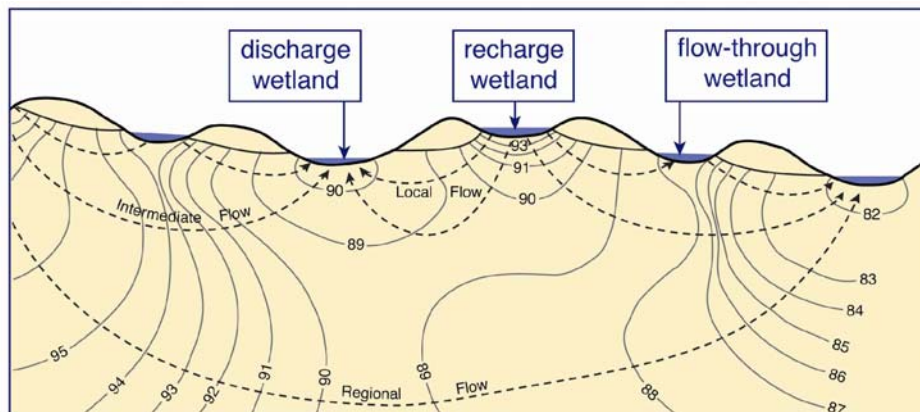


Figure 13. Depresión-focused flow systems (adapted from Lissey, 1971).

It has long been recognized that the hydraulic conductivity of the glacial tills underlying most of the northern prairie wetland region in the U.S. and the Canadian prairies is much lower at depth than near the ground surface, as also shown by van der Kamp and Hayashi (2009) in the prairie region of Canada (Figure 14). This means that the rate of deep, regional groundwater flow is very slow, and localized shallow groundwater flow systems dominate the groundwater hydrology of prairie potholes (Sloan, 1972).

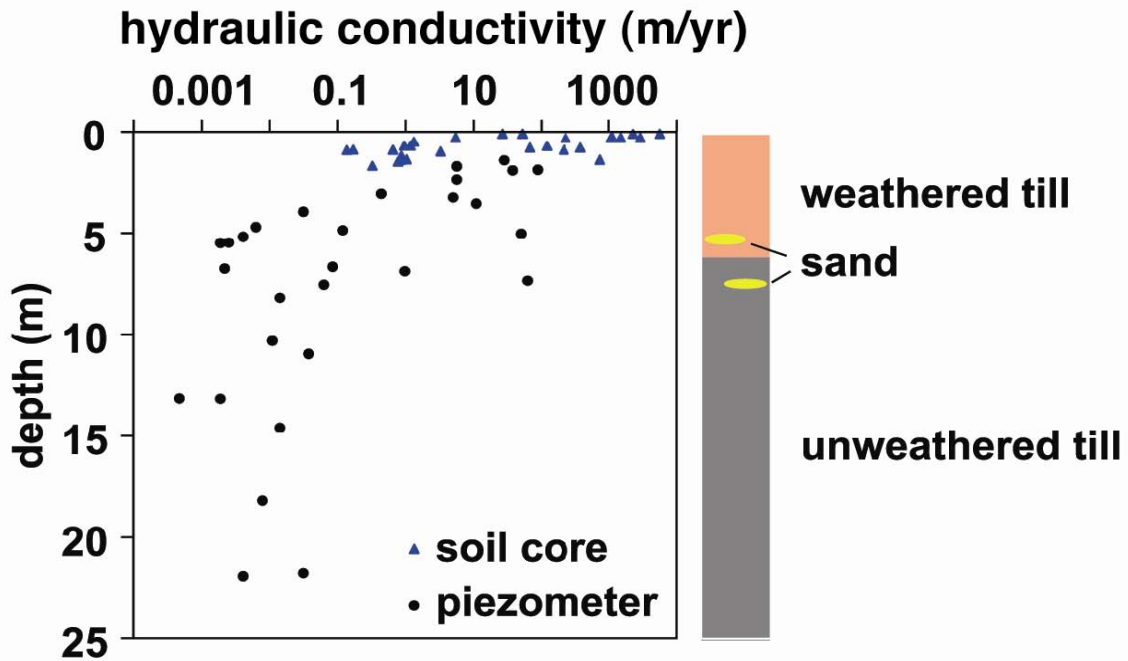


Figure 14. Hydraulic conductivity depth distribution of glacial till in the prairie region of Canada (adapted from van der Kamp and Hayashi, 2009).

The effects of low hydraulic conductivity at depth can be demonstrated by simple groundwater flow simulations as presented by van der Kamp and Hayashi (2009). Figure 15 shows a model cross section of a hypothetical recharge-discharge wetland complex based on an actual cross section in the Canadian prairies (Miller et al., 1985).

The first case (Figure 15a) assumes homogeneous glacial till having saturated hydraulic conductivity ( $K$ ) of 30 m/yr. The simulated water table (shown by the solid blue line in Figure 15) slopes down smoothly from the recharge wetland to the discharge wetland, and the average groundwater flux to the discharge wetland is ~800 mm/yr.

The second case (Figure 15b) assumes that the high- $K$  zone (of 30 m/yr) extends only to a depth of 4 m below the ground surface (indicated by the dashed line) and  $K$  decreases rapidly to 0.03 m/yr within the transition zone between 4 and 5.5 m. The average groundwater flux to the discharge wetland for the layered case is now only ~30 mm/yr, compared to the 800 mm/yr flux for the homogeneous profile. Since the dramatic reduction of  $K$  is a ubiquitous feature of glacial till in the semiarid glaciated plains, Figure 15b is a much more realistic representation of actual groundwater flow systems.



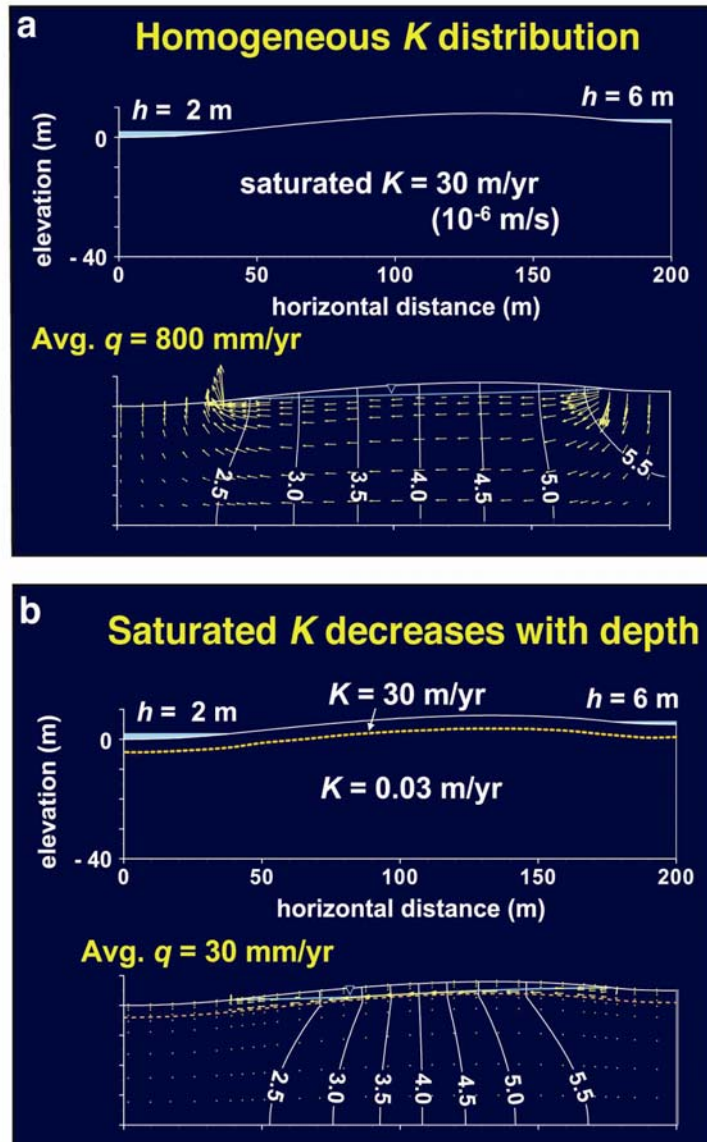


Figure 15. Recharge-discharge wetland complex steady-state simulation for (a) homogeneous, and (b) heterogeneous model cross sections (adapted from van der Kamp and Hayashi, 2009).

## Winter

As mentioned previously, combined field and theoretical modeling studies have contributed to our understanding of groundwater-surface water processes. As Winter (1999) points out, upward breaks-in-slope of the water table result in upward components of groundwater flow beneath the area of lower slope, and downward breaks-in-slope of the water table result in downward components of groundwater flow, as shown in Figure 16. These flow patterns apply to parts of many landscapes.

The groundwater flux through a surface-water bed or to land surface associated with these breaks-in-slope is not uniformly distributed areally (Winter, 1999). Where groundwater moves to or from a surface-water body underlain by isotropic and homogeneous porous media, the flux is greatest near the shoreline and decreases approximately exponentially away from the shoreline (McBride and Pfannkuch 1975; Pfannkuch and Winter, 1984), as shown in

Figure 17.

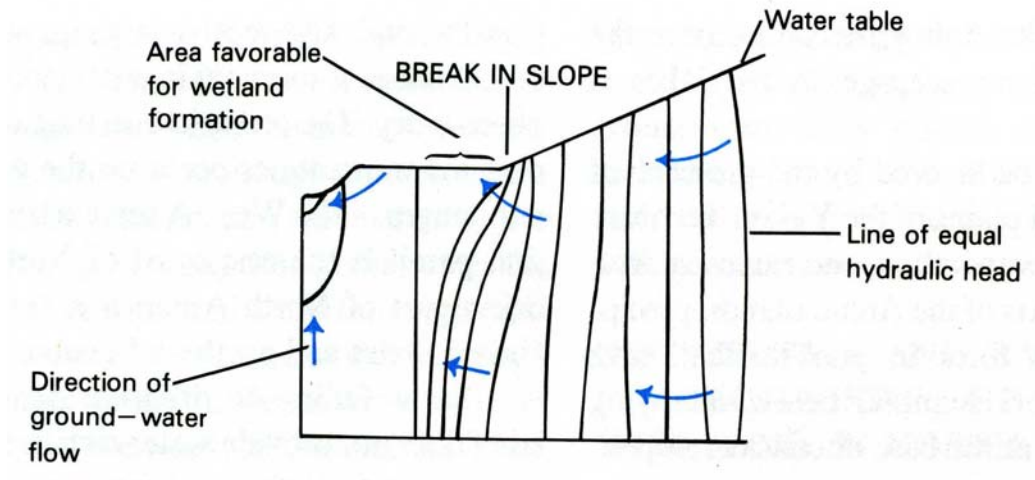


Figure 16. Breaks-in-slope impact on groundwater flow (adapted from Winter, 1999).

### Wetland salinity

Prairie wetlands located in lower parts of the landscape in a given area are generally more saline than those located in the higher parts. The difference in salinity is reflected in the composition of plant communities. According to Lissey's depression-focused model (Figure 13), the groundwater recharged by fresh snowmelt and rain flushes the salts under recharge wetlands, thereby maintaining low salinity. In contrast, discharge wetlands are at the receiving end of the groundwater transporting dissolved salts, which accumulate in topographically closed depressions resulting in high salinity after many years of salt accumulation.

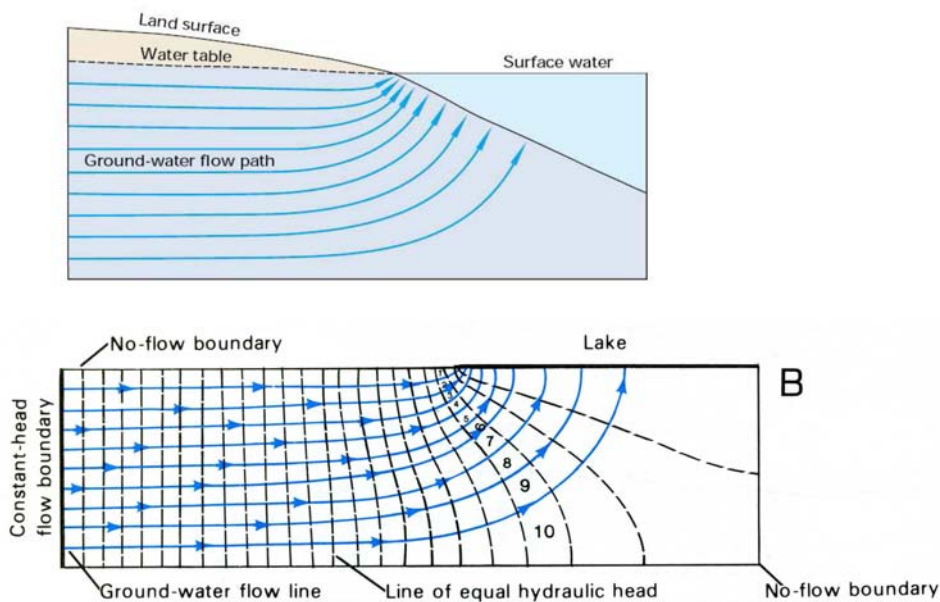


Figure 17. Groundwater fluxes decreasing approximately exponentially away from the shoreline (adapted from Pfannkuch and Winter, 1984).

## EFFECTS OF UPLAND VEGETATION AND LAND USE

The water level in prairie wetlands is generally highest in early spring after snowmelt runoff is received, and gradually declines in summer, primarily because of evaporation and infiltration exceeding the inputs of rain and occasional storm runoff (Winter, 1989). Many prairie wetlands hold surface water only for a few weeks to months. The duration of surface water, or *hydroperiod*, is a critical habitat parameter for waterfowl and other species dependent on water (Swanson and Duebber, 1989). The water level change in a typical prairie wetland can be schematically represented by a triangle, as shown in the lower part of Figure 18, where the magnitude of spring rise and the slope of summer recession determine the duration of surface water. Therefore, the ecology of prairie wetlands is strongly dependent on the factors controlling spring rise and summer recession.

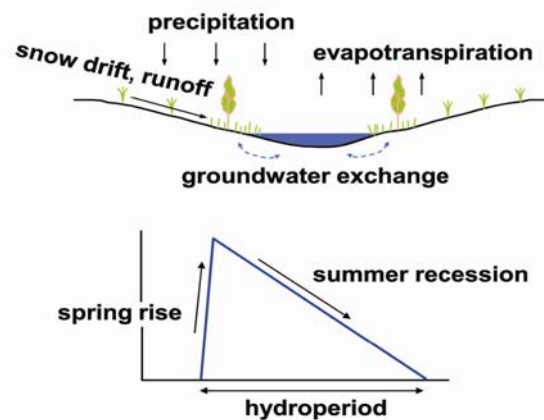


Figure 18. Hydroperiod schematic and water budget components of seasonal prairie wetlands (adapted from Van der Kamp and Hayashi, 2009).

The magnitude of spring rise in the northern prairie wetlands depends on the volume of snow drift and snowmelt runoff into the wetland. Snow drift is influenced by many factors, but microtopography and vegetative cover on the upland seem to be the most important (van der Kamp et al., 2003). Tall stubble and perennial grasses retain snow on the upland, while resuspension and redistribution of snow is relatively unrestricted on cultivated fields with little stubble. Riparian vegetation around wetlands also function as effective snow accumulators (Hayashi et al., 1998). In the absence of snow-trapping vegetation, snow accumulates preferentially in depressions.

Long-term records of water level at Wetland 92 and Wetland 109 in the Canadian prairies (Figure 19) show that the two wetlands had similar water regimes until 1986, as shown in Figure 20, depicting wetland water depth versus time. The two wetlands have similar size, and the uplands around these wetlands were subjected to dryland cultivation until 1983, when the uplands around Wetland 92 were converted to a dense nesting cover of *Bromus inermis* (Figure 21) for the purpose of improving wildlife habitat, and this practice of planting a dense nesting cover was extended to the uplands in the St. Denis National Wildlife Area (Figure 3) in Saskatchewan, Canada, as shown in yellow in the right-hand-side image of Figure 19, which indicates the land use/vegetation cover of the same region shown in the left-hand side aerial photo image. This dense nesting cover has not been disturbed by grazing, mowing, or burning (van der Kamp et al., 2003). From 1987 onward, Wetland 92 dried out and has remained almost entirely dry ever since, while the water regime in Wetland 109 did not show

a major change (Figure 20). Other small wetlands within the grassed area behaved similarly to Wetland 92 (van der Kamp et al., 1999).

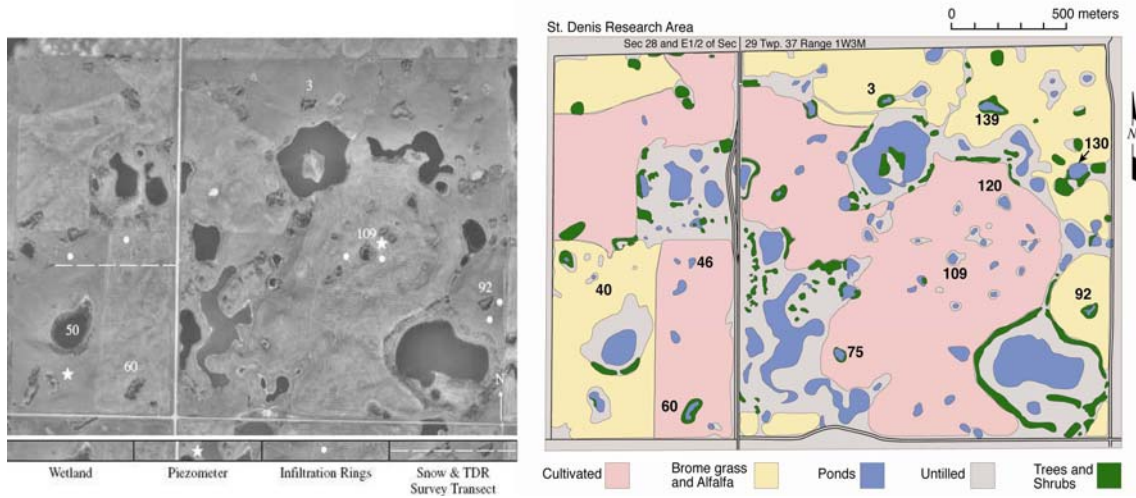


Figure 19. Aerial photograph and land use/vegetation cover for the St. Denis Research Area, Saskatchewan, Canada (adapted from van der Kamp et al., 1999, 2003).

Detailed studies of hydrological processes (Hayashi and van der Kamp, 2007) indicated that two factors operate together and lead to the dramatic shift in wetland water regime: (1) tall permanent grass cover is effective in trapping snow so that the wind-driven transport of snow into wetlands is reduced; and (2) the undisturbed grass cover leads to the development of a macropore network in the topsoil, which markedly increases the infiltrability of the soil, even when it is frozen. The macropore network takes several years to develop after introduction of the grass, as indicated by the delayed response of water level in 1987 to the cultivated-to-grass conversion that took place in 1983 (Figure 20).

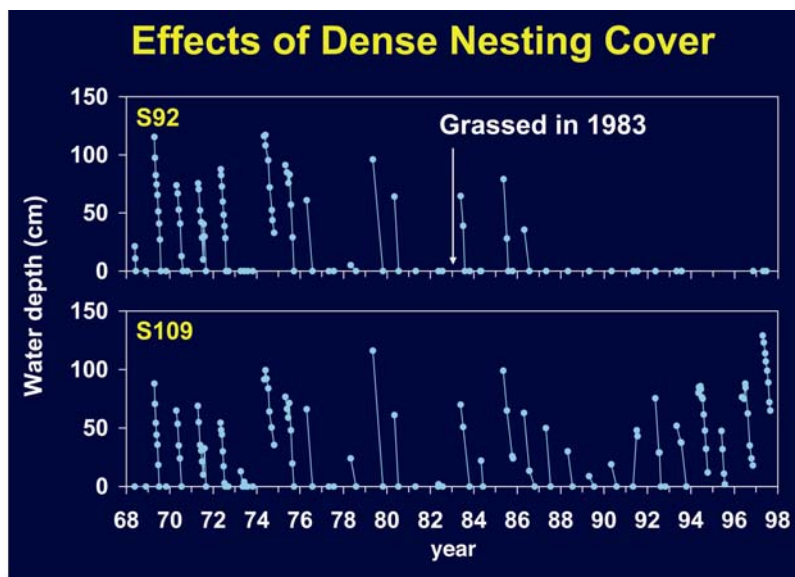


Figure 20. Water depth versus time in Wetlands 92 and 109 in the northern prairies of Canada shown in Figure 19 (adapted from van der Kamp et al., 2003).





Figure 21. Dense nesting cover of *Bromus inermis*.

## CONCLUSIONS

In conclusion, streams, lakes, and wetlands are integral parts of groundwater flow systems (Winter, 1999). Fluxes of water and chemicals from and to groundwater reflect the positions of surface-water bodies with respect to (1) different-scale groundwater flow systems; (2) local geologic controls on seepage distribution through their beds; and (3) the magnitude of transpiration directly from groundwater around their perimeters. Understanding the relative importance of all these factors for a given water body is needed for effective management of the integrated water resource.

It is particularly important to realize the intimate link between lakes and ponds and their catchments. Disturbance in the catchment, such as major land use change, can cause a dramatic change in hydrological processes, which ultimately affects the lake water level. This was clearly demonstrated in the case study of prairie wetlands, where grassing the uplands resulted in the drying out of wetlands.

Climate changes also have major effects on water levels. When the hydrological processes and their response to land use and climate are understood, it is reasonably straightforward to simulate water level in a particular lake or pond using the water balance equation. However, hydrological processes are not well understood in many cases, resulting in large uncertainty in model predictions.

The rapid decrease with depth of the hydraulic conductivity of clay-rich glacial till in the northern prairie wetlands is the essential factor controlling groundwater-wetland interaction. Lateral flow of shallow groundwater between wetland ponds and the riparian zone plays a major role in the water balance and solute cycles of prairie wetlands. In contrast, groundwater flow in the deeper low-conductivity till has minor effects on the water balance of the northern prairies of the U.S. and Canada. Understanding the roles of shallow and deep groundwater systems will improve the hydrological conceptual framework for the management of wetland ecosystems.

And finally, ecohydrological linkage between plants and water presents fruitful opportunities for collaboration between ecologists and hydrologists. The role of riparian vegetation in evapotranspiration and groundwater exchange, for example, is an important but relatively poorly understood process. It is hoped that collaborative research on ecohydrology will enable us to observe hydrological processes and ecological responses simultaneously and to develop coupled models for the prediction of ecosystem responses to land use and climate changes.

## REFERENCES

- CARTER, V.; BEDINGER, M.S.; NOVITZKI, R.P. and WILEN, W.O. (1979). *Wetland functions and values: The state of our understanding. Water resources and wetlands*. In: Greeson, P.E.; Clark, J.R. and Clark, J.E. (eds.). Proceedings of the National Symposium on Wetlands, American Water Resources Association, Minneapolis, Minnesota, pp. 344-376.
- COLANGELO, D.J. and JONES, B.L. (2003). *Phase I of the Kissimmee River Restoration Project, Florida, USA: Impacts of construction on water quality*. Environmental Monitoring and Assessment, 102(1-3): 139-158.
- COMMISSION OF EUROPEAN UNION (1995). *Wise Use and Conservation of Wetlands, Communication from the Commission to the Council and the European Parliament*. COM (95) 189 final, pp. 1-54.
- DAHL, T.E. (1990). *Wetland losses in the United States, 1780's to 1980's*. U.S. Department of the Interior, Fish and Wildlife Service, Washington, DC, USA.
- EULISS, N.H.J.; LABAUGH, J.W.; FREDRICKSON, L.H.; MUSHET, D.M.; LAUBHAN, M.K.; SWANSON G.A.; WINTER, T.C.; ROSENBERRY, D.O. and NELSON, R.D. (2004). *The wetland continuum: a conceptual framework for interpreting biological studies*. Wetlands, 24: 448-458.
- FREEZE, R.A. and WITHERSPOON, P.A. (1966). *Theoretical analysis of regional ground water flow 1. Analytical and numerical solutions to the mathematical model*. Water Resour. Res., 2: 641-656.
- FREEZE, R.A. and WITHERSPOON, P.A. (1967). *Theoretical analysis of regional ground water flow 2. The effect of water-table configuration and subsurface permeability variation*. Water Resour. Res., 3: 623-634.
- GILVEAR, D.J.; ANDREWS, R.; TELLAM, J.H.; LLOYD, J.W. and LERNER, D.N. (1993). *Quantification of the water balance and hydrogeological processes in the vicinity of a small groundwater fed wetland, East Anglia, UK*. Journal of Hydrology, 144: 311-334.
- HAYASHI, M. and VAN DER KAMP, G. (2007). *Water level changes in ponds and lakes: the hydrological processes*. In: Johnson E.A. and Miyanishi, K. (eds.), Plant disturbance ecology, Elsevier Academic Press, San Diego, pp. 311-339.
- HAYASHI, M.; VAN DER KAMP, G. and RUDOLPH, D.L. (1998a). *Mass transfer processes between a prairie pothole and adjacent uplands, 1: water balance*. J. Hydrol, 207: 42-55.
- HAYASHI, M.; VAN DER KAMP, G. and RUDOLPH, D.L. (1998b). *Mass transfer processes between a prairie pothole and adjacent uplands, 2: chloride cycle*. J. Hydrol, 207: 56-67.
- HUNT, R.J.; KRABBEHOFT, D.P. and ANDERSON, M.P. (1996). *Groundwater inflow measurements in wetland systems*. Water Resources Research, 32(3): 495-507.
- LISSEY, A. (1971). *Depression-focused transient groundwater flow patterns in Manitoba*. Geol. Assoc. Can. Spec. Pap., 9: 333-341.



- MCBRIDE, M.S. and PFANNKUCH, H.O. (1975). *The distribution of seepage within lakebeds*. U.S. Geol. Surv. J. Res., 3: 505-512.
- MEYBOOM, P. (1966). *Unsteady groundwater flow near a willow ring in hummocky moraine*. J. Hydrol, 4: 38-62.
- MEYBOOM, P. (1967). *Groundwater studies in the Assiniboine River drainage basin, Part II: Hydrologic characteristics of phreatophytic vegetation in south-central Saskatchewan*. Geol. Surv. Can. Spec. Bull. 139.
- MILLER, J.J.; ACTON, D.F. and ST. ARNAUD, R.J. (1985). *The effect of groundwater on soil formation in a morainal landscape in Saskatchewan*. Can. J. Soil Sci., 65: 293-307.
- MITSCH, W.J. and GOSSELINK, J.G. (2007). *Wetlands*. 4th edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA.
- OJIMA, D.; GARCIA, L.; ELGAALI, E.; MILLER, K.; KITTEL, T.G.F. and LACKETT, J. (1999). *Potential climate change impacts on water resources in the Great Plains*. Journal of the American Water Resources Association, 35(6): 1443-1454.
- PFANNKUCH, H.O. and WINTER, T.C. (1984). *Effect of anisotropy and groundwater system geometry on seepage through lakebeds. I. Analog and dimensional analysis*. J. Hydrol., 75: 213-237.
- ROSENBERRY, D.O. and WINTER, T.C. (1997). *Dynamics of water-table fluctuations in an upland between two prairie-pothole wetlands in North Dakota*. J. Hydrol., 191:266-289.
- SEABLOOM, E.W. and VAN DER VALK, A.G. (2003). *Plant diversity, composition, and invasion of restored and natural prairie wetlands: implications for restoration*. Wetlands, 23(1): 1-12.
- SIEGEL, D.I. (1988). *The recharge-discharge function of wetlands near Juneau, Alaska: Part I. Hydrogeological investigations*. Ground Water, 26: 427-434.
- SLOAN, C.E. (1972). *Ground-water hydrology of prairie potholes in North Dakota*. U.S. Geol. Sur. Prof. Pap., 585-C: 28 p.
- SOPHOCLEOUS, M. (2002). *Interactions between groundwater and surface water: the state of the science*. Hydrogeology Journal, 10: 52-67.
- SWANSON, G.A. and DUEBBERT, H.F. (1989). *Wetland habitats of waterfowl in the prairie pothole region*. In: van der Valk, A. (ed.), Northern prairie wetlands, Iowa State University Press, Ames, Iowa, pp. 228-267.
- THORSELL, J.; LEVY, R.F. and SIGATY, T. (1997). *A global overview of wetland and marine protected areas on the World Heritage list*. International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN), Switzerland, 61 p.
- TINER, R.W. (1984). *Wetlands of the United States: current status and recent trends*. U.S. Fish and Wildlife Service, Washington, DC, USA.
- TOTH, J. (1963). *A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins*. J. Geophys. Res., 68: 4795-4812.
- TOTH, J. (1966). *Mapping and interpretation of field phenomena for ground water reconnaissance in a prairie environment, Alberta, Canada*. International Association of Scientific Hydrology Bulletin, 11(2): 1-49.
- TOTH, J. (1971). *Groundwater discharge: A common generator of diverse geologic and morphologic phenomena*. International Association of Scientific Hydrology Bulletin 16(1-3): 7-24.
- TOTH, J. (1999). *Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations*. Hydrogeology Journal, 7(1): 1-14.

- VAN DER KAMP, G.; STOLTE, W.J. and CLARK, R.G. (1999). *Drying out of small prairie wetlands after conversion of their catchments from cultivation to permanent brome grass*. Hydrol Sci. J., 44: 387-397.
- VAN DER KAMP, G.; HAYASHI, M. and GALLEN, D. (2003). *Comparing the hydrology of grassed and cultivated catchments in the semi-arid Canadian prairies*. Hydrol. Processes, 17: 559-575.
- VAN DER KAMP, G. and HAYASHI, M. (2009). *Groundwater-wetland ecosystem interaction in the semiarid glaciated plains of North America*. Hydrogeology Journal, 17:203-214.
- WETZEL, R.G. (1999). *Plants and water in and adjacent to lakes*. In: A.J. Baird and R.L. Wilby (eds) Eco-Hydrology: Plants and Water in Terrestrial and Aquatic Environments, 269-299, New York: Routledge.
- WINTER, T.C. (1976). *Numerical simulation analysis of the interaction of lakes and groundwaters*. U.S. Geological Survey, Professional Paper, 1001, 45 p.
- WINTER, T.C. (1981). *Uncertainties in estimating the water balance of lakes*. Water Resources Bulletin, 17: 82-115.
- WINTER, T.C. (1989). *Hydrologic studies of potholes in the northern prairies*. In: van der Valk, A. (ed.) Northern prairie wetlands, Iowa State University Press, Ames, Iowa, pp. 17-54.
- WINTER, T.C. and ROSENBERRY, D.O. (1995). *The interaction of ground water with prairie pothole wetlands in the Cottonwood Lake area, east-central North Dakota, 1979-1990*. Wetlands, 15(3): 193-211.
- WINTER, T.C. (1999). *Relation of streams, lakes, and wetlands to groundwater flow systems*. Hydrogeology Journal, 7: 28-45.
- WINTER, T.C. and LABAUGH, J.W. (2003). *Hydrologic consideration in defining isolated wetlands*. Wetlands, 23: 532-540.

# Relationships between groundwater and surface water in the prairie wetlands of North America

**Marios Sophocleous**

**Kansas Geological Survey, The  
University of Kansas  
Lawrence, Kansas, USA**

**[marios@kgs.ku.edu](mailto:marios@kgs.ku.edu)**



*A freshwater emergent wetland in Ne*



# Outline



- Introduction: Wetland losses
- Wetland hydrology—prairie wetlands
- Groundwater (GW) flow systems
- GW-SW interactions
- Key field studies in the N. American prairies
- Impacts of vegetation and land use change
- Conclusions

McPherson valley wetlands, Kansas



# Introduction: Wetland losses and restoration efforts



Cheyenne Bottoms, Kansas



# Wetlands in the world according to WCMC/IUCN

- 5.7 million km<sup>2</sup> (roughly 6% of Earth's land surface) is presently composed of wetlands, of which
  - 30% are bogs,
  - 26% fens,
  - 20% swamps,
  - 15% floodplains, and
  - 2% lakes





# US wetland losses

- 53% of the wetlands of the conterminous US have been lost since European settlement in the 1700s.
- Six of those states (**California, Illinois, Indiana, Iowa, Missouri, and Ohio**) have lost more than 85% of their original wetlands.



# States with notable wetland losses

(Dahl, 1990)



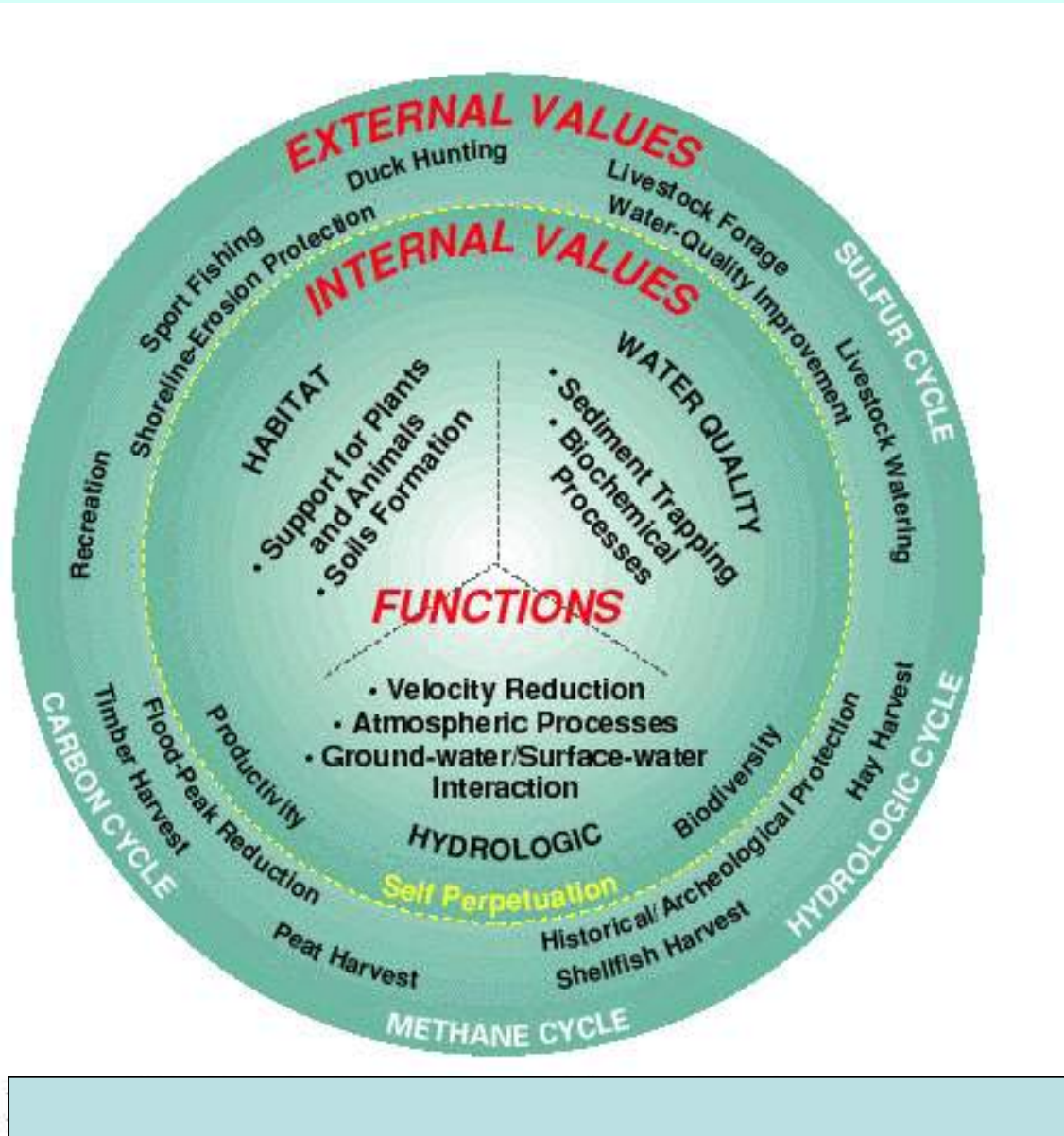
# European wetland losses

- **France** had lost 67% of its wetland area during 1900-1990
- **Netherlands** had lost 55% during 1950-1985
- **Greece** had lost 63% during 1920-1991
- **Italy** had lost 66% during 1938-1984, and
- **Spain** had lost 60% during 1948-1990

(Commission of EU, 1995)



# Wetland functions and societal values



# Northern Prairie Region



Precip. = 300-450 mm/y

Potential ET  $\cong$  600-800 mm/y

Hummocky topography

Glacial till

Frozen soil in winter



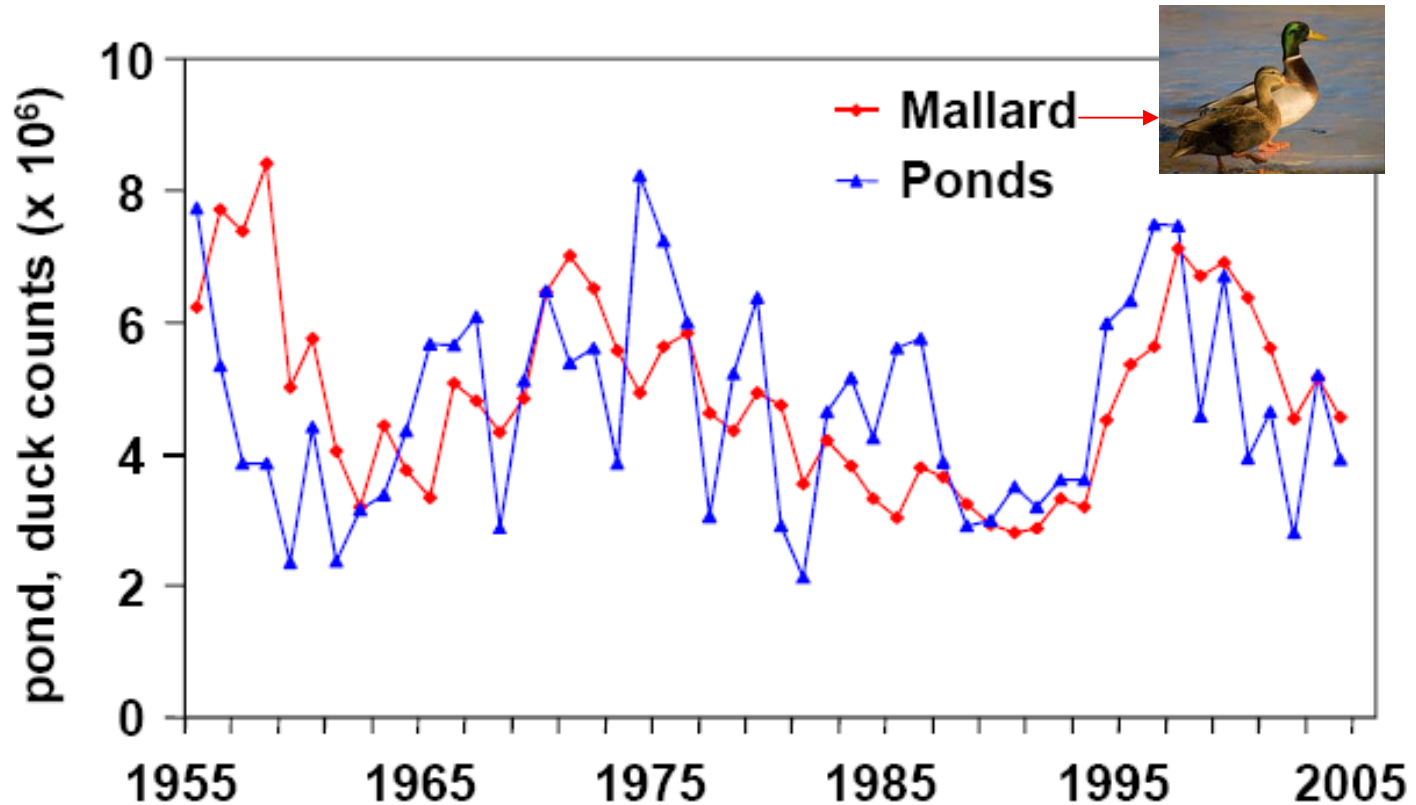


# Northern prairie wetlands



# # of Ponds and Ducks in Prairie Pothole Region

US Fish and Wildlife Service / Canadian Wildlife Service  
Air-ground data from traditional survey strata 26-49



Data by Bob Clark (Canadian Wildlife Service)



# Wetland protective laws

- In the northern prairie wetland region of North America, where numerous small wetlands comprise 20-60% of the landscape, a massive restoration effort was undertaken and nearly 2,000 wetlands were restored during 1987-1991, totaling approx. 28 km<sup>2</sup> of wetland areas (Seabloom and van der Valk, 2003)



# Wetland Hydrology

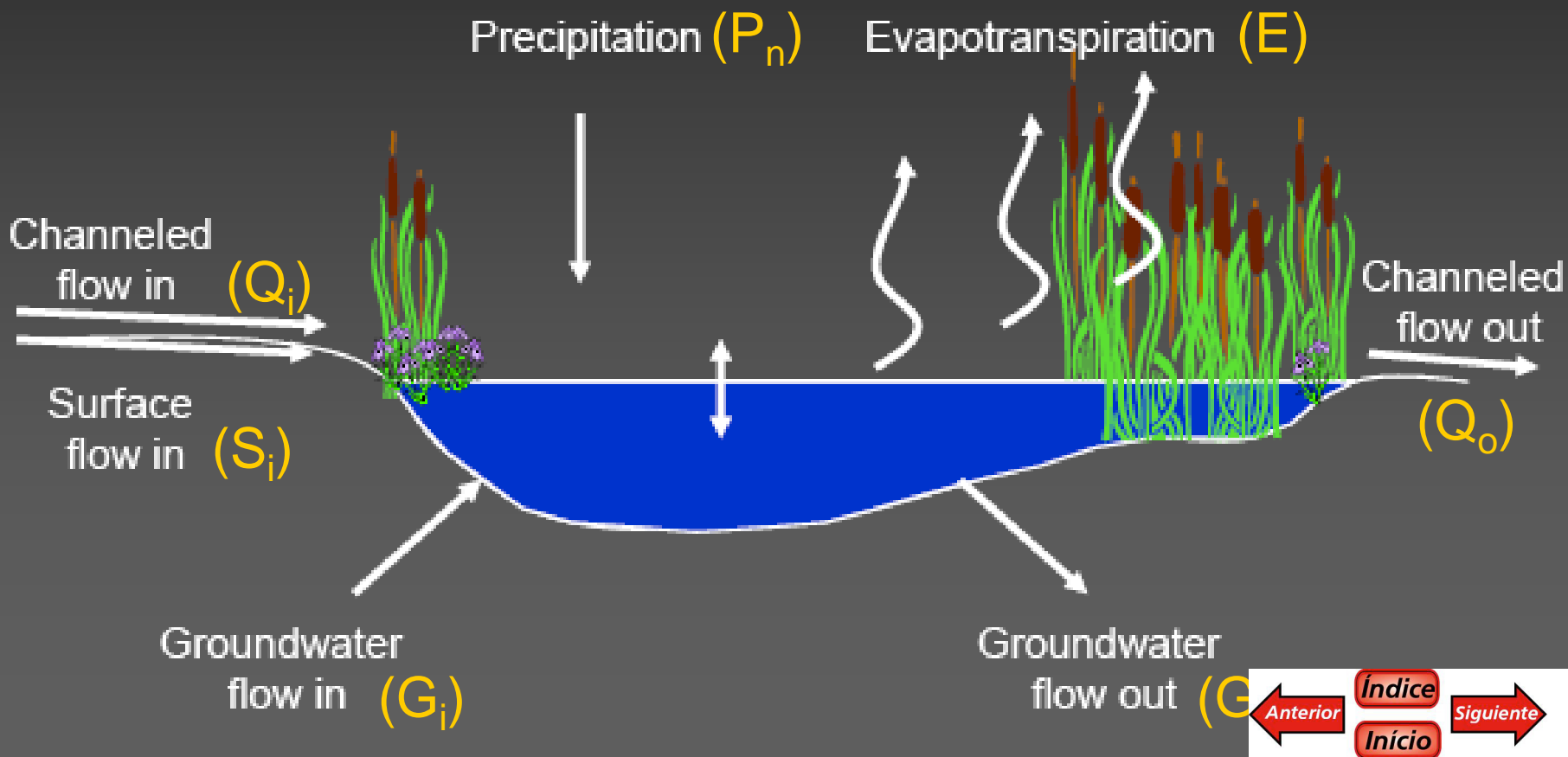
Wetland hydrology: a primary driving force influencing wetland ecology, development and conservation, and it is basic to evaluating wetland environments





# Wetland Water Budget

$$\Delta V/\Delta t = Q_i - Q_o + S_i - G_o + G_i + P_n A - EA$$

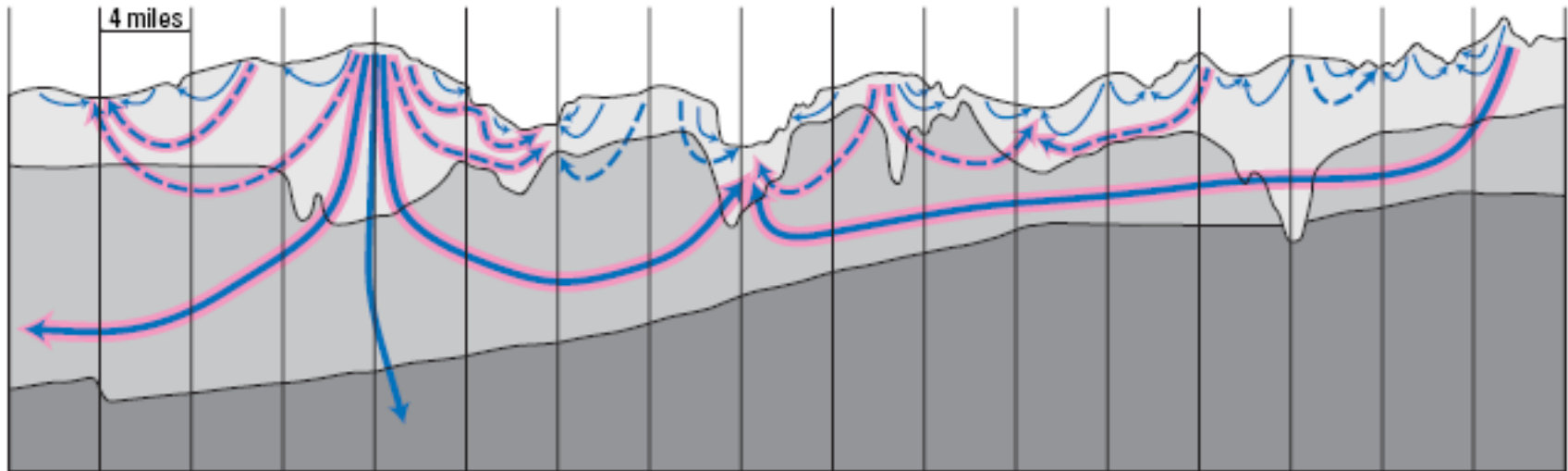


# Alternative approaches to direct measurement of wetland water budgets

- Groundwater modeling
- Water chemistry
- Stable and radiogenic isotopes
- Temperature profiles

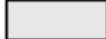








# Groundwater flow systems



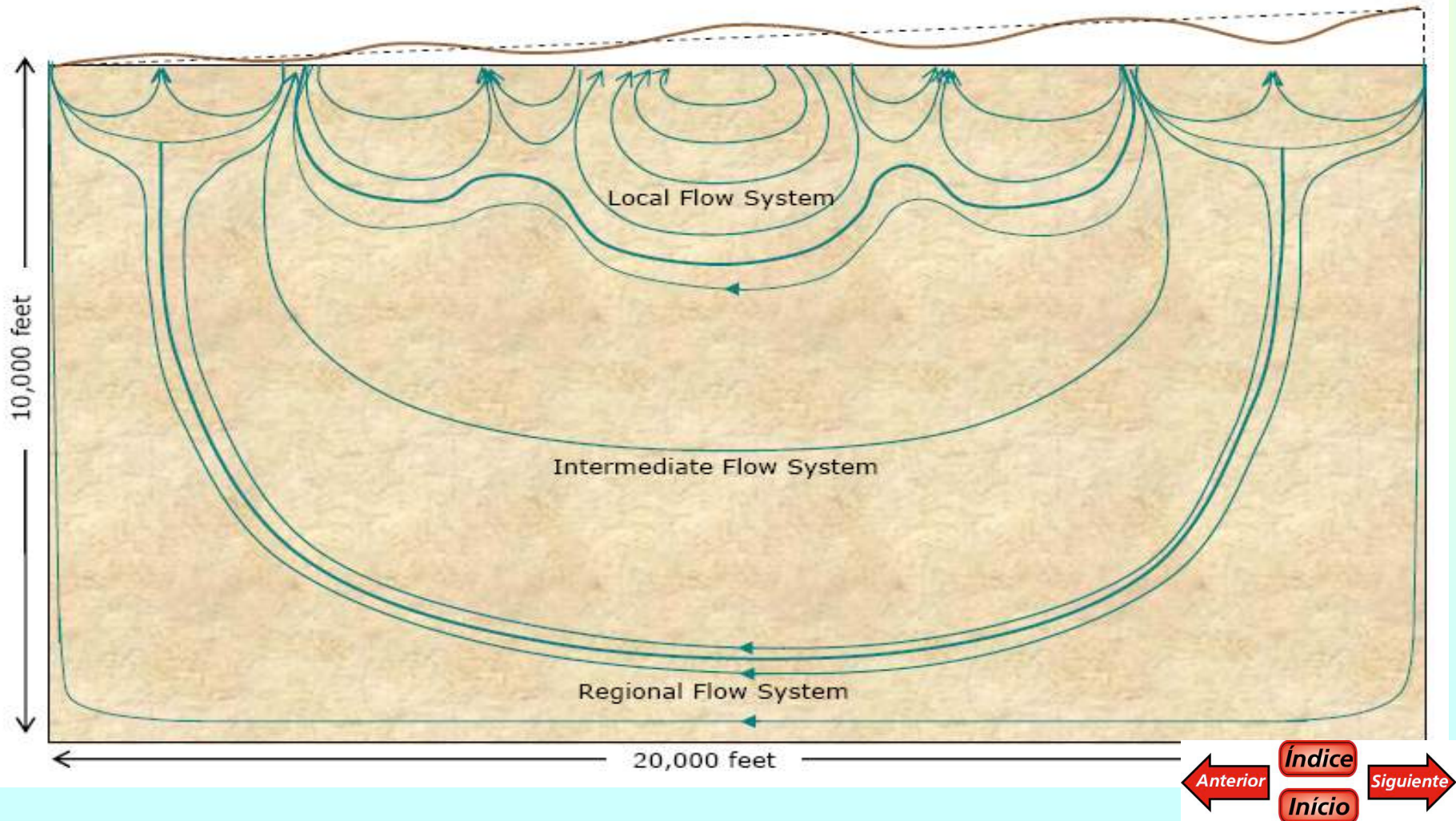
NOT TO SCALE

## EXPLANATION

-  Glacial deposits
-  Carbonate-rock aquifer
-  Basal confining unit
-  Local ground-water flow path
-  Intermediate ground-water flow path
-  Regional ground-water flow path
-  Indicates flow simulated by the regional ground-water flow model constructed for this investigation

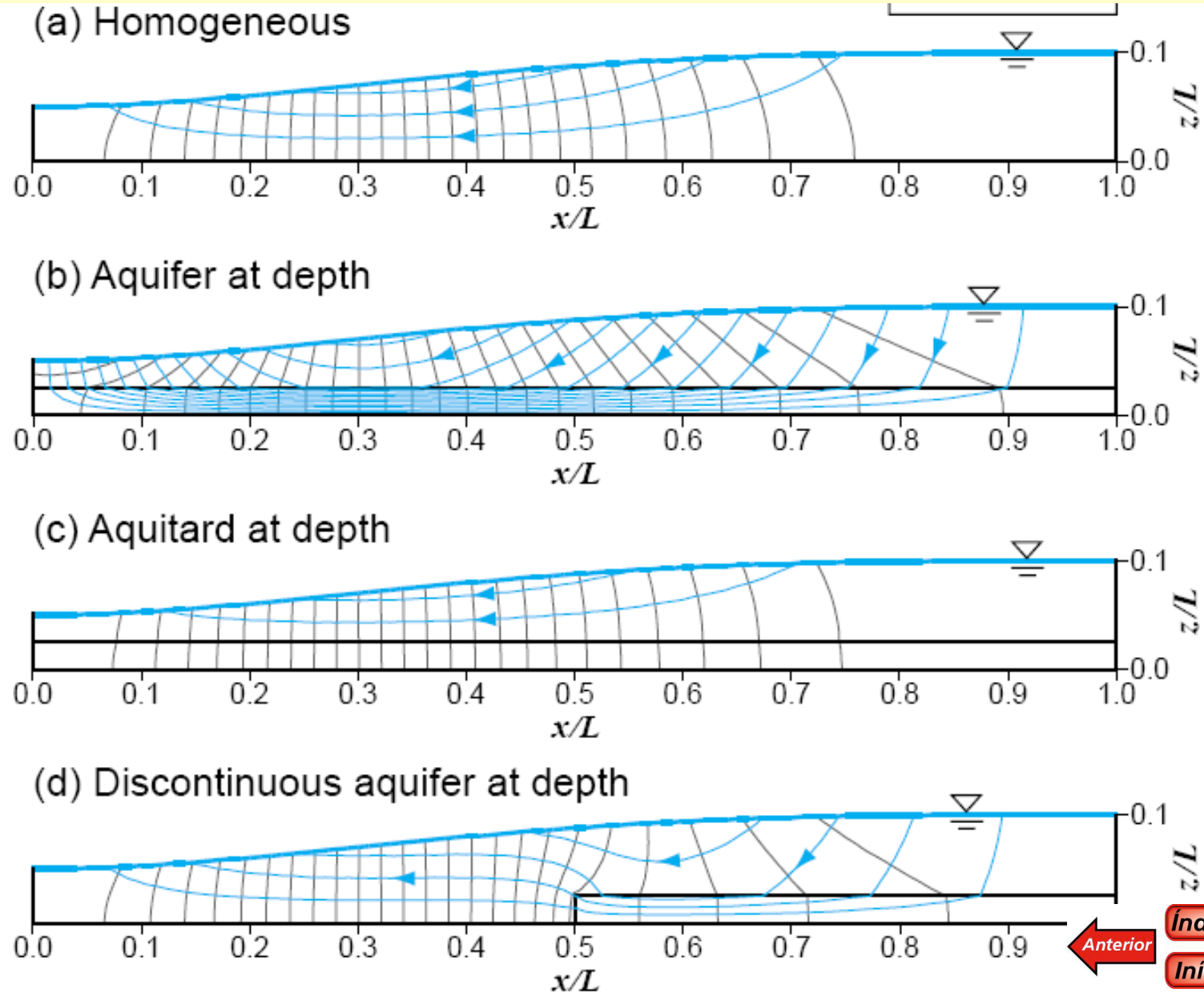


# Groundwater flow systems (Tóth, 1963)

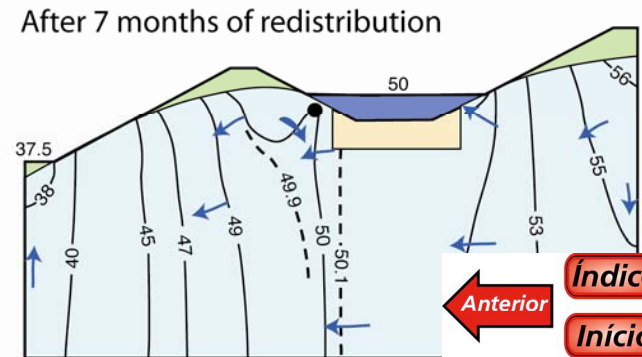
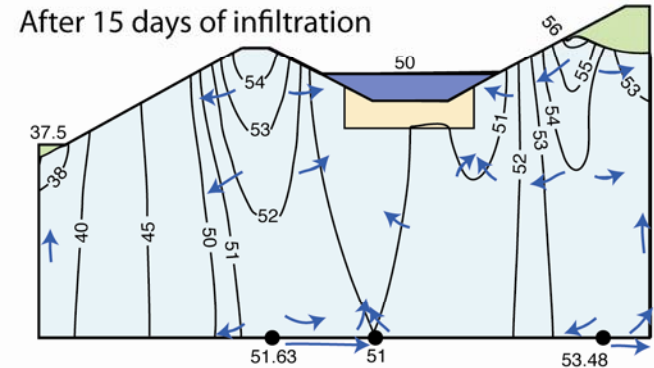
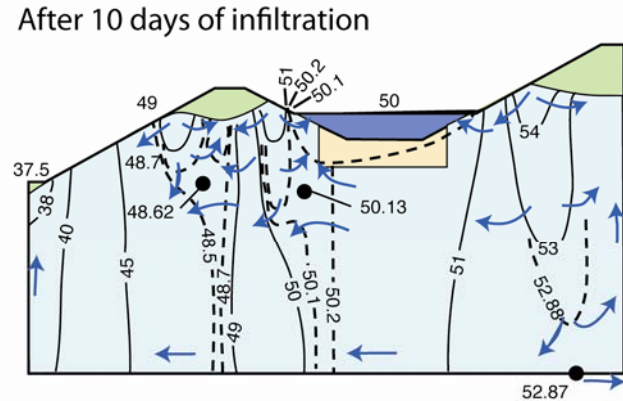
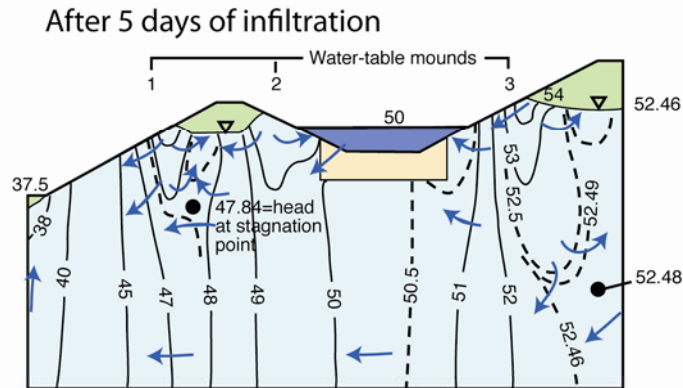
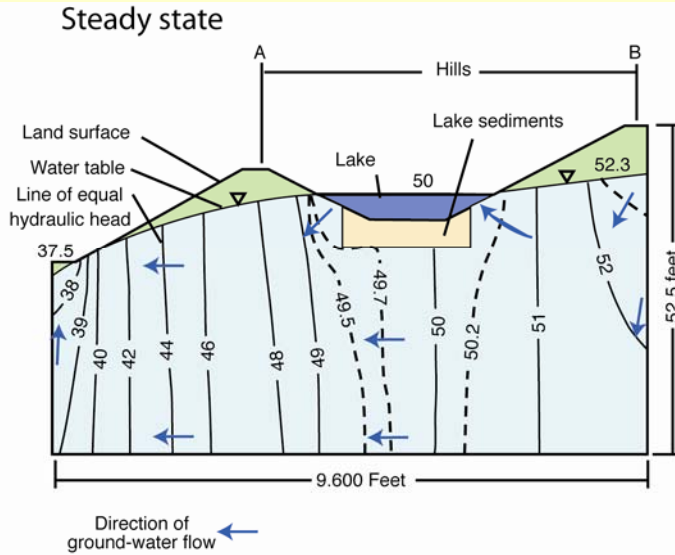




# Freeze and Witherspoon (1966, 1967)

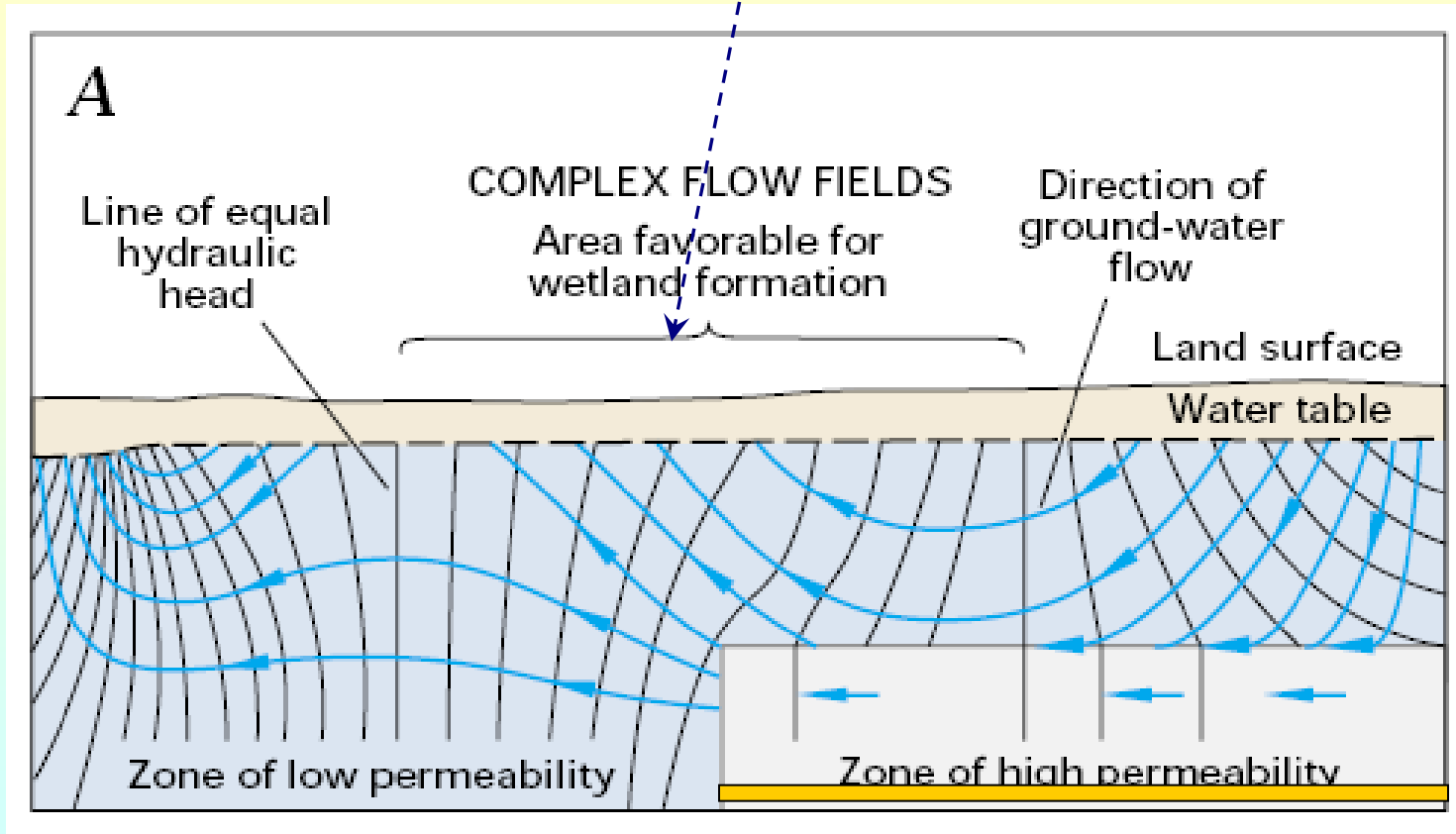


# Winter (1976)



Anterior **Índice** Siguiete  
**Inicio**

# Example of GW movement toward the land surface favoring wetland formation



# Groundwater-surface water interactions

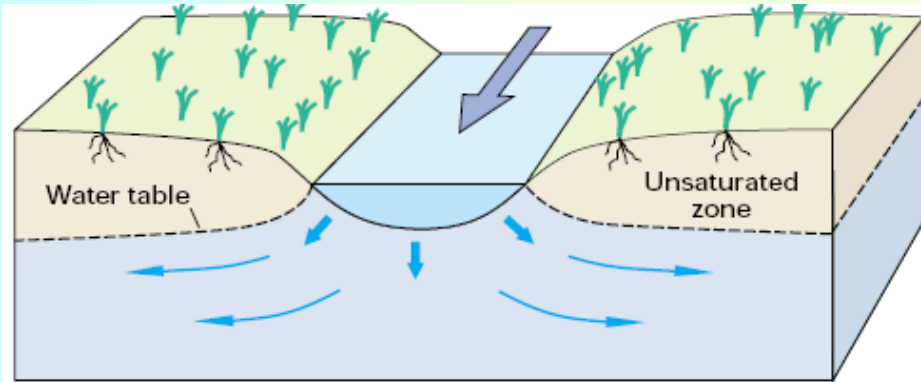


- GW-SW interaction is important to understand wetland processes, from water budgets to chemical transport to aquatic habitats and ecohydrology.
- The proportion of surface and groundwater inputs, and a wetland's interaction with groundwater are governed by
  - its position within the GW flow system,
  - the hydrogeologic characteristics of soil and rock material, and
  - their climatic setting

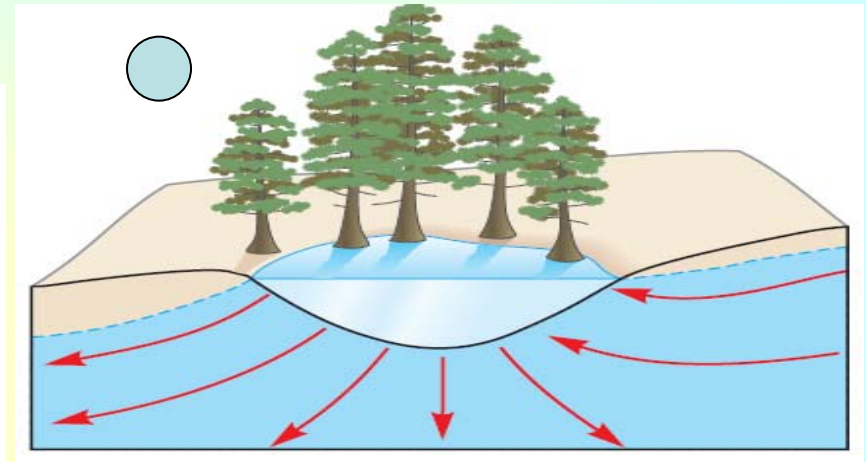


# Classification of flow regimes in wetlands

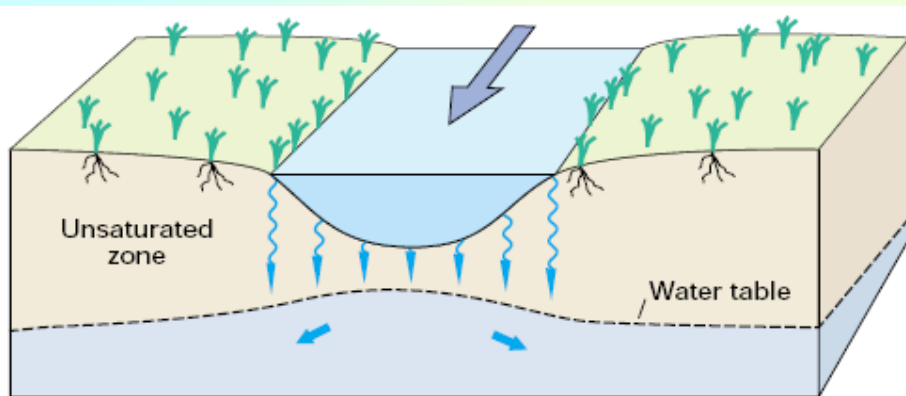
(A) Connected losing wetland



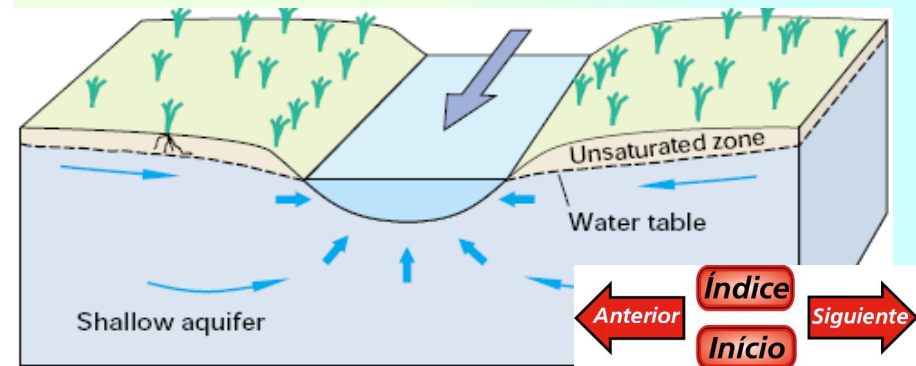
(C) Flow-through wetland



(B) Disconnected losing wetland



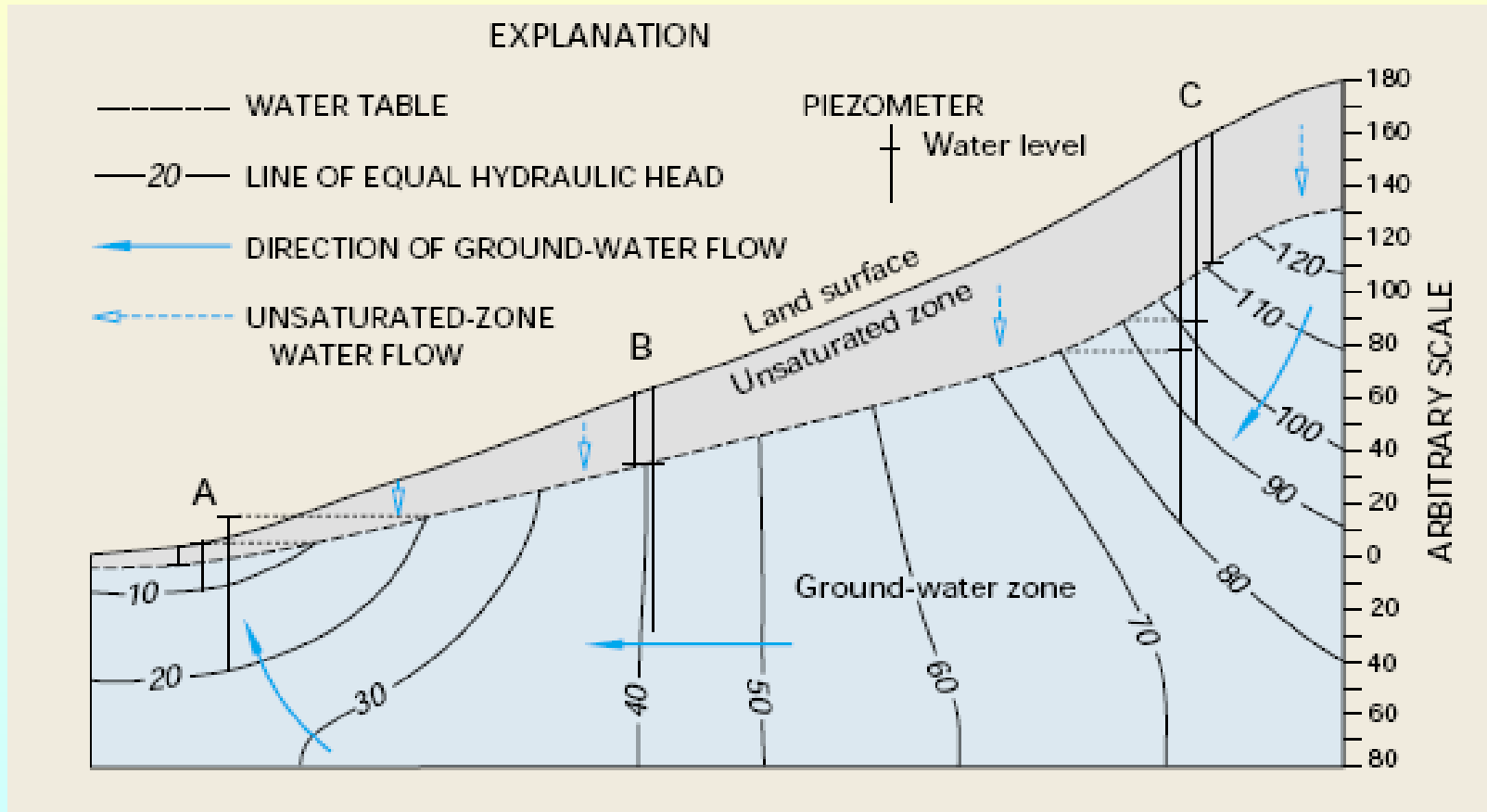
(D) Gaining wetland



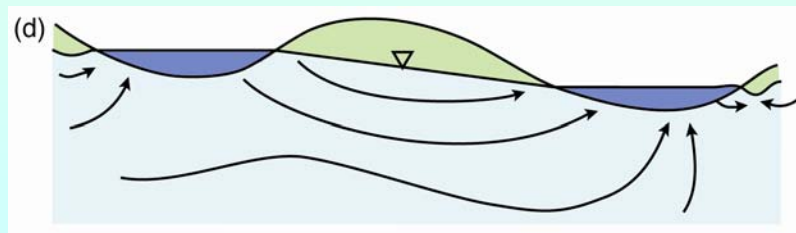
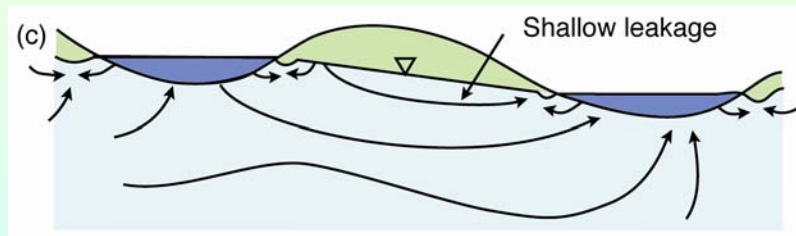
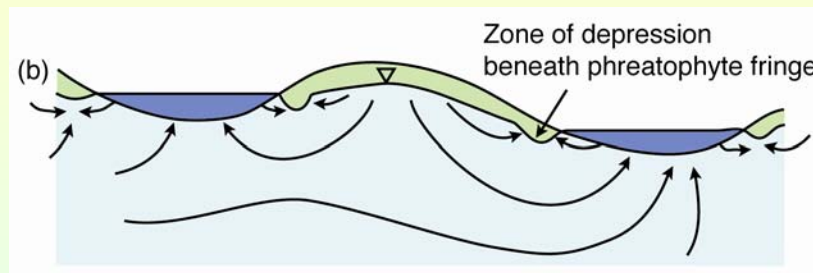
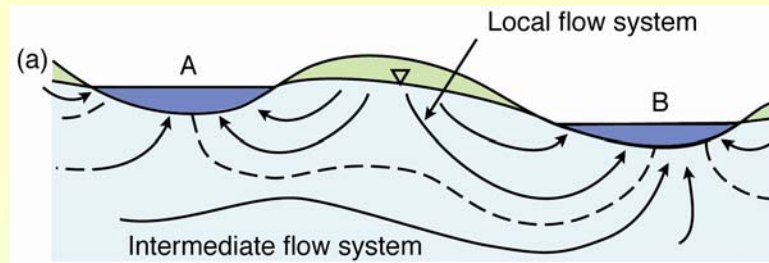
# Key field studies in the North American prairies



# Piezometer nests A, B, and C



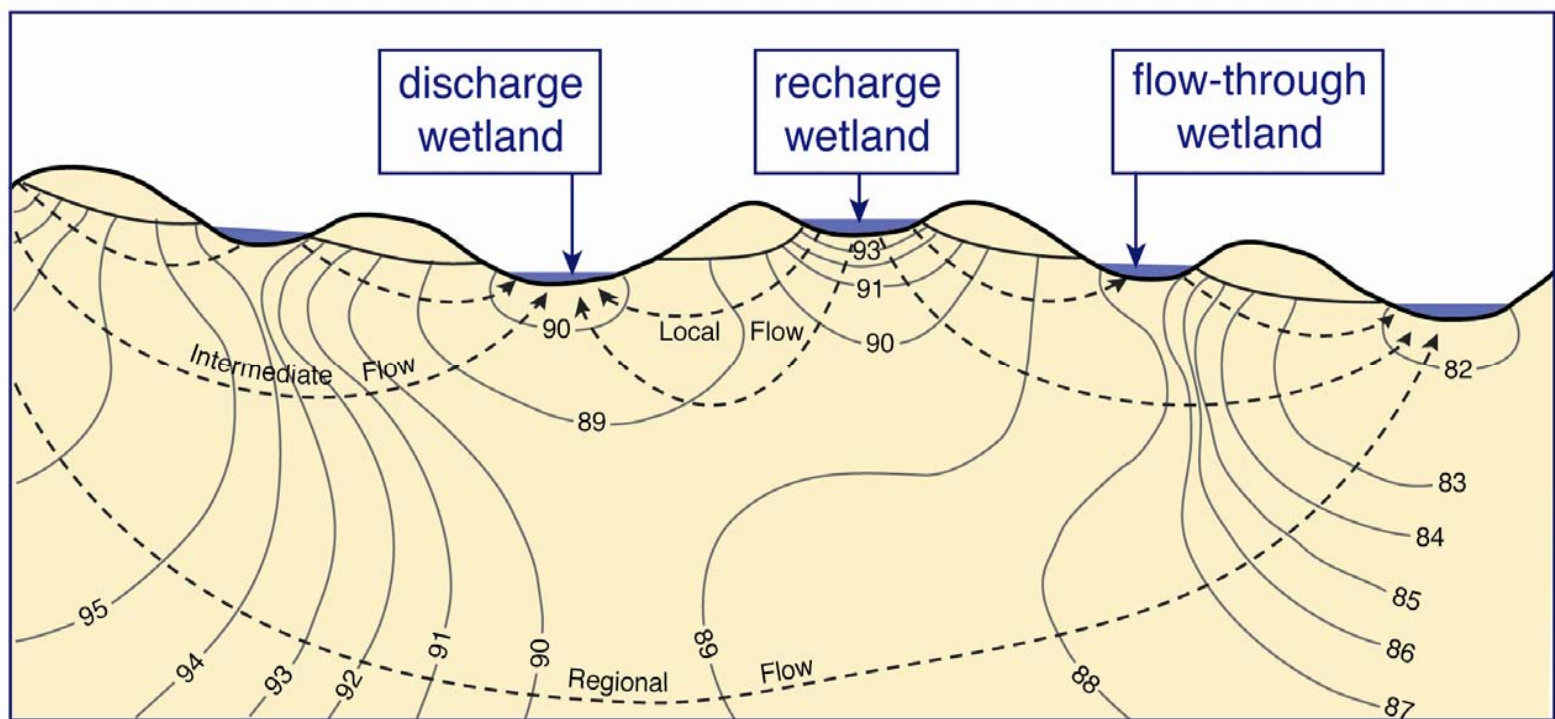
# Meyboom (1966, 1967)



→ Direction of groundwater movement    ▽ Water table  
 . . . . . Boundary between flow systems of different magnitude



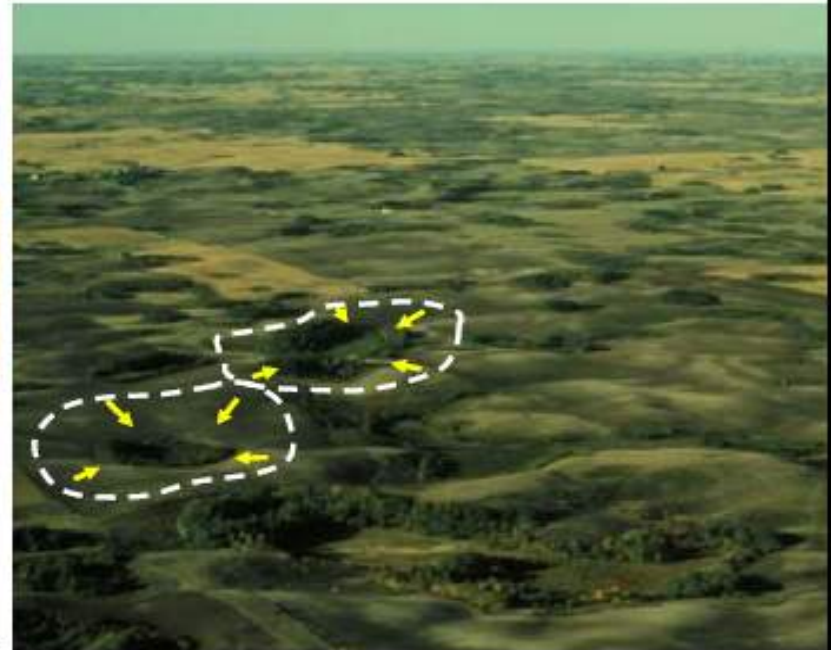
# Lissey (1971): depression-focused flow systems



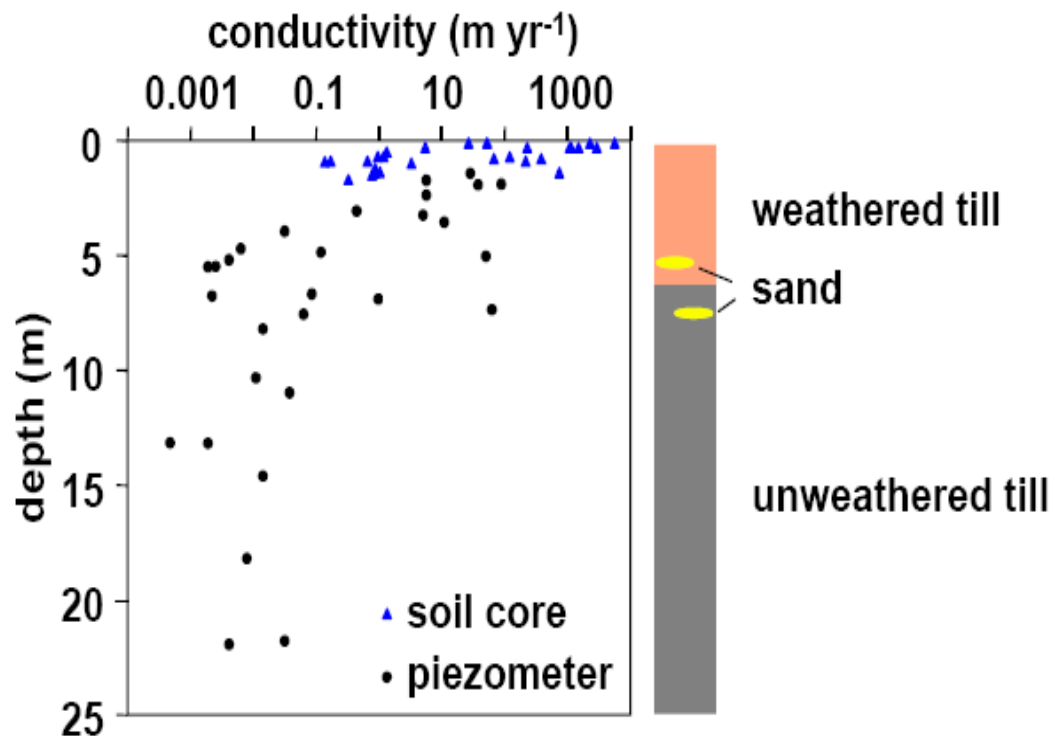
## Glaciated Landscape of Northern Prairies

Clay-rich glacial tills are relatively impermeable.

Numerous hydrologically closed depressions trap runoff water, forming northern prairie wetlands.



## Hydraulic Conductivity of Glacial Till



Deep, long-range groundwater flow is a minor component of water balance. Shallow groundwater is important.

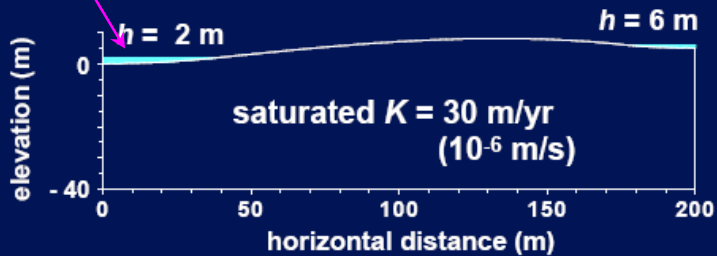
van der Kamp and Hayashi (2009. *Hydrogeology J.*, Eco-hydrology special issue

# Recharge-discharge wetland complex --Effects of low K at depth

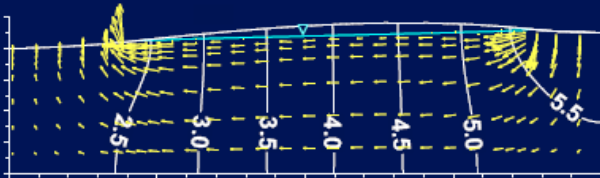
Discharge wetland

## Steady-state flow simulation

Variably saturated 2-D finite-element flow model  
van Genuchten eqn. for unsaturated parameters



Avg.  $q = 800 \text{ mm/yr}$

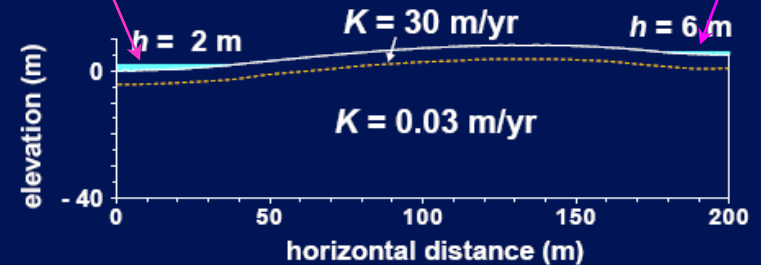


Discharge wetland

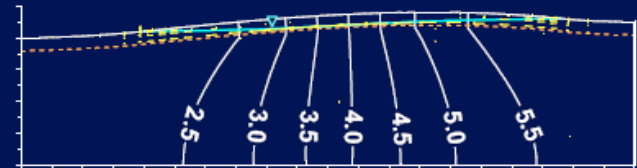
Recharge wetland

## Steady-state flow simulation

Saturated  $K$  decreases with depth



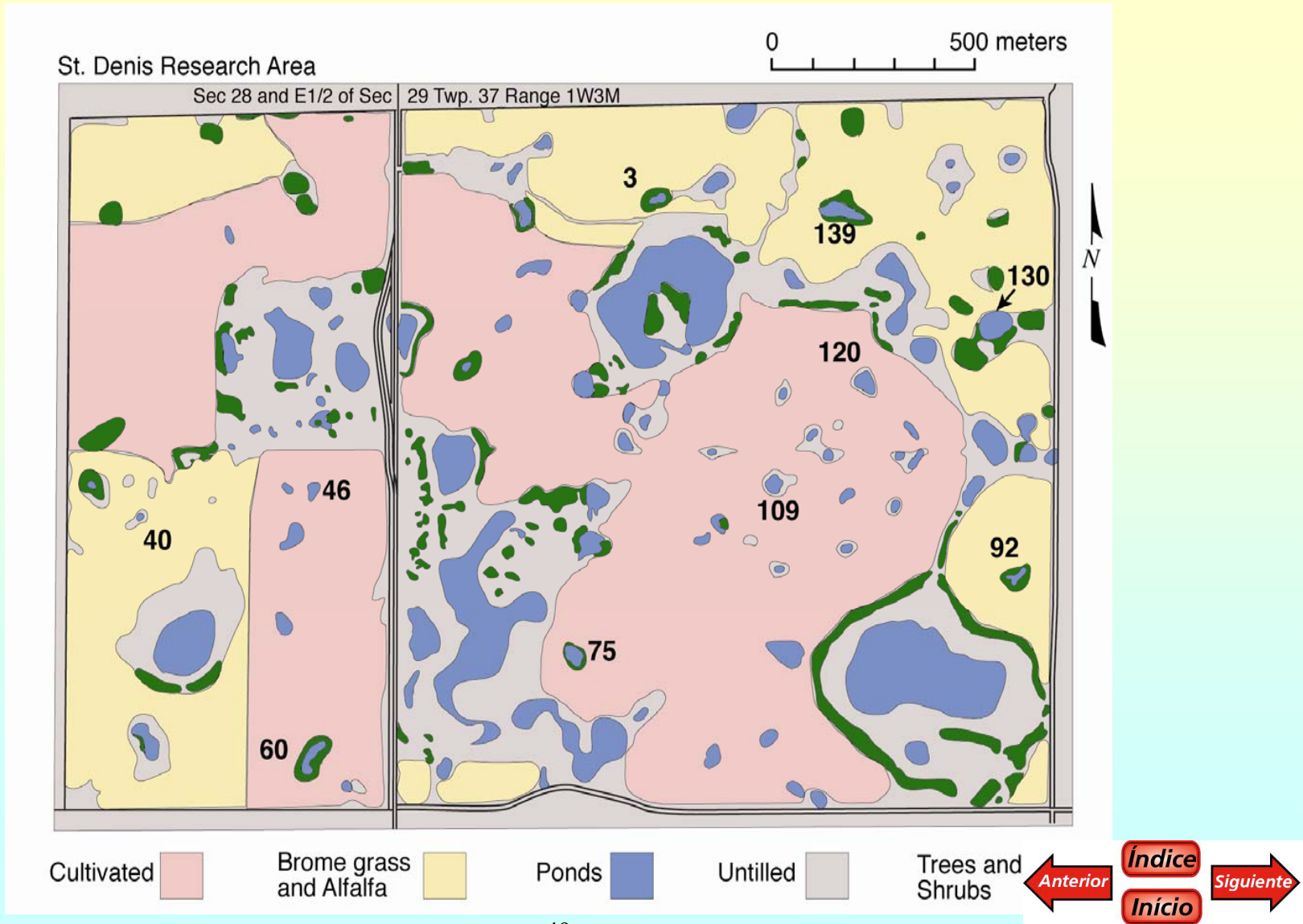
Avg.  $q = 30 \text{ mm/yr}$



(van der Kamp & Hayashi, 2009)

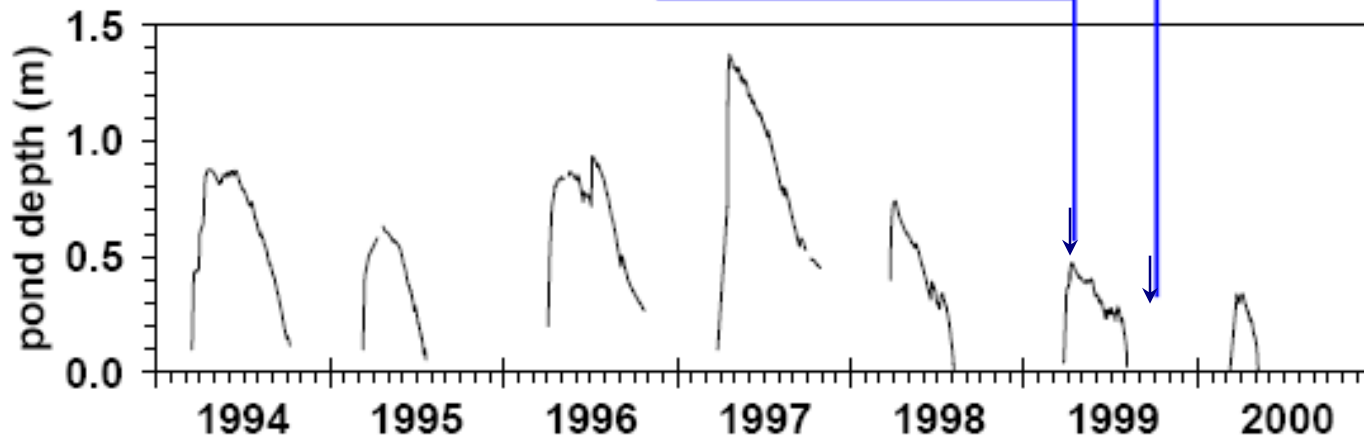


# Effects of upland vegetation and land use changes

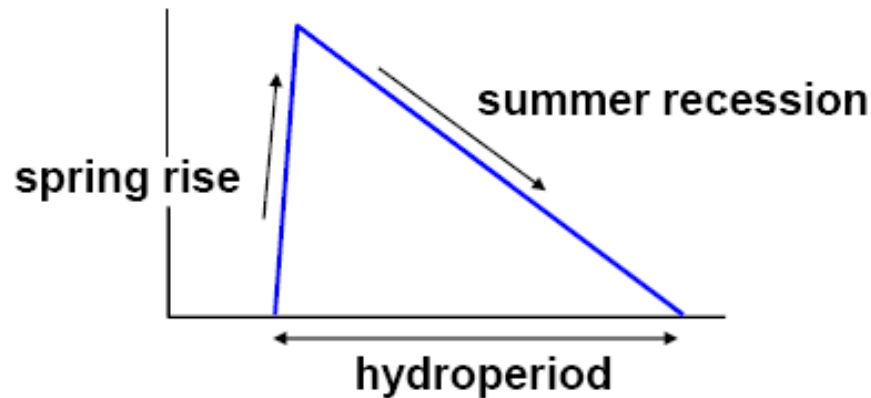
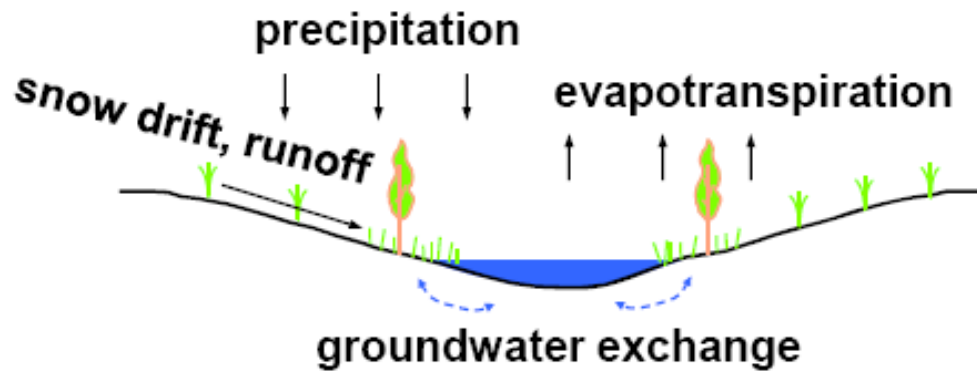




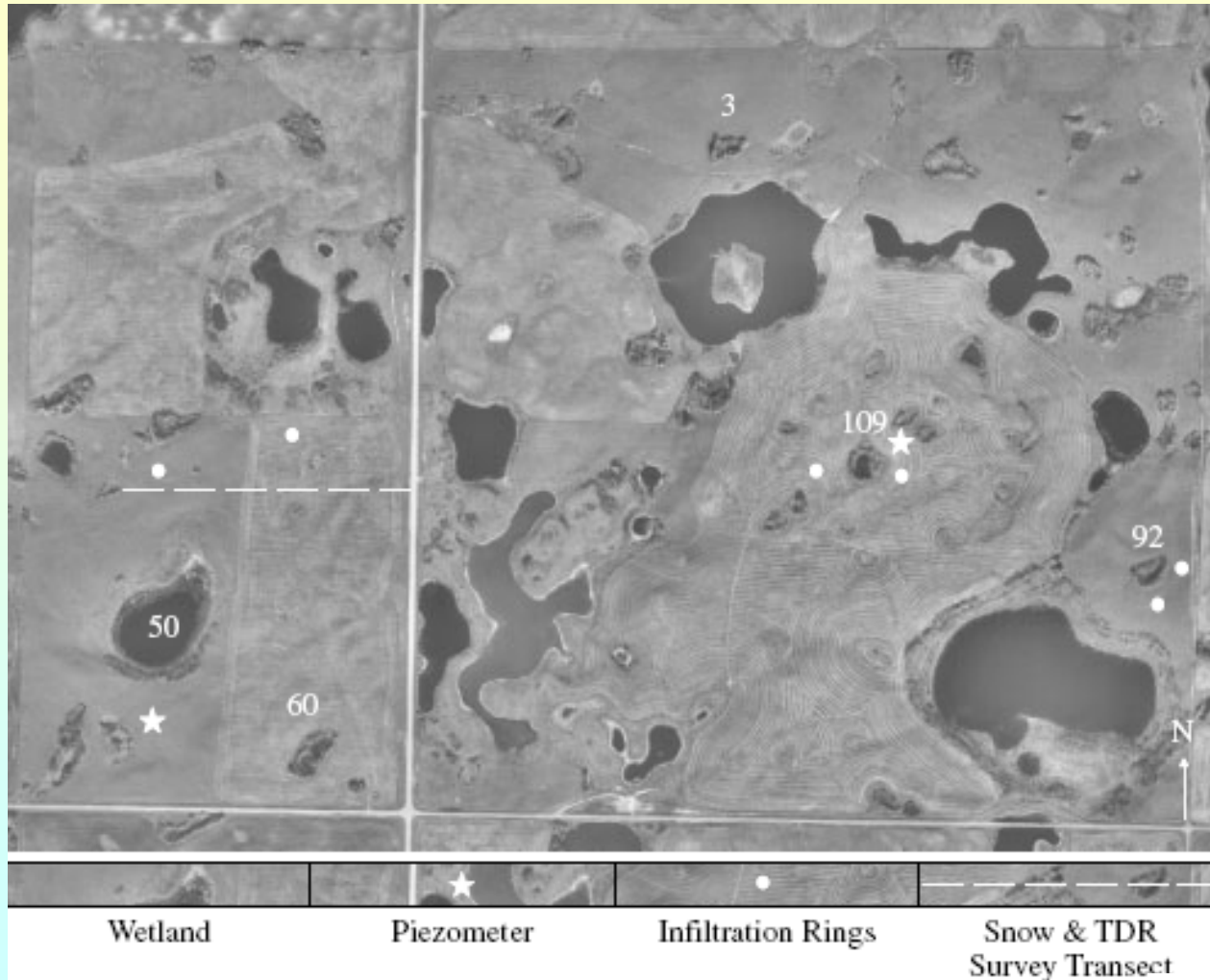
## Strong Seasonality of Pond Water Level



# Water Balance of Seasonal Prairie Wetlands

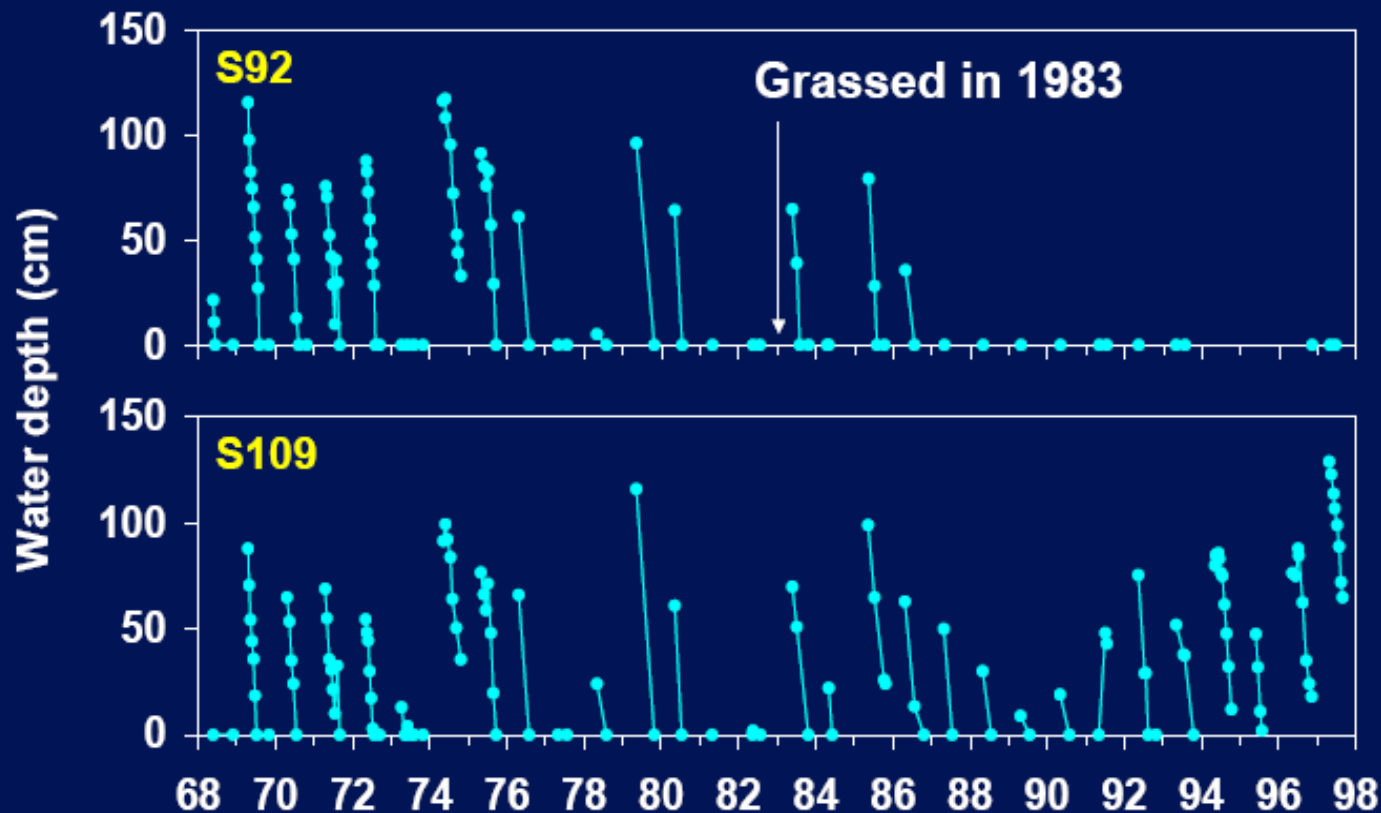


# Northern prairie wetlands aerial photo



# Effects of Dense Nesting Cover

van der Kamp et al. (2003, Hydrol. Process., 270: 214-229)

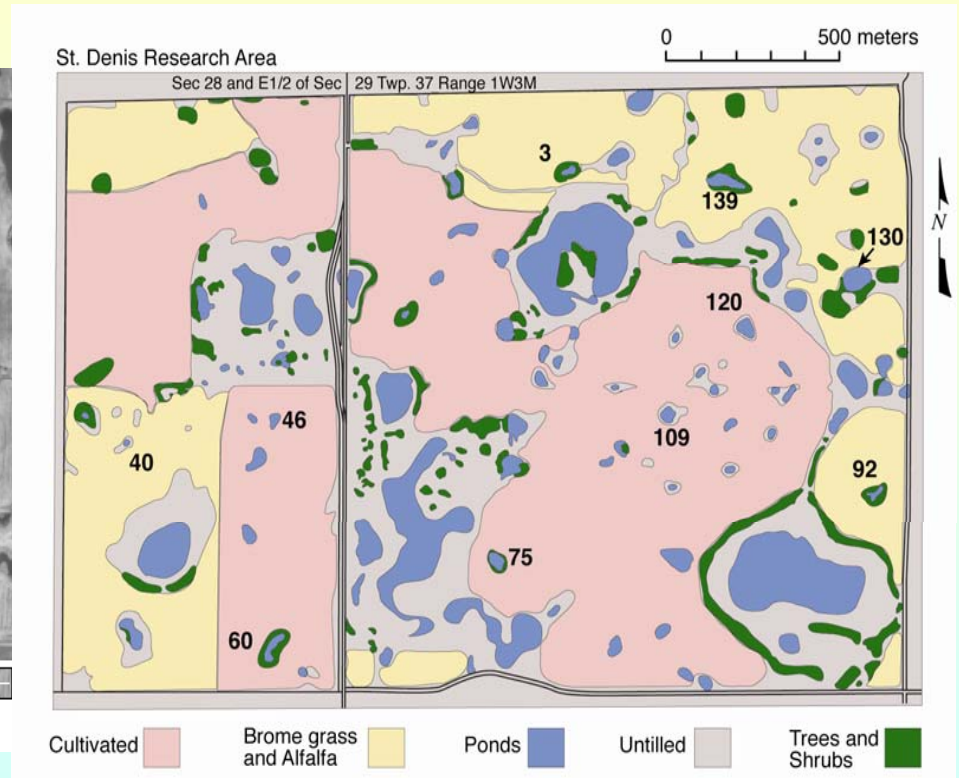
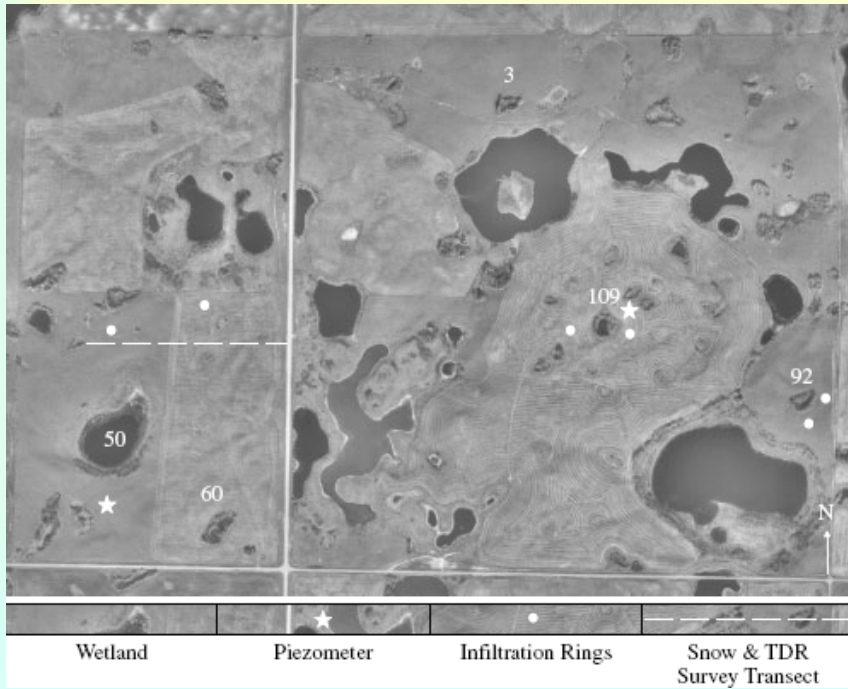


# *Bromus inermis* nesting cover

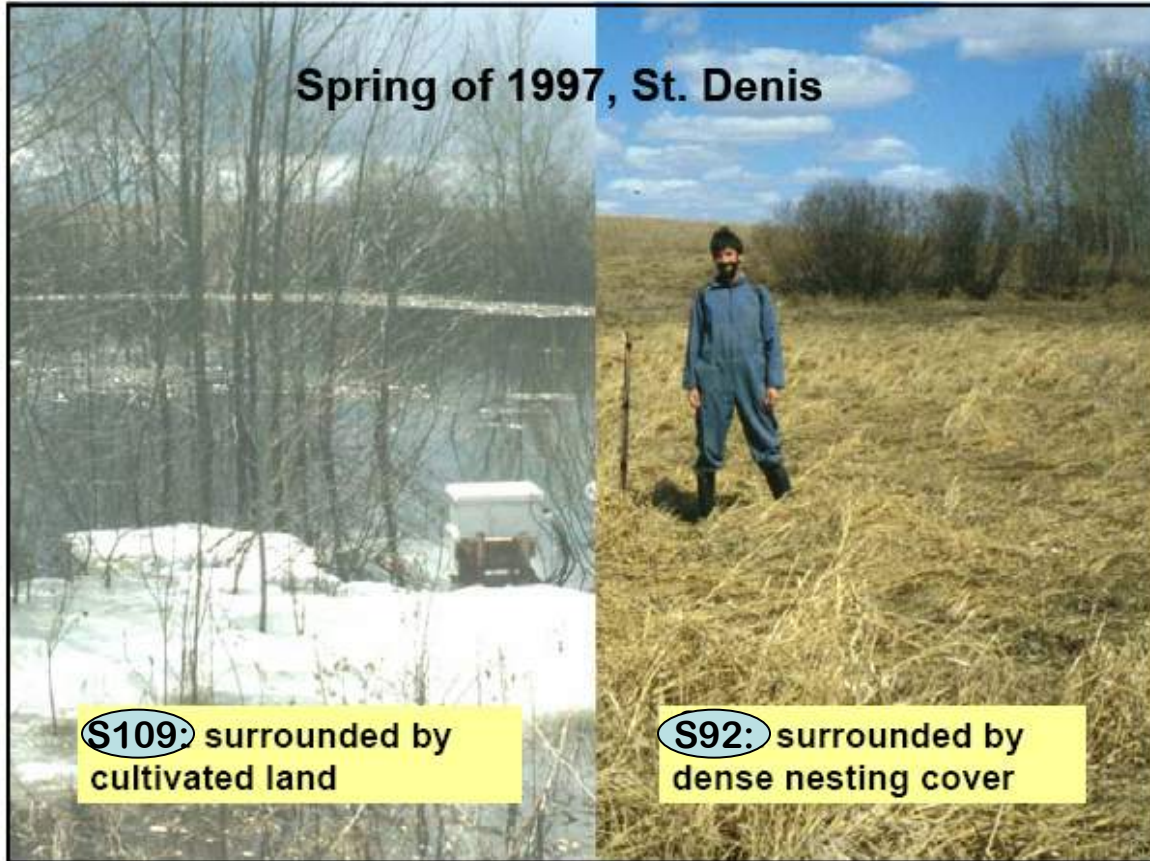




# Land use/vegetation cover



Spring of 1997, St. Denis

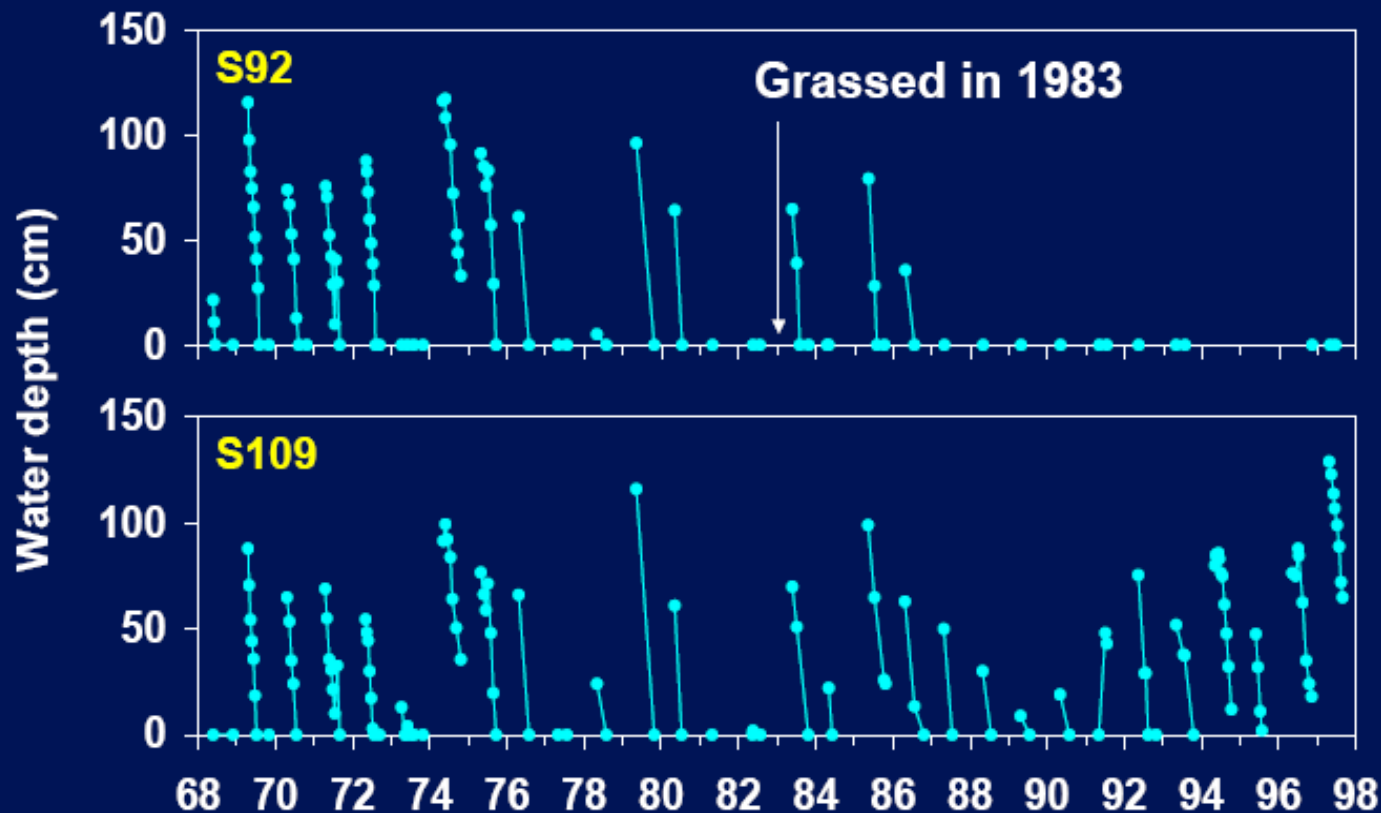


**S109:** surrounded by cultivated land

**S92:** surrounded by dense nesting cover

# Effects of Dense Nesting Cover

van der Kamp et al. (2003, Hydrol. Process., 270: 214-229)



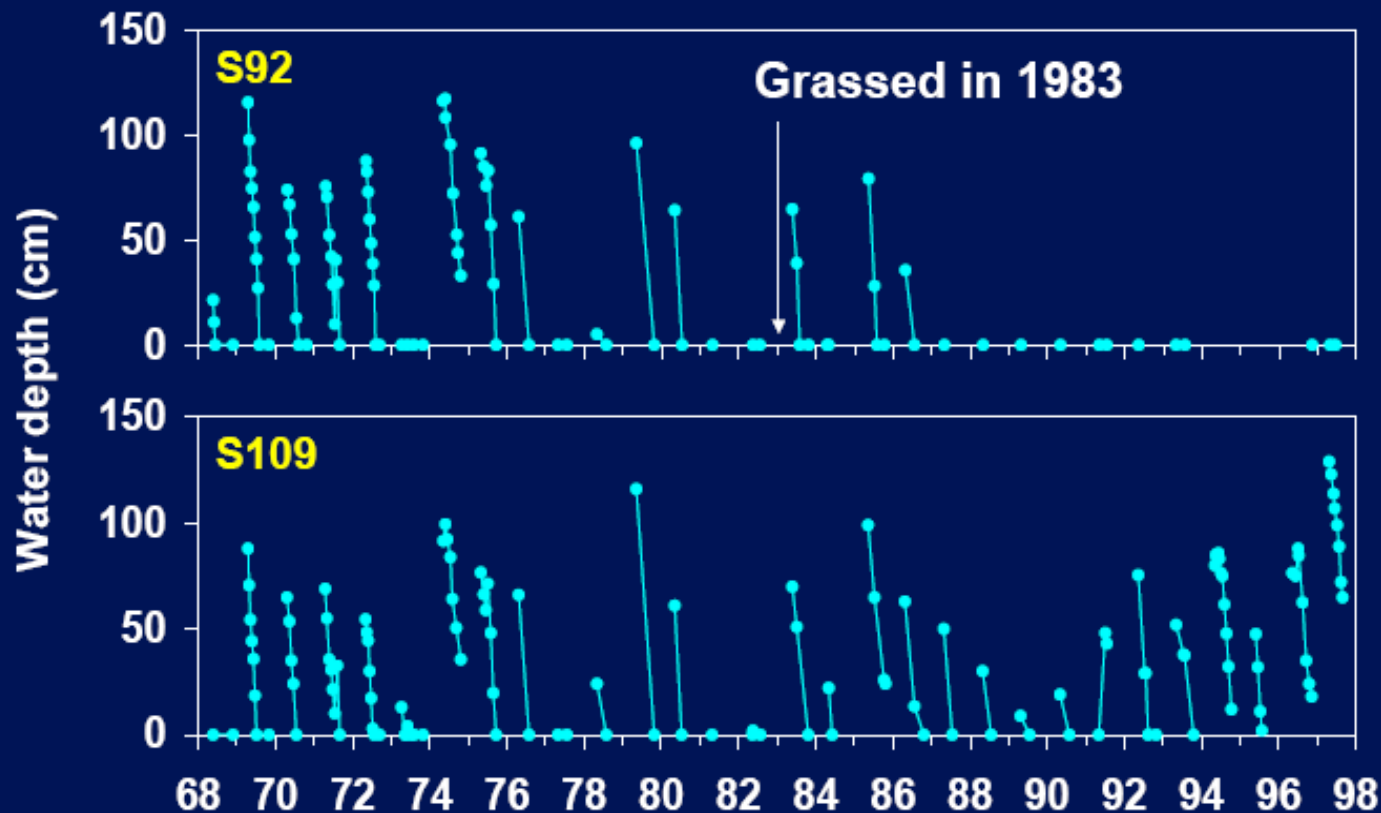
# Factors leading to shifts in wetland water regime in the northern prairies

- (1) tall permanent grass cover is effective in trapping snow so that the wind-driven transport of snow into wetlands is reduced
- (2) the undisturbed grass cover leads to the development of a macropore network in the topsoil, which markedly increases the infiltrability of the soil, even when it is frozen



# Effects of Dense Nesting Cover

van der Kamp et al. (2003, Hydrol. Process., 270: 214-229)





# Conclusions (1)

- Streams, lakes, and wetlands are integral parts of GW flow systems
- Fluxes of water and chemicals from and to GW reflect the positions of surface-water bodies with respect to
  - (1) different-scale GW flow systems;
  - (2) local geologic controls on seepage distribution through their beds; and
  - (3) the magnitude of transpiration directly from GW around their perimeters
- Understanding the relative importance of all these factors for a given water body is needed for effective management of the integrated water resource



# Conclusions (2)

- Intimate link between lakes and ponds and their catchments
- Disturbance in the catchment, such as major land-use change, can cause a dramatic change in hydrological processes
- Climate changes also have major effects on water levels



# Conclusions (3)

- The rapid decrease with depth of the hydraulic conductivity of clay-rich glacial till in the northern prairie wetlands is the essential factor controlling GW-wetland interaction
- Lateral flow of shallow GW between wetland ponds and the riparian zone plays a major role in the water balance and solute cycles of prairie wetlands (as shown by van der Kamp and Hayashi, 2009)
- GW flow in the deeper low-conductivity till has minor effects on water balance
- Understanding the roles of shallow and deep GW systems will improve the hydrological conceptual framework for the management of wetland ecosystems



# Conclusions (4)

- Ecohydrological linkage between plants and water presents opportunities for collaboration between ecologists and hydrologists
- The role of riparian vegetation in ET and GW exchange is an important but relatively poorly understood process
- Collaborative research on ecohydrology will enable us to observe hydrological processes and ecological responses simultaneously, and to develop coupled models for the prediction of ecosystem responses to land use and climate changes



# Hydrogeological assessment of wetlands in England and Wales for WFD

Mark Whiteman – Hydrogeology Technical Adviser



antes...(1985)



e ahora...(2009)



rocas

AGUA  
SUBTERRÁNEA

humedales



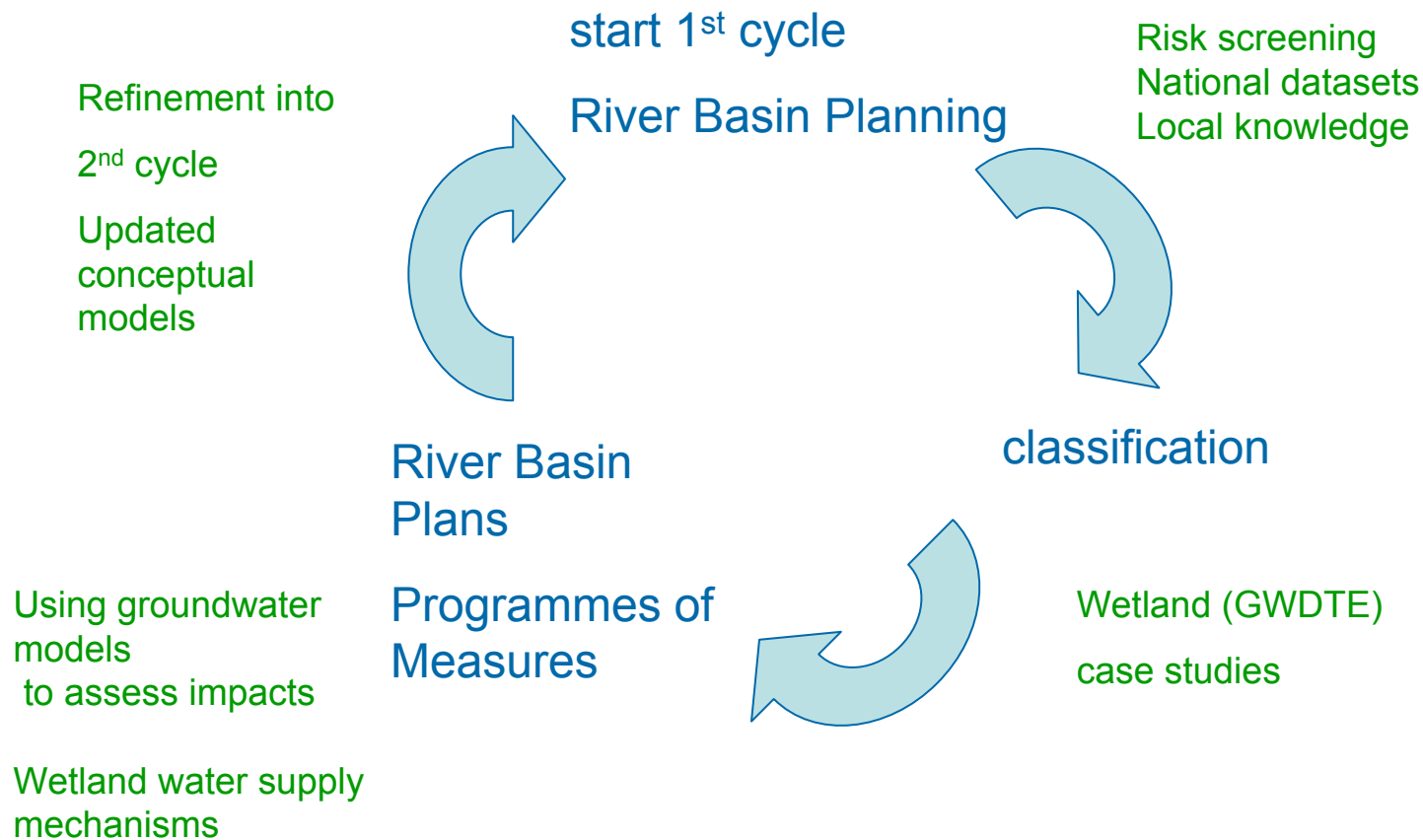
# My role



- ➔ Environment Agency – a regulator reporting to UK Government
- ➔ Competent authority for WFD, tight timescales
- ➔ I led work on the wetland test



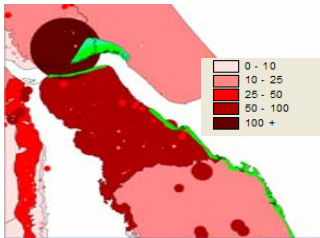
# How we assessed wetlands for WFD



# WFD groundwater tests

WFD GW Body Quantitative Characterisation tests assess the risk of:  
Unacceptable impacts on the  
GW body

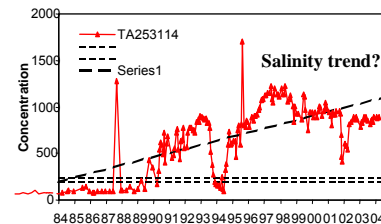
GW Body resource  
balance



# WFD groundwater tests

WFD GW Body Quantitative Characterisation tests assess the risk of:  
Unacceptable impacts on the  
GW body

Saline or other  
intrusions





# WFD groundwater tests

WFD GW Body Quantitative Characterisation tests assess the risk of:  
Unacceptable impacts on  
dependent receptors

SW body ecological  
status deterioration



# WFD groundwater tests

WFD GW Body Quantitative Characterisation tests assess the risk of:  
Unacceptable impacts on  
dependent receptors

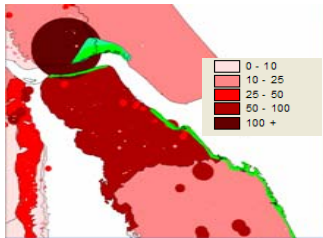
GWDTE (wetland)  
significant damage



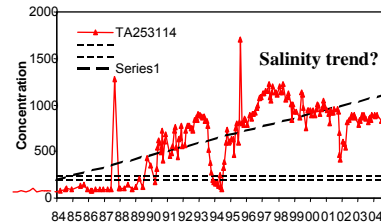
# WFD groundwater tests

WFD GW Body Quantitative Characterisation tests assess the risk of:  
 Unacceptable impacts on the GW body  
 Unacceptable impacts on dependent receptors

GW Body resource balance



Saline or other intrusions



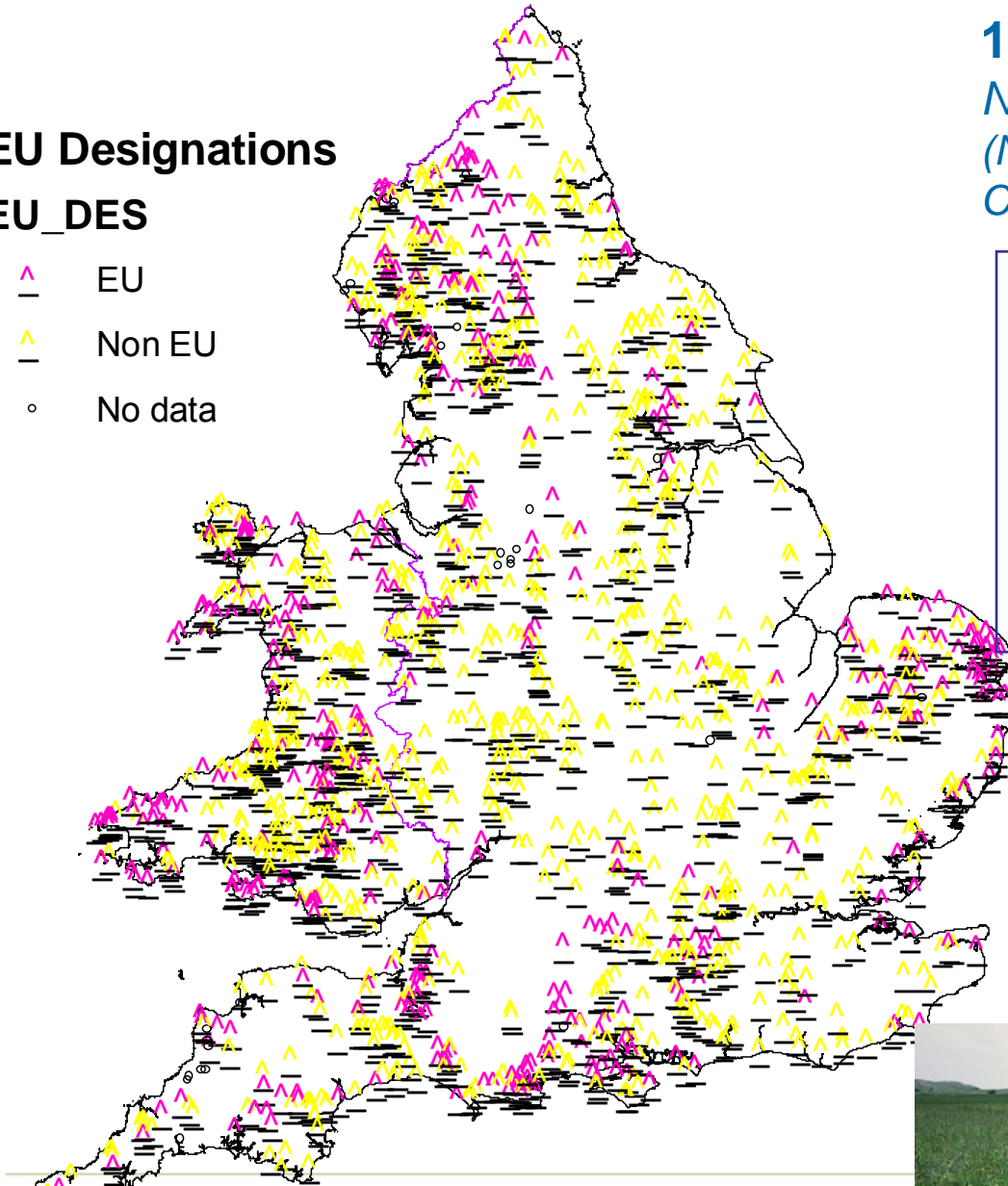
SW body ecological status deterioration  
 GWDTE (wetland) significant damage



## EU Designations

### EU\_DES

- ▲ EU
- ▲ Non EU
- No data



**1,386 sites**

*National conservation bodies  
(Natural England  
Countryside Council for Wales)*

**Aim: assess every  
GWDTE for risk of  
significant ecological  
damage caused by  
groundwater pressures**

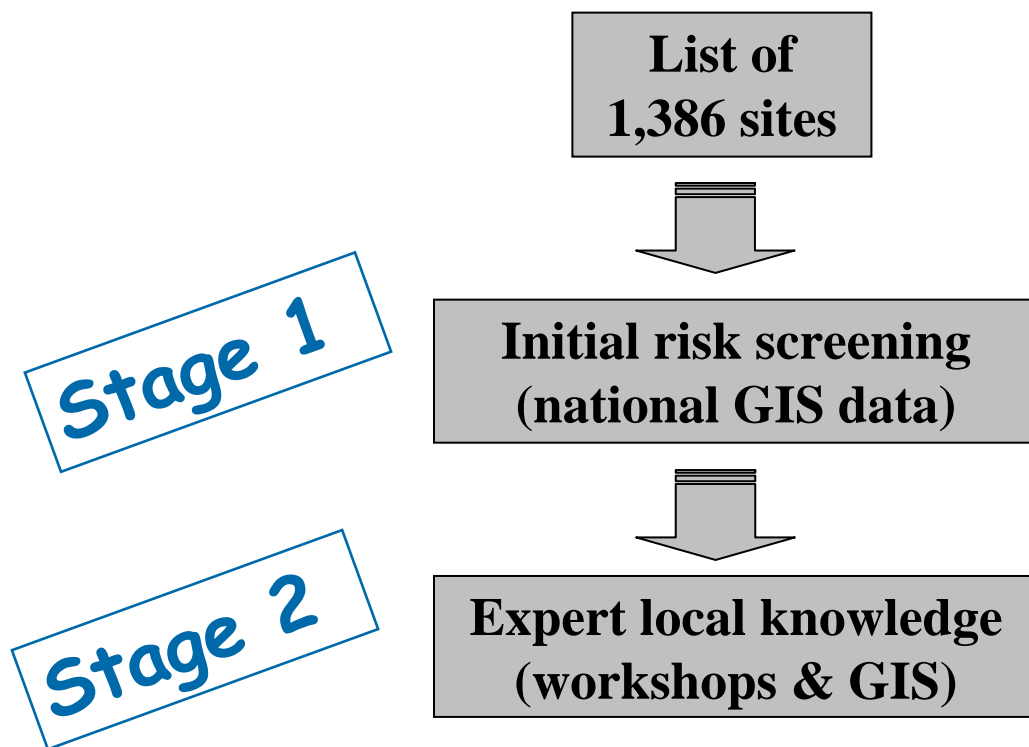


Wet Heath



Wet Dune Slacks

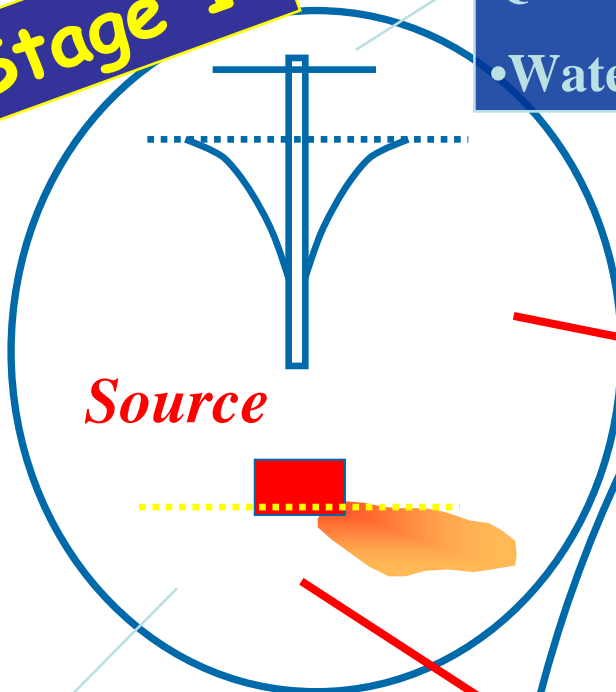
# Screening for Risk: Overview of approach



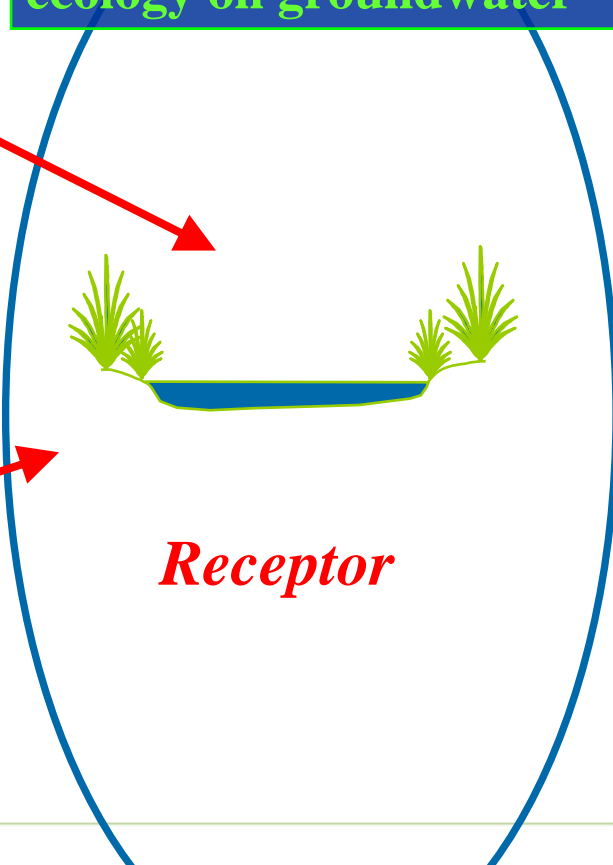


# Stage 1

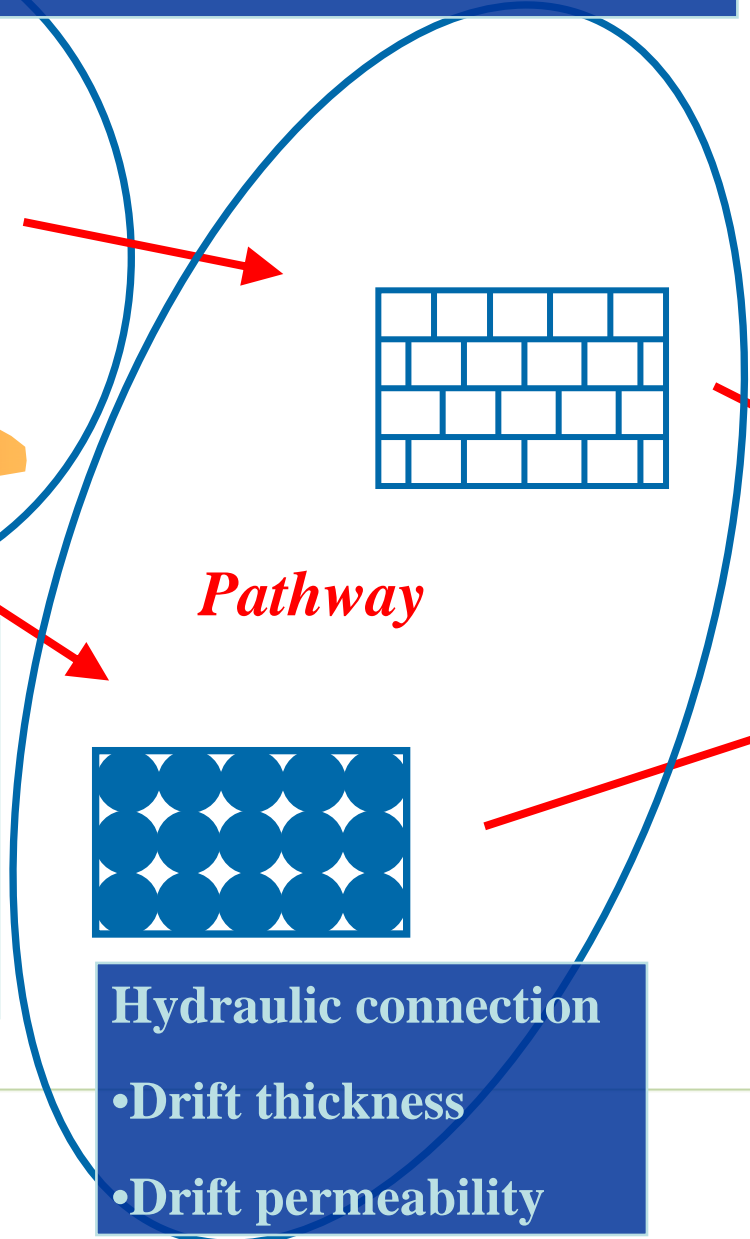
**Quantitative pressure**  
• Water abstraction



**Degree of dependence of ecology on groundwater**



**Chemical pressure**  
• Phosphate in groundwater  
• Sensitivity to nutrients



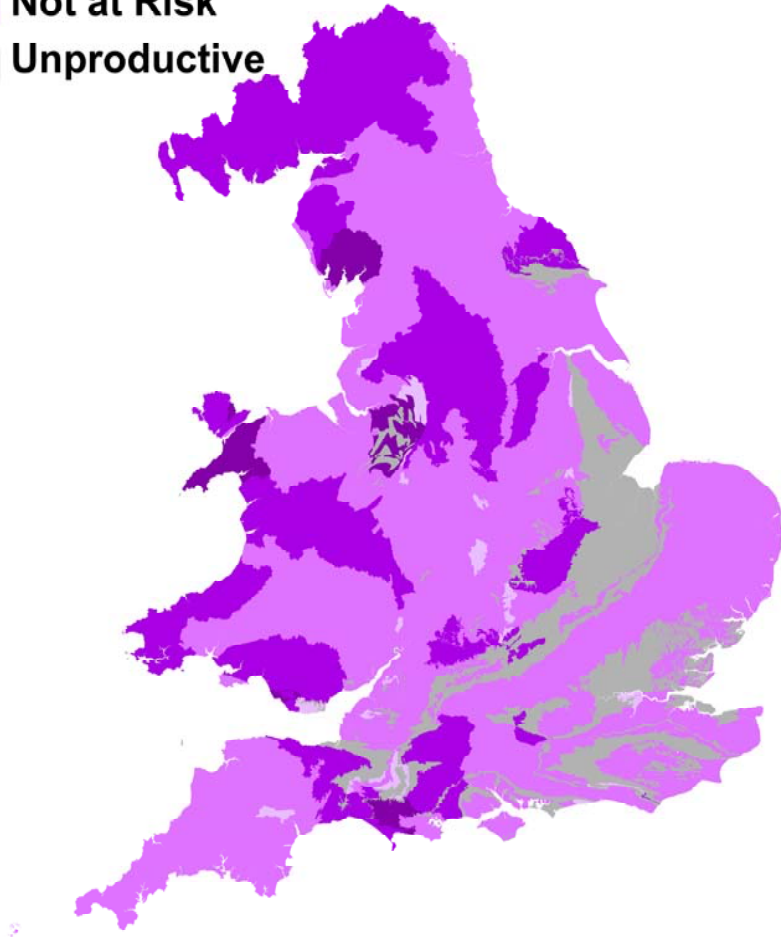
**Hydraulic connection**  
• Drift thickness  
• Drift permeability

# Results of screening wetlands for risk

## GWDTEs - Chemical Risk

GWBodies+\_ClassificationGWDE\_Quant&Chem\_Status&Risk  
C\_RISK

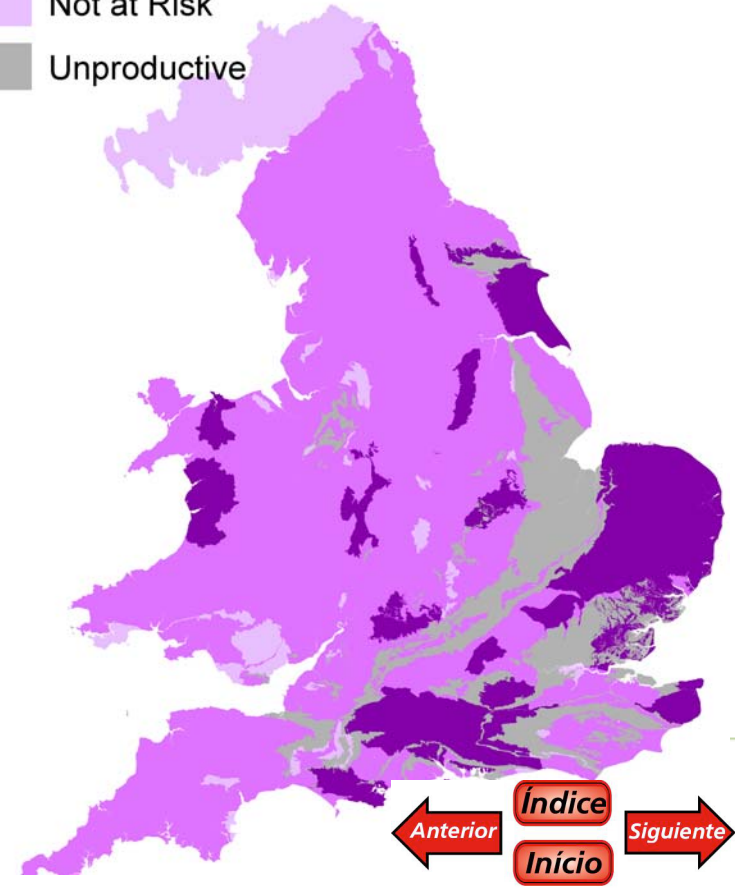
- At risk
- Probably at Risk
- Probably Not at Risk
- Not at Risk
- Unproductive



## GWDTEs - Quantitative Risk

GWBodies+\_ClassificationGWDE\_Quant&Chem\_Status&Risk  
Q\_RISK

- At risk
- Probably at Risk
- Probably Not at Risk
- Not at Risk
- Unproductive



# Classification

- Translating potential risk into actual damage
- Classified each groundwater body in England and Wales at either good or poor status according to whether GWDTEs are significantly damaged.
- Evidence of actual ecological damage



# Classification process

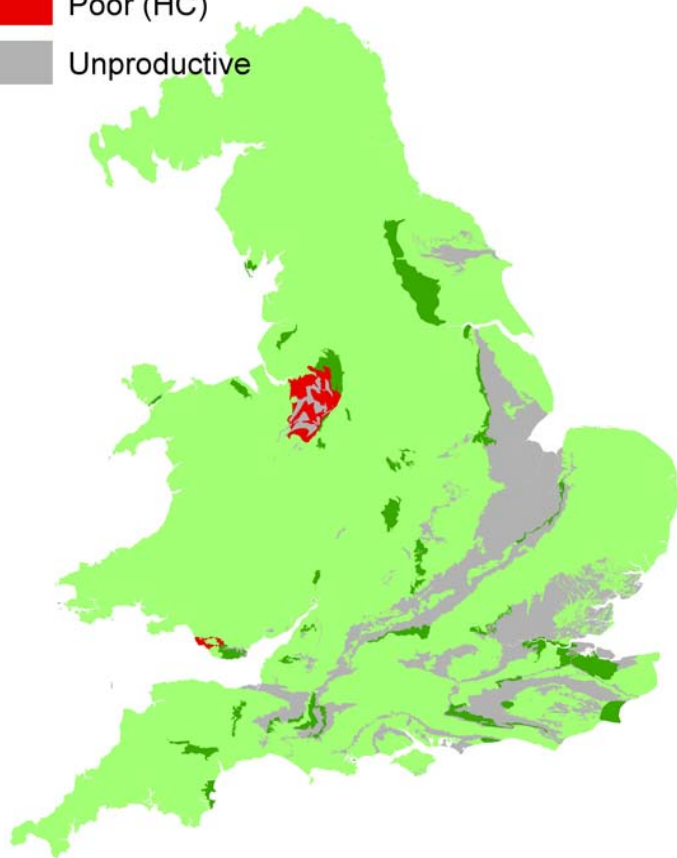
- ➔ Is a chemical threshold exceeded?
- ➔ What are the required environmental supporting conditions?
  - Are the required conditions in place?
- ➔ If not, is groundwater the cause?
  - Is the wetland significantly damaged?
  - Do we have the evidence?

# Classification results – wetland test

## GWDTE test - Chemical Status

GWBodies\_+\_ClassificationGWDTE\_Quant&Chem\_Status&Risk

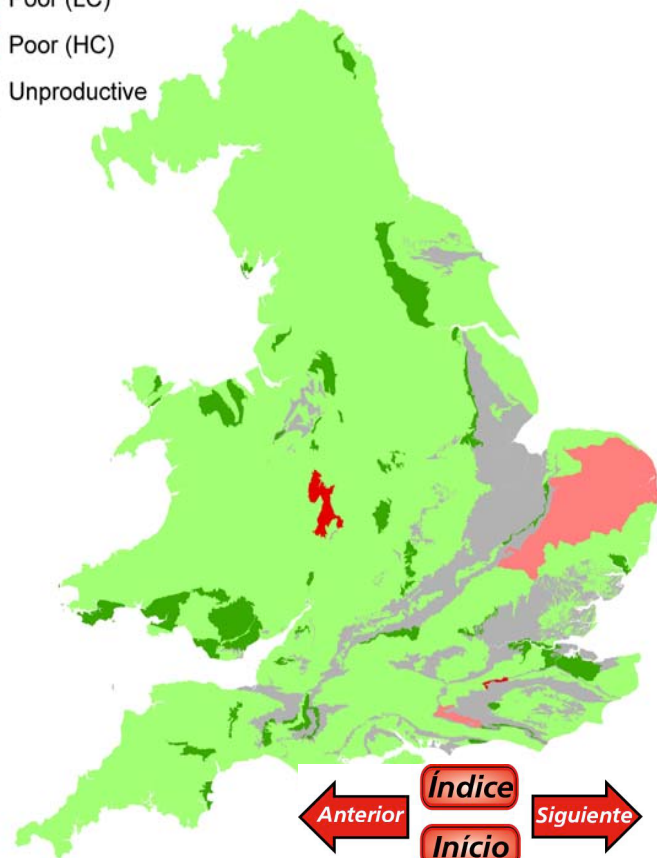
C\_STATUS



## GWDTE Test Quantitative Status

GWBodies\_+\_ClassificationGWDTE\_Quant&Chem\_Status&Risk

Q\_STATUS





# Further investigations



# Further investigations

Reason for high risk?

Site unfavourable

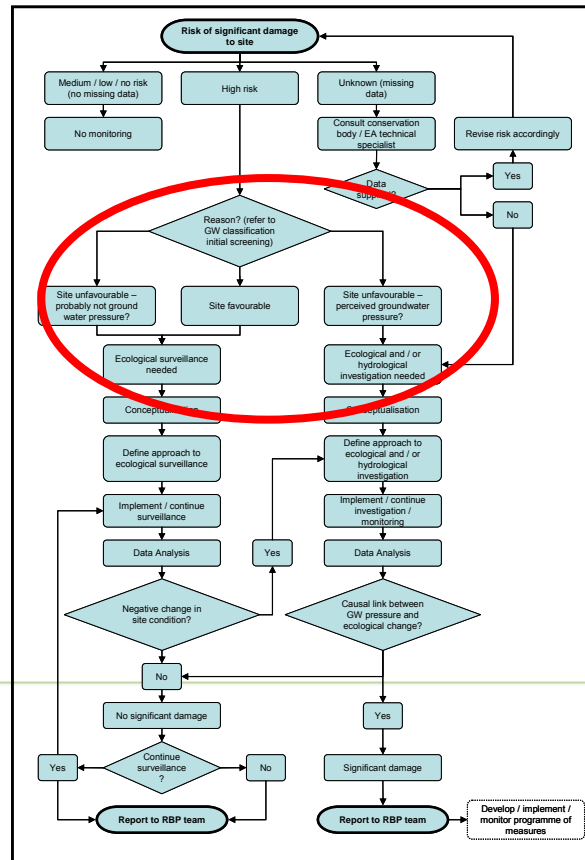
Site favourable

Site unfavourable –  
groundwater

Not groundwater

Ecological and/or  
hydrological  
investigation  
needed

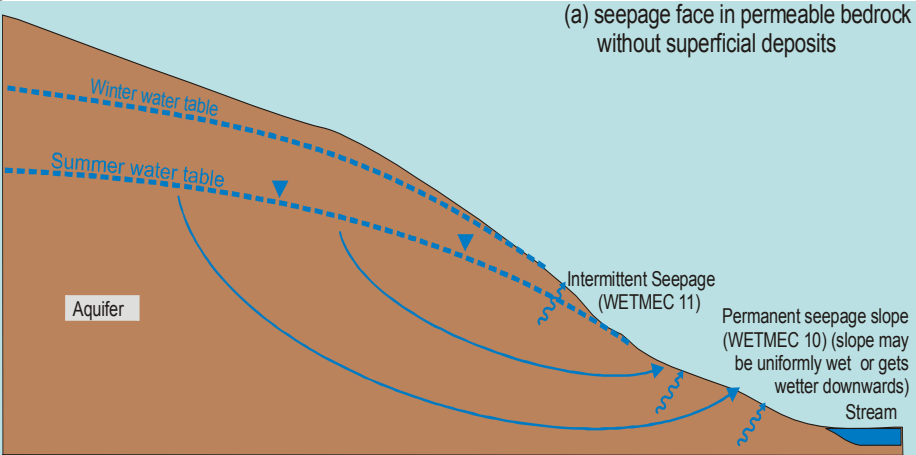
Ecological  
surveillance  
needed



# Importance of conceptual models

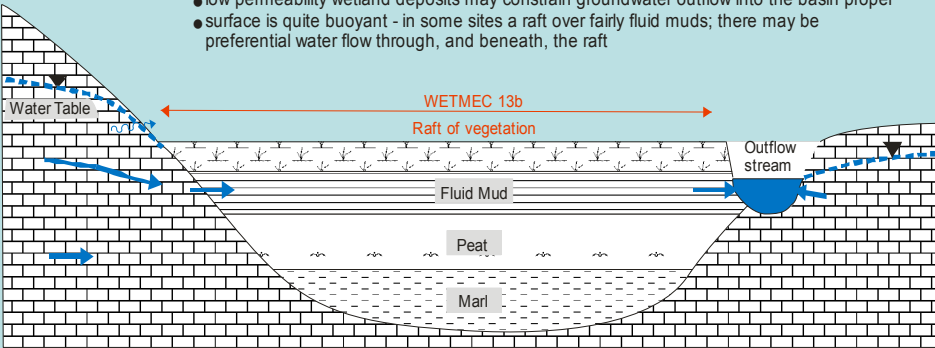
## Fens and Mires

(a) seepage face in permeable bedrock without superficial deposits



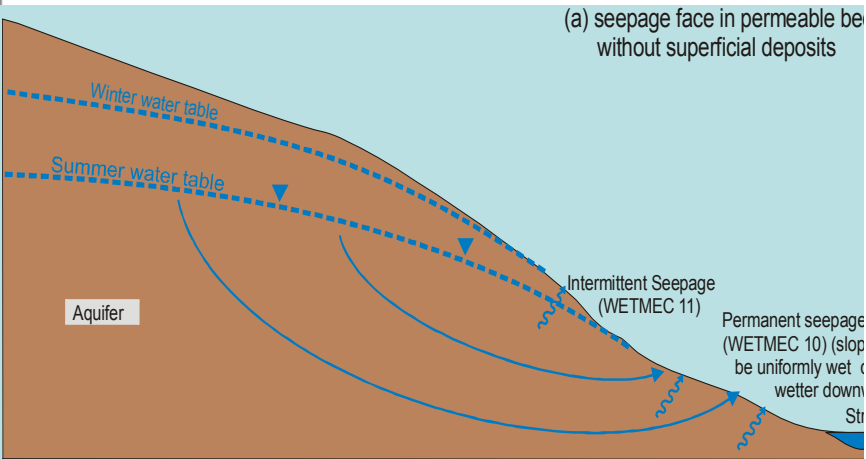
WETMEC 13b: Seepage Percolation Quag (e.g. Cors Goch)

- basin is fed by groundwater outflow around margins of depression
- low permeability wetland deposits may constrain groundwater outflow into the basin proper
- surface is quite buoyant - in some sites a raft over fairly fluid muds; there may be preferential water flow through, and beneath, the raft

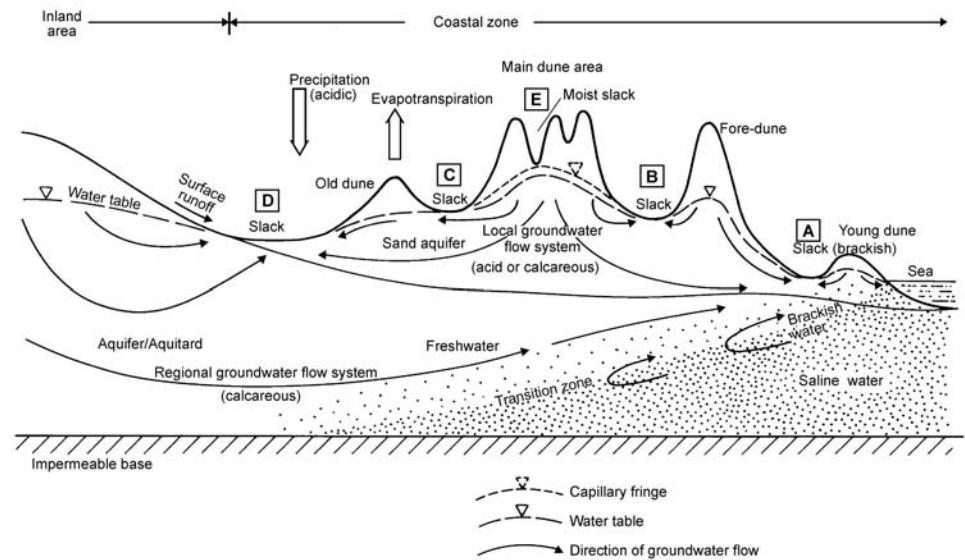


# Importance of conceptual models

## Fens and Mires

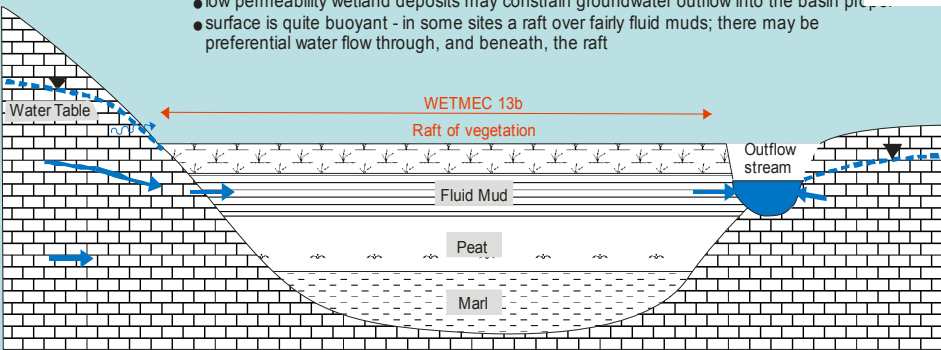


## Wet Dune Slacks



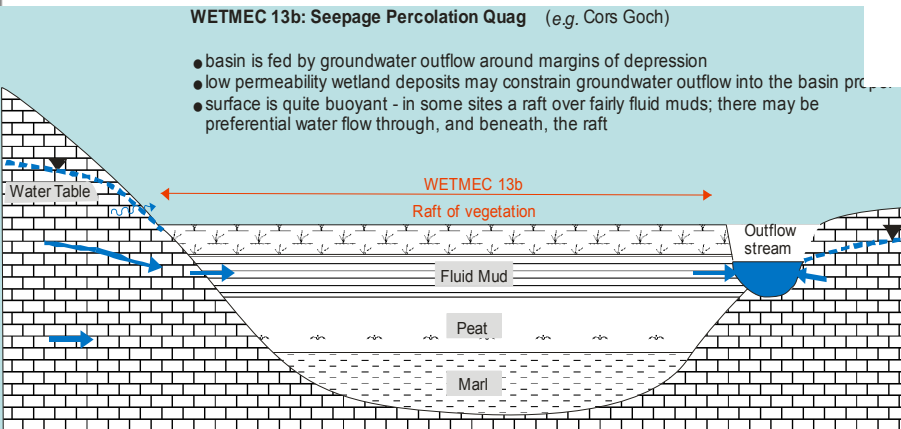
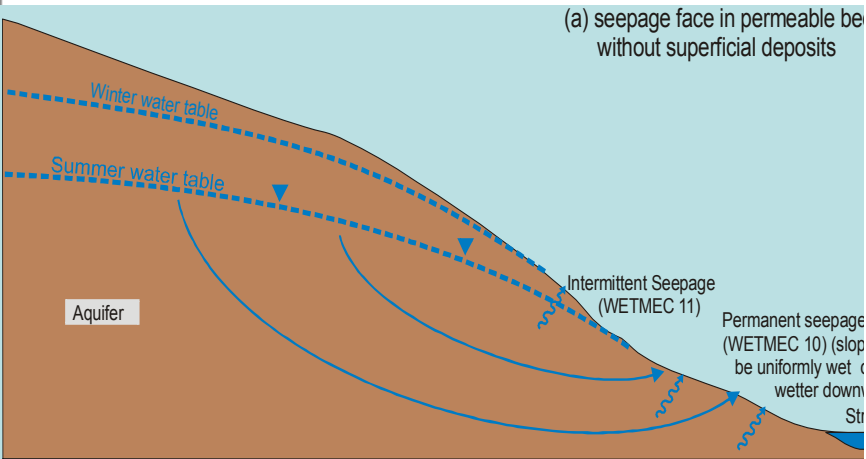
**WETMEC 13b: Seepage Percolation Quag** (e.g. Cors Goch)

- basin is fed by groundwater outflow around margins of depression
- low permeability wetland deposits may constrain groundwater outflow into the basin
- surface is quite buoyant - in some sites a raft over fairly fluid muds; there may be preferential water flow through, and beneath, the raft

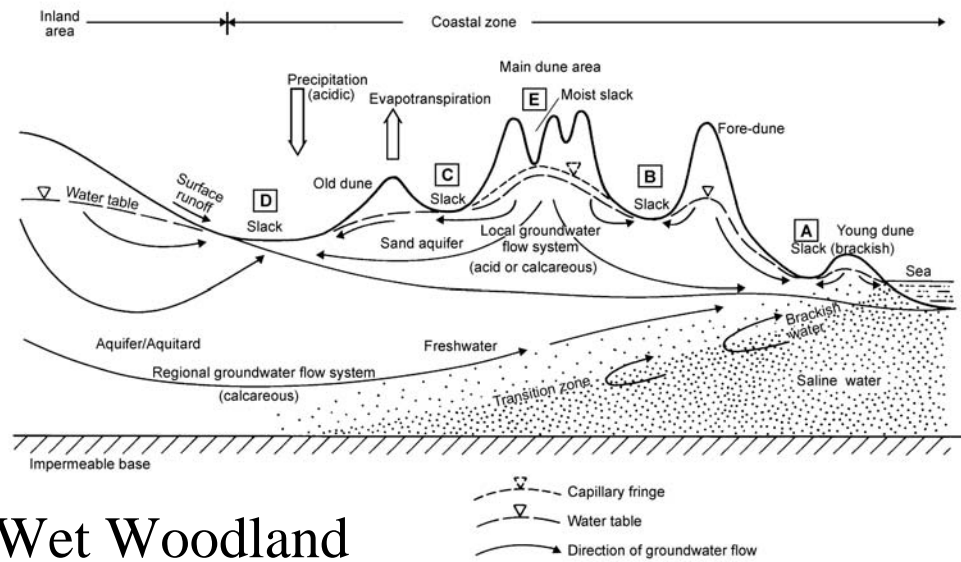


# Importance of conceptual models

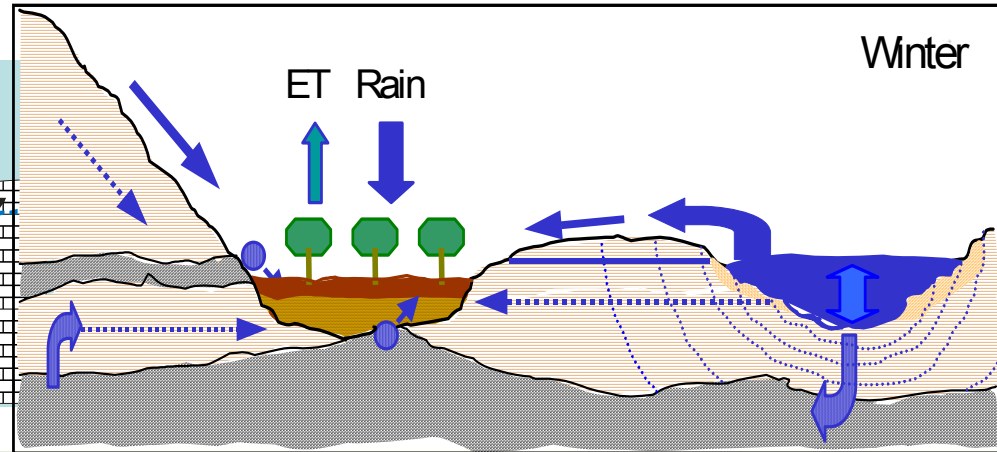
## Fens and Mires



## Wet Dune Slacks



## Wet Woodland



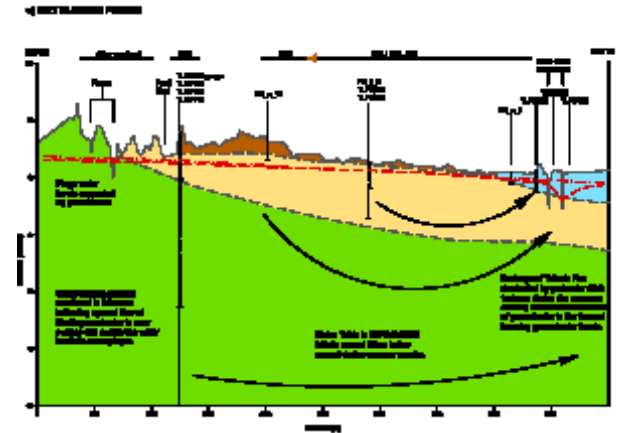


# Wetland water supply mechanisms (WETMECs)

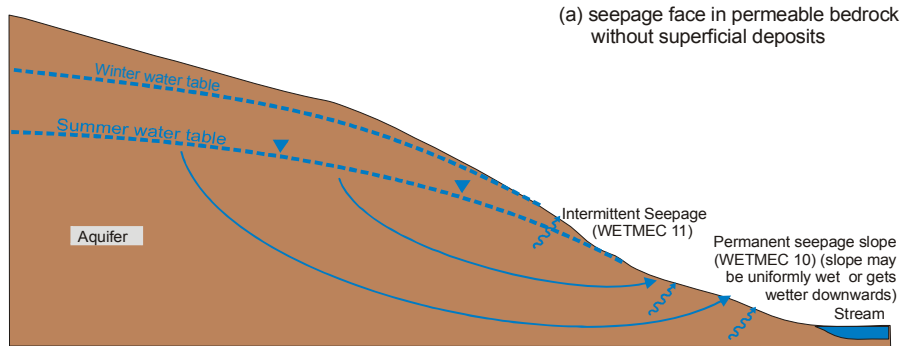
Hydrogeologists are familiar with the development of conceptual hydrogeological models for wetland sites.

WETMECs can be seen as 'add-ons' to these, which extend conceptual models to take better account of the properties of the wetland itself.

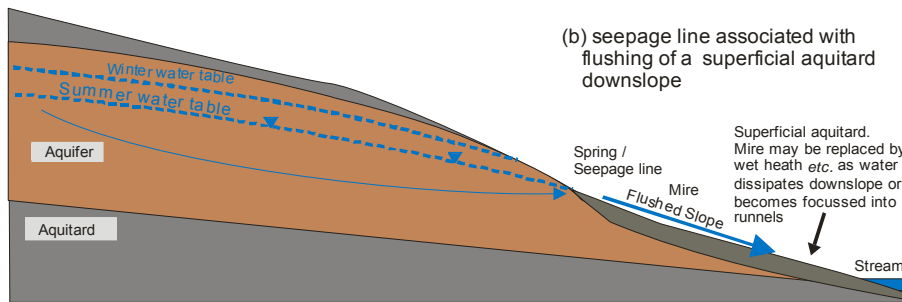
They are, however, generic, rather than site specific.



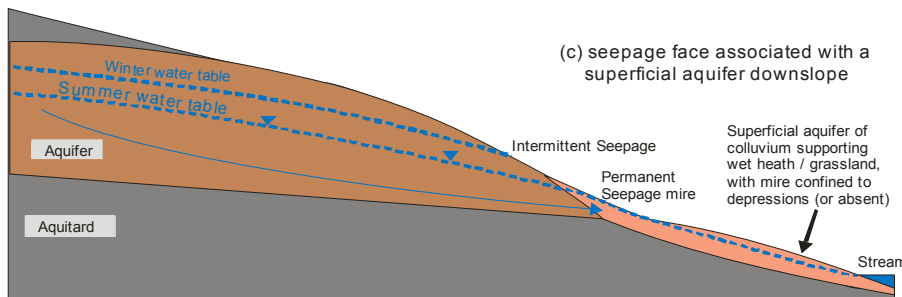
# Why WETMECS should matter to Hydrogeologists – Top-Layer Control of Groundwater outflow



(a) Permanent seepage slope (WETMEC 10a)



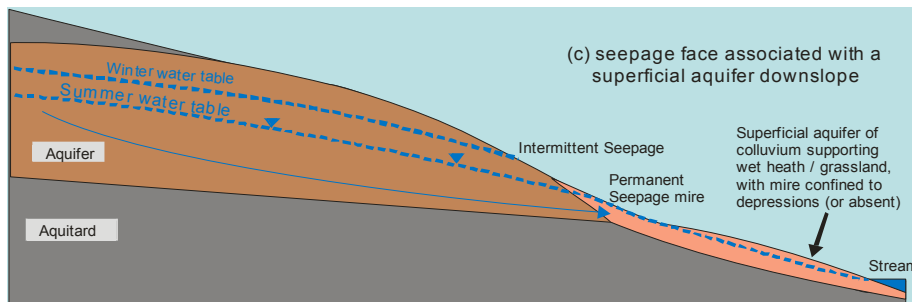
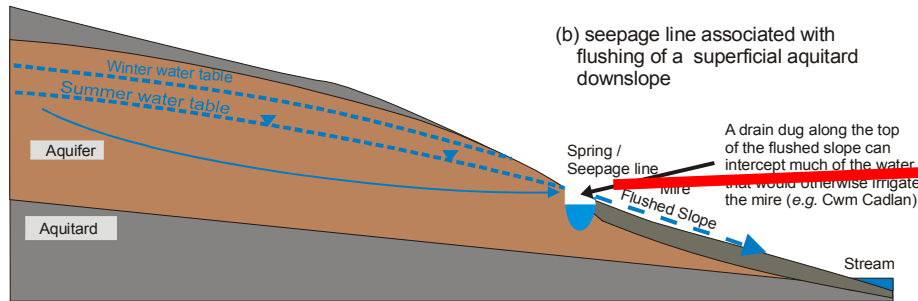
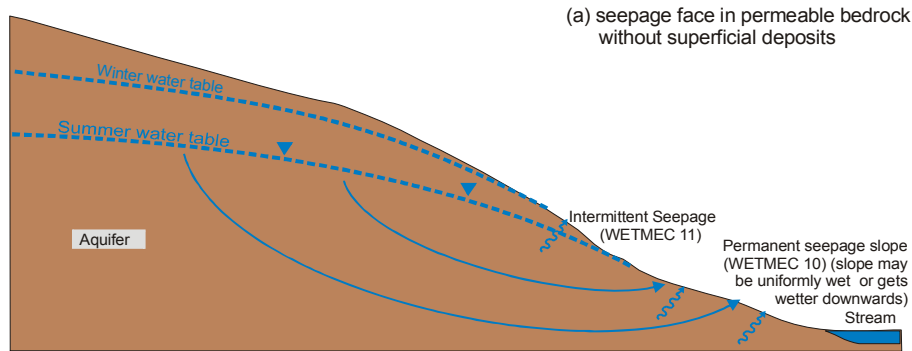
(b) Flushed slope (WETMEC 17)



(c) Diffuse seepage slope (WETMEC 10b)



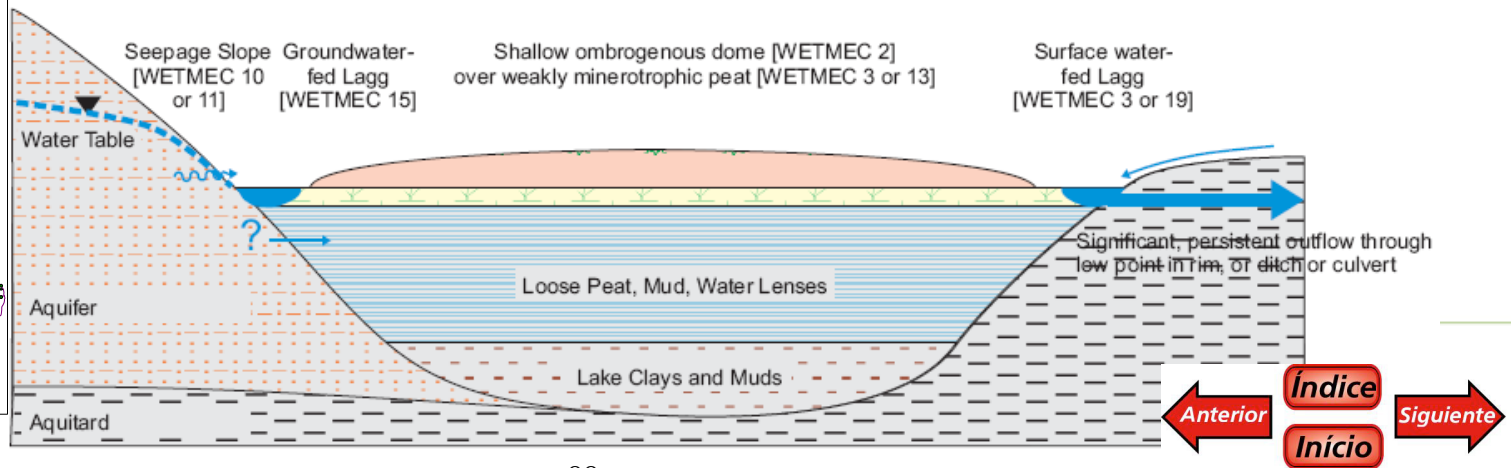
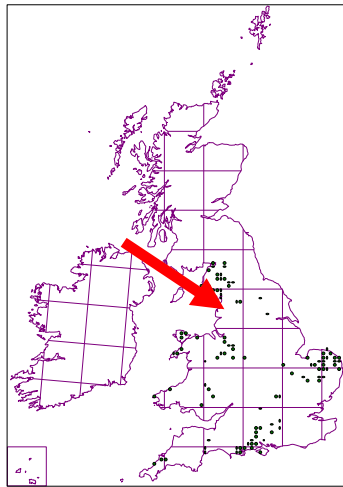
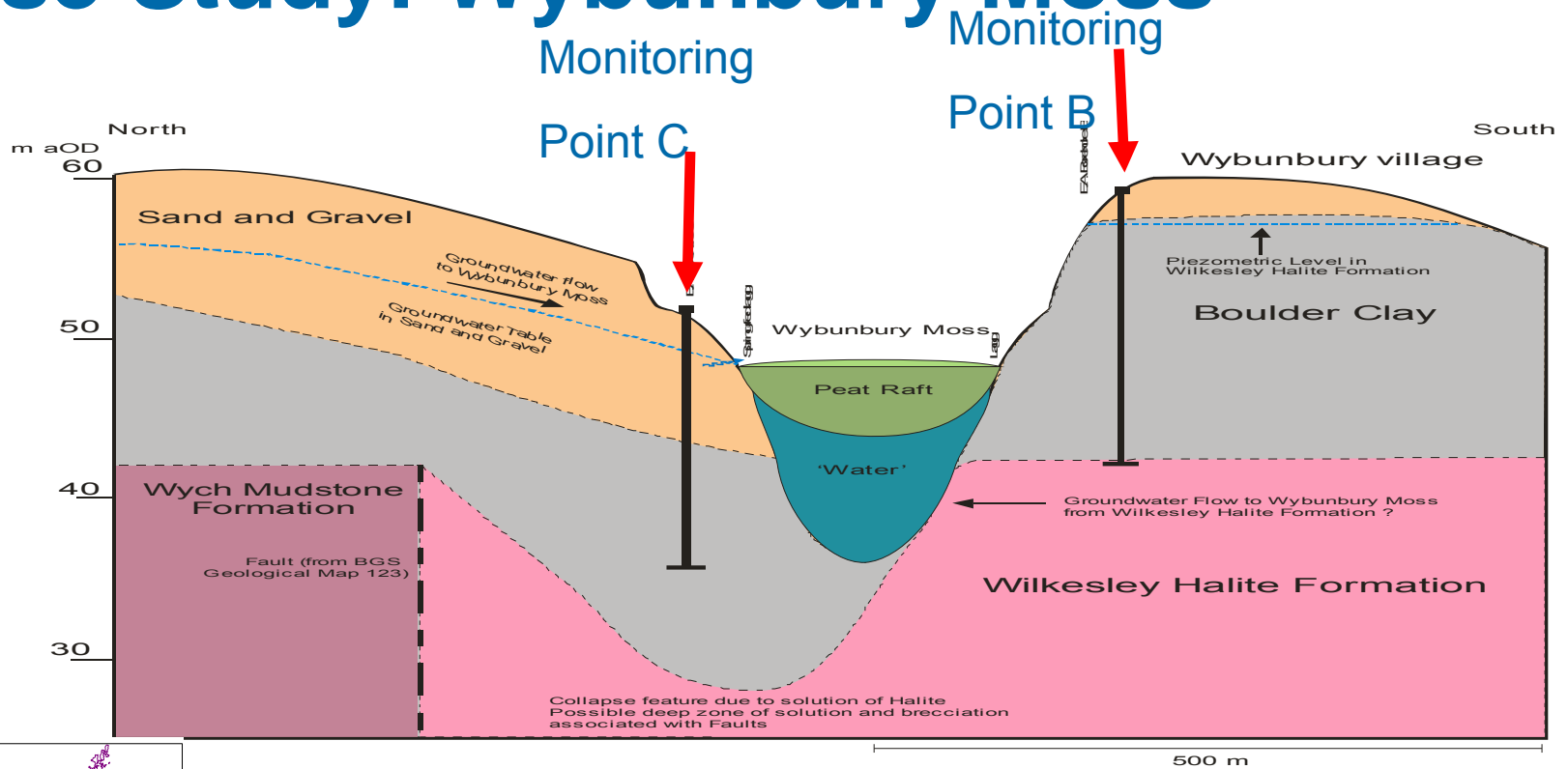
# Top-Layer Control of Groundwater outflow



## Cwm Cadlan SAC, South Wales



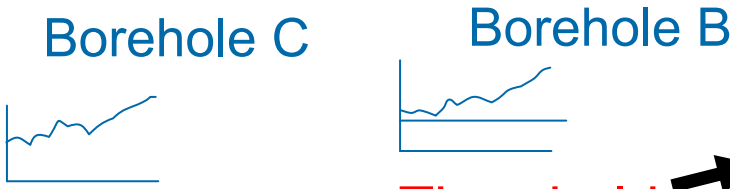
# Case Study: Wybunbury Moss



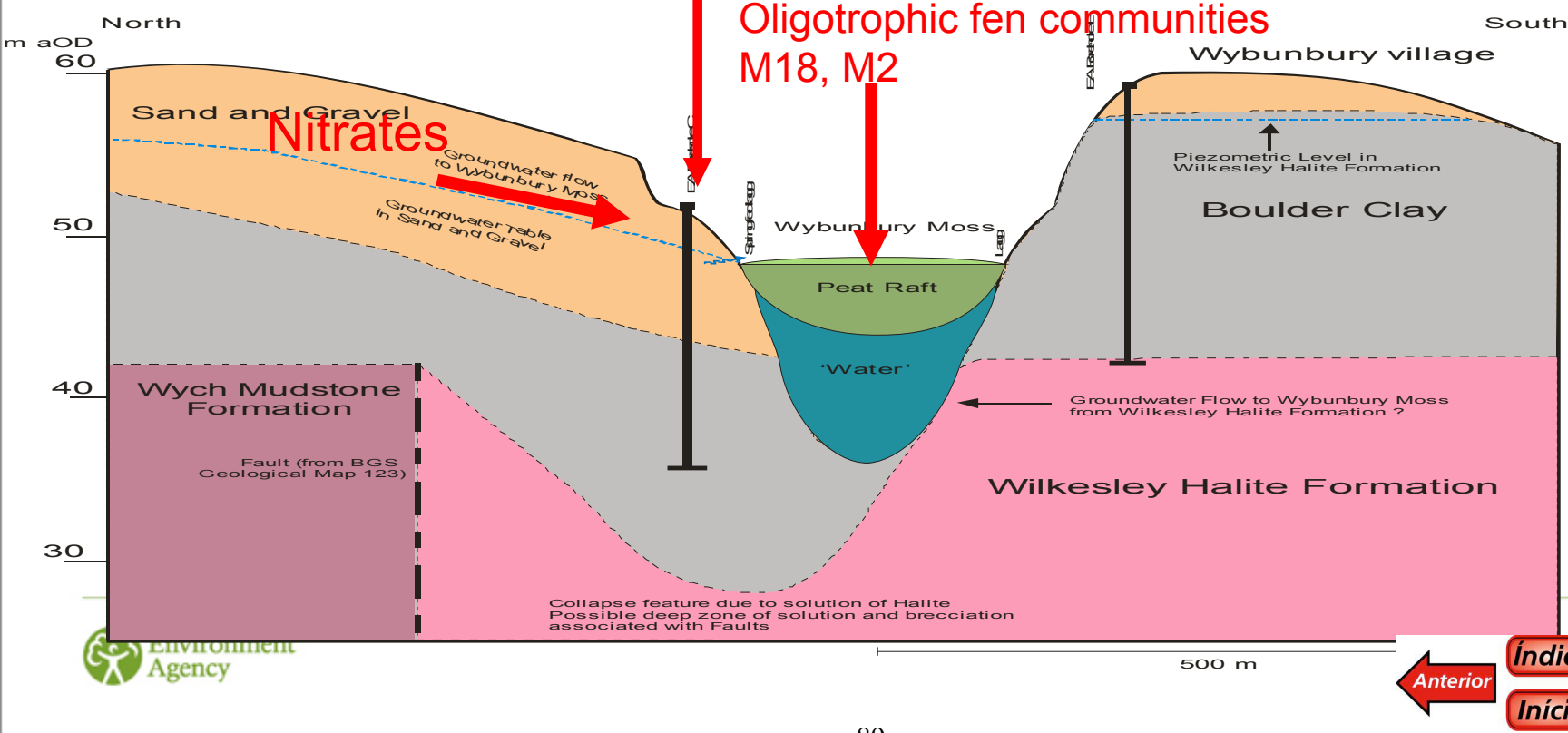
# Wybunbury Moss

## Risk Screening & Classification

Poor status, high confidence  
 All anthropogenic

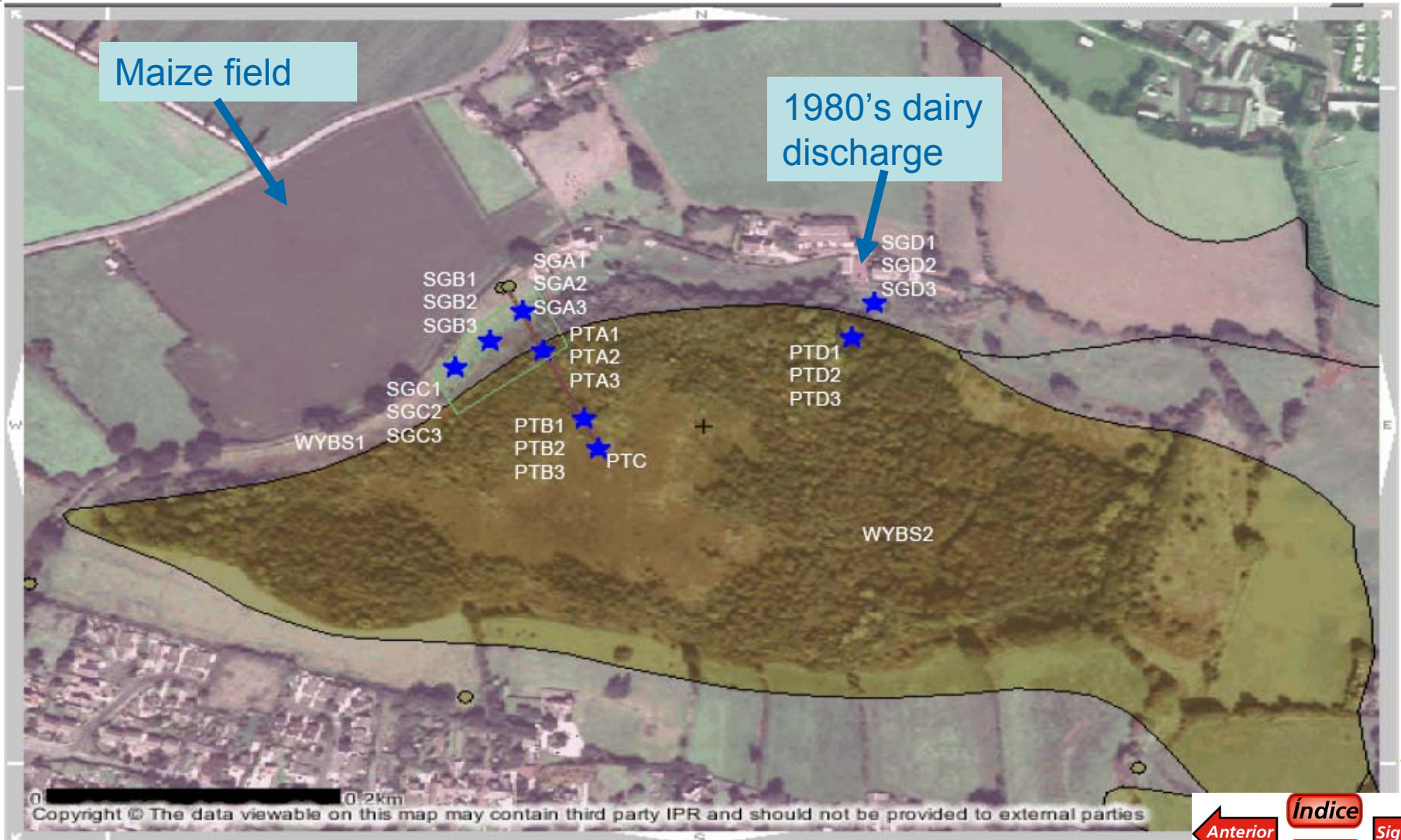


NO3 (N) 20mg/l → Threshold 10mg/l → Exceedance >10mg/l

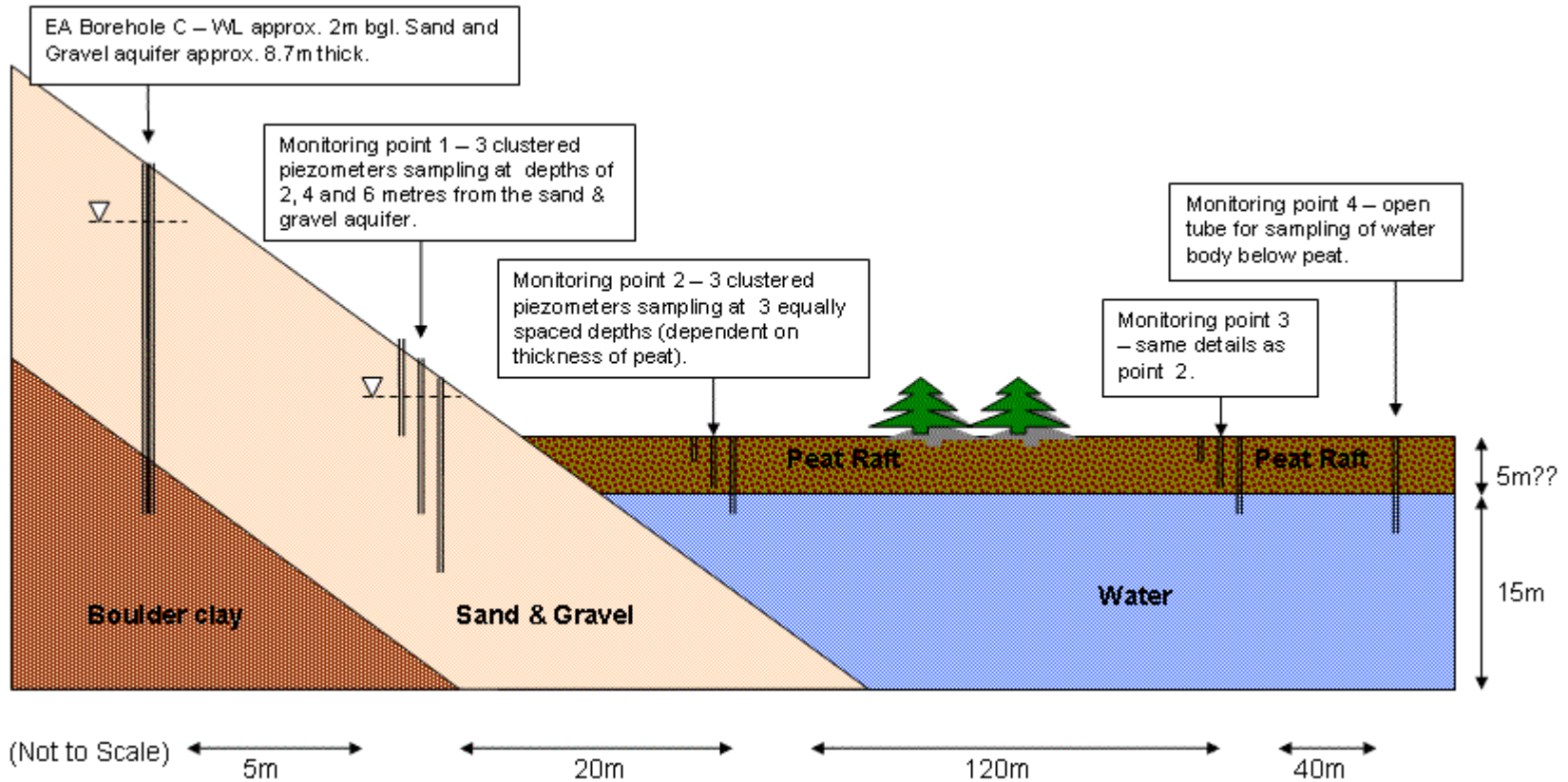




# Wybunbury – Investigation



# Nested piezometers

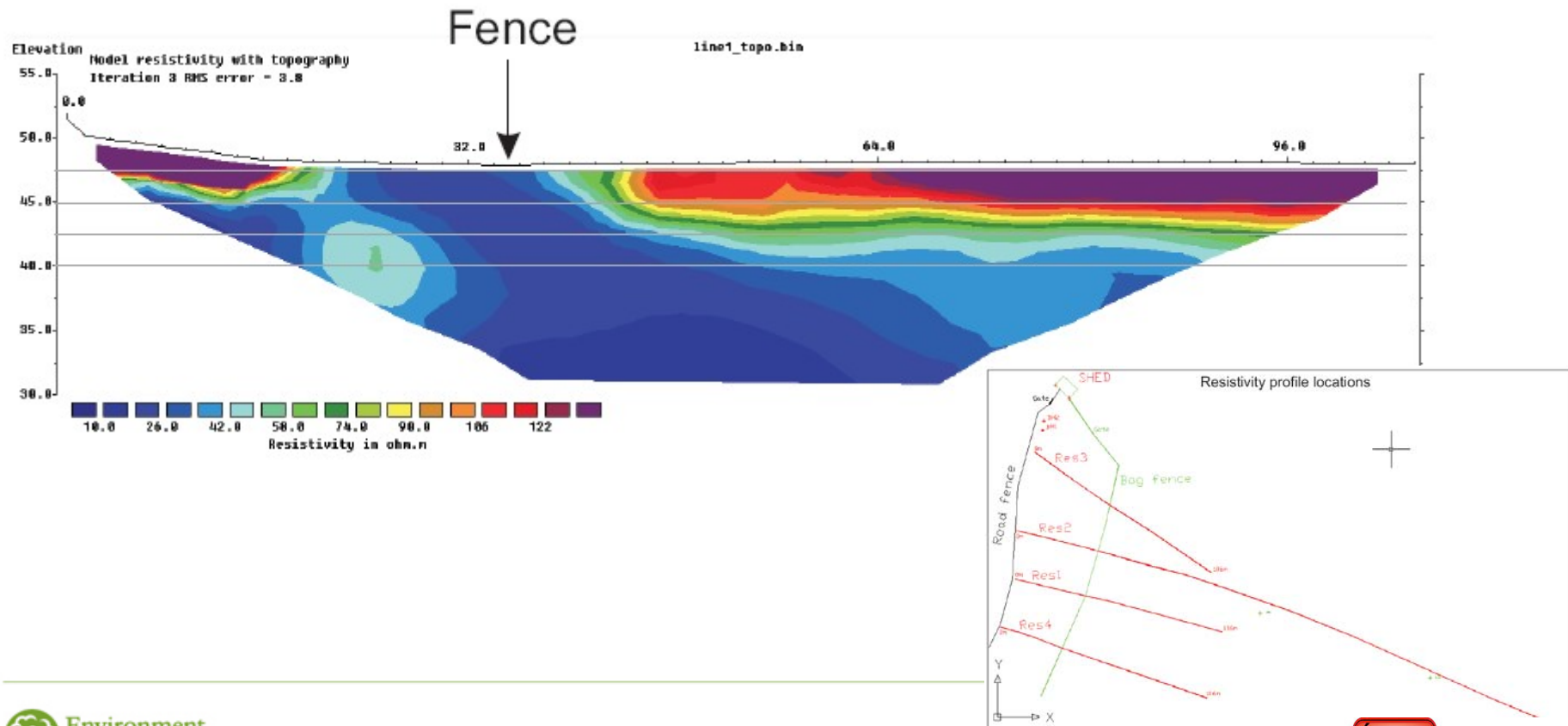


# Resistivity profiles

WNW

ESE

Res1

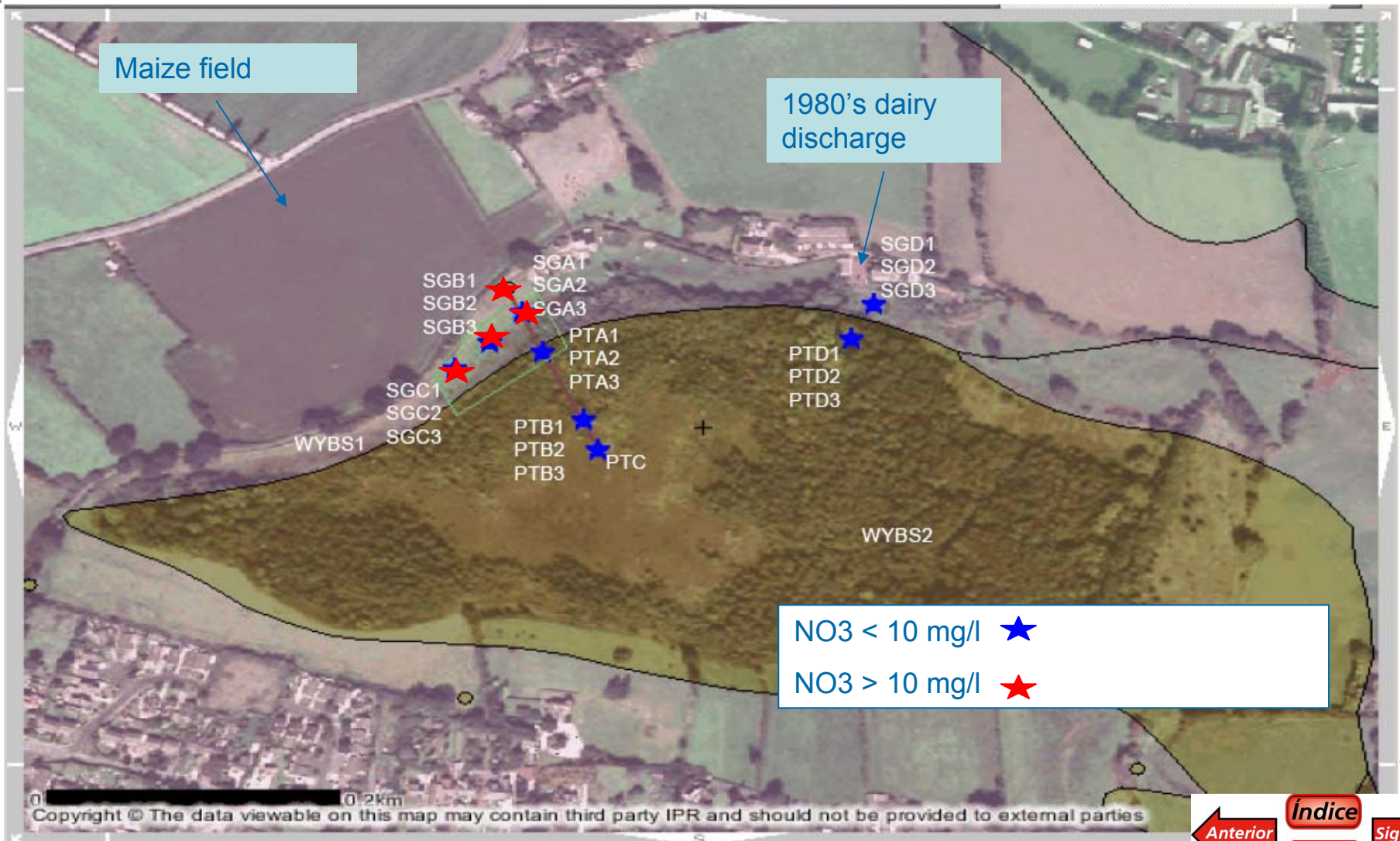






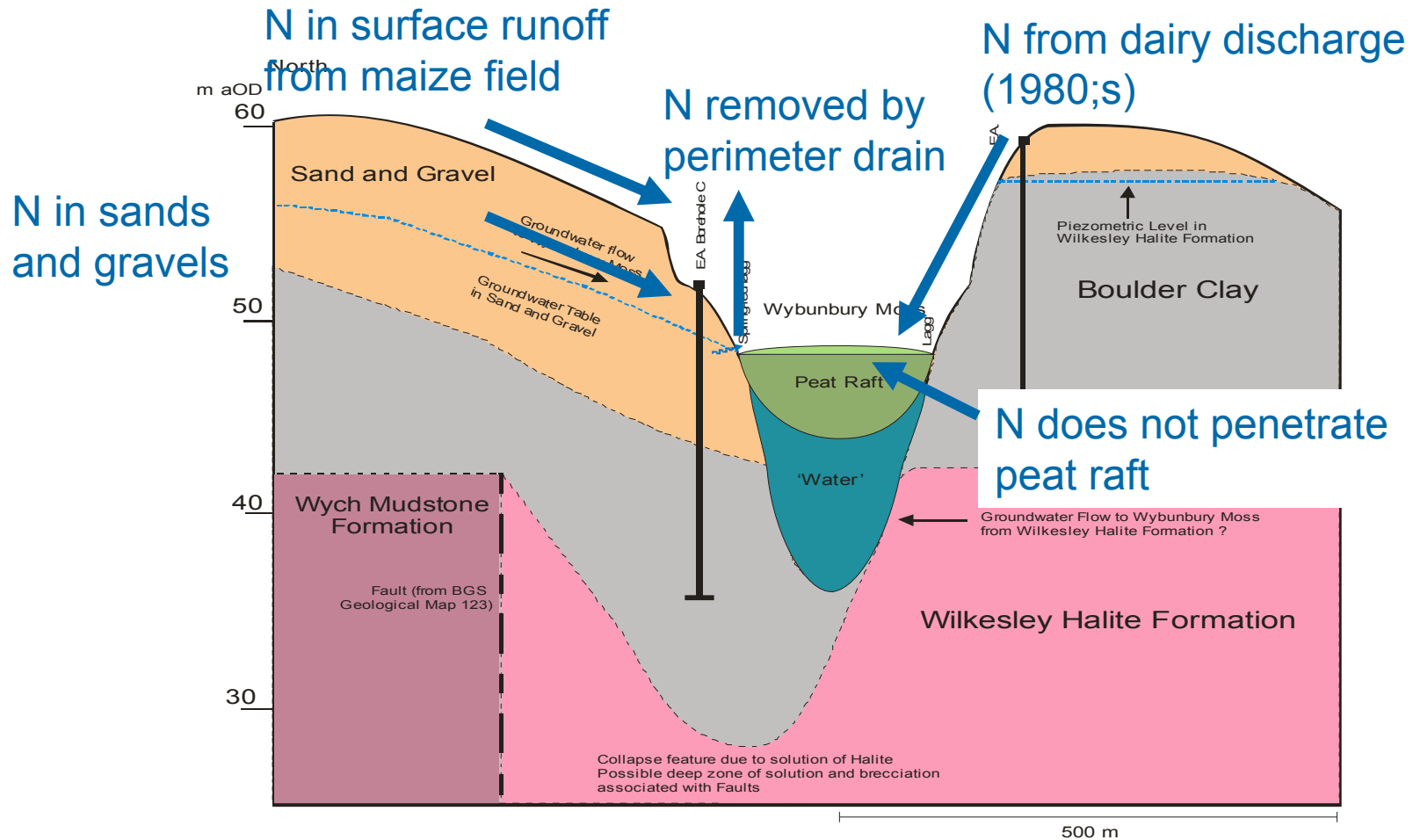


# Nitrate concentrations

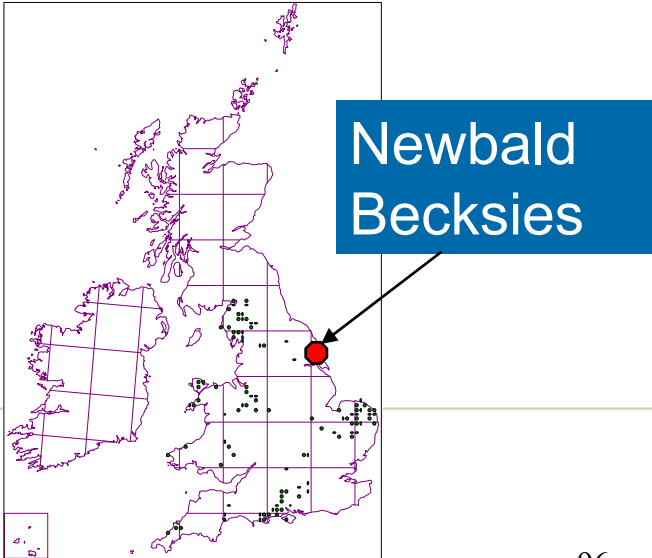
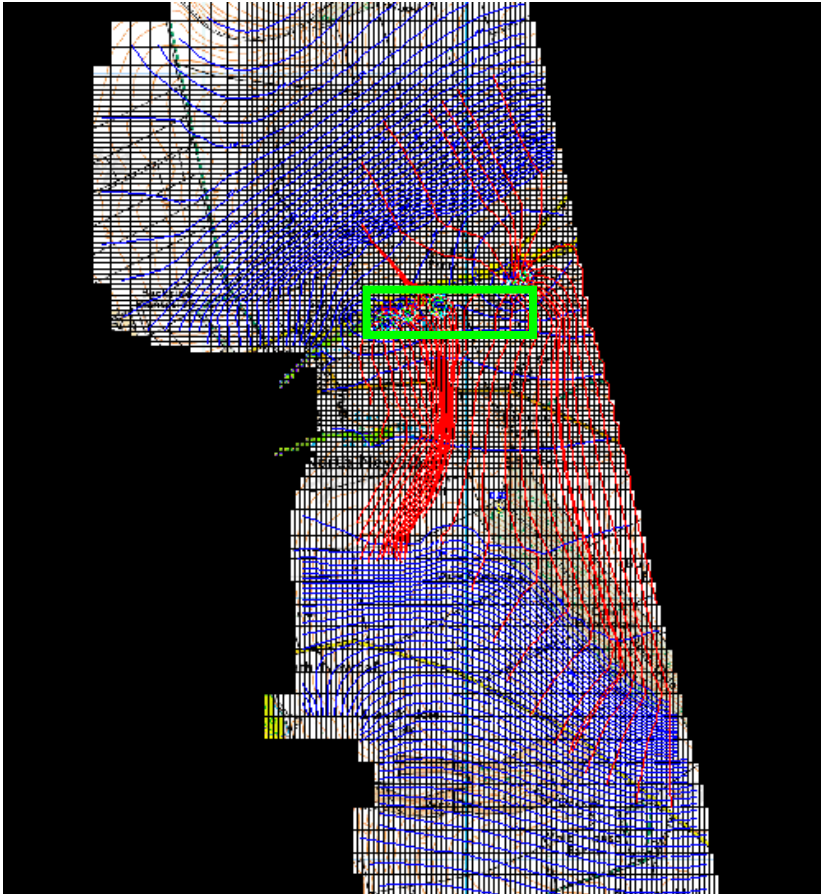




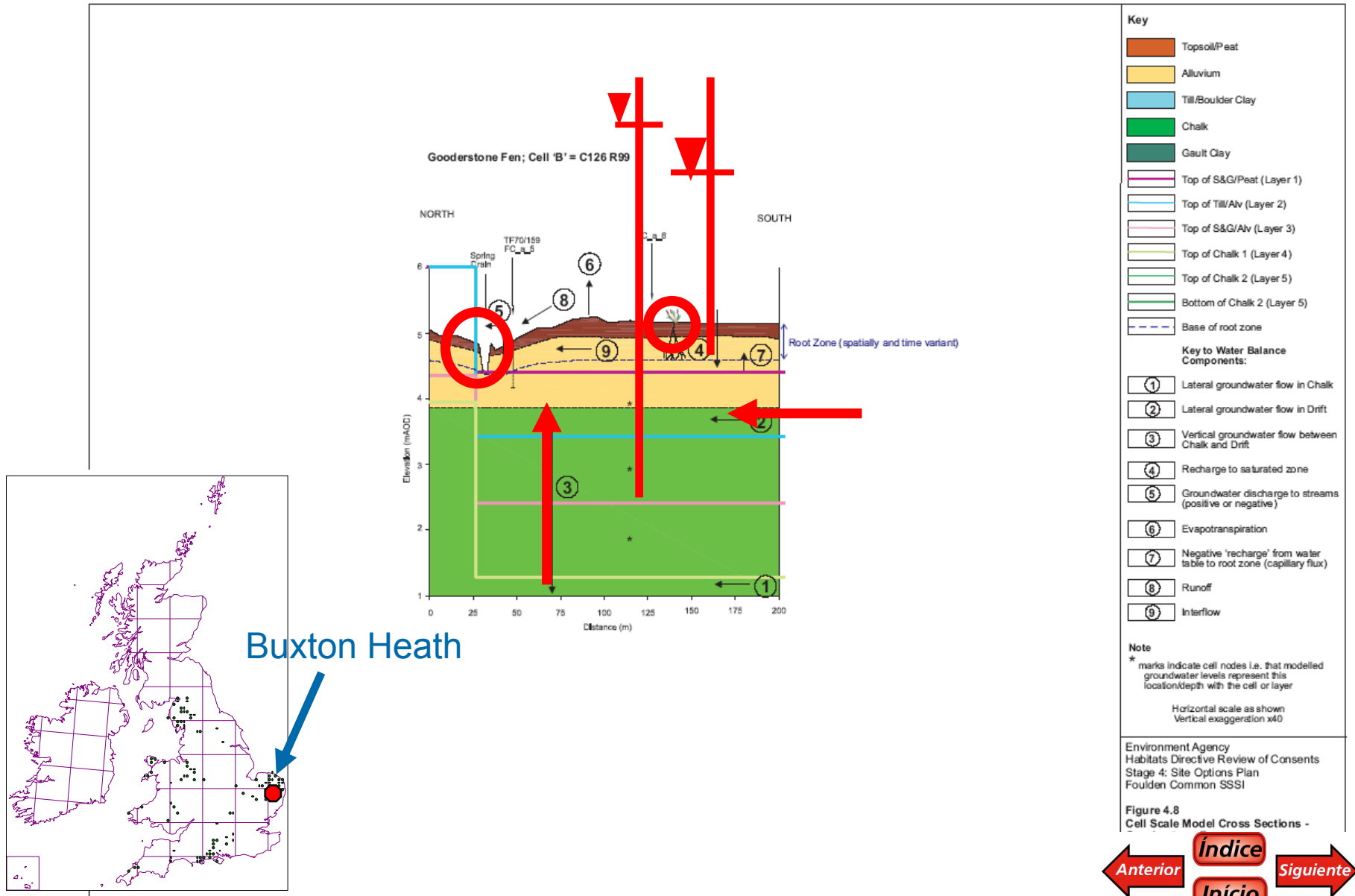
# Revised conceptual model



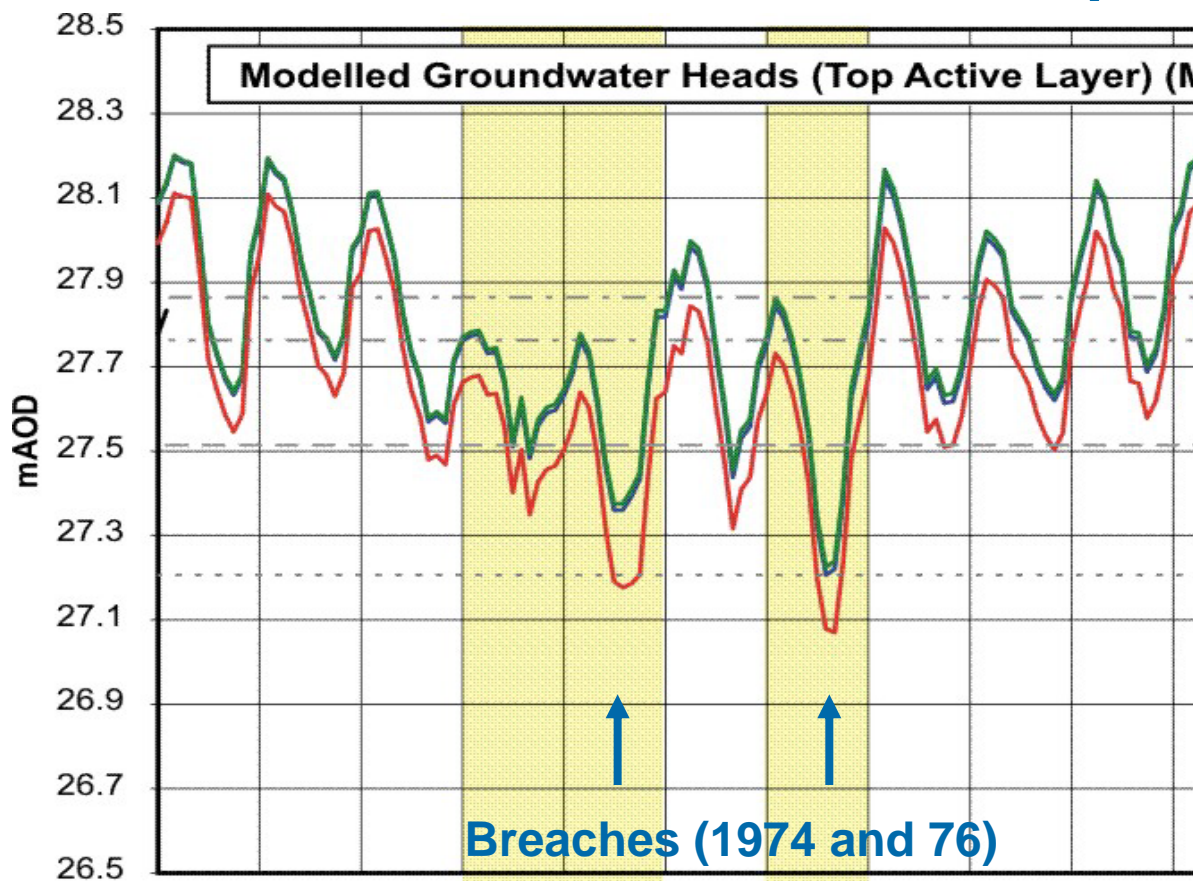
# Further evidence – using modelling



# Quantitative thresholds



# Appraisal of Scenarios – Groundwater Heads at the Feature of Interest (NVC M13)





# Where have we got to?...and what would we do differently next time?

- The hydro-ecological conceptual model is very important
- assessing local source-pathway-receptor linkages based on conceptual understanding
- investigations are expensive, need to be smarter next time around. We are still on the journey...



# Cost effective techniques

- ✓ Soil Augering
- ✓ Hydro-ecological walkover survey
- ✓ Dipwells (with dataloggers)
- ✓ Chemical sampling
- ✓ Ecological quadrats
- ? Deep piezometers
- ? Geophysics (resistivity, GPR....)
- ? Isotopes

Cheaper



More expensive



# Further work on wetland thresholds

- ⇒ EU regulators and academics special session at HydroEco 2009
- ⇒ some countries identified GWDTEs (Sweden, Norway, Finland, Netherlands, England & Wales, Scotland, Austria)
- ⇒ all have difficulty with criteria/thresholds for damage
- ⇒ IWRM-net workshop 2-3 November 2009

# Links

See [www.environment-agency.gov.uk](http://www.environment-agency.gov.uk) or [www.naturalengland.org.uk](http://www.naturalengland.org.uk)

- Brooks, A., Brown, R., and James, S., 2009. Guidance on Monitoring and Investigation at Groundwater-dependent Terrestrial Ecosystems (GWDTE). Environment Agency report.
- Barsoum, N, Anderson, R, Broadmeadow, S, Bishop, H, and Nisbet, T (2005). Eco-hydrological Guidelines for Wet Woodland – Phase 1. English Nature Research Report 619
- Davy, A.J., Grootjans, A.P., Hiscock, K., and Petersen, J. (2006) Development of Eco-hydrological Guidelines for Dune Habitats- Phase 1. English Nature Research Report number 696;
- Mountford, J.O., Rose, R.J. and Bromley, J. (2005). Development of eco-hydrological guidelines for wet heaths – Phase 1. English Nature Research Reports Number 620;
- Wheeler, B.D. Shaw, S.C. and Tanner, K. (2009) A Wetland Framework for Impact Assessment at Statutory Sites in England and Wales. Science Report SC030232/SR1



Wheeler, B.D.; Shaw, S.C.; Gowing, D.J.G.; Mountford, J.O.; and Mc (2004). Ecohydrological Guidelines for Lowland Wetland Plant C Eds. Brooks, A.W., Jose, P.V. and Whiteman, M.I. Environment,







¡Gracias!  
Thank you!





# Acknowledgements

- ➔ University of Sheffield
- ➔ Open University
- ➔ University of East Anglia
- ➔ NERC Centre for Ecology and Hydrology
- ➔ Entec UK Ltd
- ➔ Forest Research



## Jornadas de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos – Grupo Español

### El papel del Agua Subterránea en el Funcionamiento de los Humedales

# Las aguas subterráneas como elemento básico de la existencia de numerosos humedales

Emilio CUSTODIO, Dr.I.I., Real Acad. Ciencias  
Prof. Dept. Ingeniería del Terreno  
Centro Internacional de Hidrología Subterránea  
Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Barcelona



# Humedales que dependen del agua subterránea

- Dependencia { parcial temporal total } con agua de { precipitación escorrentia local fluvial }
- El nivel freático { intersecciona queda cerca } de la superficie del terreno
- Son áreas de descarga { local intermedia regional } { con drenaje endorreicas totalmente cerradas }
- Se sitúan en { fondos de valle áreas bajas áreas costeras interfluvios amplios }

# Situación de los humedales que dependen del agua subterránea

## En depresiones del terreno

- junto a cauces fluviales
- en bajos de llanura
- en fondos intramontanos
- en llanos interfluviales

## Por la posición relativa

- en cuencas bajas
- en cuencas medias
- en cabecera

estables

costeros  
deltaicos

→ algo variables  
→ variables

## Por el flujo del agua

- con descarga superficial
- endorreicos con descarga subterránea

combinables

- cerrados { con lavado esporádico  
sin lavado → salares

## Denominaciones

- áreas encharcadas / pantanosas / encharcadizas
- lagunas someras
- criptohumedales
- áreas de freatofitas
- bofedales
- salares









**Estany (lago) principal**

**Estans de Basturs. Conca de Tremp. Lleida**



**Àrea encharcada pròxima**



**Fuente de Piedra (Málaga)**



**Zoñar (Córdoba)**

**Humedales y lagunas intermedias**



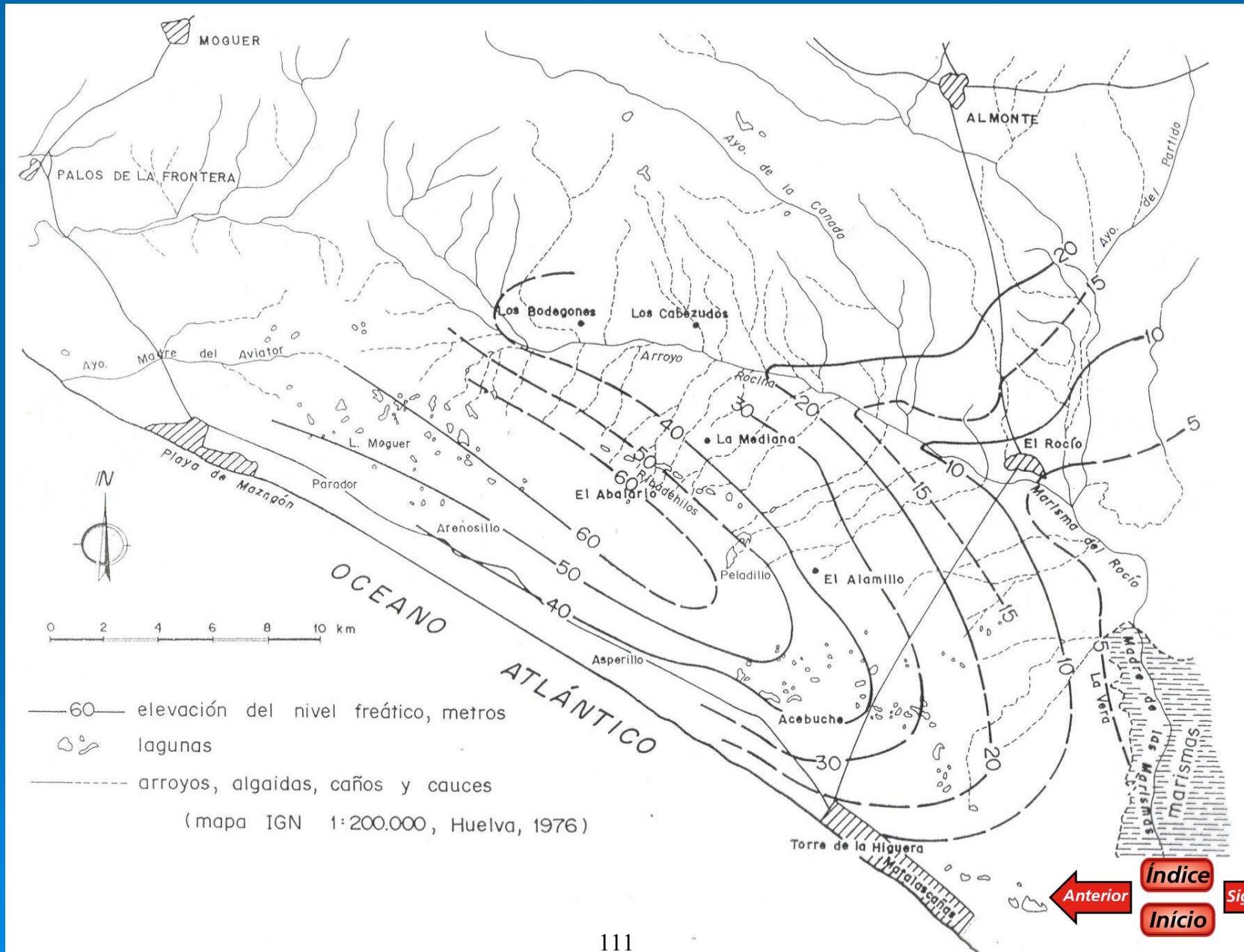


La Ricarda Delta del Llobregat (Barcelona)



S'Albufera de Mallorca

## Humedales de áreas bajas



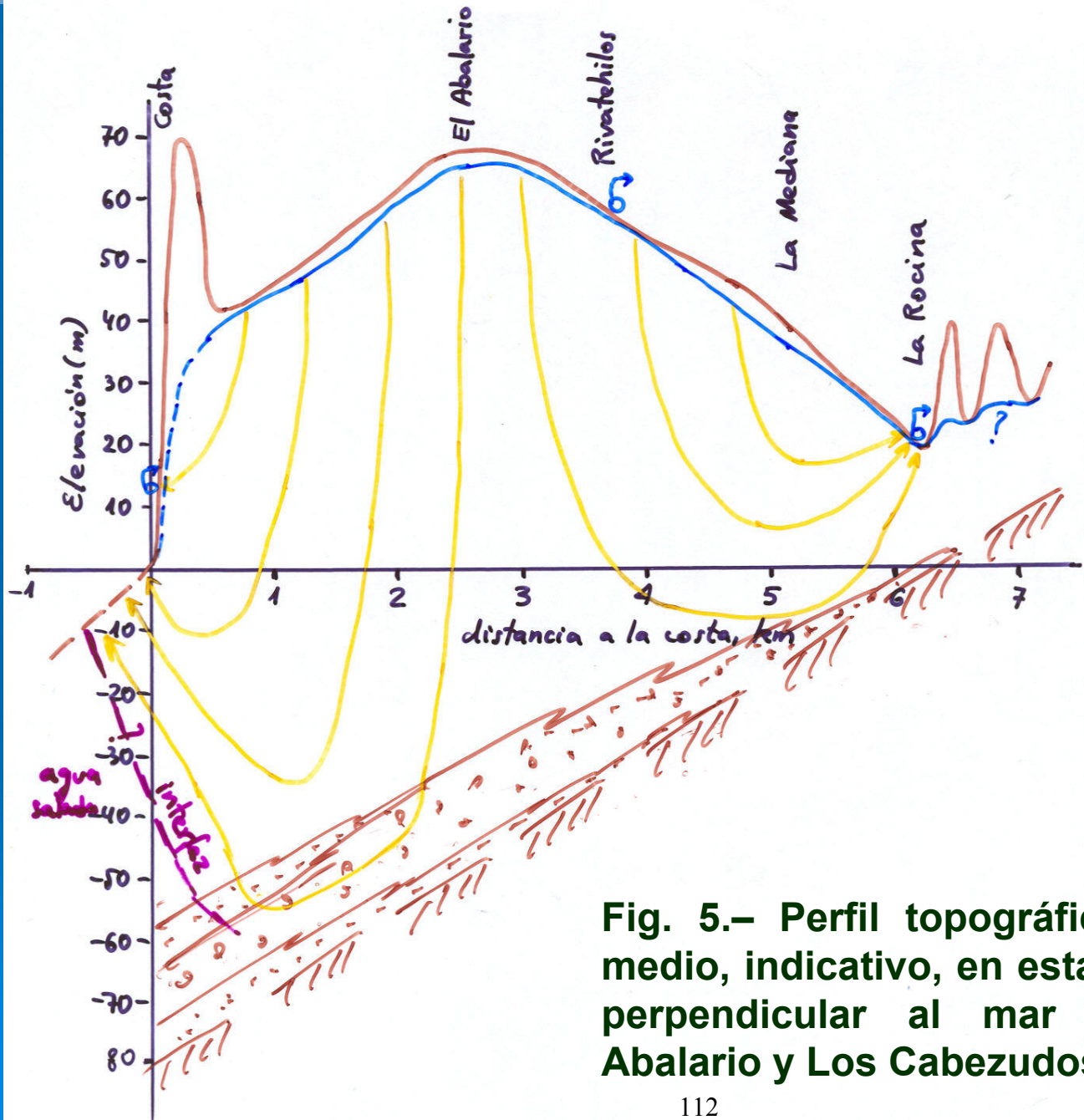


Fig. 5.- Perfil topográfico y piezométrico medio, indicativo, en estado no perturbado, perpendicular al mar pasando por El Abalarío y Los Cabezudos (La





Vista de la Laguna de Santa Olalla (abril 1989)



Ojo en cerca del borde de marisma



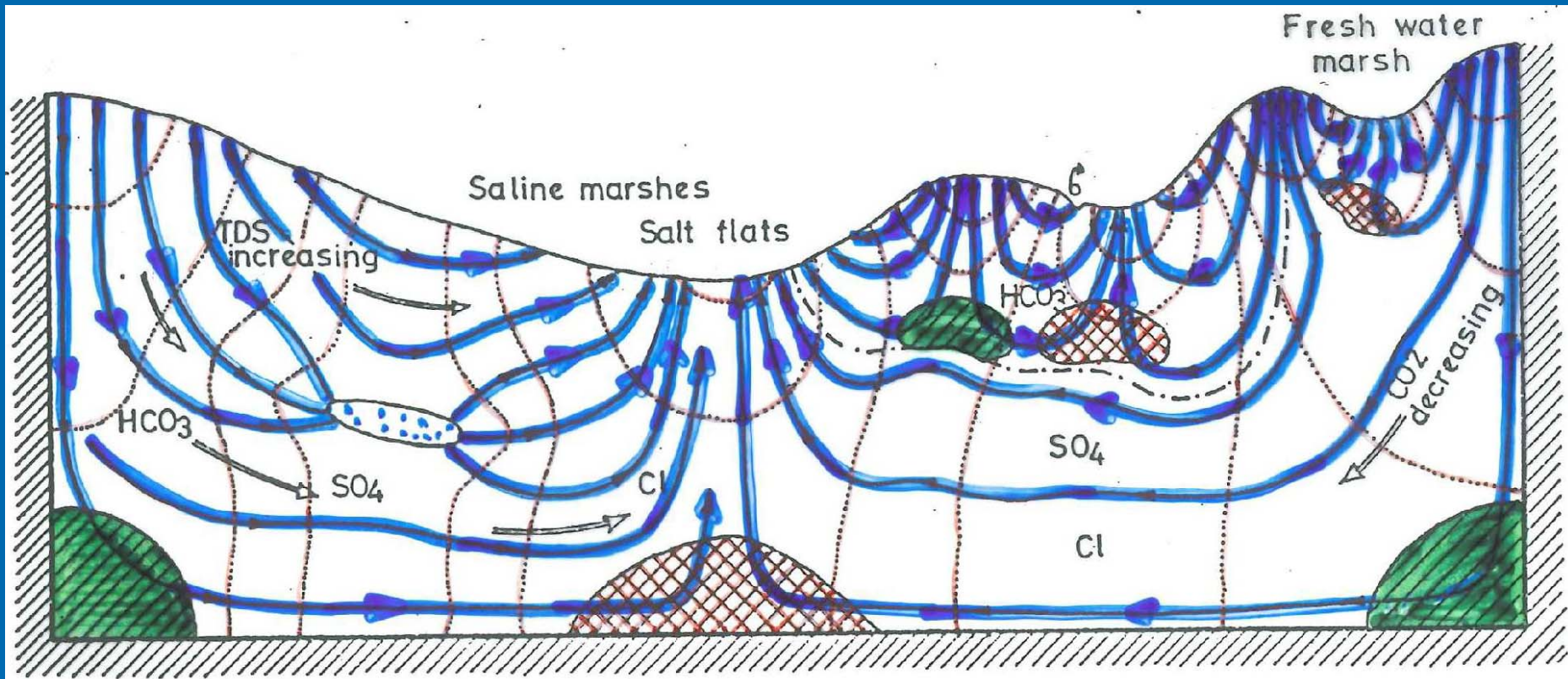
Zona lagunar de Ribetejilos, con un fondo de laguna y vegetación periférica de eucaliptos (1993), hoy erradicados

## Doñana

# Características de los humedales que dependen del agua subterránea

- Agua disponible regularmente  
⇒ poco efecto de sequías
- Agua contribuye solutos  
⇒ concentración por evaporación / transpiración
- Agua de humedal / criptohumedal:
  - \* dulce { sin precipitados  
con precipitados } carbonatos  
oxihidróxidos de Fe
  - \* agua salobre
  - \* agua salada / salmuera ⇒ sales evaporitas
  - \* con grandes fluctuaciones químicas



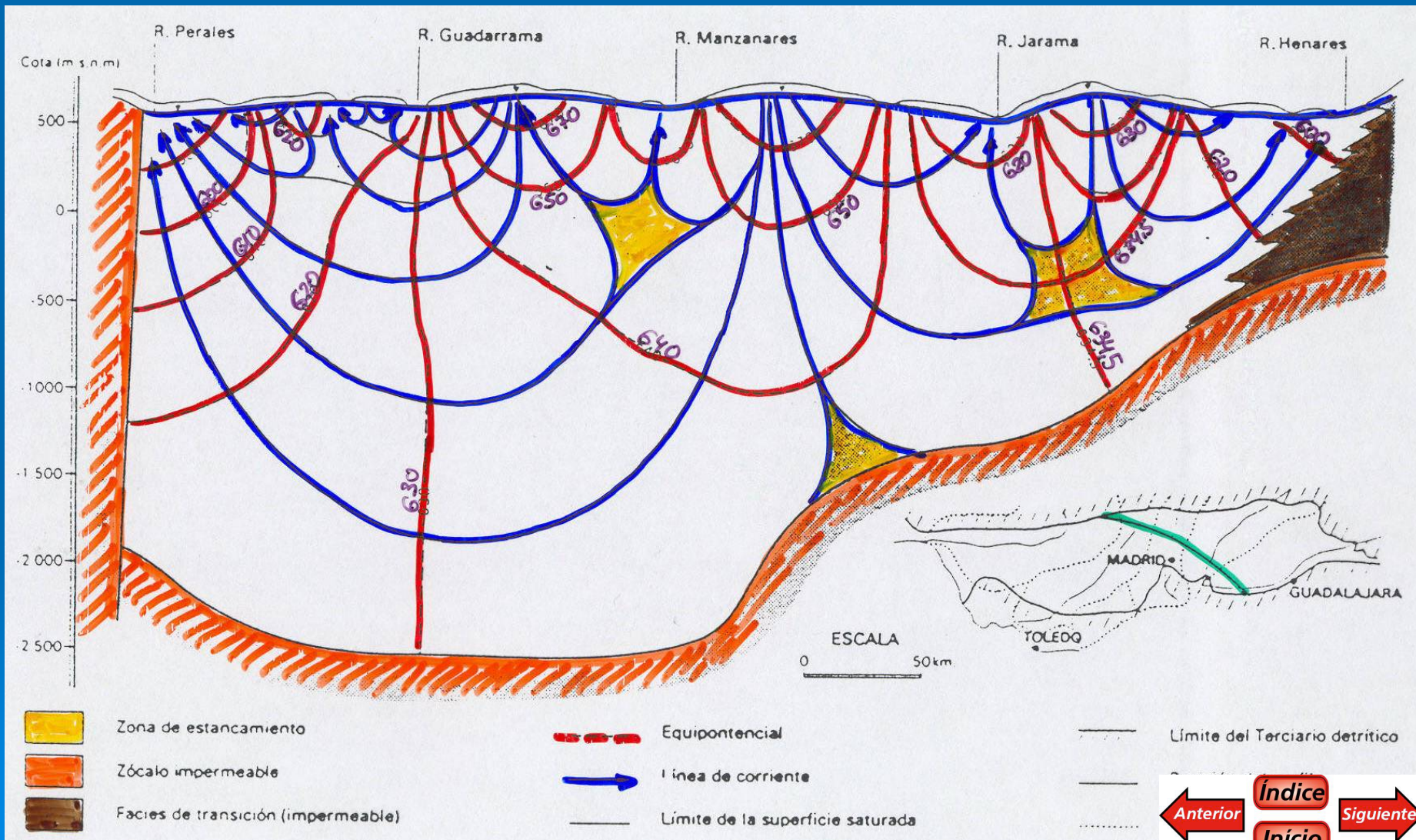


- flow line
- equipotential line
- boundary between flow systems (chemical facies boundary)

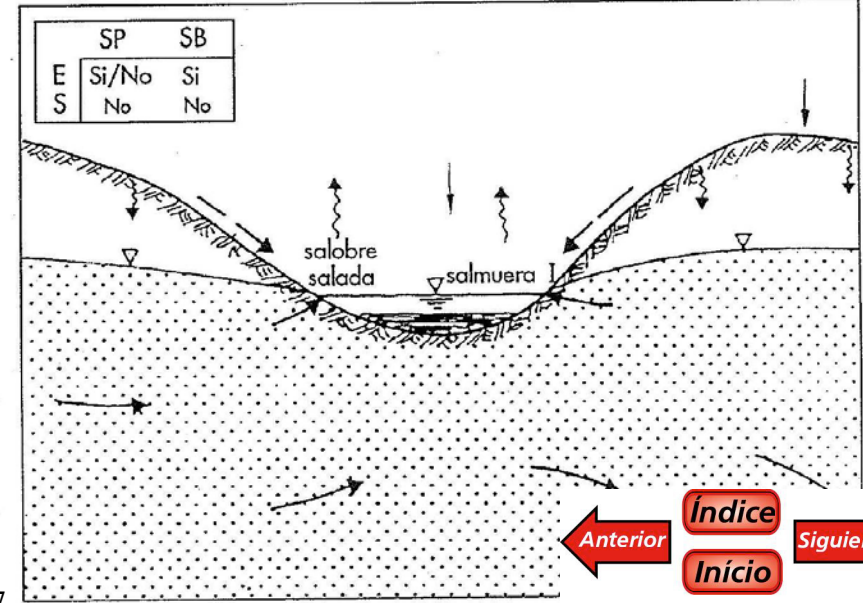
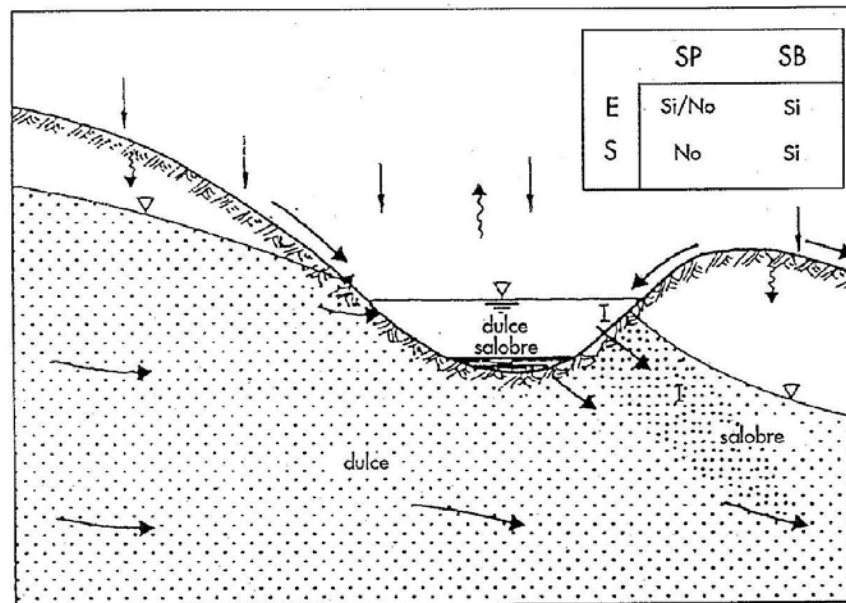
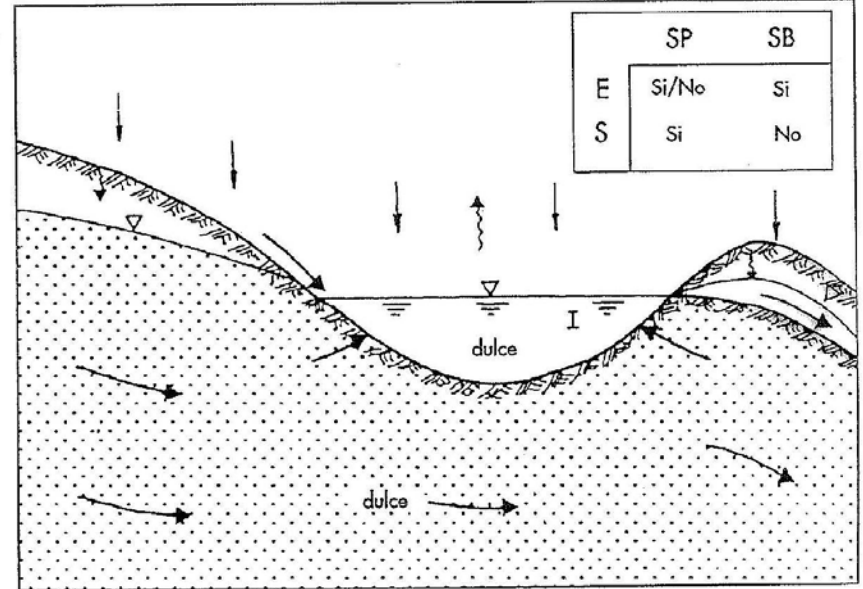
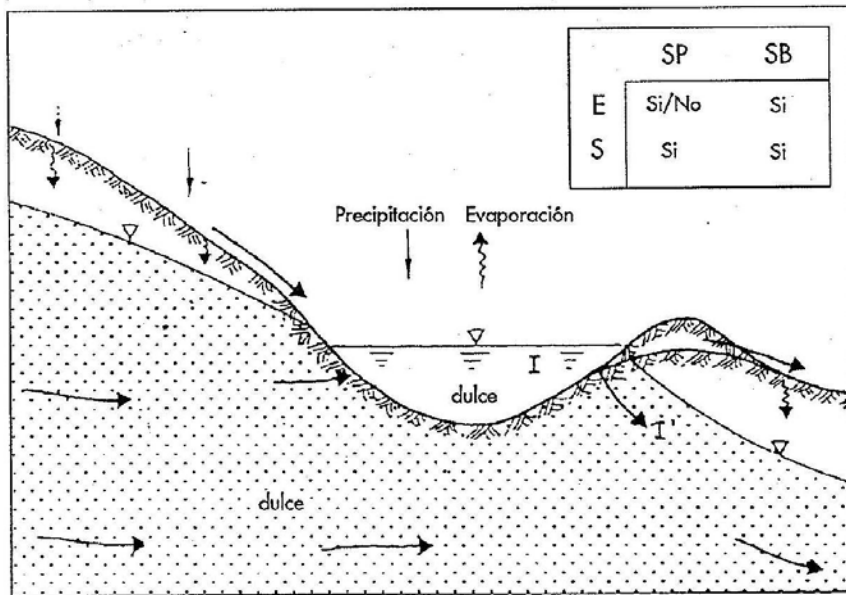
- high permeability layer
- quasis stagnant zone, high TDS
- zone of hydraulic trap, high TDS

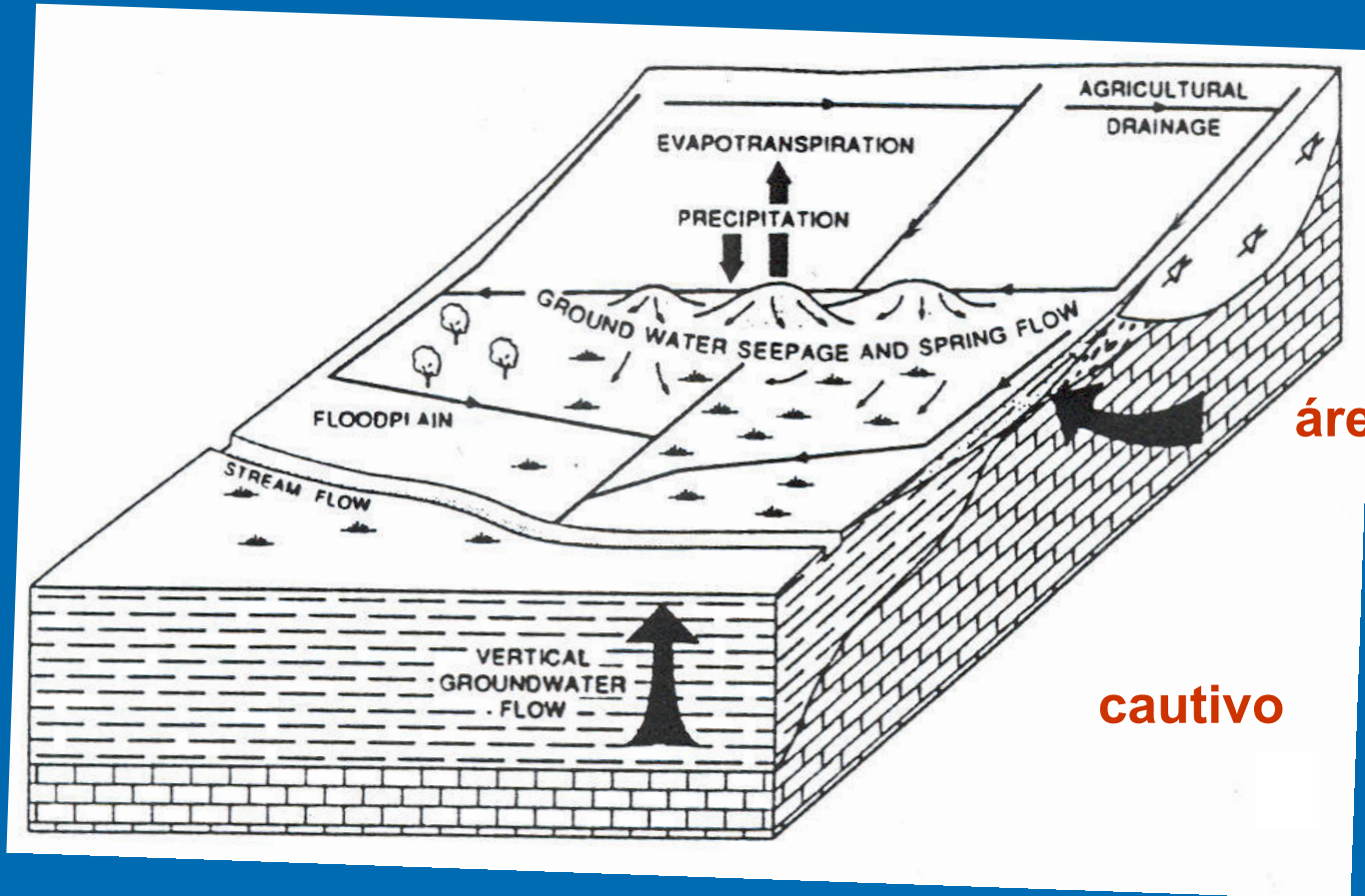


# Red de flujo en el acuífero de Madrid









libre

área de descarga

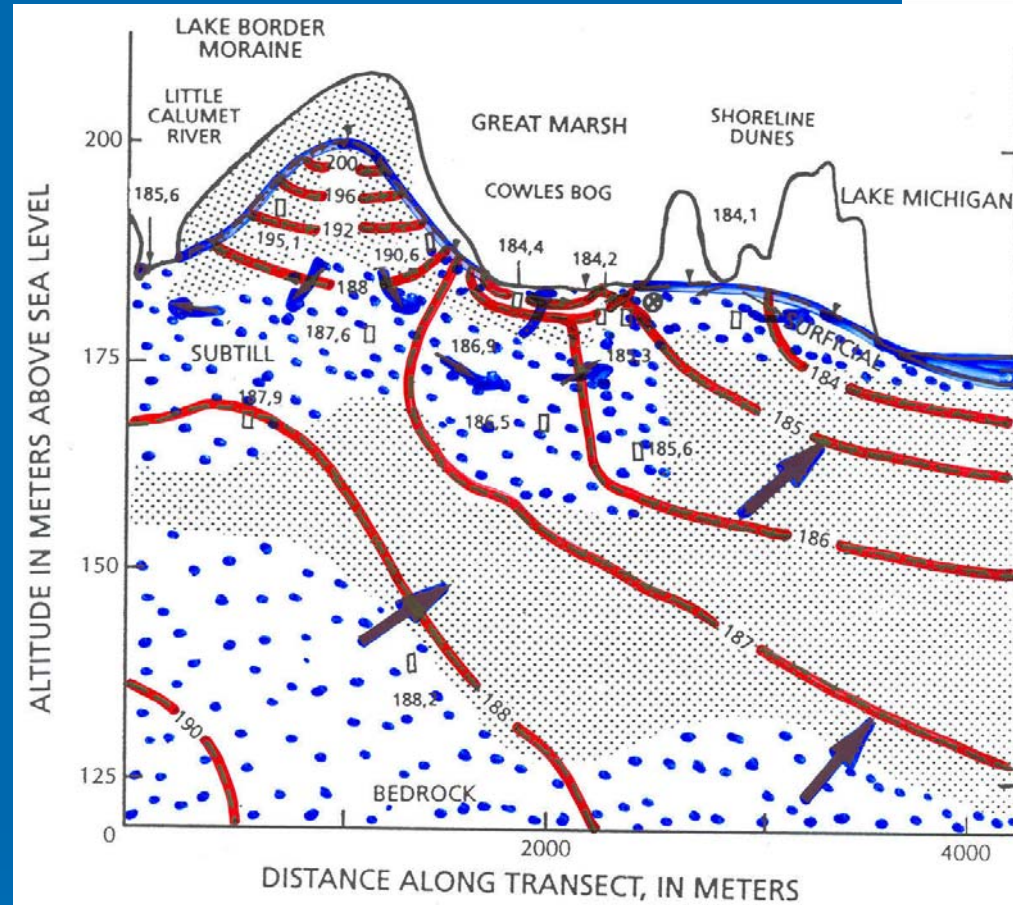
cautivo

Esquema de funcionamiento de un humedal de área de descarga de un acuífero libre que se hace cautivo. El humedal recibe la descarga del acuífero carbonatado subyacente y el drenaje de las áreas agrícolas





Una de las lagunas de Riudera



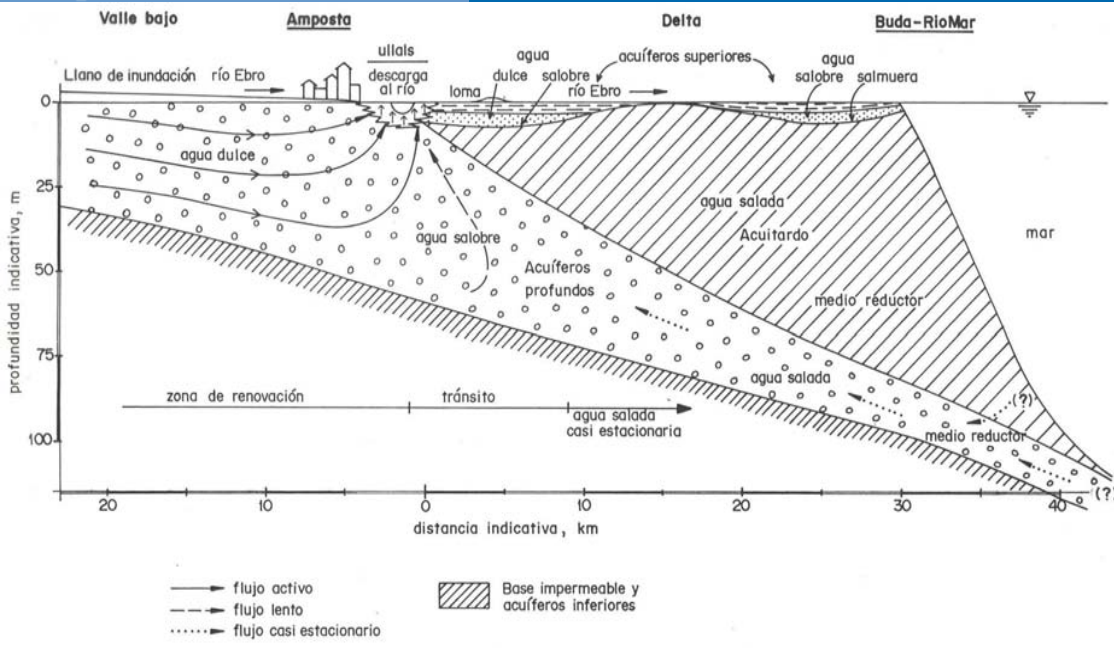
EXPLANATION

General direction of ground water flow

- Regional
- Intermediate
- Local
- 196 Equipotential line
- Symbol for surface water or water table
- 185,6 Screened interval and altitude of water level in observation well
- Symbol for ground - water flow out of the plane of the cross - section
- Confining bed
- Symbol for surface water or water table





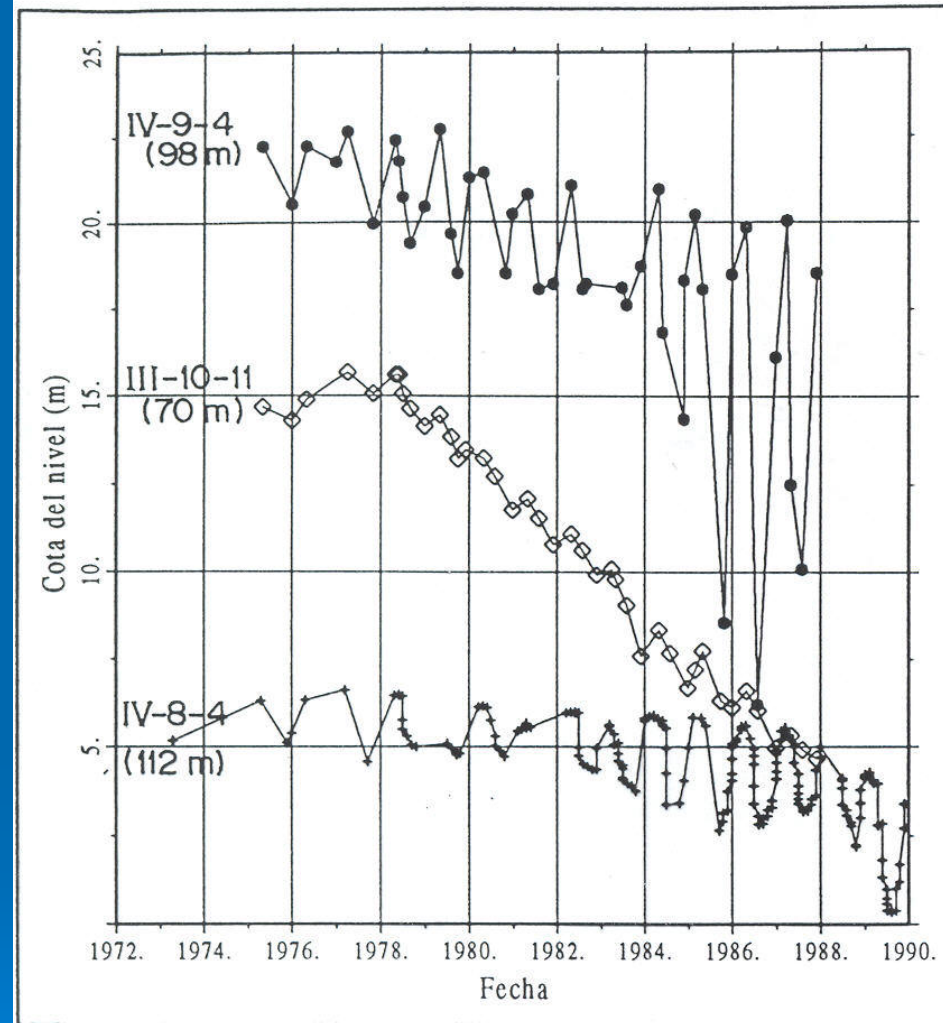
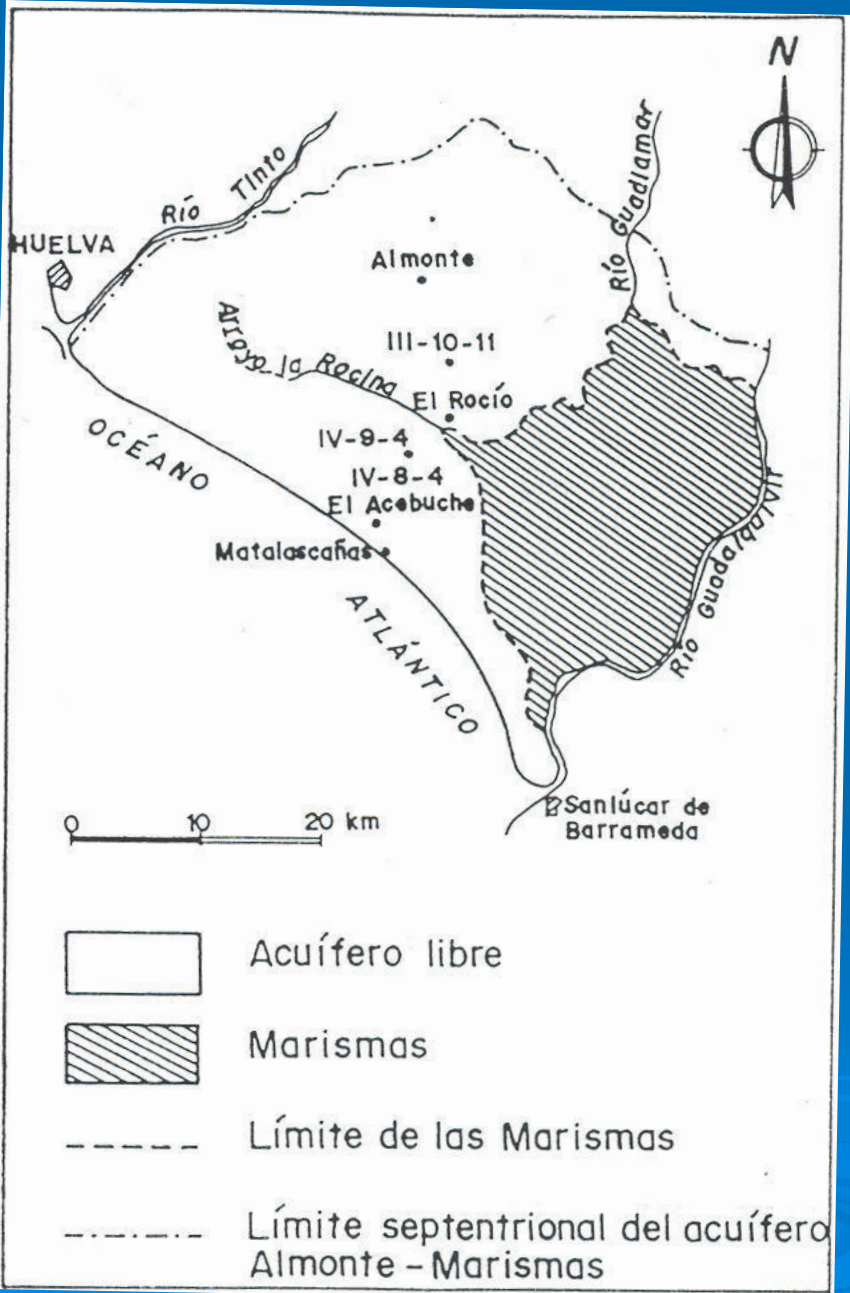


# Delta y Baix Ebre

## Humedales de borde de delta



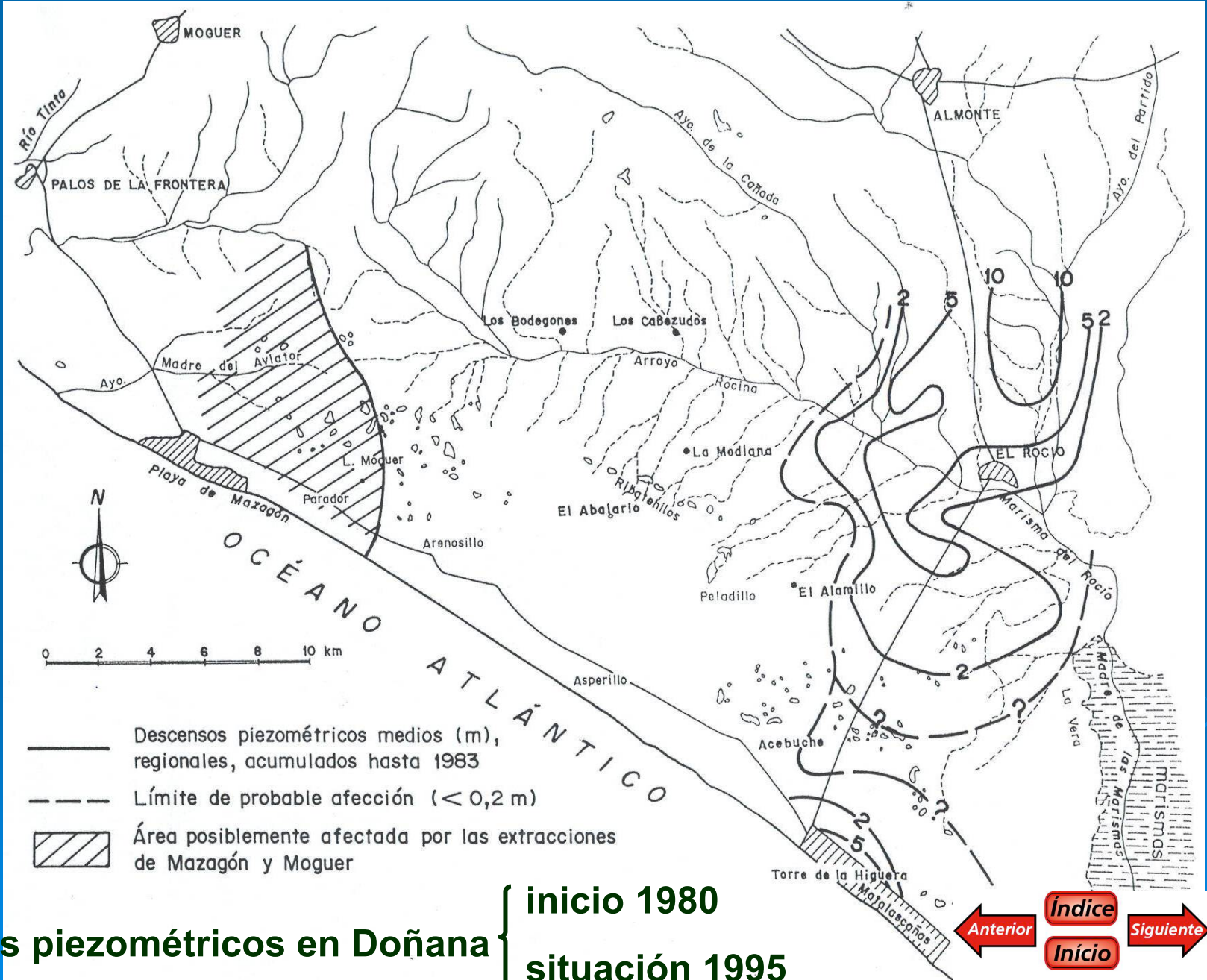
# Doñana



## Evolución de niveles piezométricos en tres pozos en Doñana







**Descensos piezométricos en Doñana**

**inicio 1980**  
**situación 1995**



## Efecto de las extracciones de aguas subterráneas en los humedales que dependen de ellas

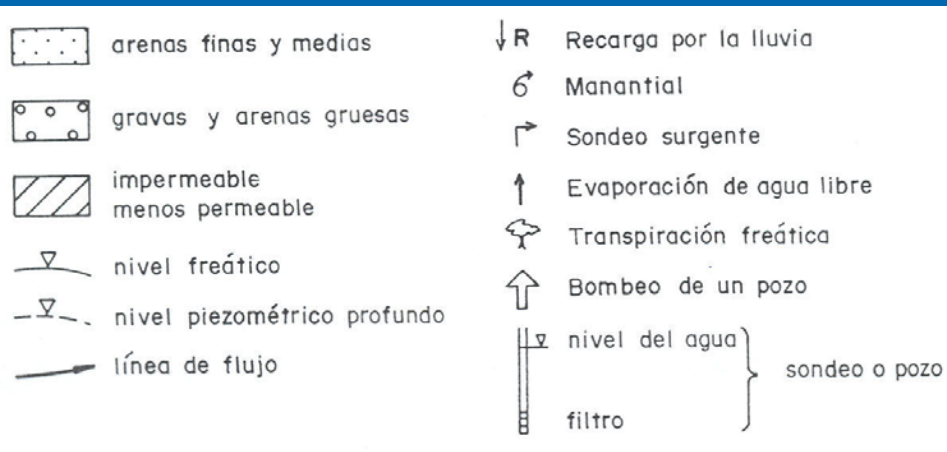
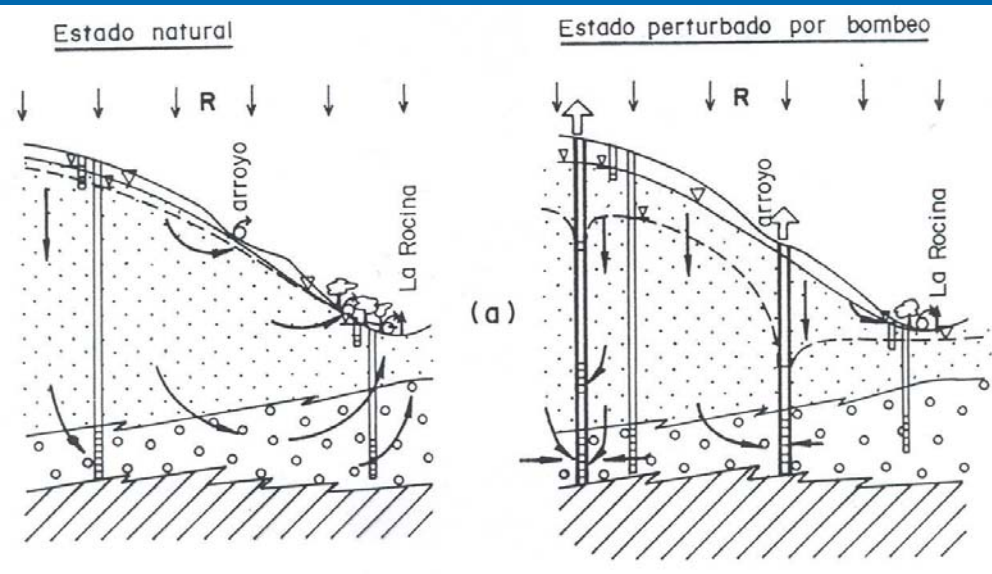
- Descenso
  - Fluctuaciones
- } de niveles { freáticos  
piezométricos

- Cambios químicos y de salinidad
- Cambia superficies de humedal

Extracción →

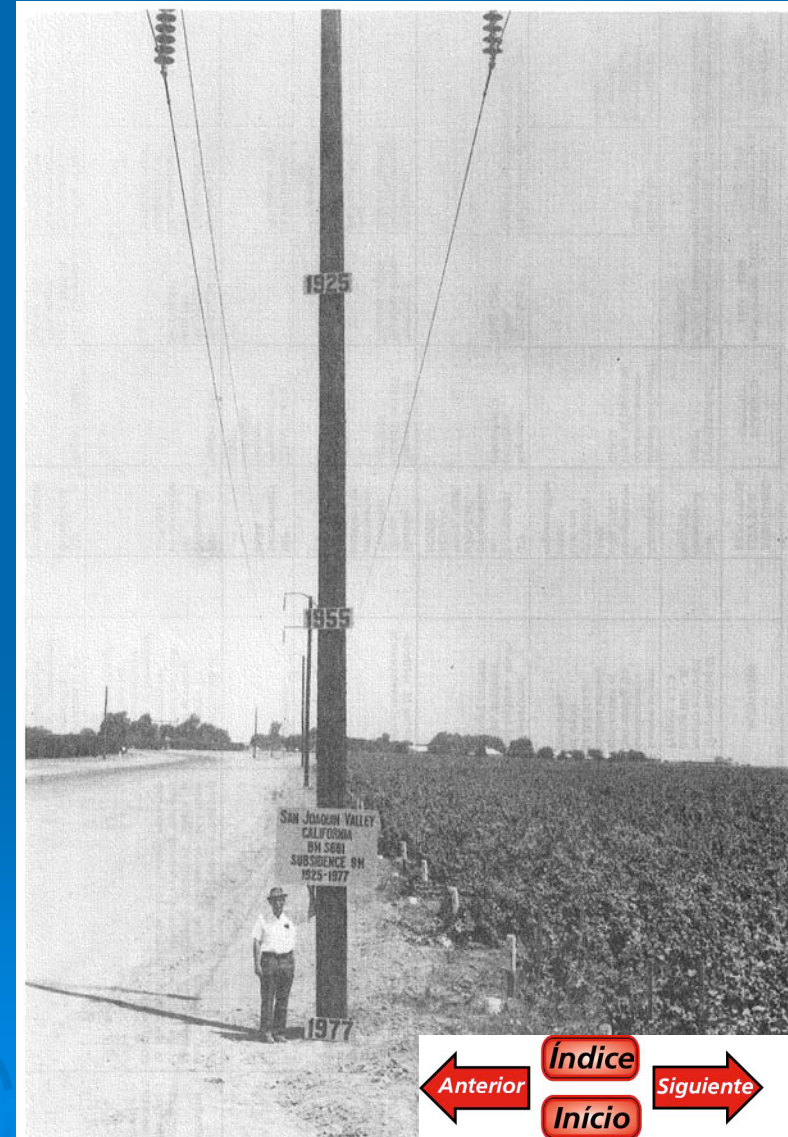
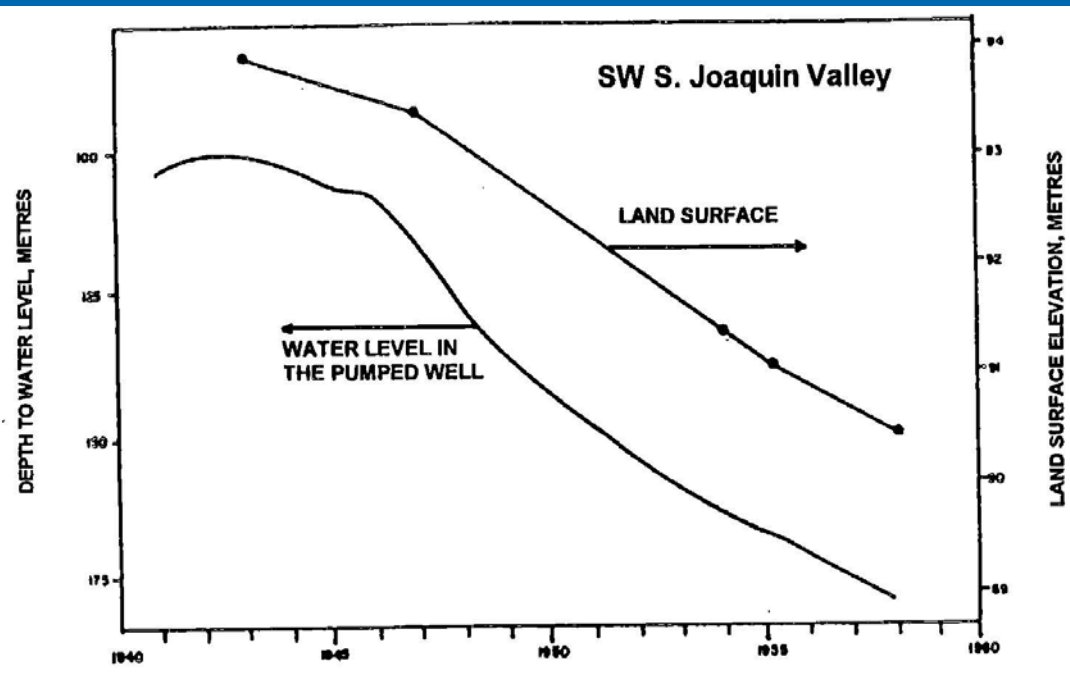
- Modifica flora { sustituciones  
desapariciones
- Dertificación local
- Posible subsidencia / colapso del terreno





**Laguna Redonda, al oeste de El Abalarío, con agua de precipitación, ya que el nivel freático está deprimido por los bombeos de Mazagón–Moguer. Antes era freática**

# Subsidencia generalizada del terreno debida a la extracción intensiva de agua subterránea





# Colapso por descenso y fluctuación del agua subterránea



**Colapso en un área kárstica**  
**Winter Park, Florida**



**Laguna de colapso del terreno**  
**en la Garrotxa**  
**de Ba**





# Estudios hidrológicos de humedales

- Modelo conceptual

- Cuantificar {
  - área de recarga
  - recarga → variabilidad

- Modelar {
  - flujo
  - transporte de solutos

- \* difícil simular {
  - superficie libre
  - descarga en humedal
  - relaciones con aguas superficiales
  - tránsito a otras aguas
  - flujo tridimensional

- \* humedal es con frecuencia un detalle en el contexto regional

- Definir modelo conceptual {
  - piezométricamente
  - hidrogeoquímicamente {
    - solutos mayoritarios
    - solutos minoritarios
    - isótopos ambientales
  - a partir de tiempos de flujo

- Estudiar cambios / fluctuaciones {
  - en hidrodinámica
  - en composición química
    - evaporación
    - cambios redox
  - en características del fondo del humedal

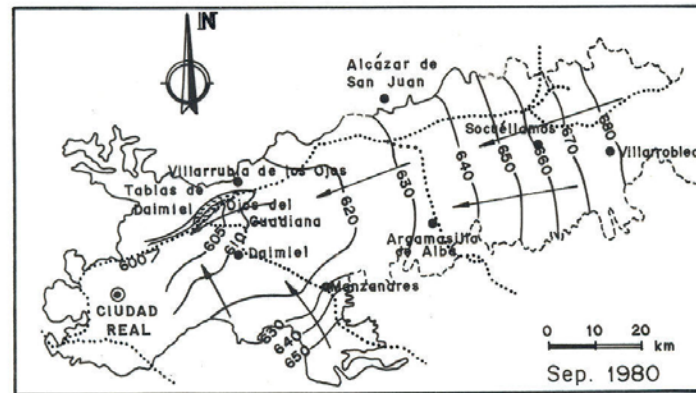
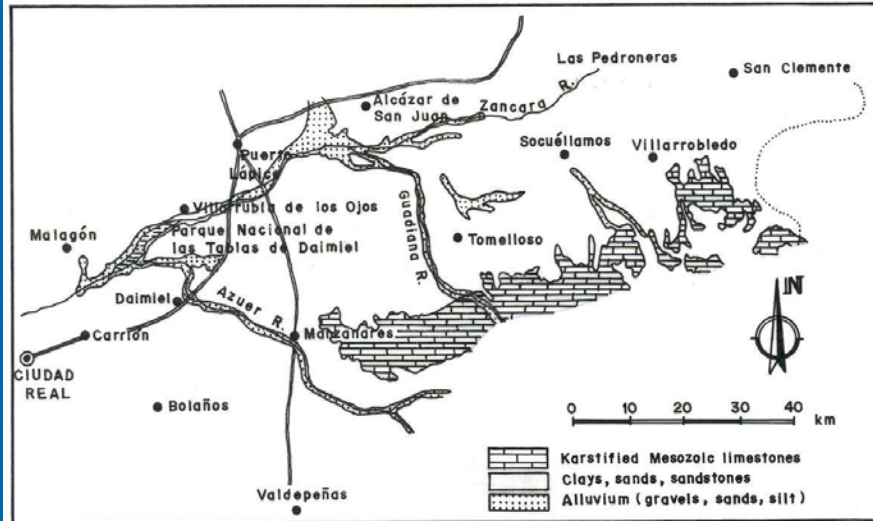




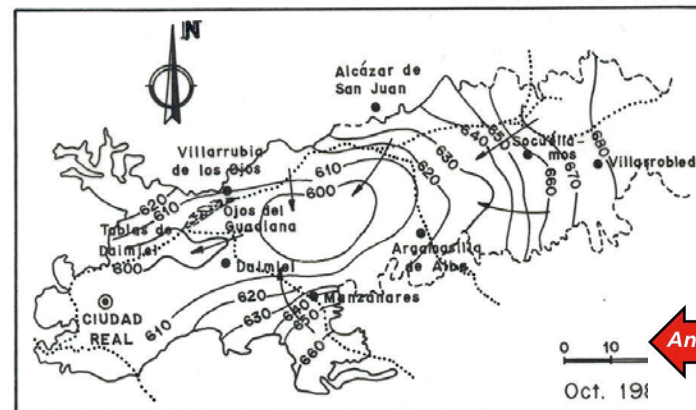


Àrea desecada con turba en oxidación

# Tablas de Daimiel



Poca explotación



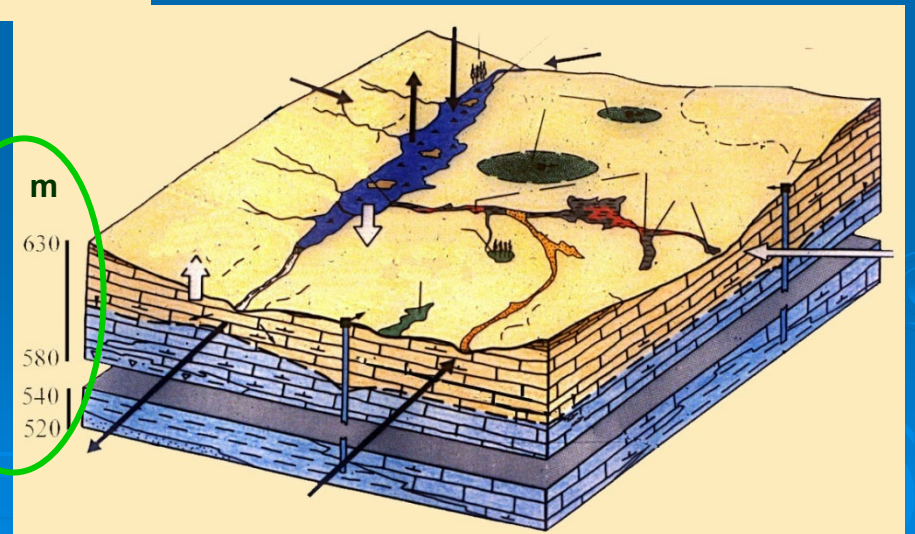
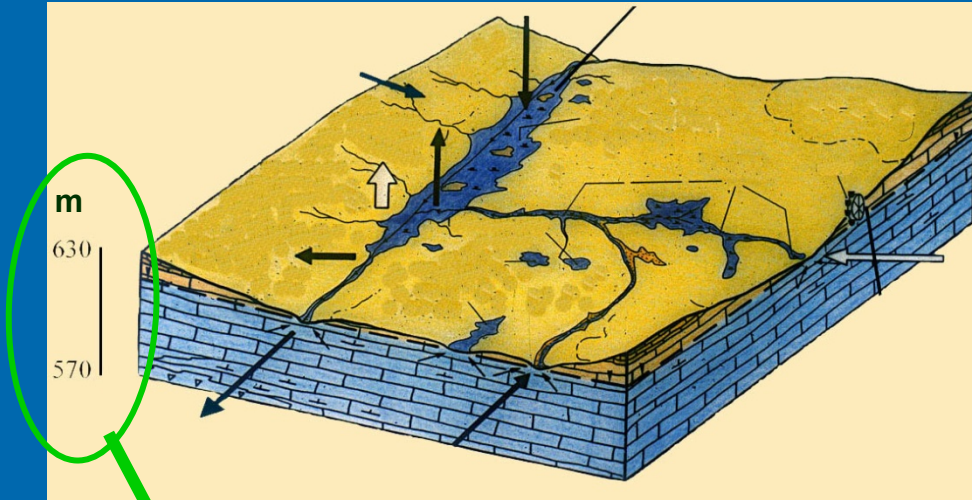
Explotación intensiva



# PARQUE NACIONAL DE LAS TABLAS DE DAIMIEL

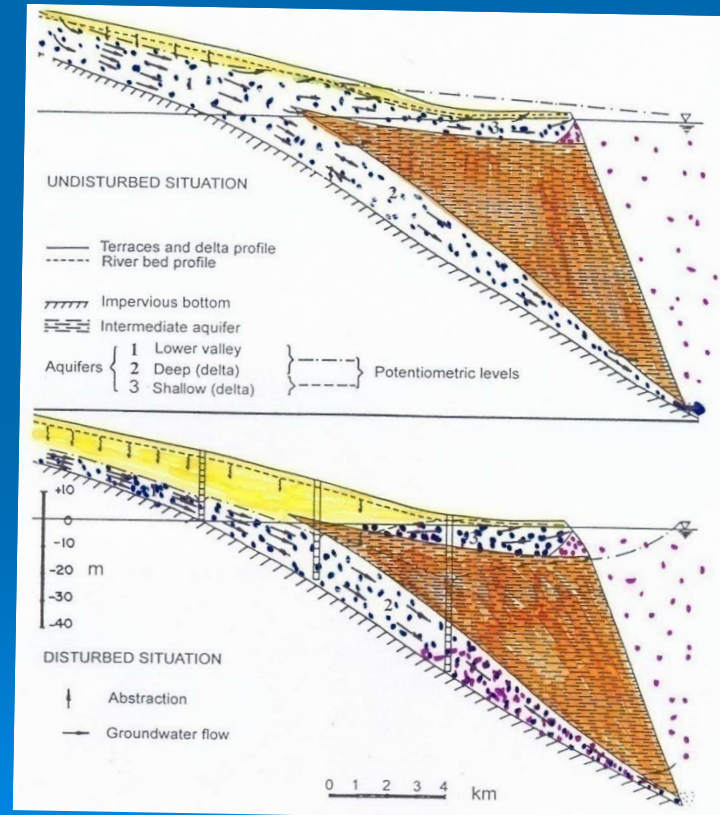
## ESTADO NATURAL

## ESTADO PERTURBADO

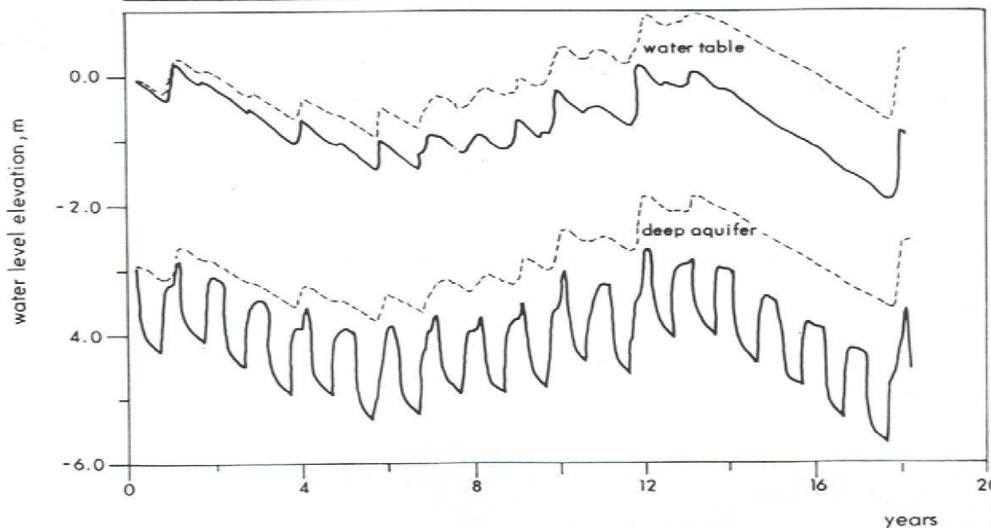
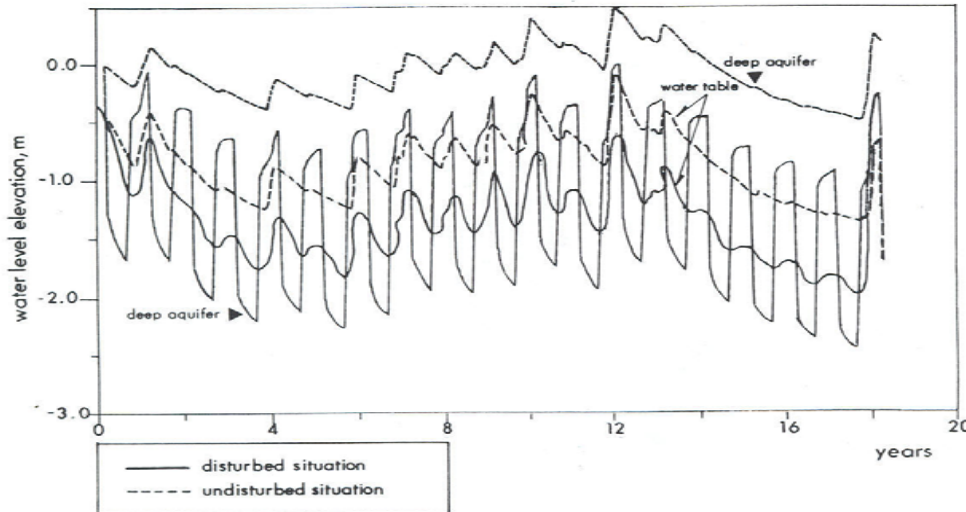


Descenso importante (>30 m) de niveles piezométricos

# Efecto de las extracciones de agua subterránea en el Baix Llobregat







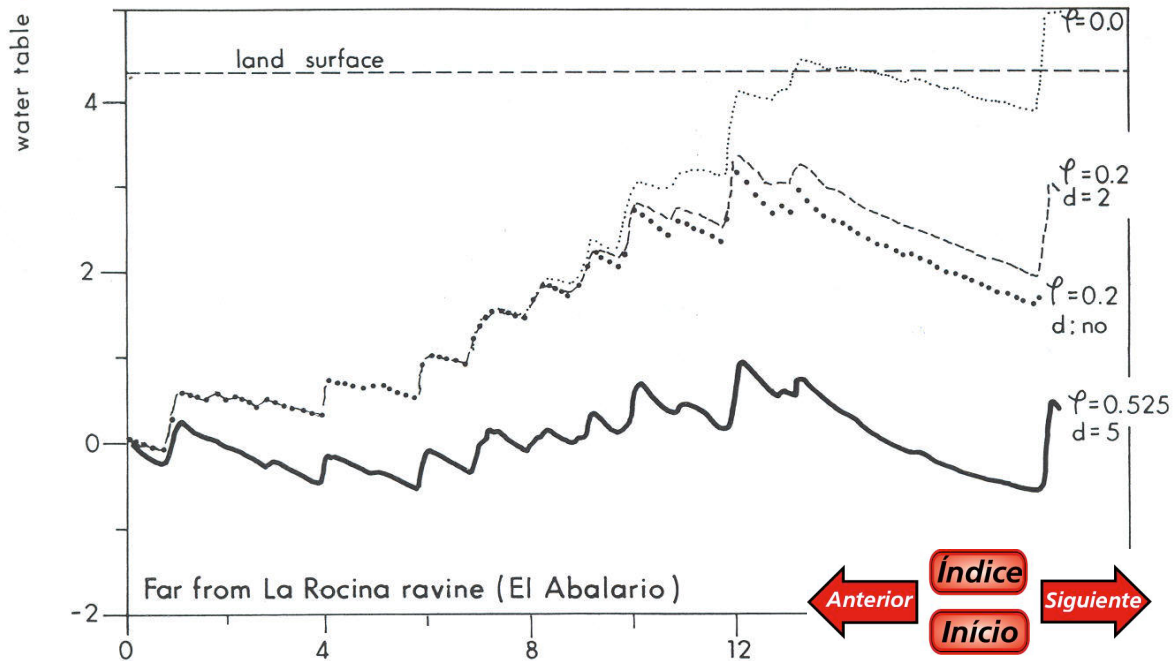
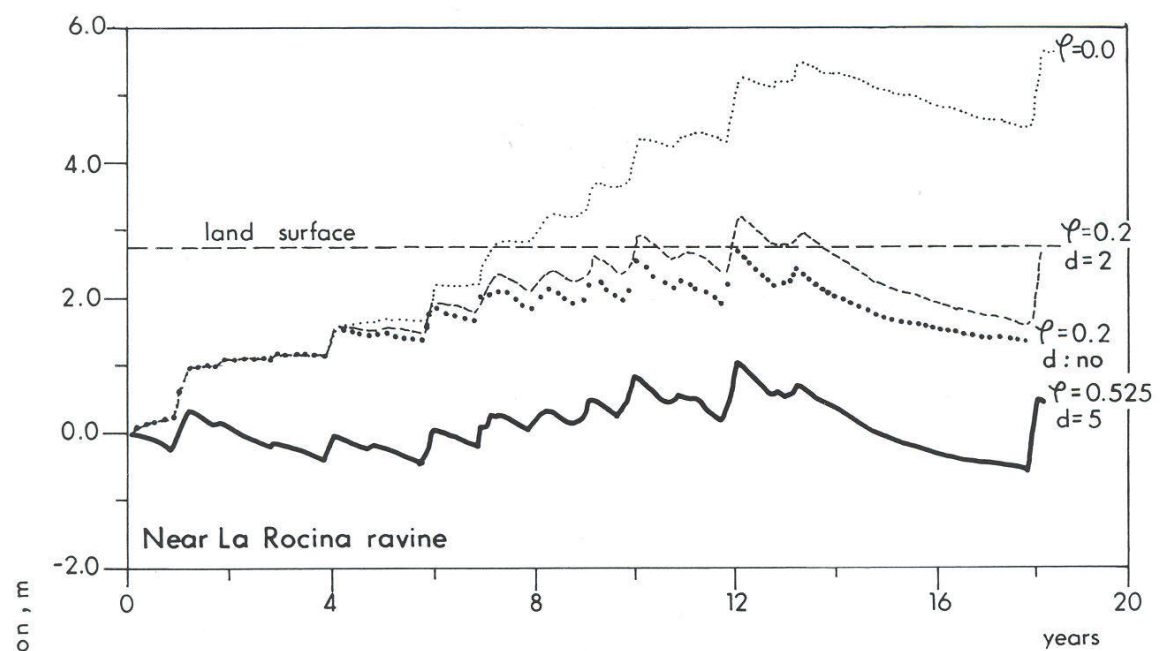
## Efecto de las extracciones de agua subterránea en El Abalarío (Doñana)



# Efecto de los cambios de vegetación en El Abalarío (Doñana)

$d$  = profundidad radical de afección al nivel freático

$\varphi$  = uso del agua m/a



“Paleohidrología y cambio global en el pasado:  
los registros de los lagos en la Península Ibérica  
y su relación con el agua subterránea ”

‘Palaeohydrology and past global changes:  
Iberian Lacustrine records and groundwaters’



Blas Valero Garcés

Instituto Pirenaico de Ecología - CSIC



# Los lagos son sensores del balance hídrico



Ibón de Estanés



Radiotelescopio de Arecibo (Puerto Rico)



# Paleolimnología y Paleohidrología

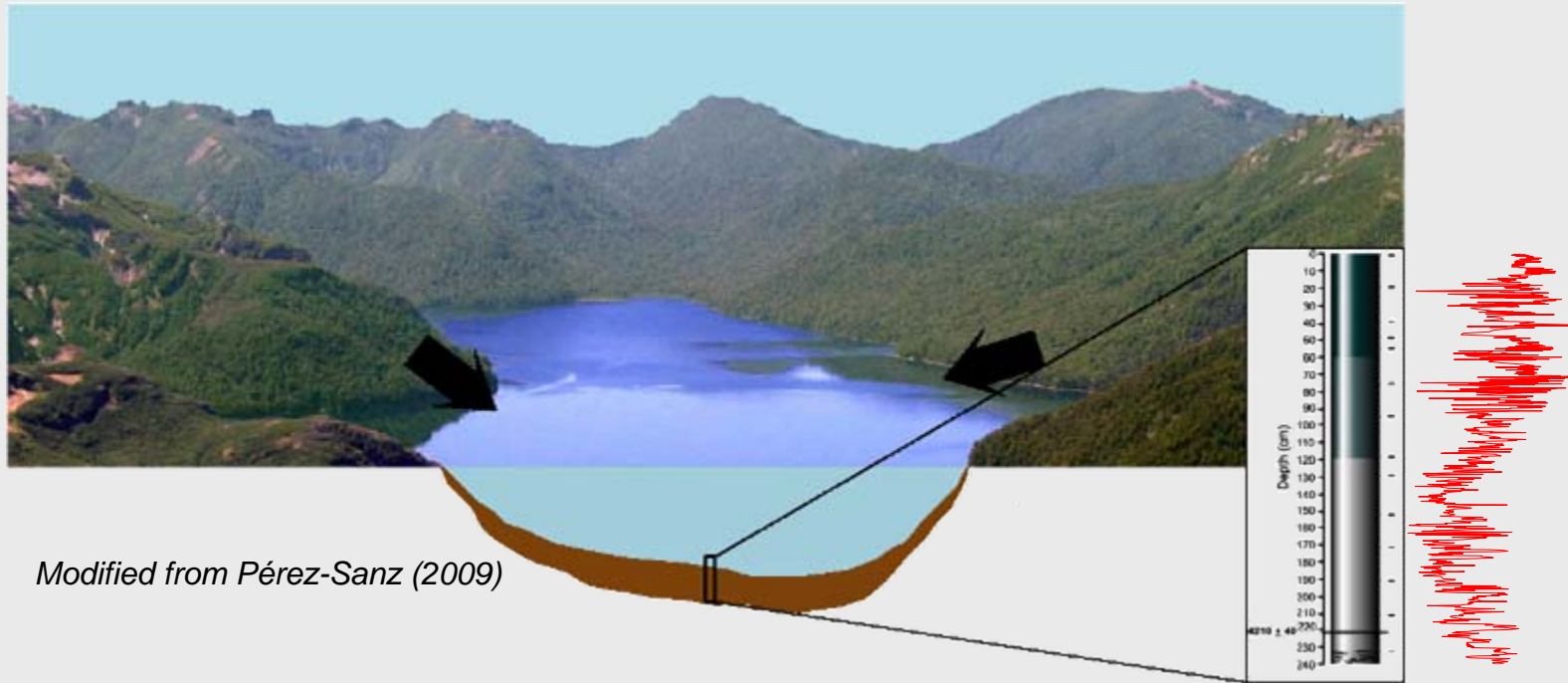
- Los lagos son sensores hidrológicos del pasado
  - Metodologías en paleolimnología
- Algunos ejemplos ibéricos
  - Lagos Kársticos: Taravilla, Estanya
  - Lagos salinos: Saladas de la Depresión del Ebro
- Implicaciones para el Cambio Global
- ¿Cómo avanzar?





# Lagos como sensores

**LAKE RECORDS:** Archives of **past** environmental conditions in **continental** areas



*Modified from Pérez-Sanz (2009)*

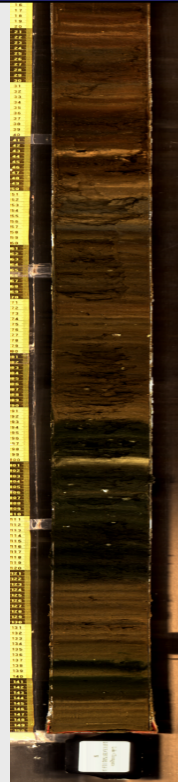
**Hydrological, geomorphological and vegetation changes associated to climate and/or land-use modifications:**

- ✓ **Long, continuous series**
- ✓ **High temporal resolution** ← high sedimentation rates
- ✓ **High number of environmental variables to be reconstructed:**
  - Hydrological balance
  - Lake waters chemical composition
  - Clastic input variability
  - Lake's biota
  - Limnological (water T(°C), EC) and atmospheric variables (T)



## ¿qué es un lago...?

- Una trampa de polen
- Un almacén de agua
- Una pecera
- Una trampa de sedimentos
- Una zona de descarga del acuífero



## ¿de donde vienen los indicadores? sedimentos

- Filtro hidroclimático
- Mezcla de partículas
- Procesos de depósito: Erosión, transporte y sedimentación
- Bioturbación
- Aguas subterráneas
- Diagénesis

### ARCHIVOS “CONTENEDORES”:

- Cuenca lacustre, geomorfología

### ARCHIVOS “CONTENIDOS”

(=indicadores, proxies)

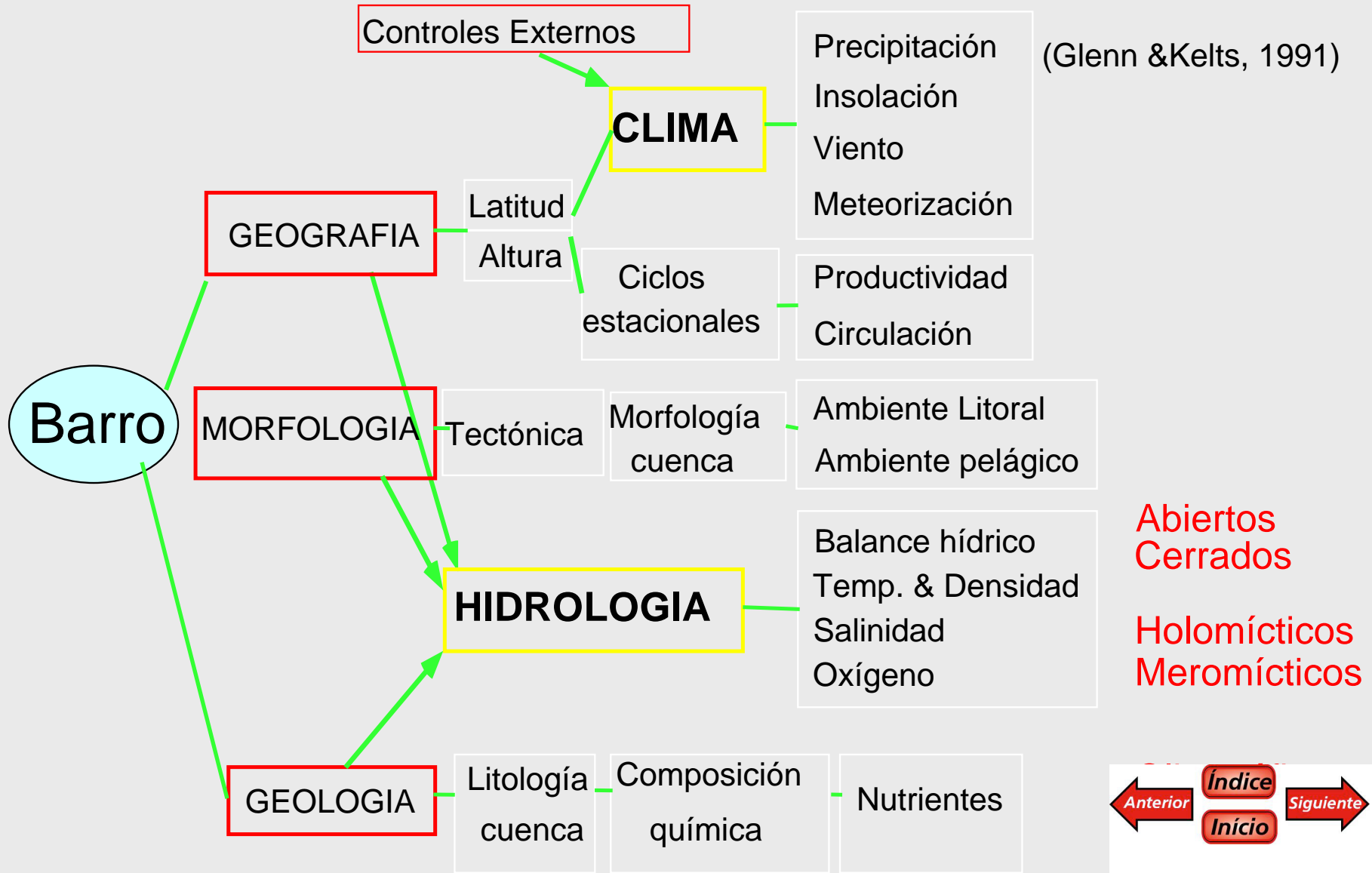
- Agua
- Sedimentos:
  - Terrigenos
  - Químicos, biológicos,
  - Cosmogénicos, volcánicos
  - Aerosoles, contaminantes
  - Fósiles



Lago = una entidad geológica



# Controles Sedimentación



# Tipos de lagos en España: Hábitats ecológicos

- **Tipo 1.-** Lagunas y humedales fluviales (en curso medio-bajo: 1.1 - llanuras de inundación o 1.2 - meandros abandonados; 1.3. - de represamiento en curso alto).
- **Tipo 2. -** Sistemas de alta montaña (morfogénesis glacial o periglacial) (2.1.- glacial o 2.2.- glacio-karst).
- **Tipo 3.-** Lagos y lagunas profundos kársticos (exokársticos) calcáreos.
- **Tipo 4.-** Lagos y lagunas profundos kársticos (exokársticos) sobre yesos (corresponde al tipo de hábitat de interés comunitario 3190).
- **Tipo 5.-** Lagunas someras salinas (origen kárstico inducido, karst no funcional, u otros orígenes).
- **Tipo 6.-** Lagunas y humedales someros no salinos (origen kárstico inducido) de aguas alcalinas (6.1.- permanentes o 6.2.- temporales).
- **Tipo 7.-** Lagunas y humedales someros no salinos (origen morfoestructural) de aguas ácidas y/o de baja alcalinidad (7.1.- permanentes o 7.2- temporales).
- **Tipo 8.-** Lagunas volcánicas.

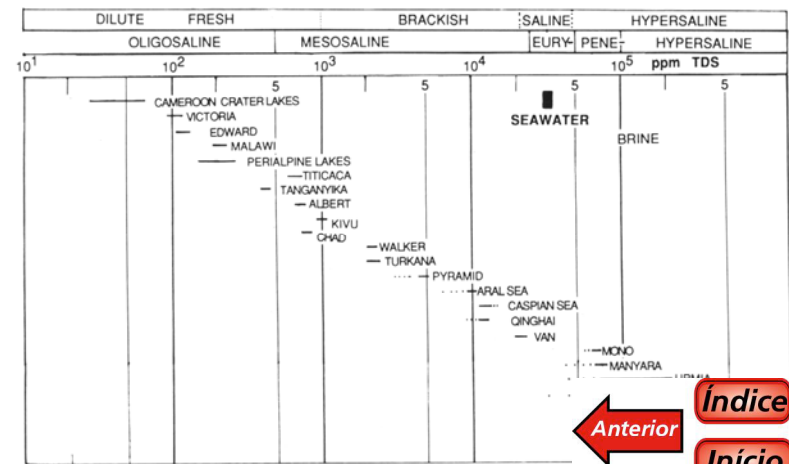


# Lagos como sensores

- Open: with an outlet (surface)
- Closed: without an outlet

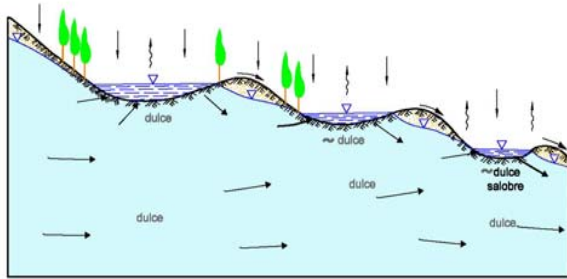


Large range in salinity, chemical composition, pH, organic productivity, residence time: freshwater (< 5 per mil) brackish, saline, hypersaline....

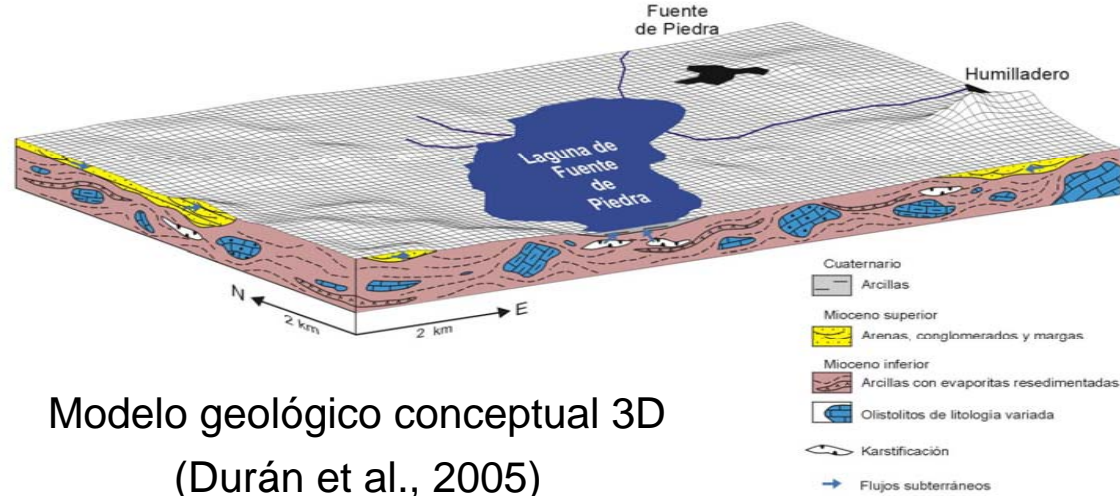
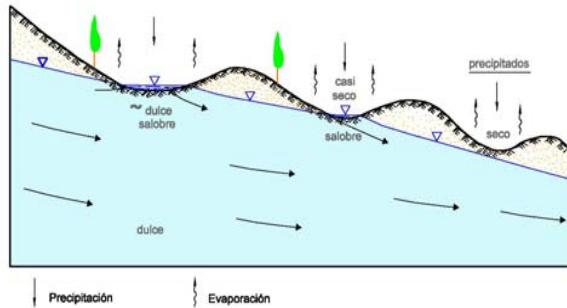


# Lagos como sensores

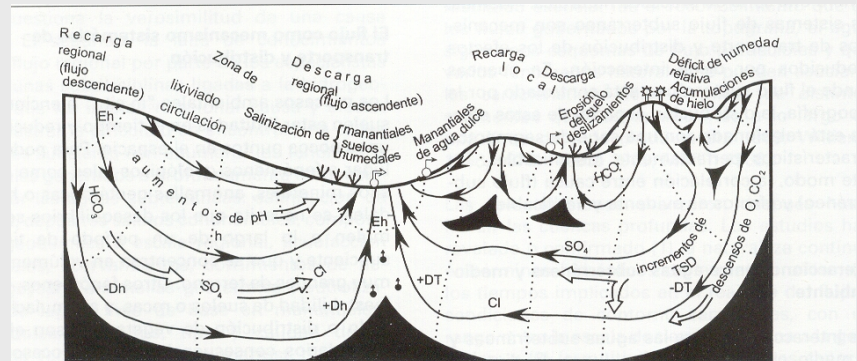
## HUMEDALES



Cambio ↓ Climático



Modelo geológico conceptual 3D  
(Durán et al., 2005)



### LEYENDA

- Linea equipotencial
- Linea de corriente
- Manantial: frío, caliente
- ☼ Plantas freatofitas
- ☼ Plantas xerofitas
- Eh<sup>+</sup> Condiciones Redox: oxidantes
- Eh<sup>-</sup> reductoras
- Trazas minerales (metálicos, evaporitas, hidrocarburos) por encima de los valores de acumulación
- Dh Niveles piezométricos: subhidrostáticos
- h hidrostáticos
- +Dh superhidrostáticos
- ▲ Trampa hidráulica: convergencia y acumulación de materia transportada y calor
- ▲ Zona estagnante: incremento TSD
- +DT, -DT Temperatura geotermal y anomalía en los gradientes: positiva, negativa

Humedales y acuíferos (López-Geta, 2009)

Modelo flujo de agua subterránea  
relación con humedales







... ¿ serán registros  
paleohidrológicos

y de actividad de aguas subterráneas ?





# PALEOLIMNOLOGÍA





# Análisis de Cuenca

- Indicadores “primarios: de evolución lacustre...
  - Geomorfología (terrazas)
  - Estratigrafía sísmica



Indicadores secundarios: tienen que “interpretarse”...





# Sondeos...





# Sondeos...









# Sondeos...



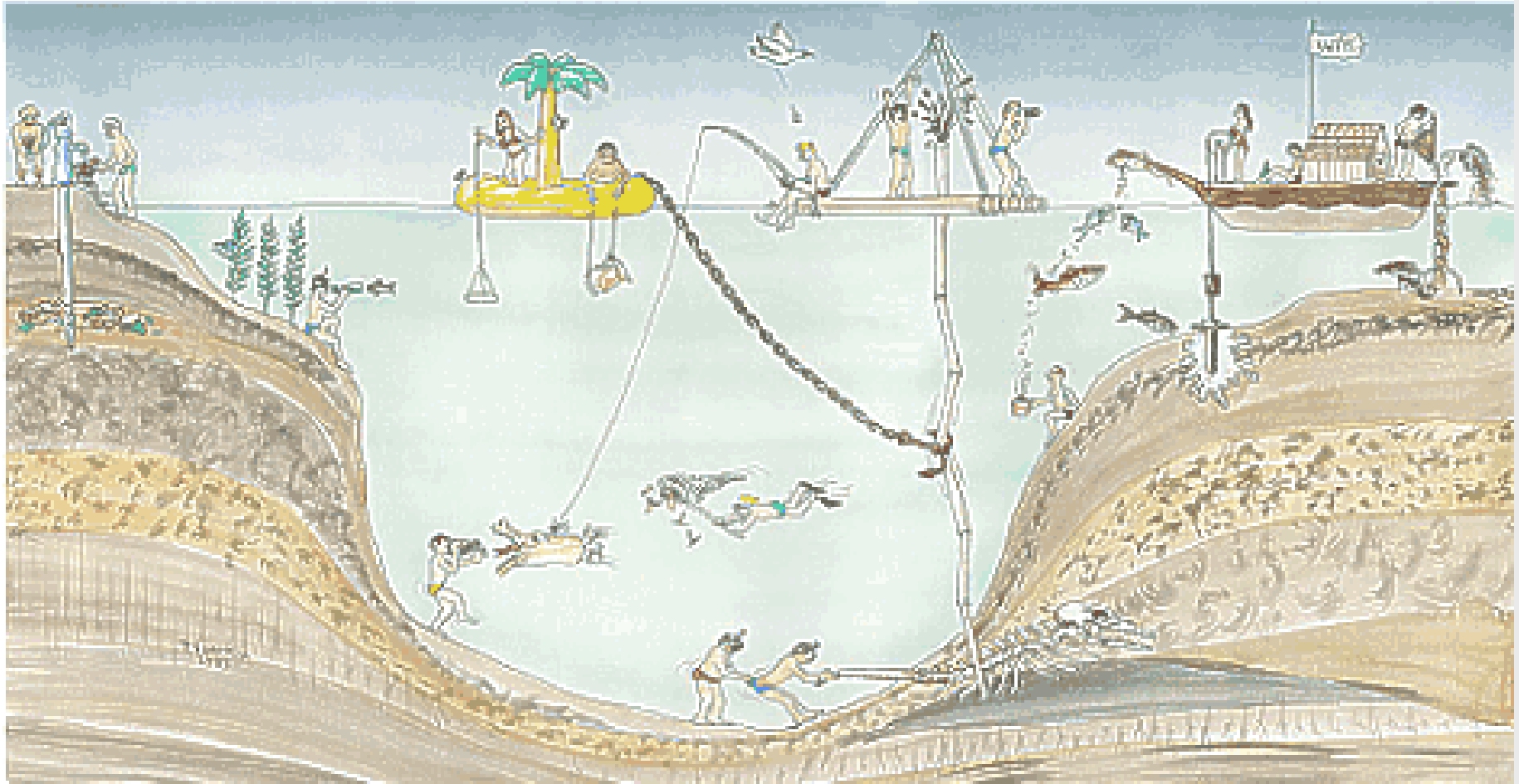
# Sondeos...

groundwater

water

platforms

freeze core



underwater  
video

plankton

sediment

← Anterior **Índice** Siguiete →  
**Início**







# Sondeos...











## Expedición Limnocliber 2004



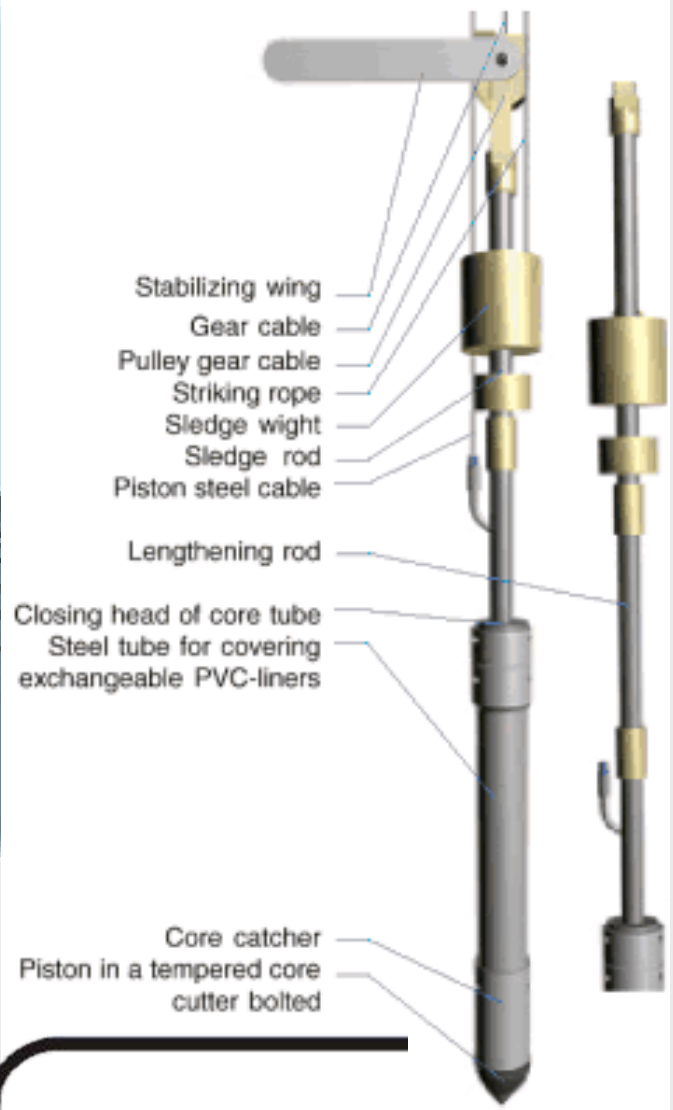
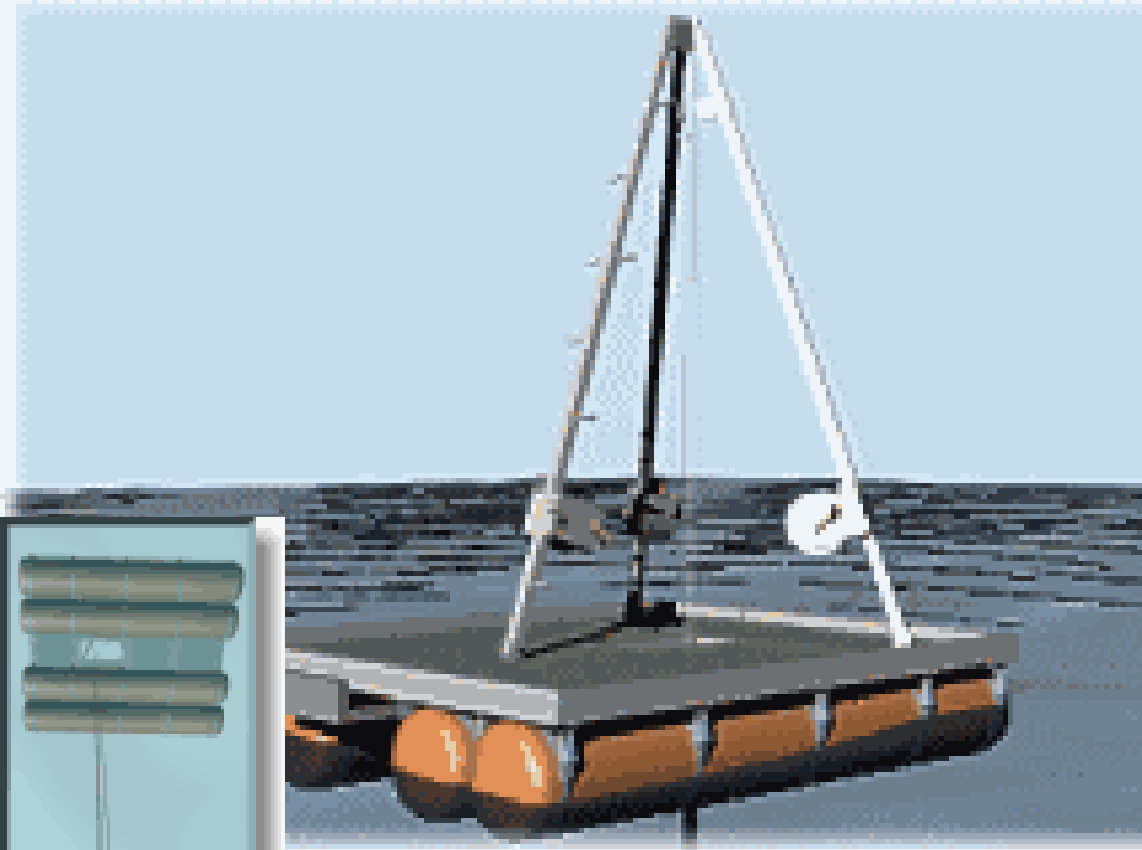
# Plataforma UWITEC *La Pascuala*



Botadura: 23 Enero 2006



# Sondeos...



**UWITEC**



# La Plataforma GLAD800







Una vez conseguido el barro...

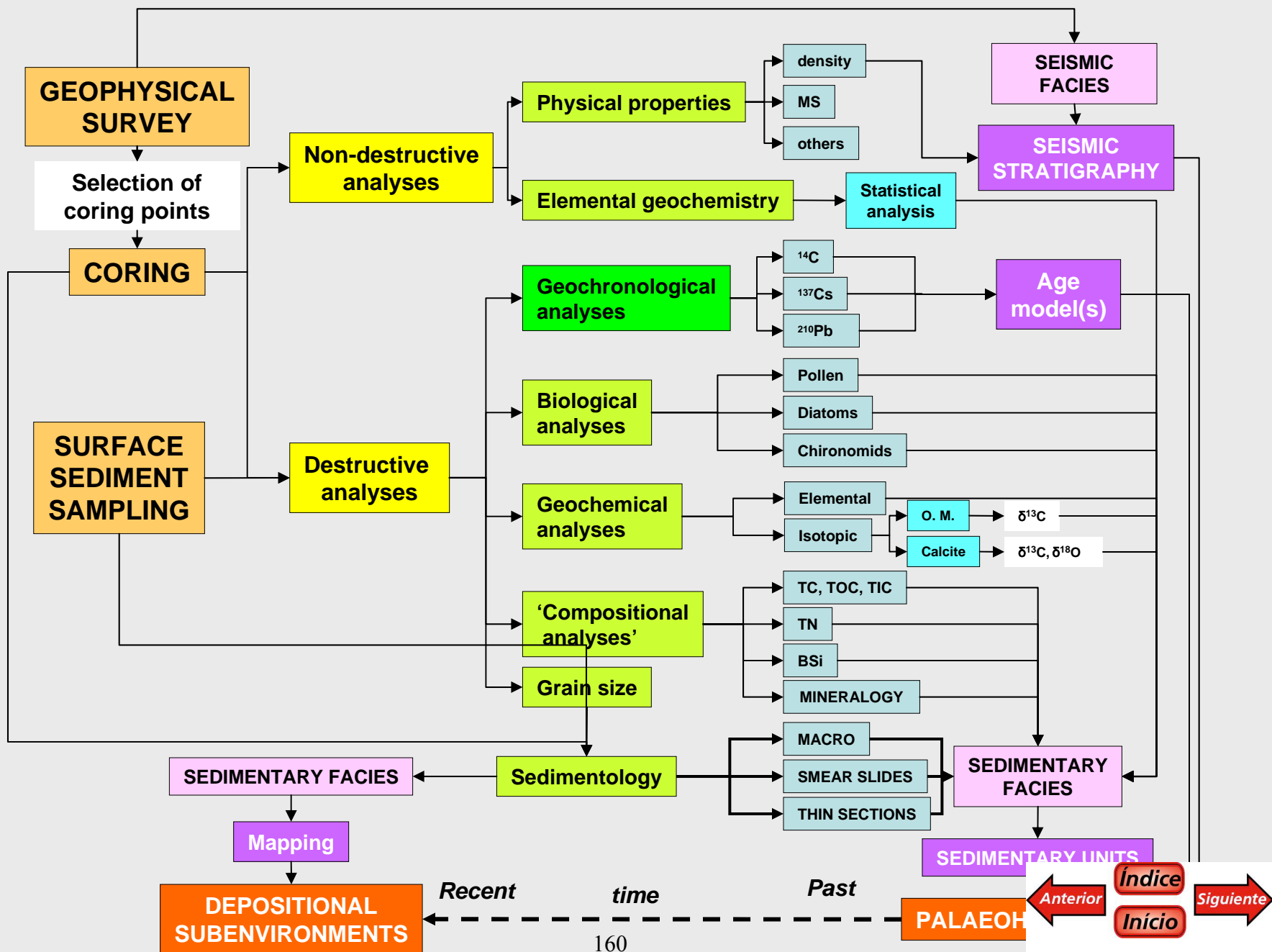




# Trabajo de Laboratorio



# METODOLOGIA



# Indicadores ambientales

<b>Nivel lago</b>	<b>Costas, Facies</b>
<b>Tasa sediment.</b>	<b><math>^{137}\text{Cs}</math>, <math>^{210}\text{Pb}</math>, <math>^{14}\text{C}</math>, paleomagnetismo, varvas</b>
<b>Productividad</b>	<b>Corg., pigmentos, biomarcadores, <math>\delta^{13}\text{C}</math></b>
<b>Nutrientes</b>	<b>Biota, plancton</b>
<b>Avenidas</b>	<b>Litología, facies</b>
<b>Salinidad</b>	<b>Ca/Sr, Mg/Sr Na/Sr, biota <math>\delta^{18}\text{O}</math></b>
<b>Comp. Química</b>	<b>Mineralogía, biota</b>
<b>Vegetación</b>	<b>Polen</b>
<b>Erosión</b>	<b>Facies</b>
<b>Estacionalidad</b>	<b>Biota, polen, facies</b>
<b>Anoxia</b>	<b>Varvas, pigmentos</b>
<b>Ciclicidad</b>	<b>Varvas, facies</b>





# Some examples: Iberian Lakes

Best records for the reconstruction of changes in effective moisture

Mediterranean areas:

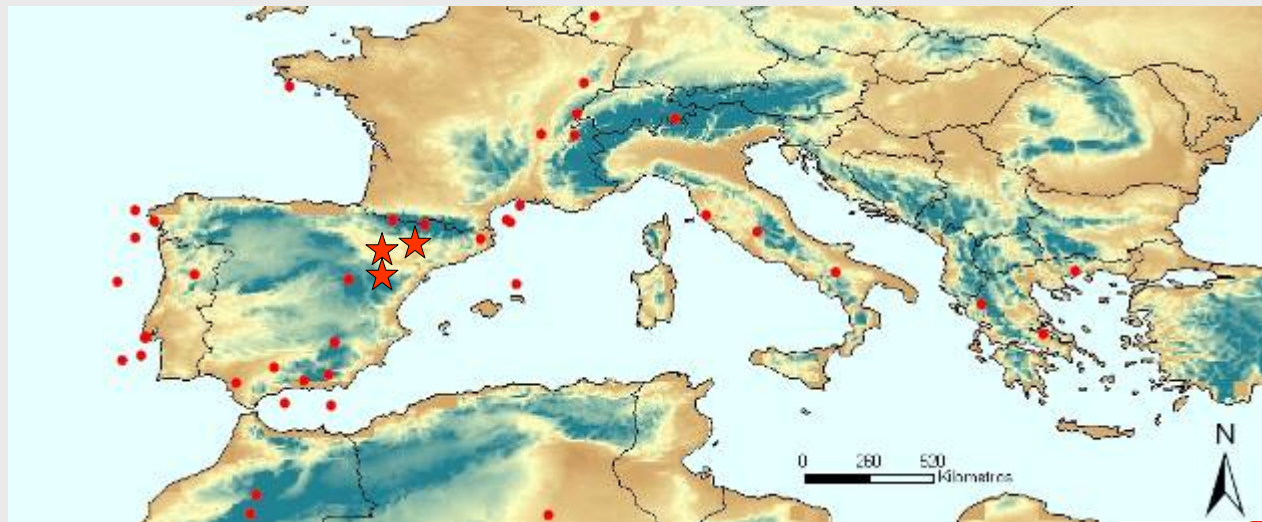
- Sub-polar / Sub-tropical area
- Predominantly semi-arid conditions
- Long history of human occupation



High sensibility to hydrological changes



Special interest of palaeohydrological reconstructions

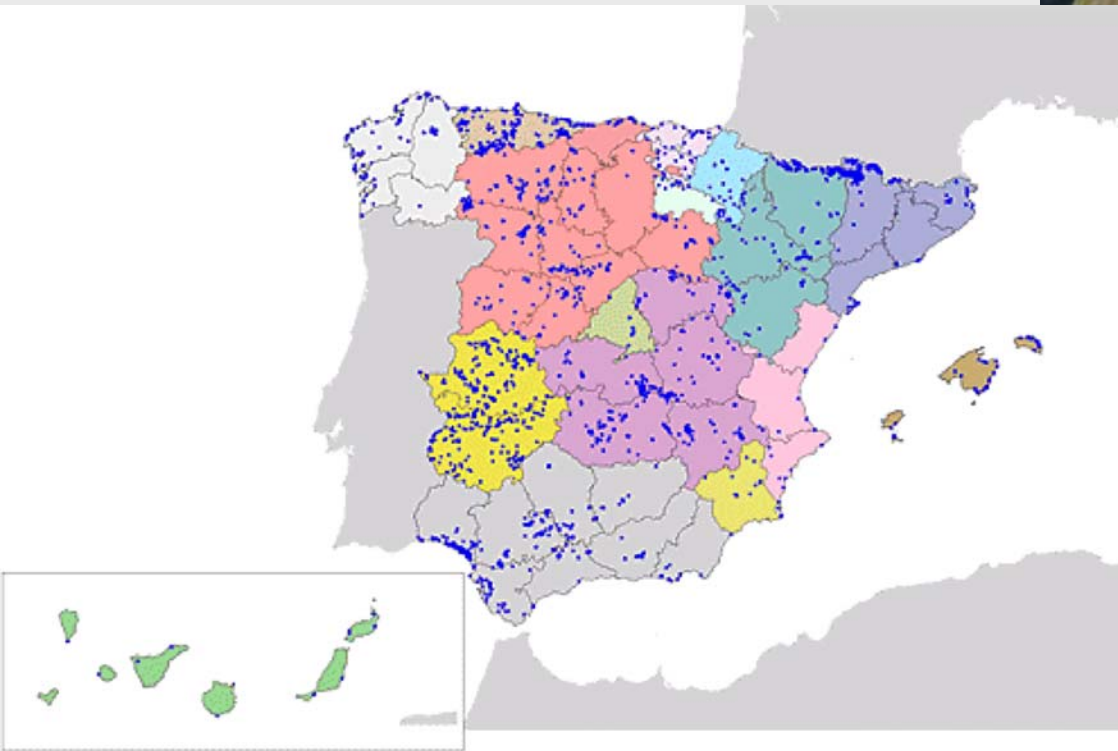


However, most reconstructions are pollen-based and lack an adequate **chr** resolve abrupt climate fluctuations → more records are needed!



# LAKE SEQUENCES

Principales zonas húmedas recogidas en el Inventario Nacional de Zonas Húmedas de España. Fuente: MIMAM.



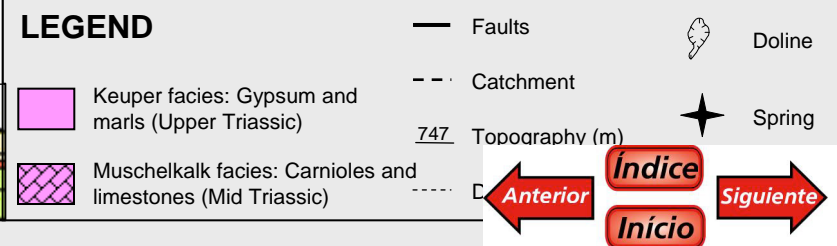
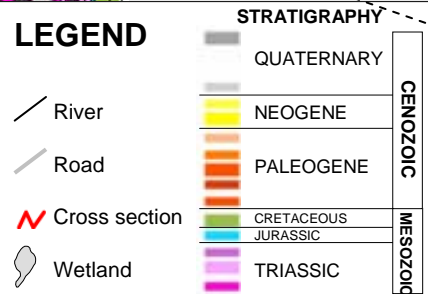
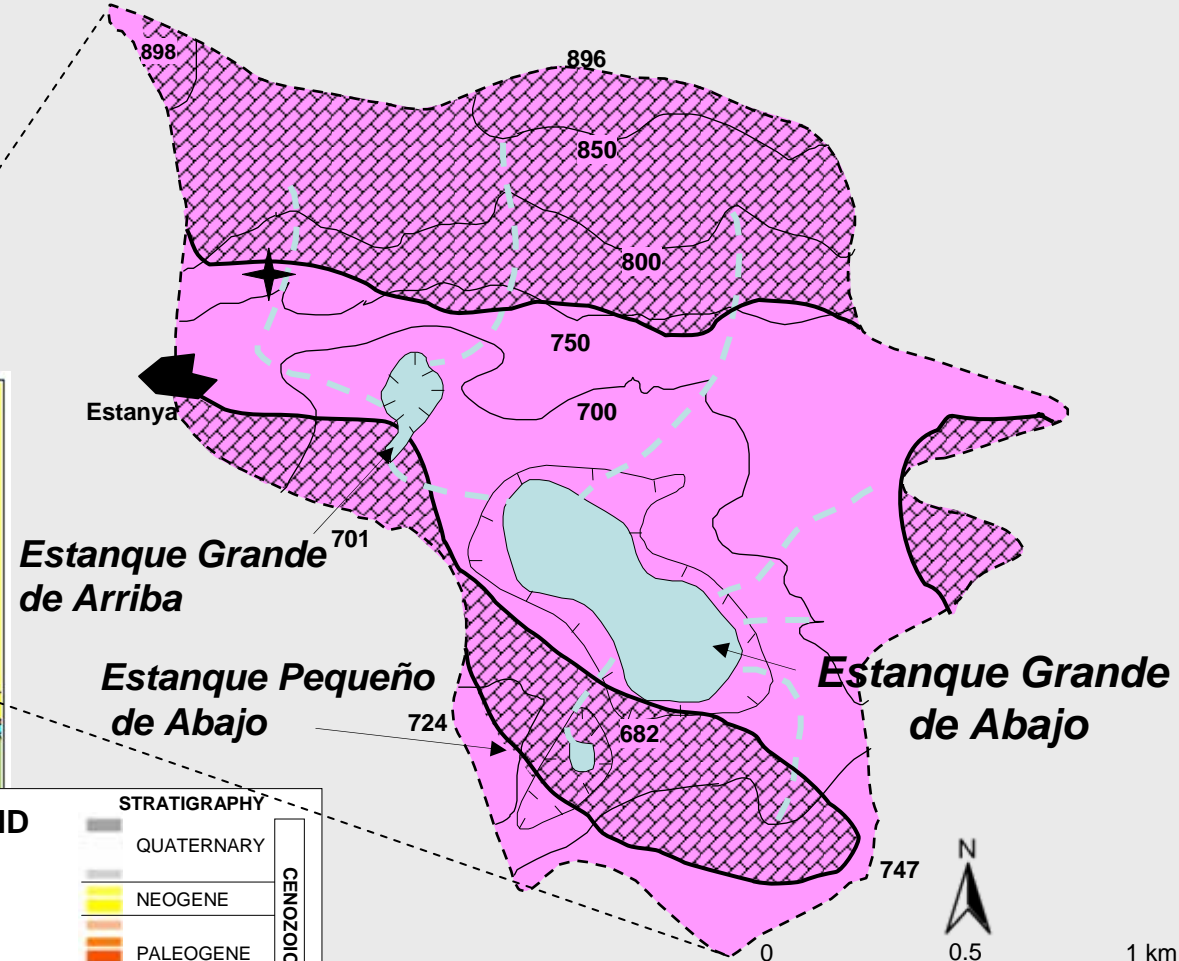
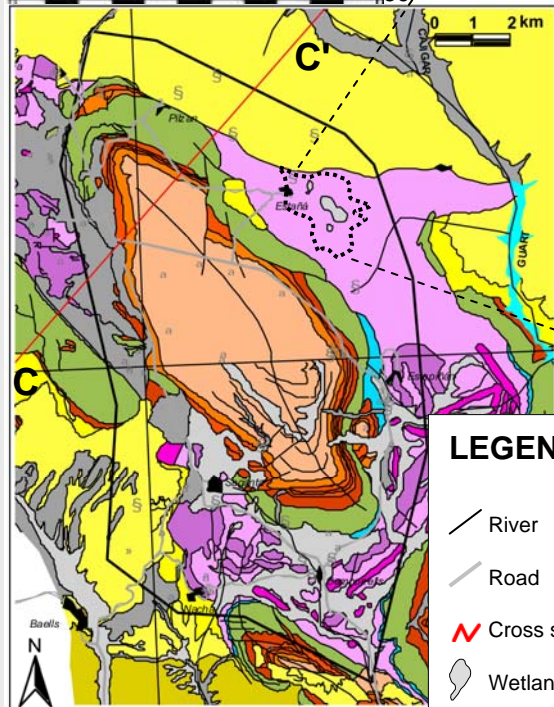
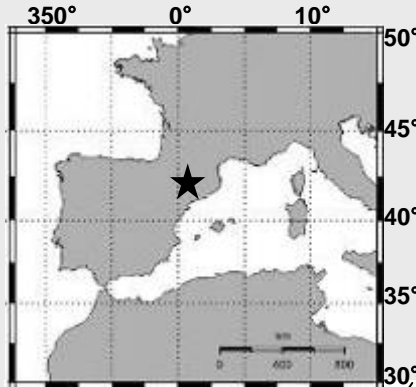




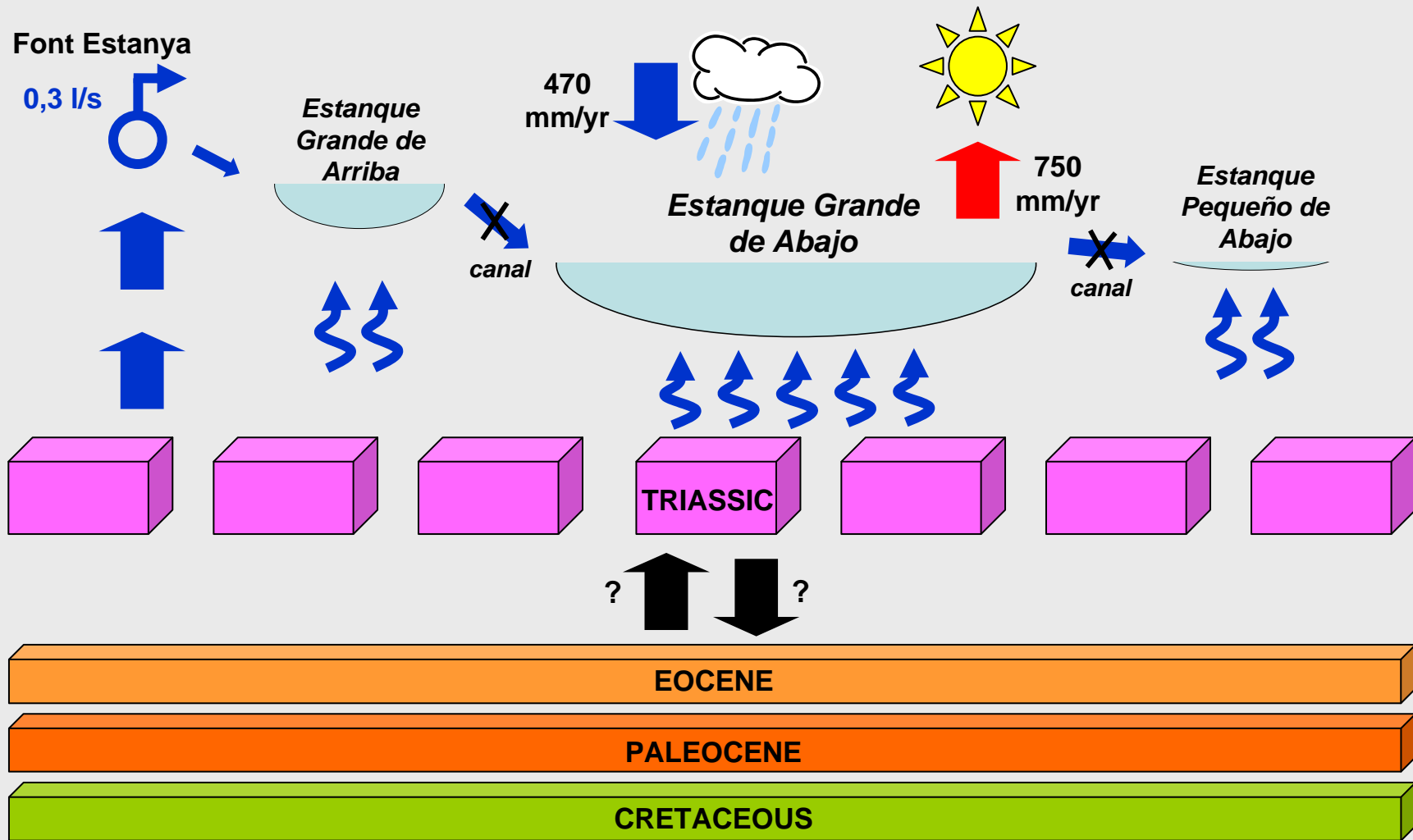
## Balsas de Estanya



# Estanya



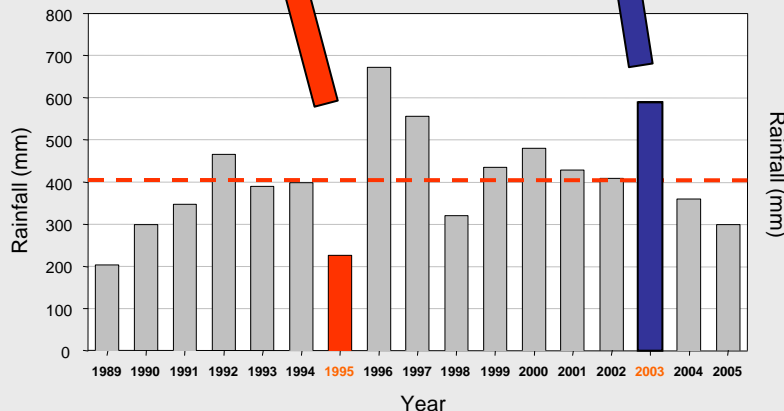
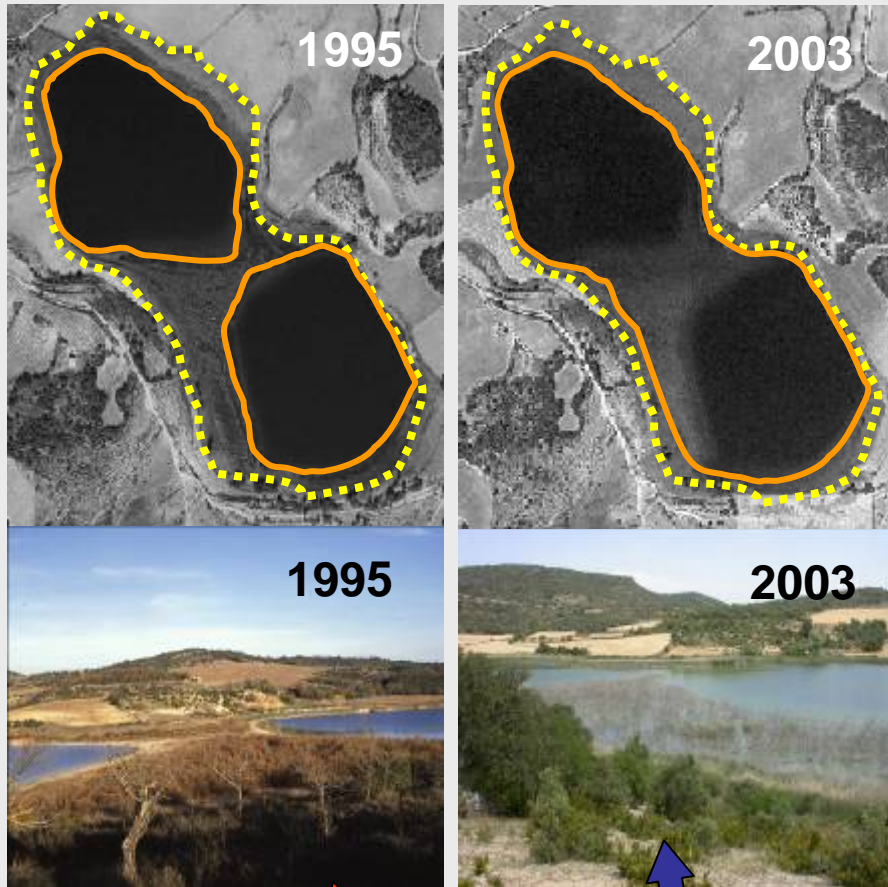
# Estanya



(Modified from Villa and Gracia, 2004)



# Estanya



- **Lake hydrology:**

- Groundwater input vs. evaporation output

- Excellent **sensor** of **effective moisture changes**

- **Evidences of relatively rapid response of water level to rainfall variability:**

- *Dry year 1995* → **isolation** of NW and SE sub-basins

- *Humid year 2003* → **sill** separating the 2 sub-basins **submerged**, at 2-3 m water depth

- **Hydrometeorological balance** in progress (Pérez et al., 2008)  
– IGME (I+D) project

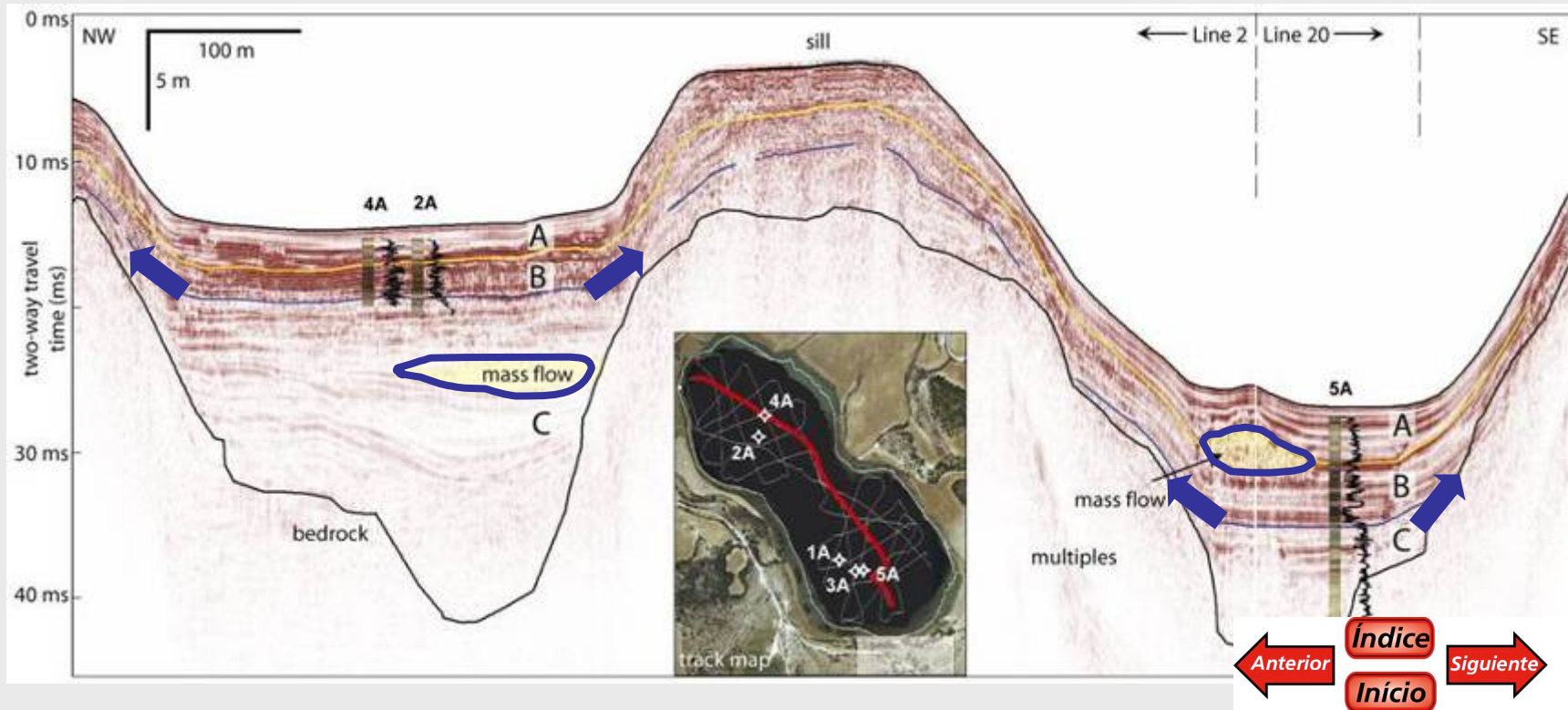
Source: Ebro Basin Watershed Au





Seismic stratigraphy coherent with sedimentary units, indicates:

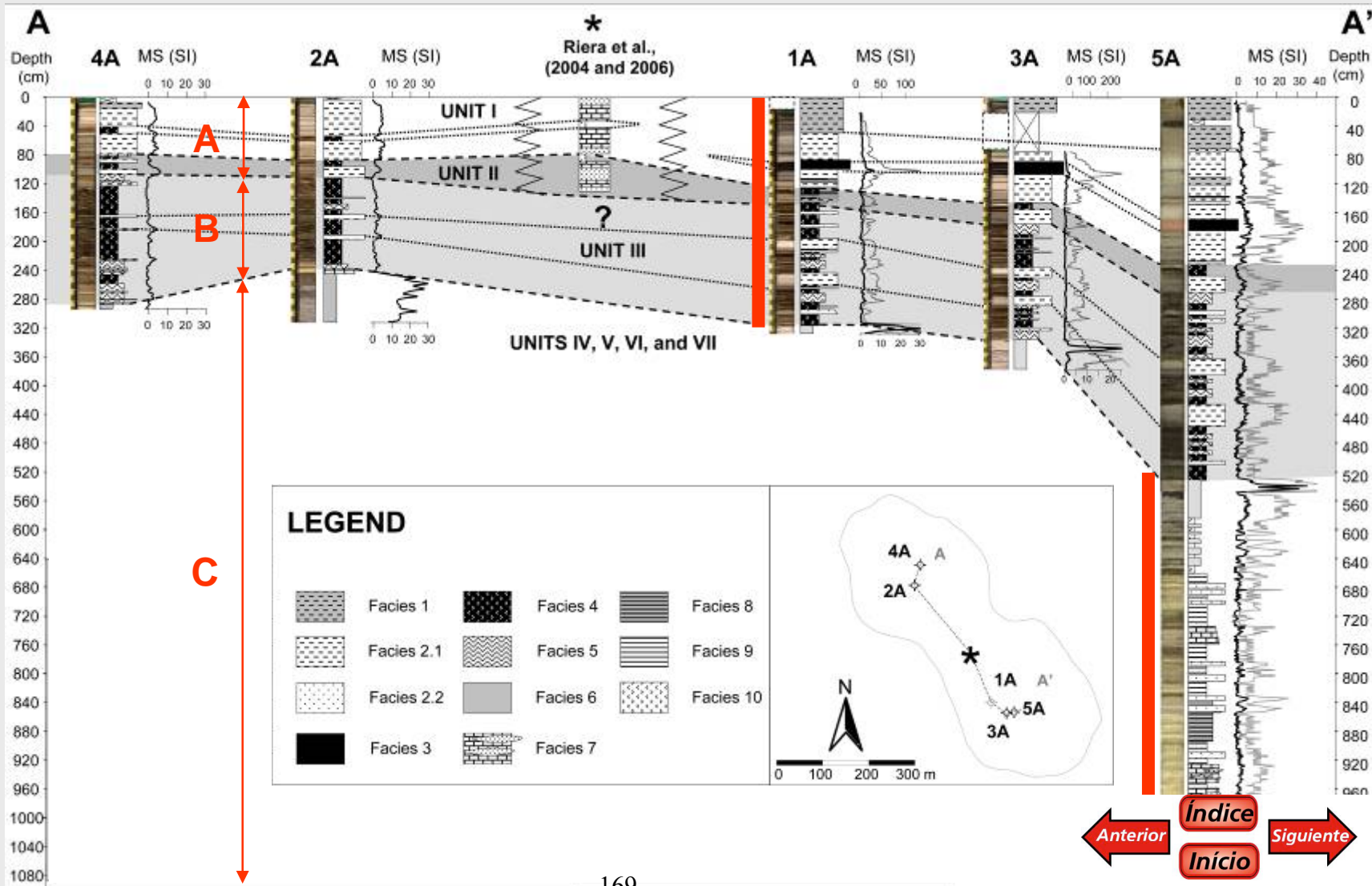
- i. A **transgressive episode** leading to the connection of the 2 sub-basins at the **Early Holocene** (ca. 9.4 cal kyrs BP)
- ii. Presence of **mass flows**, controlled by hydrological fluctuations and/or regional seismic events



# Estanya: Cores correlation

- 10 sedimentary facies
- 7 sedimentary units

• Good correspondence sedimentary – seismic units



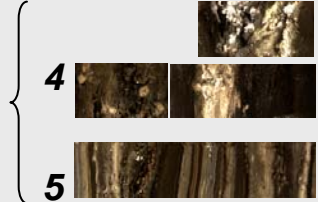
# Estanya: Sedimentary facies

## FACIES

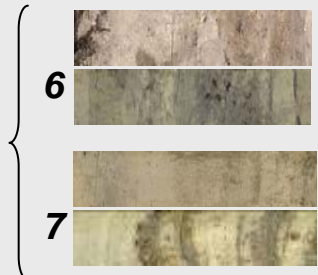
### CLASTIC FACIES



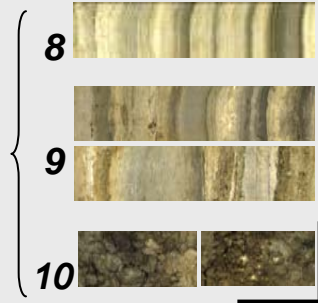
### ORGANIC-RICH FACIES



### CARBONATE-RICH FACIES



### GYPSUM-RICH FACIES



5 cm

## DEPOSITIONAL ENVIRONMENTS

*Deep, monomictic, seasonally stratified, freshwater to brackish lake*

*Relatively deep, saline lake with microbial mats*

*Ephemeral saline lake – mud flat*

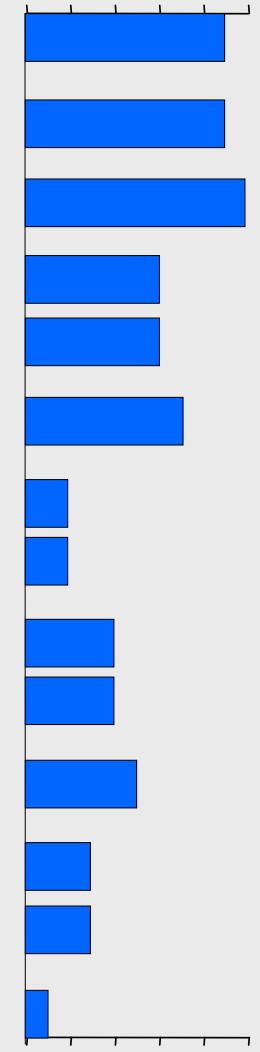
*Shallow, carbonate-producing lake*

*Permanent, saline lake with saline stratification*

*Permanent, saline lake*

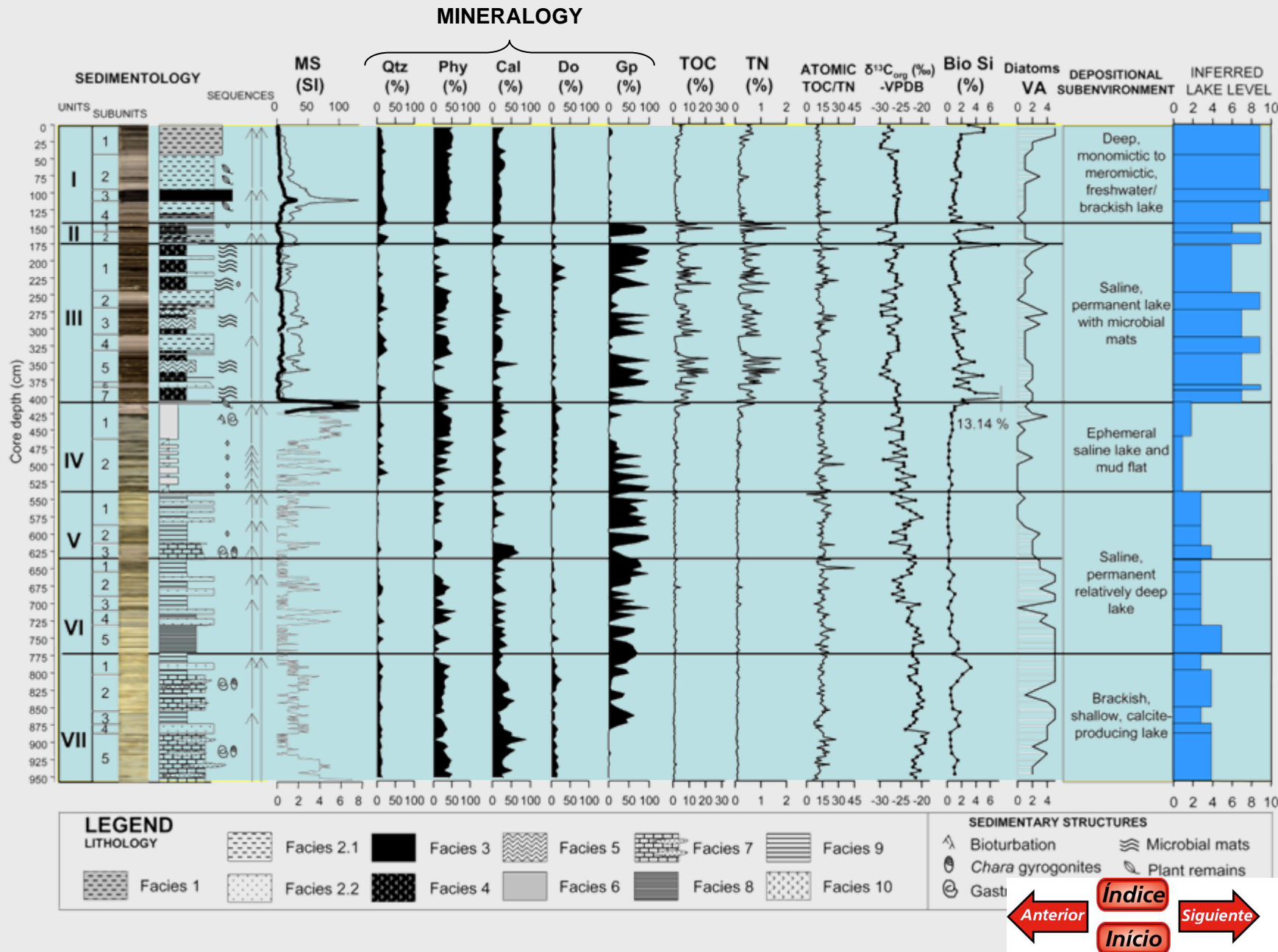
*Ephemeral saline lake – mud flat*

## LAKE LEVEL

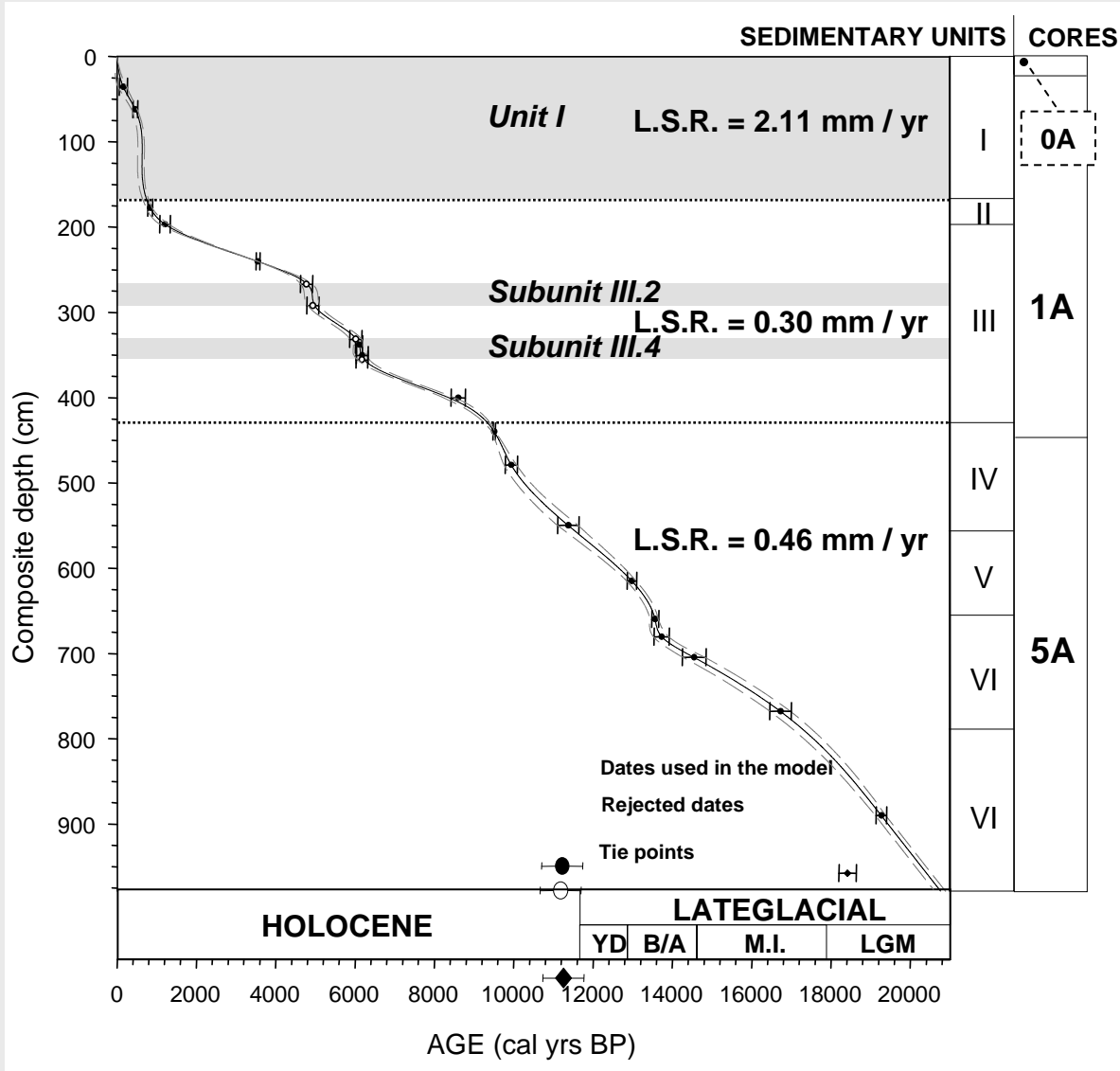




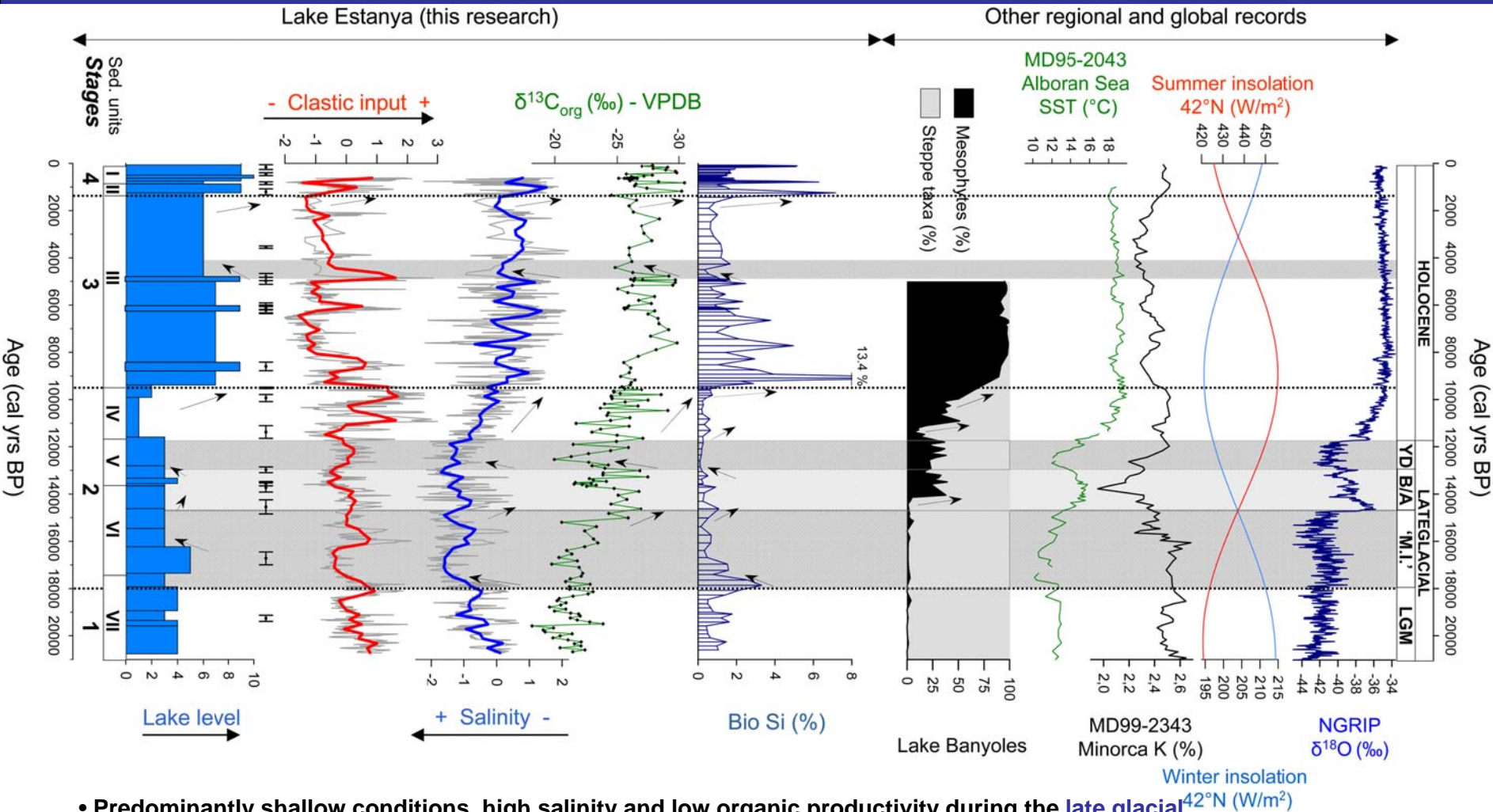
# Estanya: The sedimentary sequence



# Estanya: Age model



# Estanya: Palaeohydrology Lateglacial/Holocene



- Predominantly shallow conditions, high salinity and low organic productivity during the late glacial
- Higher lake level, lower salinity and increased bioproductivity during the Holocene
- ‘Moderate’ lake level during the LGM
- Most arid conditions occurred during: the Mystery Interval (18 -14.5 cal kyrs BP), the Younger Dryas (12.9 – 11.6) and the transition to the Holocene (11.6 – 9.4). Delayed hydrological response to the onset of the Holocene (9.4 cal Kyrs)
- Increased runoff and sediment delivery around 8.6, 6.2 and 4.8 cal yrs BP
- Lake level decline Mid Holocene (4.8 – 4.0 cal kyrs BP)

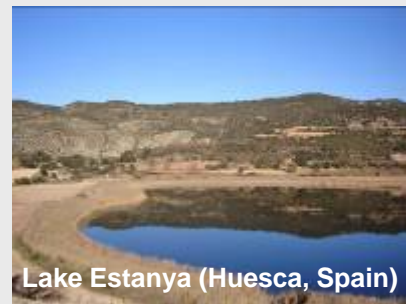
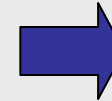
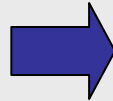




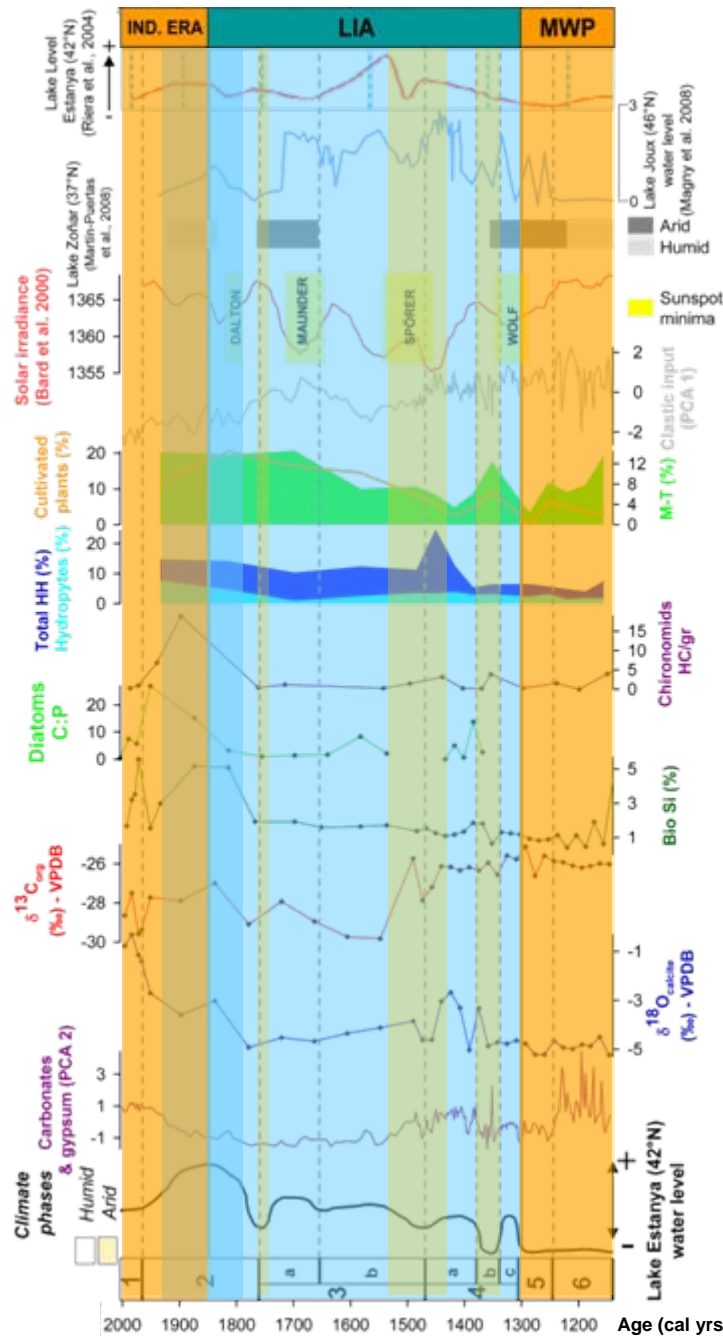
# Estanya: depositional environments and hydrology

Different “Estanya Lake” in the past: at least 5 different depositional environments:

- i. Shallow, carbonate producing lake (21 – 17.3 cal kyrs BP)
- ii. Permanent, relatively deep saline lake (17.3 – 11.6 cal kyrs BP)
- iii. Ephemeral saline lake – mudflat (11.6 – 9.4 cal kyrs BP)
- iv. Saline, permanent lake with microbial mats (9.4 – 0.8 cal kyrs BP)
- v. Deep, brackish/freshwater deep lake with permanent/seasonal stratification (0.8 cal kyrs BP – present)



# Estanya: Palaeohydrology last millennium



- Shallow lake levels during the MWP (prior to 1300 AD) and after 1850 AD, characterized by:

- Highly concentrated waters (higher carbonate & gypsum precipitation)
- More terrestrial influence on o.m. (higher values)
- Decreased bioproductivity (chironomids, diatoms)
- Decreased total HH, decreased hydrophytes

- Higher lake levels during the LIA (1300 – 1850 AD)

- LIA → complex internal structure controlled by solar activity → higher lake levels during sunspot minima

- Aridity crises coinciding with phases of maximum solar activity:

- MWP
- 1340 – 1380 AD
- 1470 – 1490 AD
- Ca. 1770 AD
- post 1850 AD



- Highest lake level during the 19<sup>th</sup> century, coinciding with maximum agricultural expansion and last cold phase of the LIA

- Drier conditions during the 20<sup>th</sup>



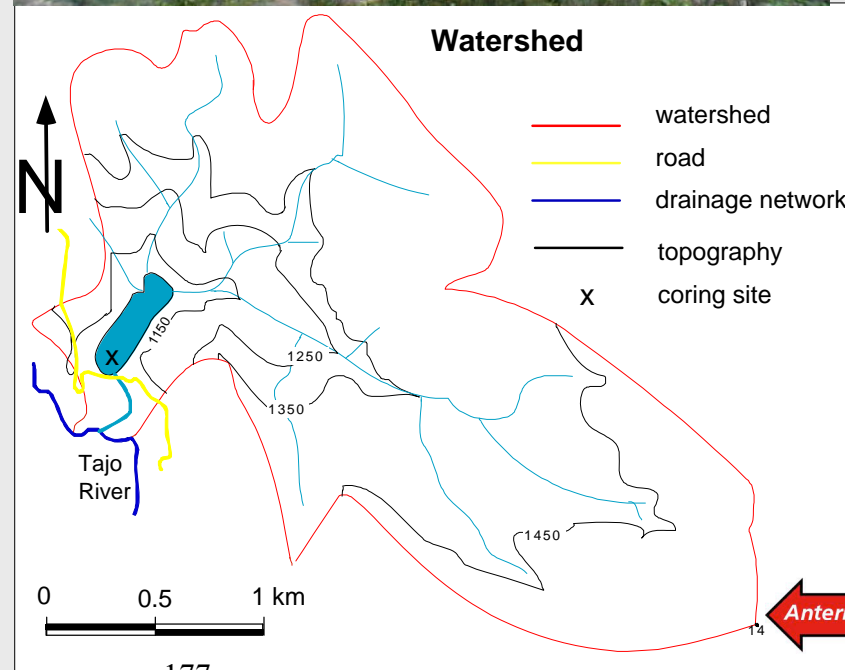
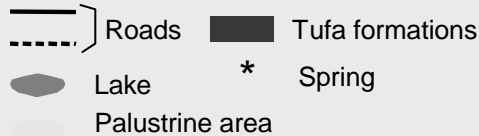
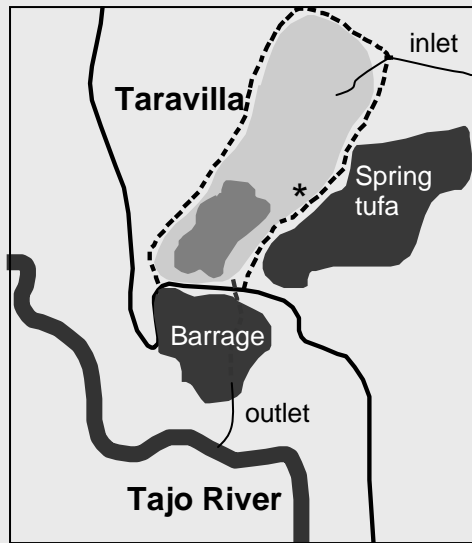
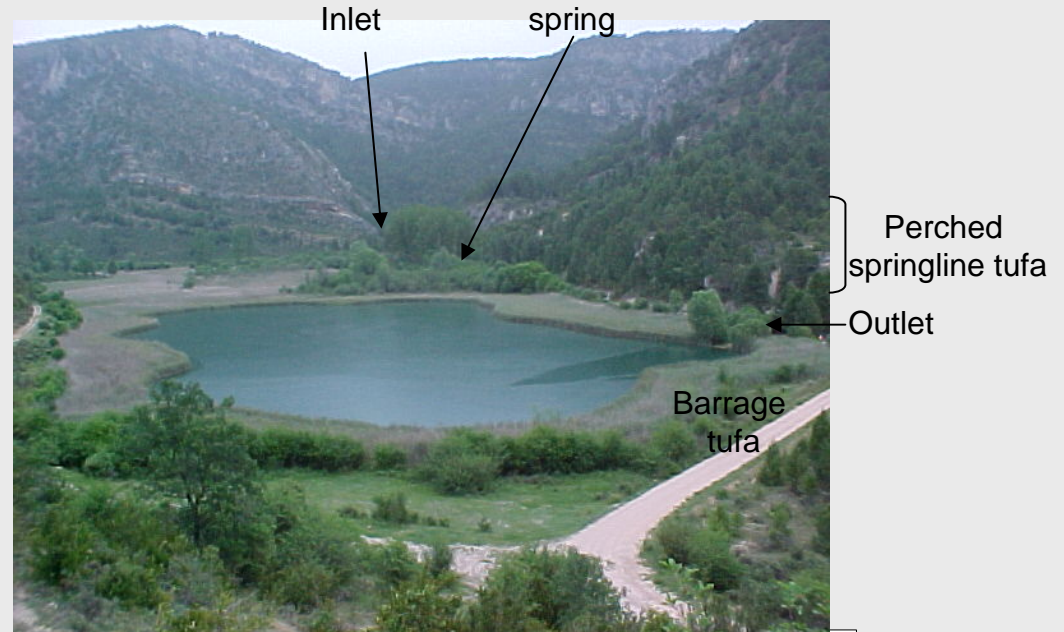
# Taravilla



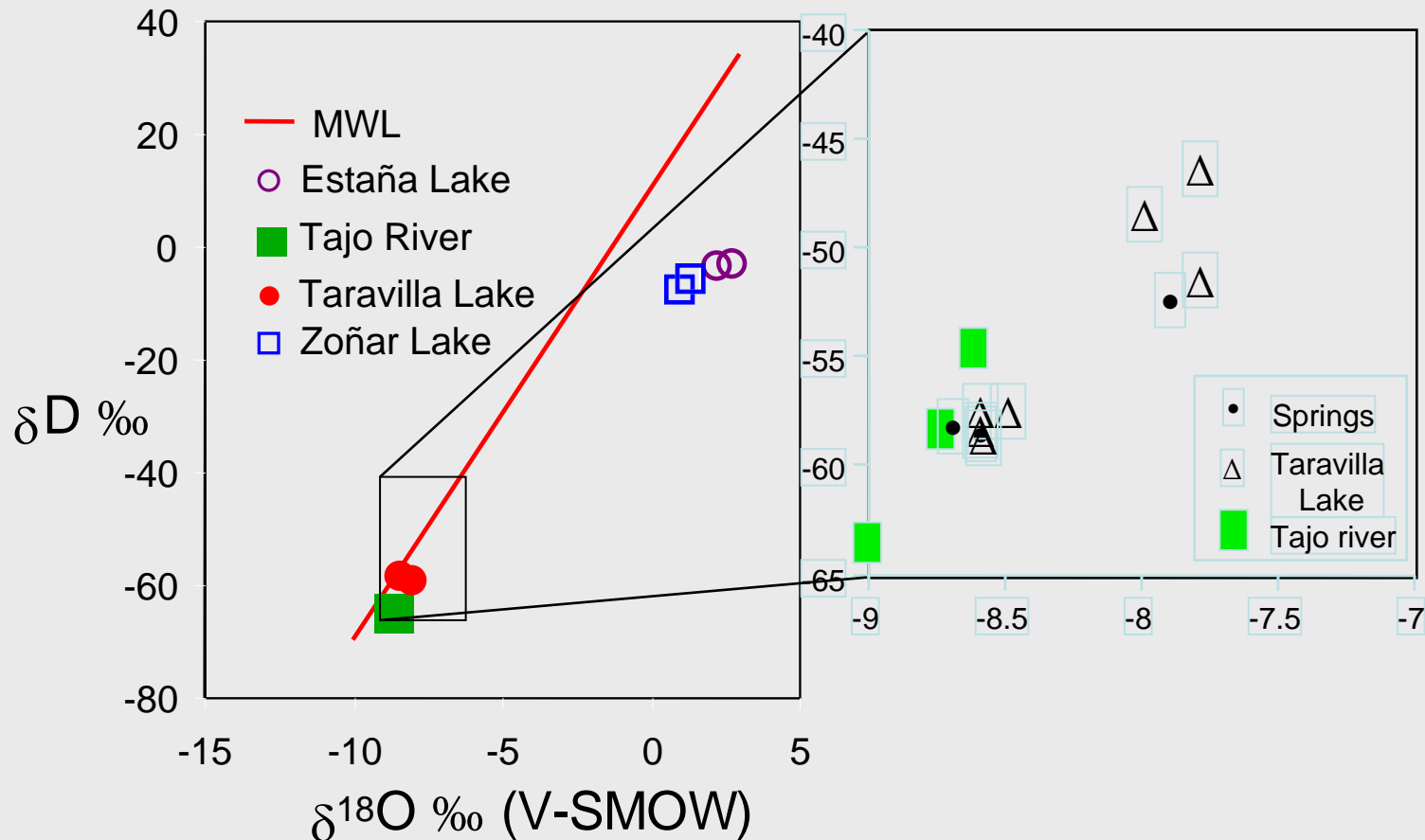


# Taravilla

- Iberian Range
- karstic and travertine origin
- 11 m of max. water depth
- open system,
- mainly groundwater fed
- seasonal inlet and outlet into the Tajo River
- Tufa deposits (Barrage and perched)

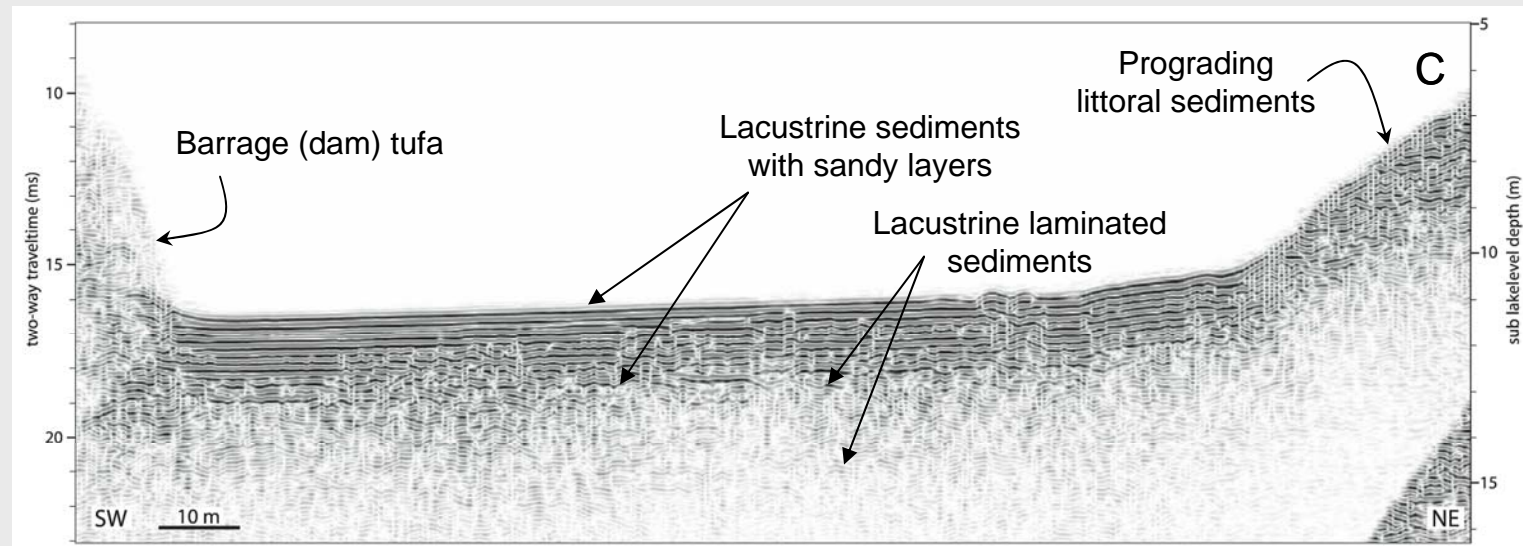
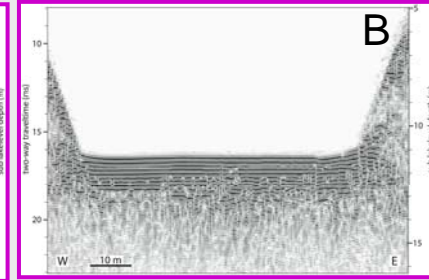
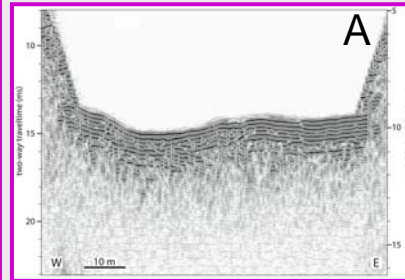
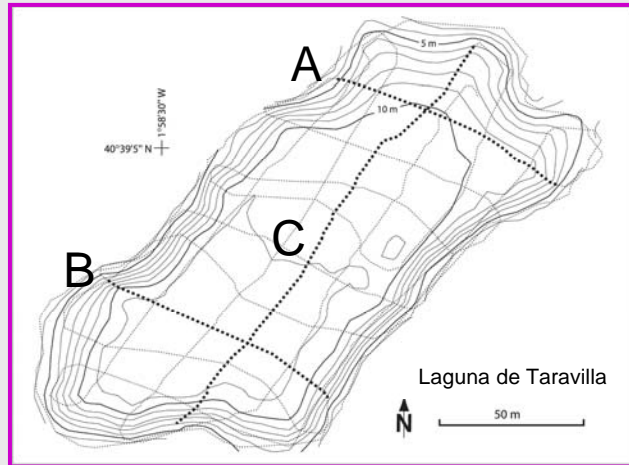


## Hydrology



- lake waters are isotopically well-mixed.
- hydrologically - open system with low evolution of meteoric waters
- low mineralized (conductivity mean value of 0.5– 0.6 mS/cm)
- calcium and carbonate-rich waters; low sulfate

## Seismic stratigraphy



- Steep margins, flat bottom
- Continuous and parallel reflectors, poor penetration





## Travertines: sensors of global change



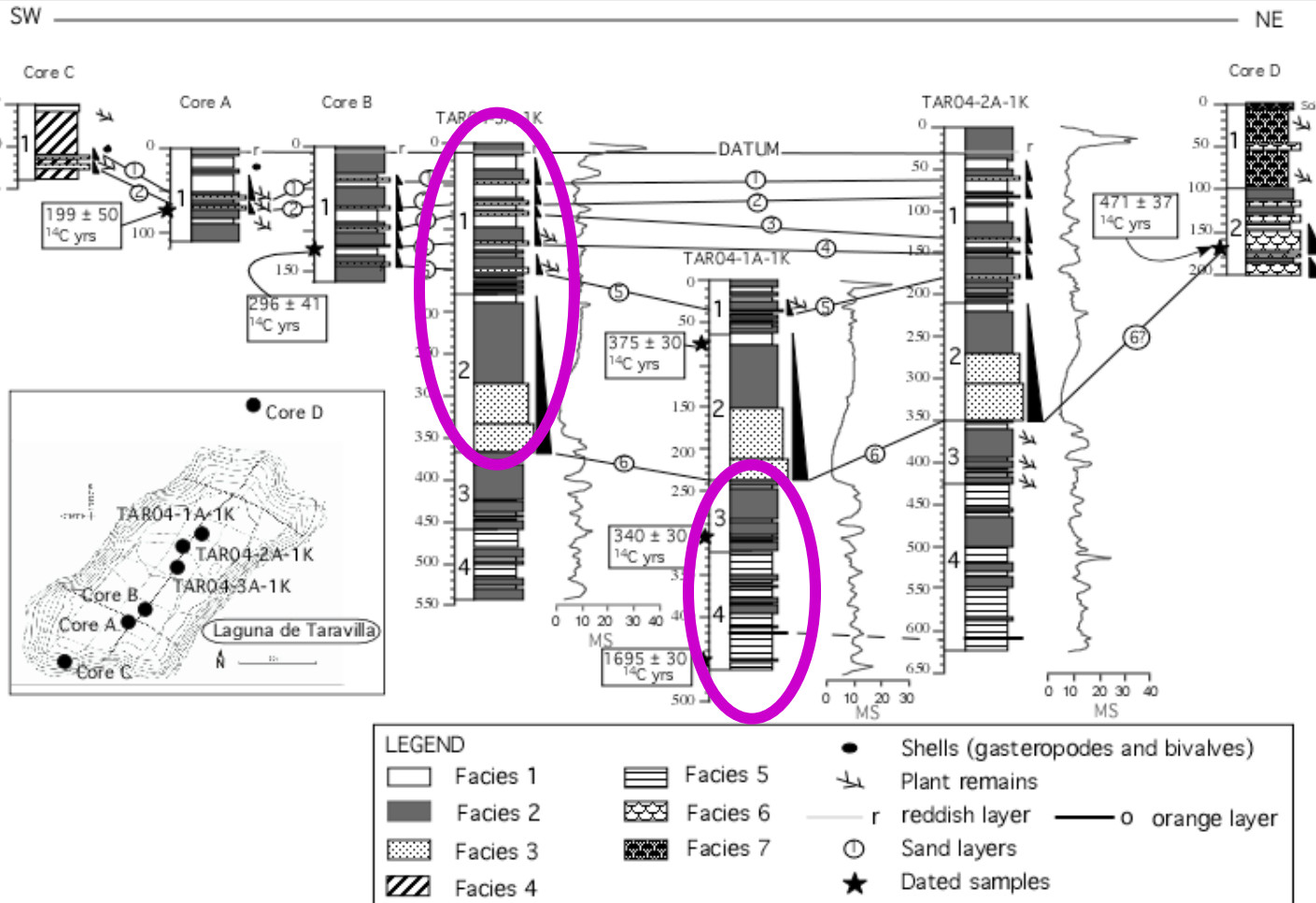
Sample	$^{238}\text{U}$ (ppb)	$^{232}\text{Th}$ (ppb)	$\delta^{234}\text{U}^*$ (measured)	$^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ (activity)	$^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ (activity)	$^{230}\text{Th}$ Age (ka) (uncorrected)	$^{230}\text{Th}$ Age (Ka) (corrected)	$\delta^{234}\text{U}_{\text{Initi}}$ (correct)
Barrage	239.2 ±0.7	752 ±10	66.3 ±4.0	5.5 ±0.2	1.043 ±0.036			
Barrage	126.8 ±0.3	54.2 ±0.5	323.2 ±2.9	8.0 ±0.3	0.2078 ±0.0074	18.5 ±0.7	8.8 ±5.2	331 ±
Barrage	110.7 ±0.3	42.7 ±0.3	321.6 ±3.9	7.7 ±0.3	0.1798 ±0.0059	15.9 ±0.6	7.1 ±4.6	328 ±
Barrage	266 ±1	639 ±16	63.9 ±3.7	4.7 ±0.3	0.682 ±0.040	110 ±11	11 +61/-11	66 ±1
Barrage	164.4±0.7	97.4 ±0.9	256.7 ±3.9	6.6 ±0.2	0.2376 ±0.0079	22.7 ±8.4	8.2 +7.6/-8.2	263 ±
Springline tufa	88.9 ±0.2	16.46 ±0.09	267.3 ±1.7	85.8 ±0.8	0.9626 ±0.0082	143.7 ±2.4	139.7 ±3.1	397 ±

Springline tufa: 139.7 ± 3.1 kyr B.P. Isotopic stage 6 to 5

Barrage tufa: five U/Th ages (from 11 to 7.1 kyr BP). Lateglacial to E



## Sediment cores: flood stratigraphy



**UNIT 3:** dominance of darker carbonate silts in thick layers

Increase organic productivity

**UNIT 4:** laminated sediments (light grey, fine carbonate silt and mud)

Deposition in a lower energy environment, with less alluvial influence

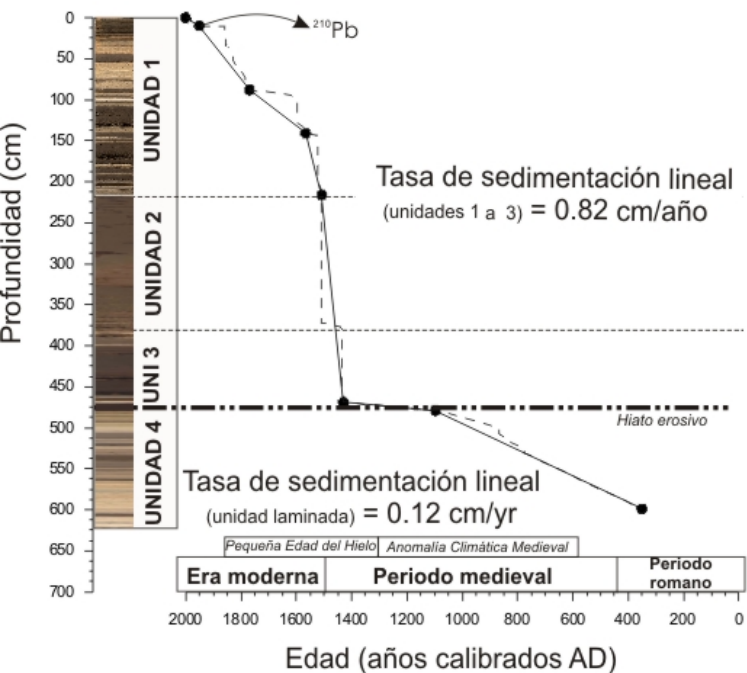
**UNIT 1:** alternation of dm-thick layers of massive, lighter to darker gray silt and mud

**UNIT 2:** thick fining upward sequence composed of sands and silts

Deposition during flood episodes reaching the center of the lake

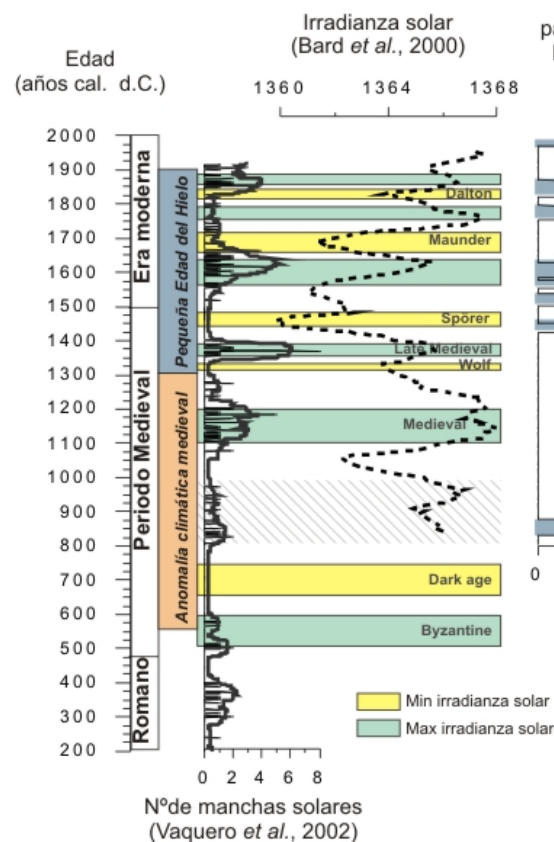


A)

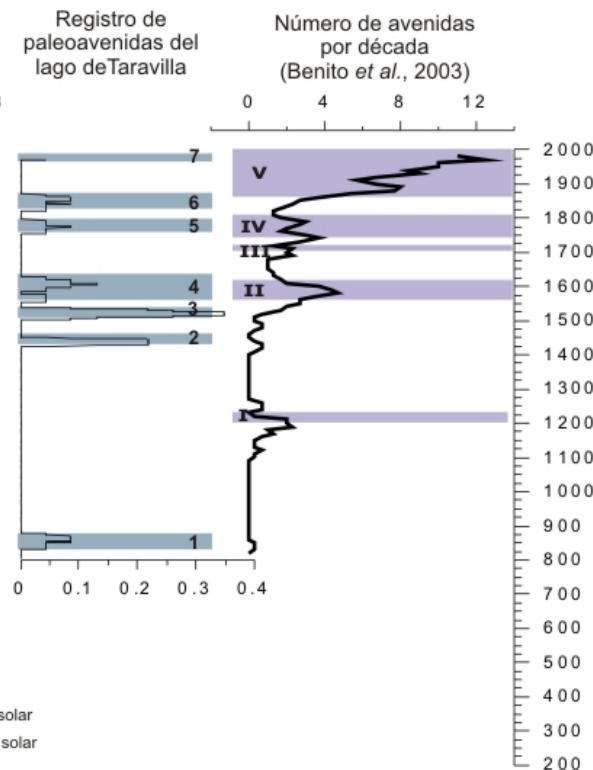


B)

## RECONSTRUCCIONES GLOBALES



## PALEOAVENIDAS EN ESPAÑA

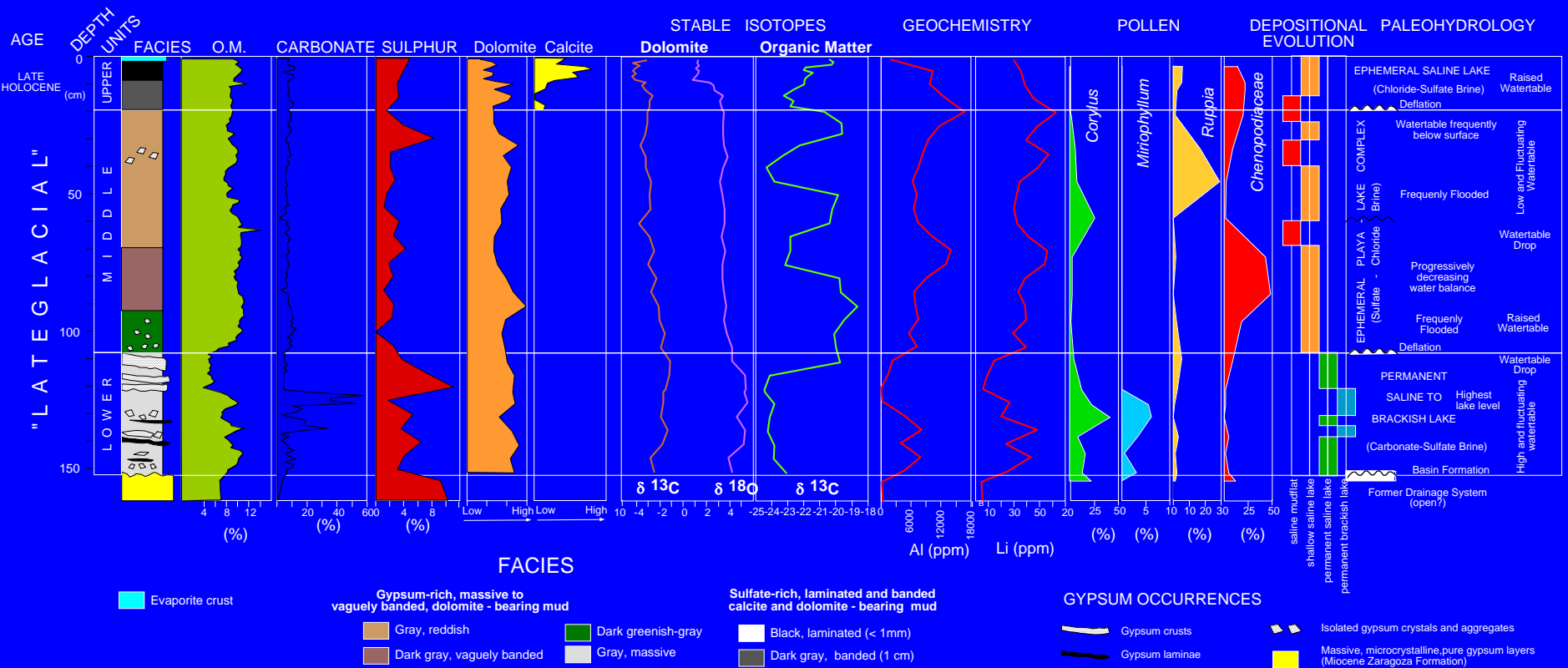




# El Valle del Ebro



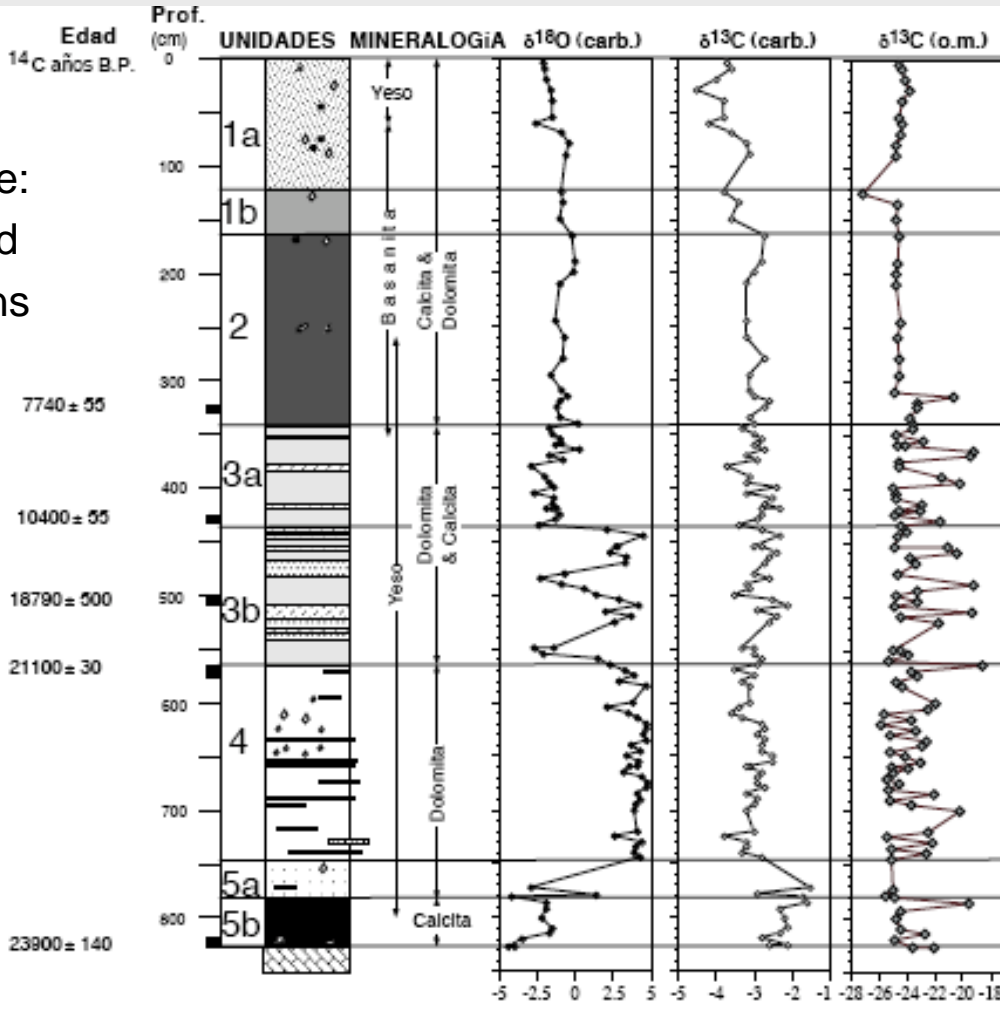
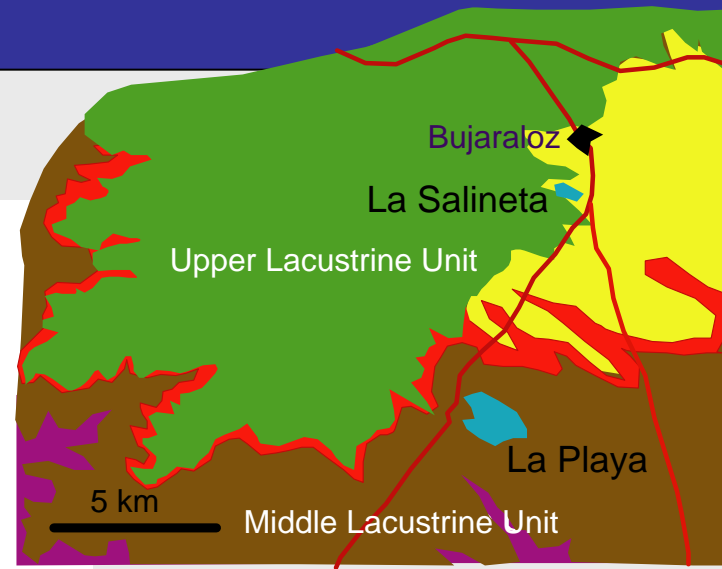
## Fluctuaciones balance hídrico



1. Lago de agua dulce durante alguna fase de la deglaciación
2. Refugios de árboles termófilos (*Corylus*, avellano)
3. Grandes fluctuaciones hidrológicas durante el Tardiglaciario



# La Salineta



Mid Holocene: More arid conditions

Early Holocene: Less arid conditions

LGM : Arid conditions

Basin formation Humid Period? (ca. 22000 yr BP)

- LEYENDA
- Barro de dolomita gris, masiva, con abundancia yeso
  - Barros gris oscuro masivos ricos en dolomita, yeso y cuarzo
  - Barros gris verdosos, masivos o ligamentados laminados ricos en calcita y yeso
  - Barro gris masivo carbonatado con abundancia eflorescencias yesíferas y raigón salino
  - Barro gris verdoso masivo dolomítico con abundancia yeso
  - Barro gris masivo carbonatado sin laminas ni costras de yeso
  - Barro gris masivo carbonatado con abundancia laminas y costras de yeso
  - Guitraco (caliza micocinas)
  - Raigón pedogénico: \* moteado, raices
  - Tipos de yeso: láminas microcristalinas, costras, Cristales aislados





# Chiprana

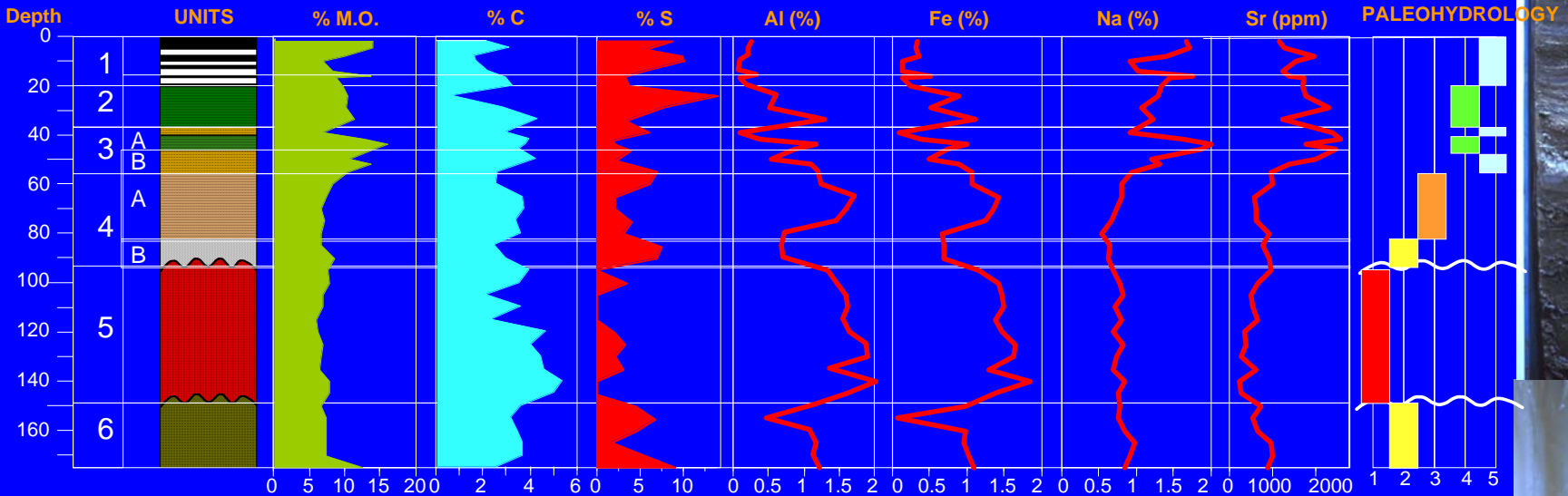


- SALADA CHIPRANA
- Permanent ( $Z_{max} = 5m$ ), hypersaline (40 g/L),  $(SO_4^{=}) - (Mg^{2+}) - (Na^+)$  water
- water input: rainfall and runoff, groundwater, irrigation returns
- Irrigation: 4100 ha (44 ha in the watershed)

- High biodiversity
- Unique ecosystems:
  - ✓ Charophyte meadows
  - ✓ Cyanobacterial mats
  - ✓ Anoxic hypolimnion



# Chiprana

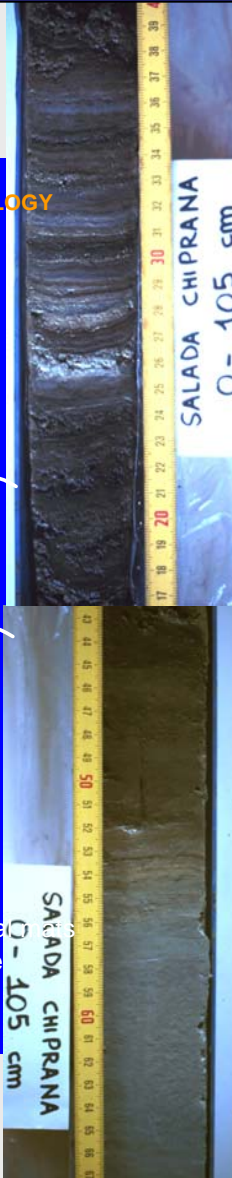


## SEDIMENTARY FACIES

- |                                |                              |
|--------------------------------|------------------------------|
| Black, laminated mud           | Gray, banded muds            |
| Gypsum laminae                 | Gray, massive fine silt      |
| Cyanobacterial mats            | Red, massive fine silt       |
| Gray - greenish laminated muds | Gray, green gypsum-rich silt |
| Sedimentary unconformity       |                              |

## DEPOSITIONAL ENVIRONMENTS

1. Dry MudFlat
2. Ephemeral Saline Lake (Saline Pan)
3. Shallow Saline Lake
4. Perennial Saline Lake with Cyanobacteria
5. Perennial, Meromictic, Deep Saline Lake



From an ephemeral lake to a permanent lake in the 14<sup>th</sup> century)





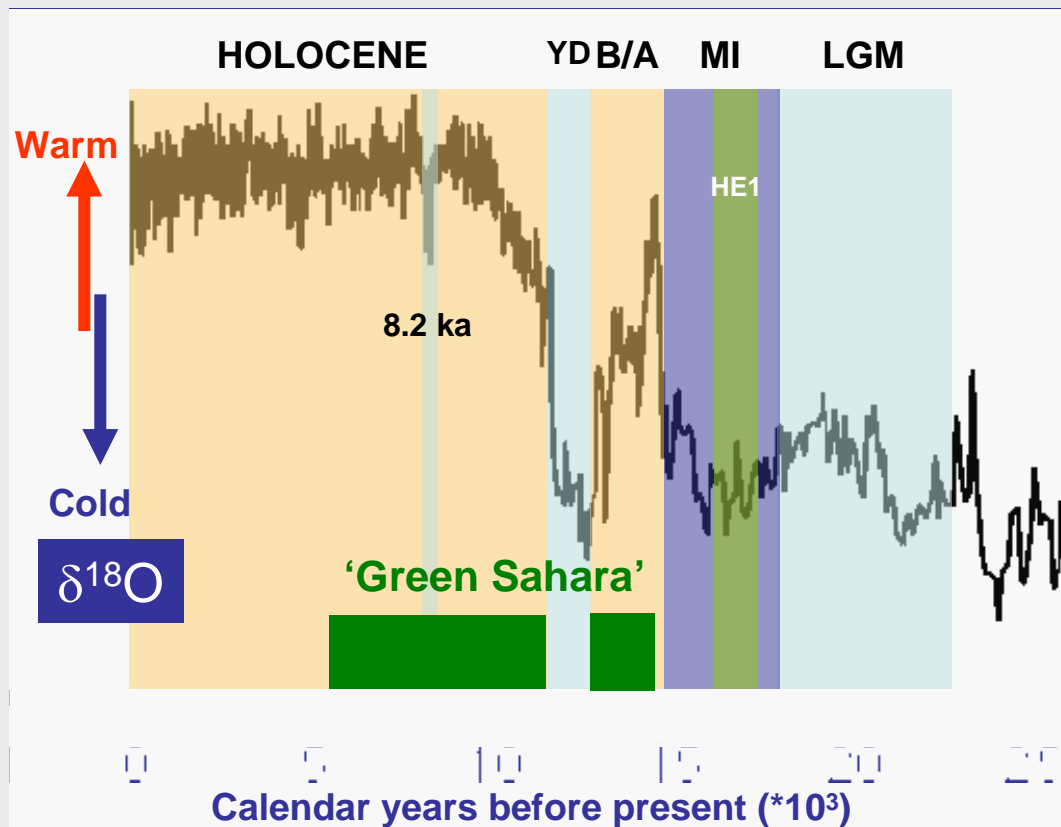


?

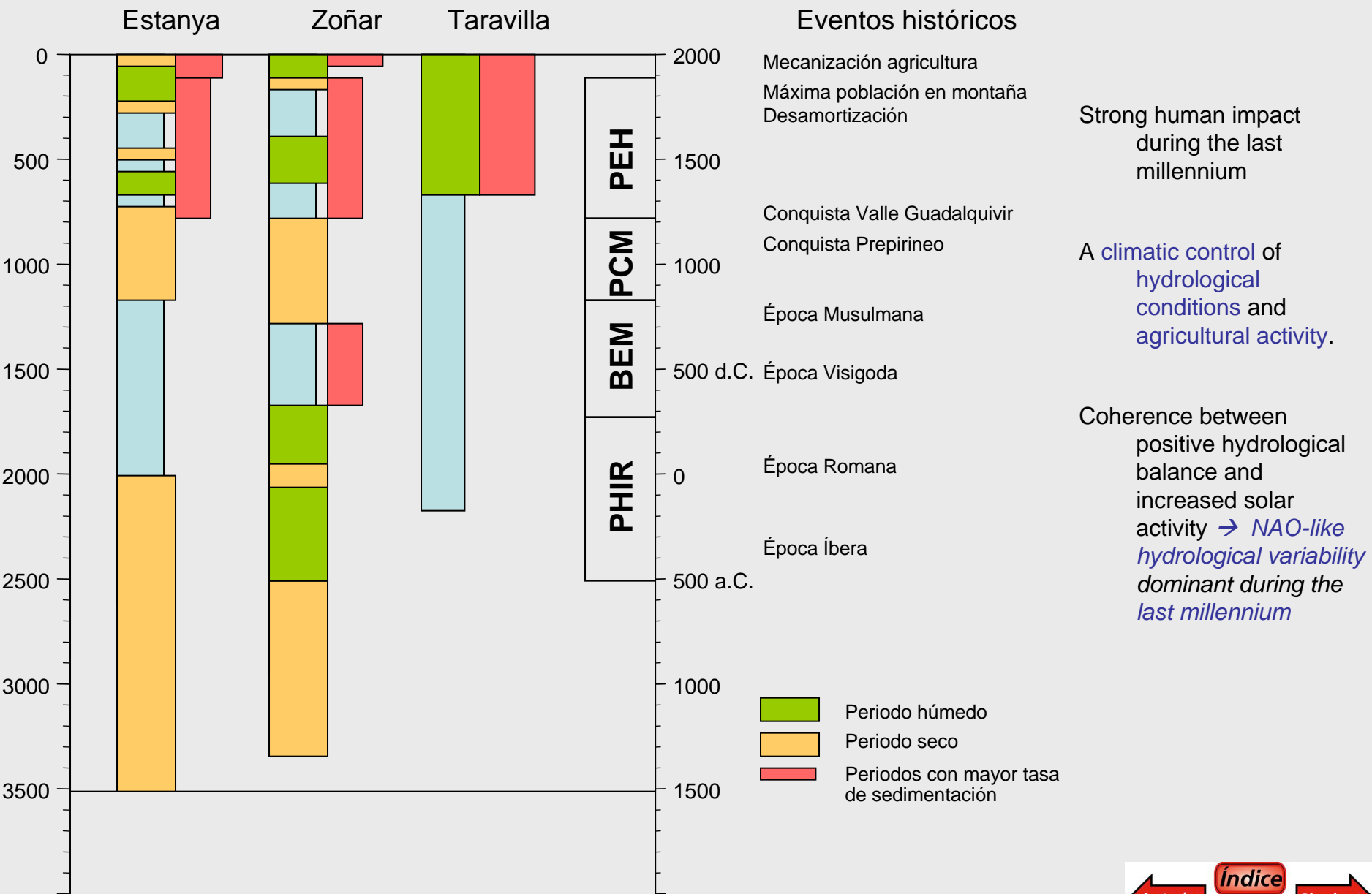


# Iberian Lakes record of past global events at millennial scale

1. Relatively more **positive water balances** during the LGM (21 – 18 cal kyrs BP), in agreement with other local and regional records ← *reduced evaporation?*, *changes in seasonality (winter versus summer precipitation?)*, *aquifer recharge*
2. **Aridity** during the HE1 event 'embedded' within the MI (18 – 14.5 cal kyrs BP)
3. **Coherent but limited hydrological response** to sub-orbital scale, global climate changes (YD, B/A, 8.2)
4. Record of **high-frequency, centennial scale intra-Holocene hydrological variability** related to **Bond cycles**.



# ... and centennial to decadal scale



- ✓ Necesidad de **modelos geológico e hidrogeológicos cuantitativos**: génesis y funcionamiento ACTUAL de los humedales
- ✓ **Monitorización** de lagos y humedales: incluirlos en Long Term Ecological Research o iniciativas similares
- ✓ **Reconstrucciones numéricas** de balances hídricos en el pasado
- ✓ “**Proxies**” de **aguas subterráneas**: geoquímicos, secuencias varvadas
- ✓ **La paleolimnología - paleohidrología** aporta datos imprescindibles para la gestión, restauración y conservación de los humedales y los recursos hídricos
  - ✓ Evaluación del impacto antrópico
  - ✓ Cambios en el balance hídrico
  - ✓ Ejemplos de respuesta del sistema lacustre /acuífero a cambios climáticos



Ibón de Estanés



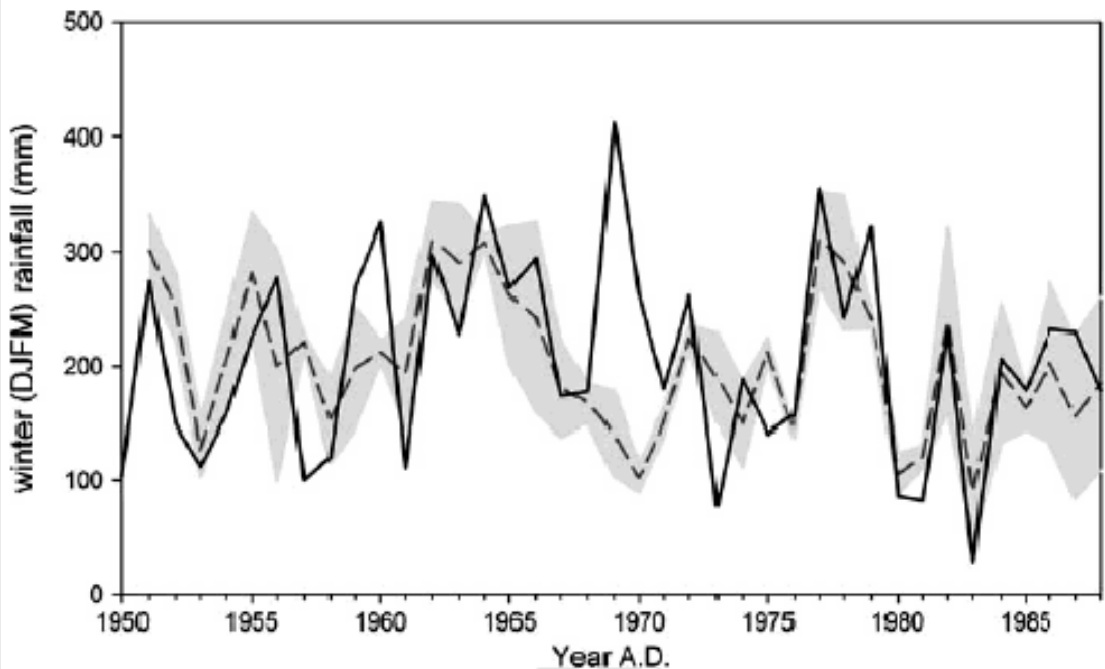
Radiotelescopio de Arecibo (Puerto Rico)



*Los modelos han de ser globales e integradores en el espacio y en el tiempo de los múltiples factores que controlan la evolución de los lagos y humedales y*

*han de incluir las aguas subterráneas*



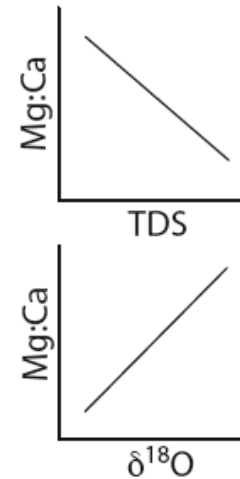
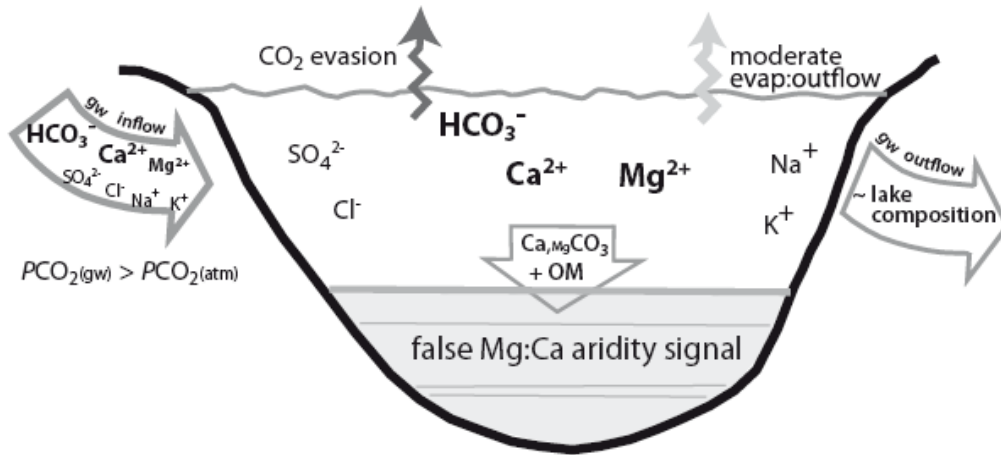


*Comparison between winter (DJFM) rainfall instrumental values (solid line) and inferred winter rainfall from calcium carbonate lamina thickness (mean: dashed line, standard deviation: grey area) (from Romero-Viana et al., 2008).*

**Proxies cuantitativos calibrados**

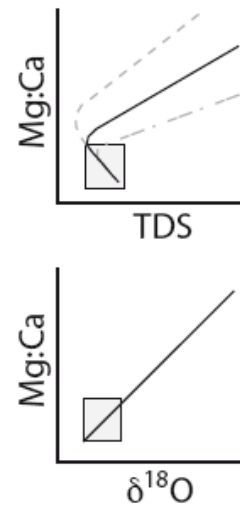
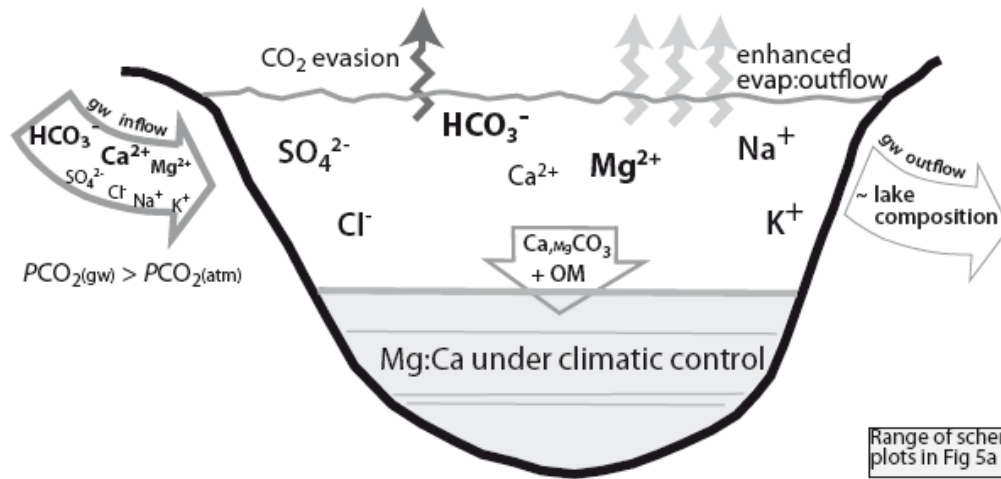


# ¿qué nos falta...?



## DILUTE WATERS; LOW EVAPORATION

Lake Mg:Ca under dominantly nonclimatic control of groundwater delivery and outflow. Mg:Ca/TDS is inverted relative to regional interlake evaporatively controlled trends



## CONCENTRATED WATERS; HIGHER EVAPORATION

Lake Mg:Ca/TDS reverses under increasingly climatic control when relatively conservative ions accumulate. Position of inflection point and slope of increasing-TDS trend depend on initial inflow composition

(From Shapley et al., 2009)



Is Mg/Ca ratio a paleosalinity proxy?....  
understanding biogeochemical cycles



*“Las cicatrices del agua nos miran.  
Sospechan que somos culpables  
de todas sus heridas”*

Marta Navarro García

¡Gracias!

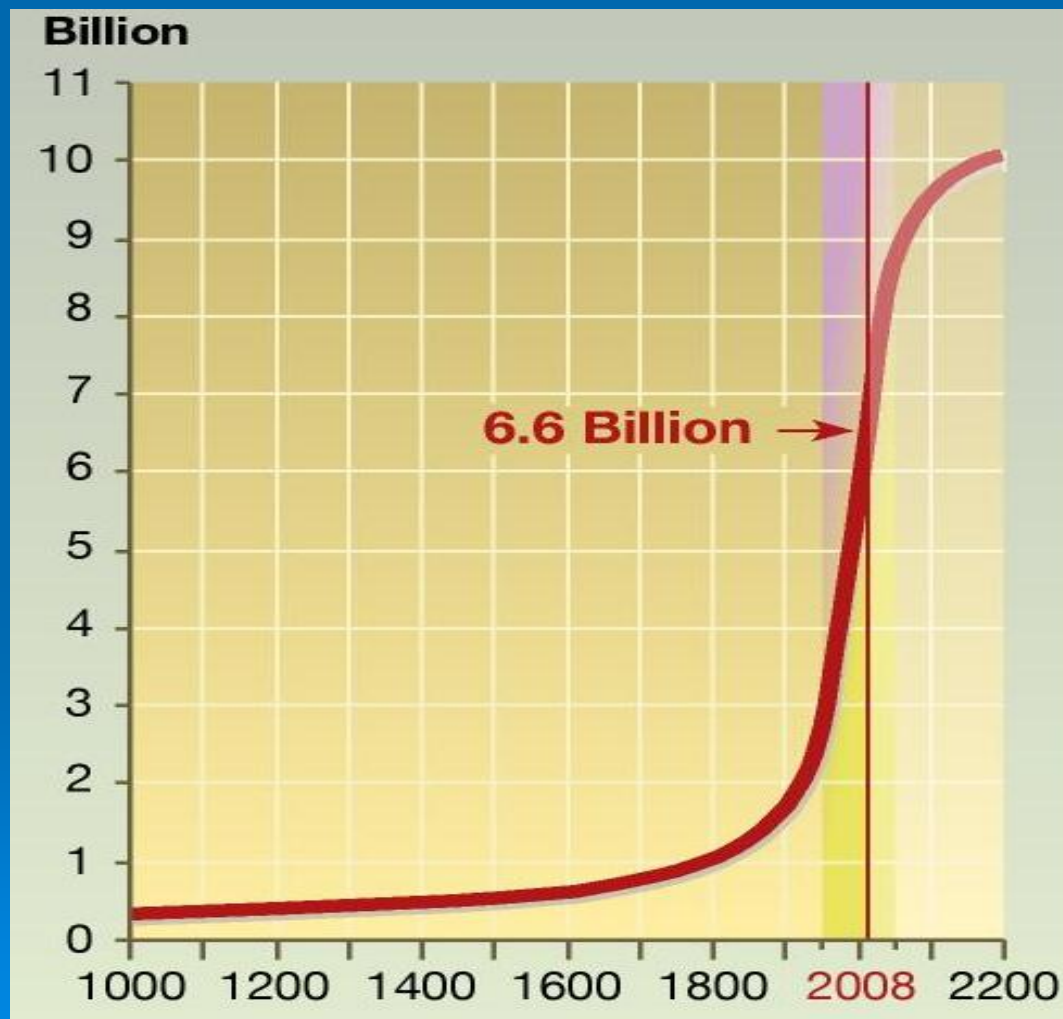
# Los desafíos de la gestión de los recursos hídricos y el rol del agua subterránea – humedales

*Carlos Fernandez-Jauregui*

*Director*

*c.fernandez-jauregui@wasa-gn.net*

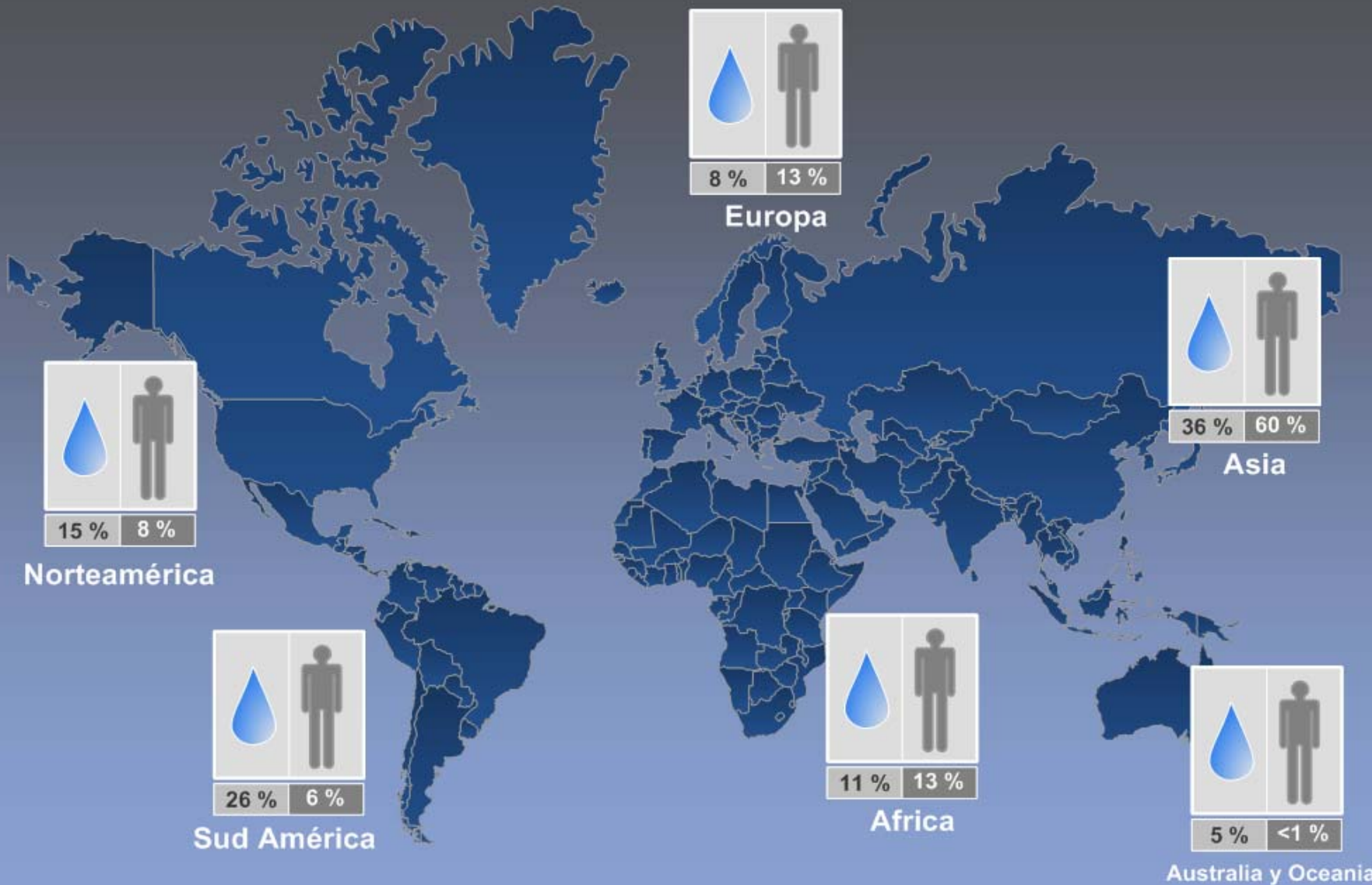
# Población triplicada en 70 años durante el siglo XX

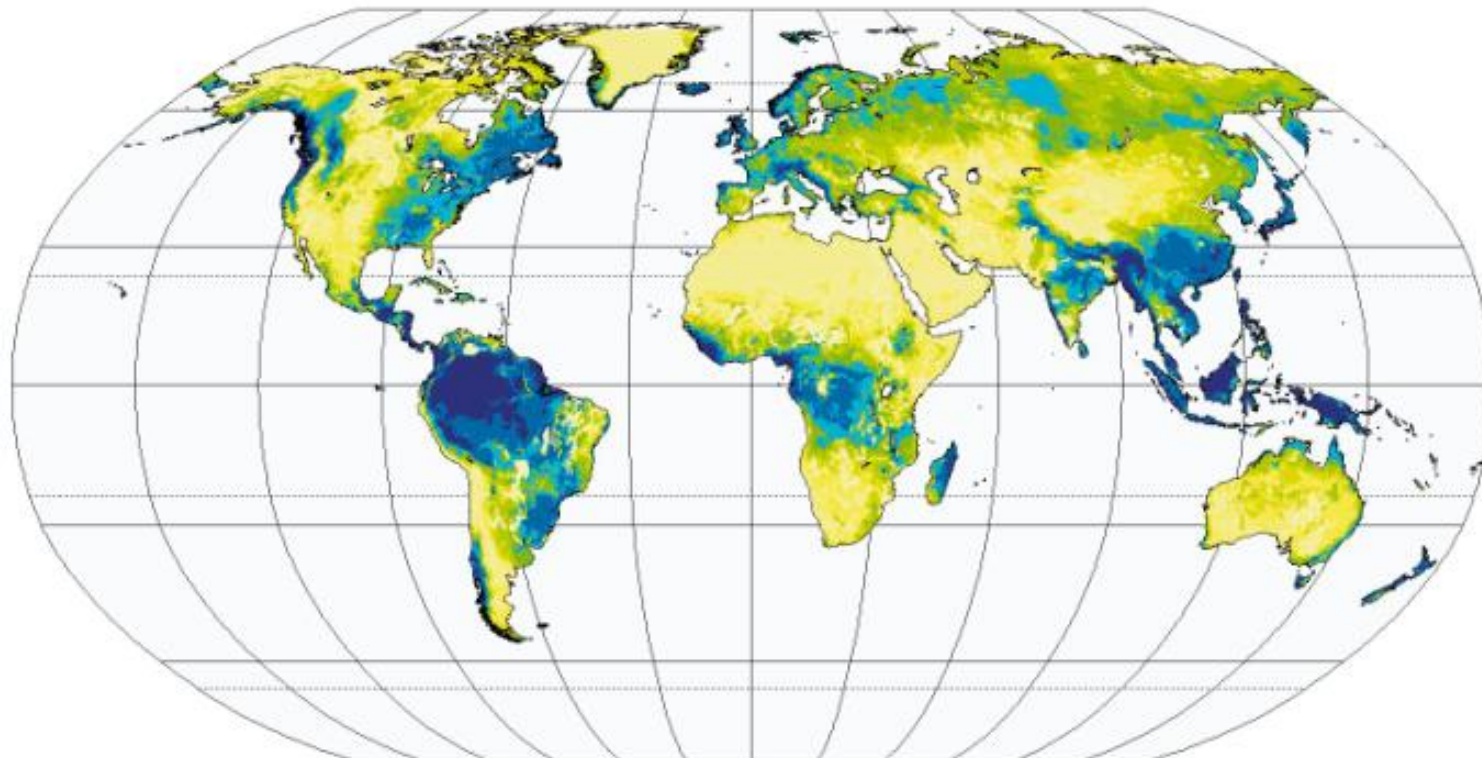






**ESTIMACION GLOBAL DE LAS CANTIDADES DE AGUA DULCE Y AGUA SALADA EN LA TIERRA**





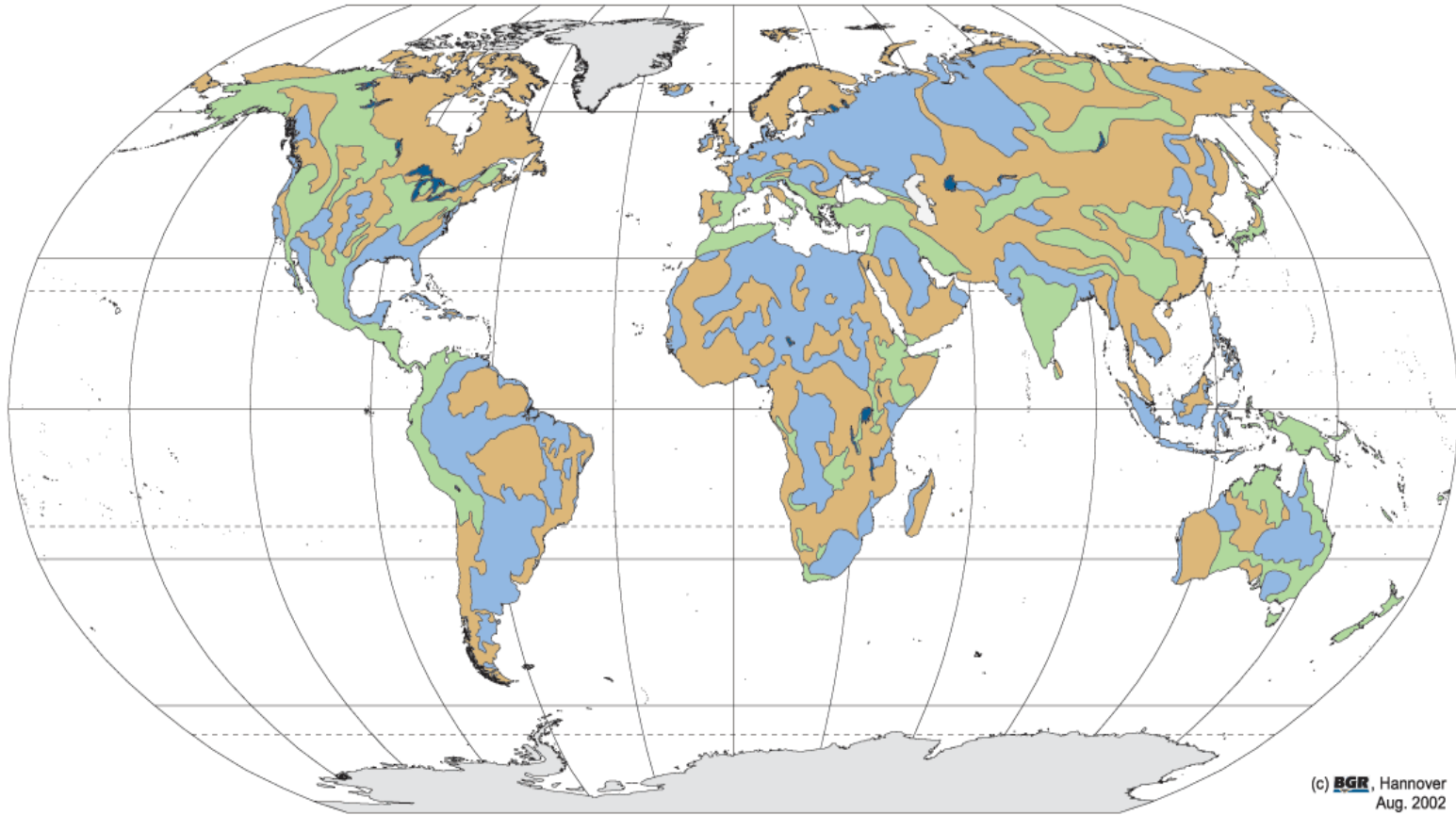
Map 1. Long-term average runoff on a global grid [mm/annum]



(c) Center for Environmental Systems Research, University of Kassel, April 2002- Water GAP 2.1D



# Groundwater Resources of the World



(c) **BGR**, Hannover  
Aug. 2002

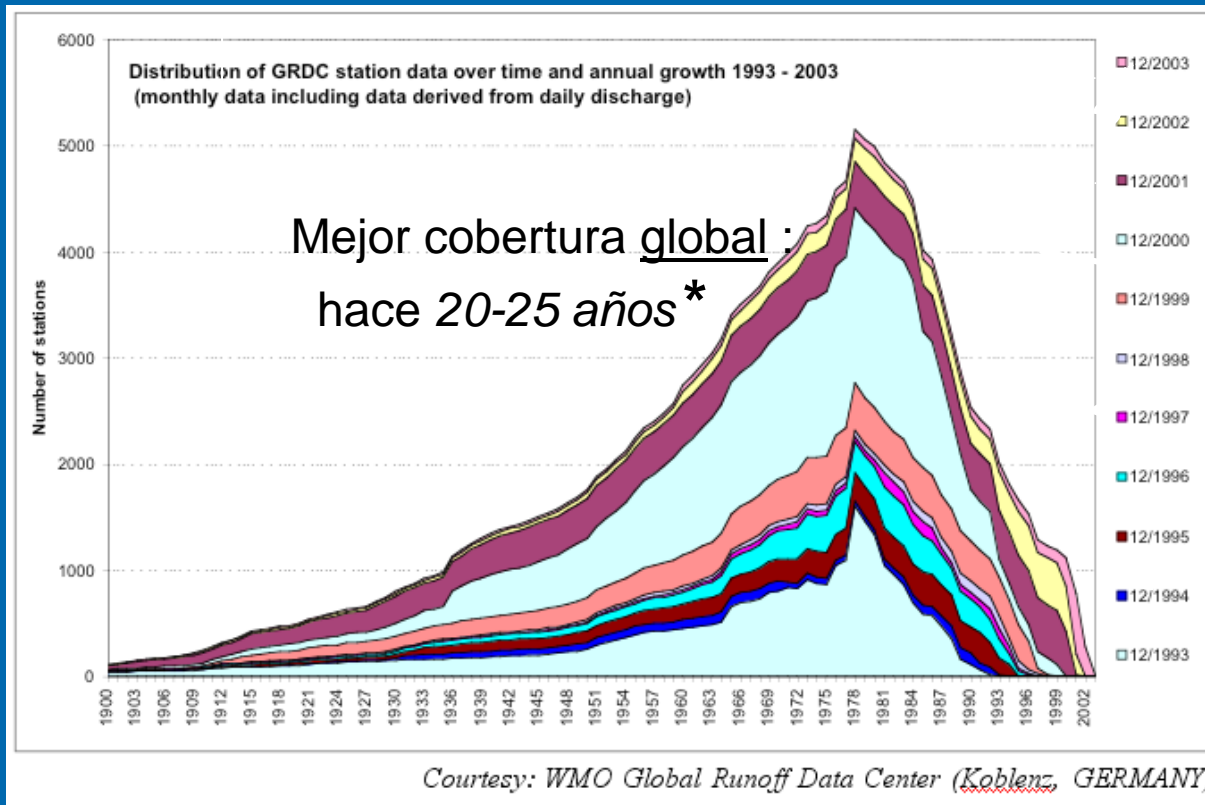
## Legend

- major groundwater basin with highly-productive aquifers
- area with complex structure including some important aquifers
- area with generally poor aquifers, locally overlain by river-bed aquifers
- permanent ice
- large freshwater lake

0 2500 5000 7500 10000 km



# Historia de la red global de conocimientos



## Disponibilidad de datos: un futuro muy incierto

- Clausura del Banco de Datos
  - Comercialización de datos
  - Desafíos legislativos/derechos de propiedad Intelectual
- Pérdidas de la red de estaciones
- Retraso en la recopilación y la presentación de datos
- Países en desarrollo: países más afectados

Los colores indican la fecha del archivo

\*Sin duda existen más archivos (Por ej. registros nacionales), pero actualmente sin unificar y a menudo en formatos no digitales difíciles de manipular; el a está dificultando



# Los Humedales y las Crisis Mundial del Agua

- Los humedales son uno de los elementos vitales que contribuyen a la existencia de del Planeta, y sin embargo continuamos permitiendo su destrucción en todo el mundo.
- Uno de esos errores ha sido la destrucción de humedales en el mundo.



# Los Desafíos

- la restauración y rehabilitación de los humedales alterados, degradados o modificado
- Un llamamiento mundial para proteger los humedales

# ¿ Qué nos aportan los humedales ?

Abastecimiento de agua.

Regulación del caudal de agua

Abastecimiento de alimentos

Polos de desarrollo económico

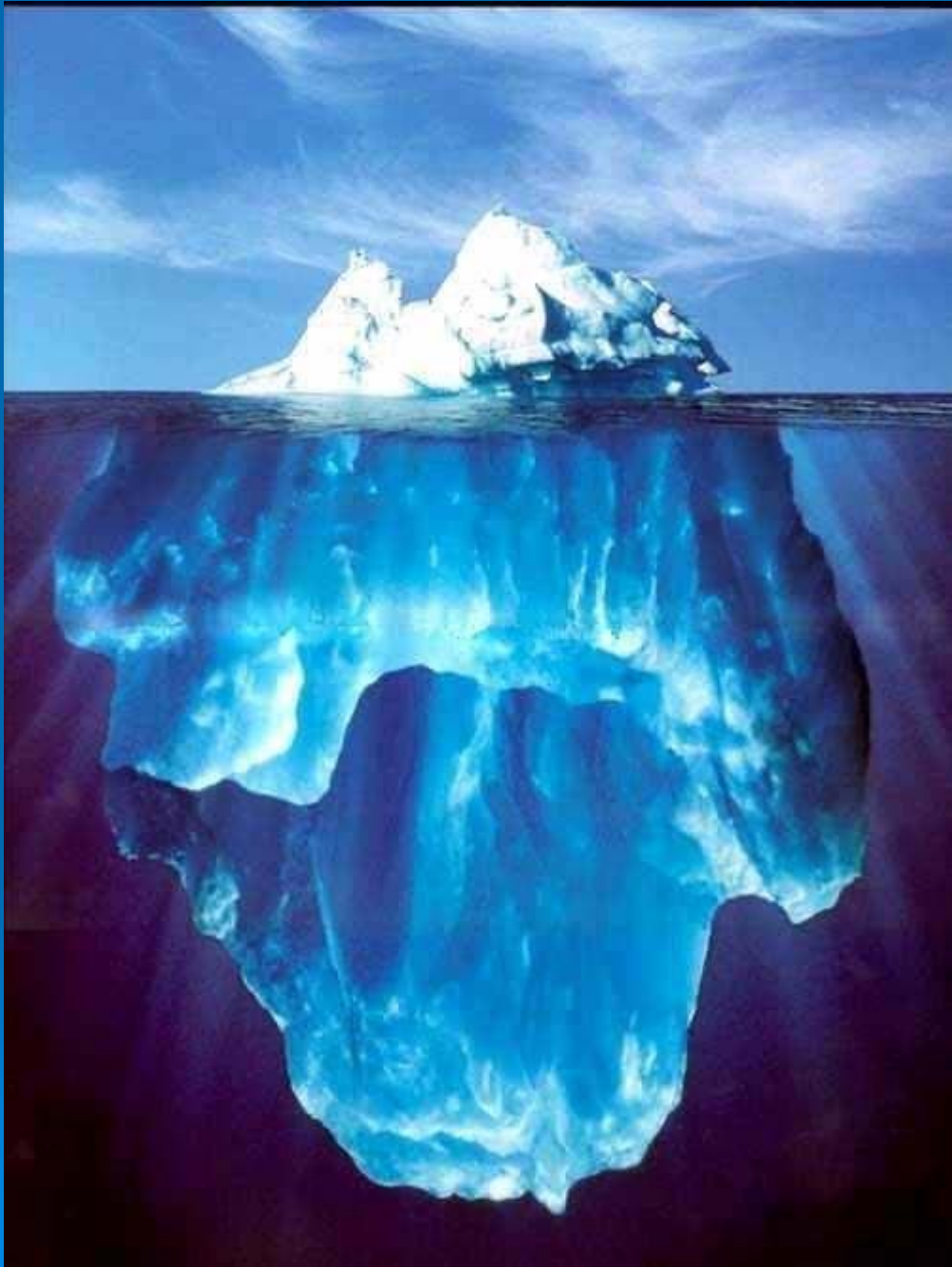
Efectos beneficiosos en el clima

# La Importancia

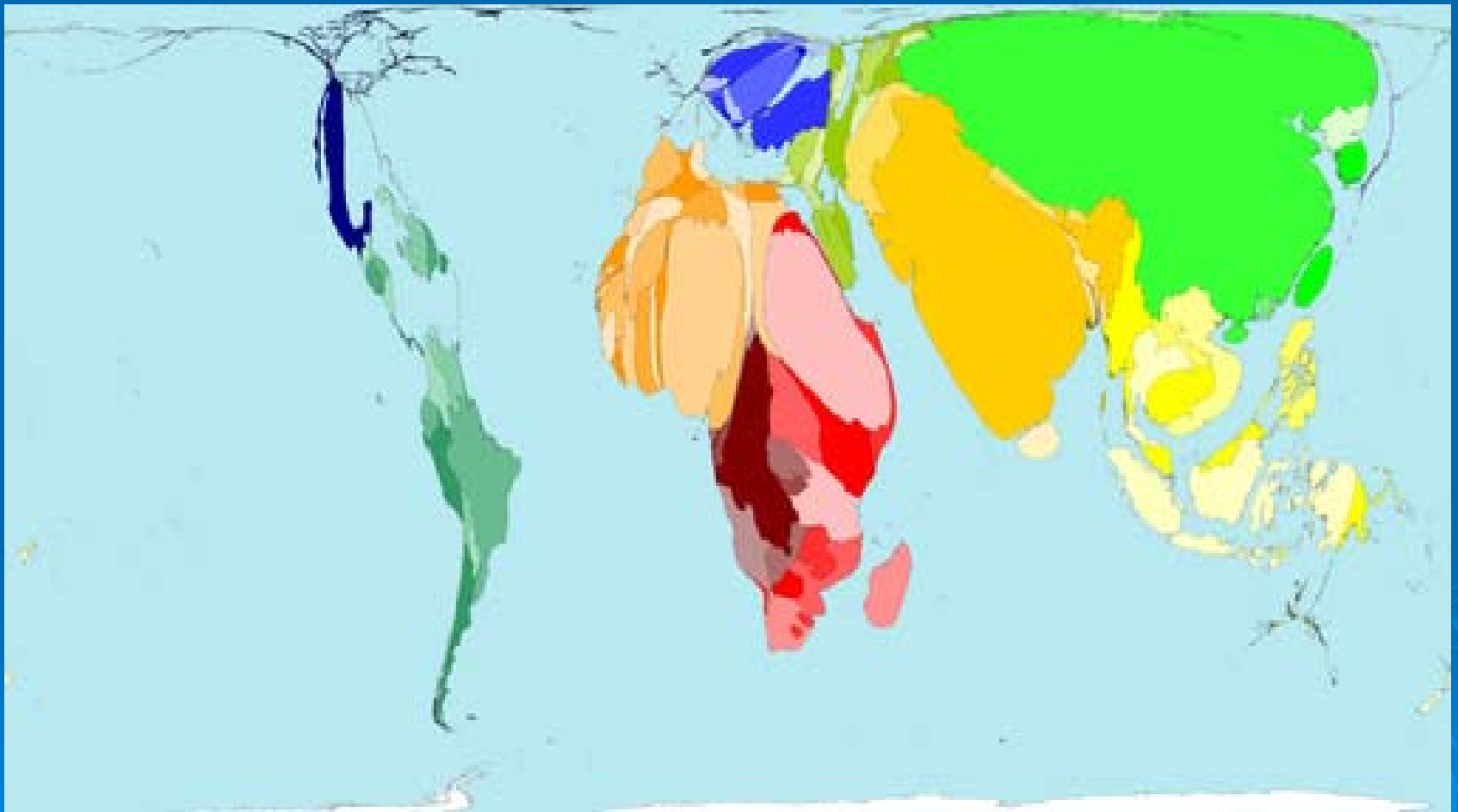
8.600.000 km<sup>2</sup> (en torno al 6,4% de la superficie terrestre del mundo), extensión algo mayor que la de Europa, están cubiertos por humedales

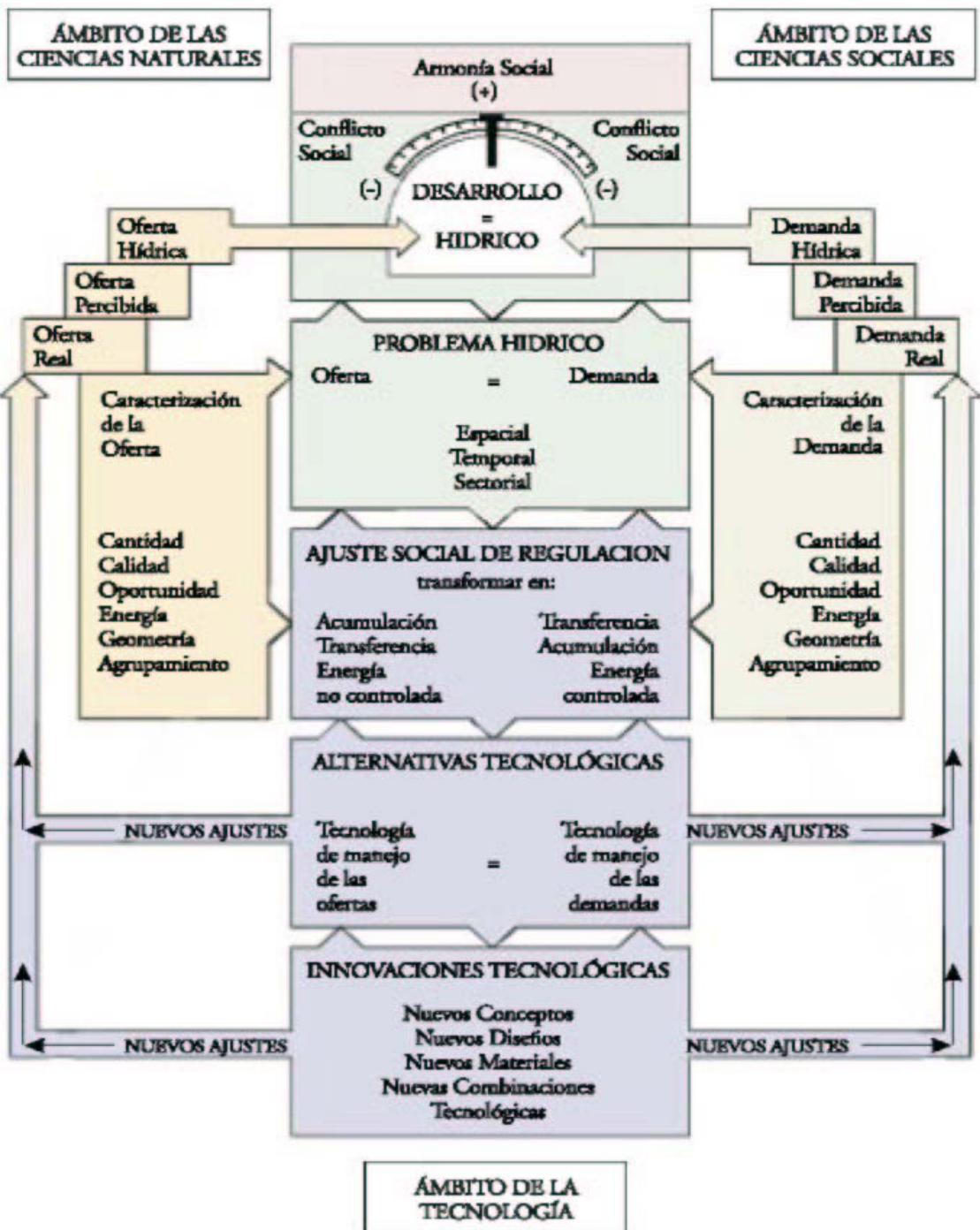
Hay humedales en todos los continentes, excepto en el Antártico, y en todos los climas, desde los trópicos a la tundra. Los porcentajes mayores corresponden a turberas altas (30%), turberas bajas (26%), pantanos (20%) y llanuras aluviales (15%), en tanto que los lagos representan el 2% de la superficie total. Los suelos turbosos ocupan, en conjunto, más de 2.300.000 km<sup>2</sup>.





# Mapa de la pobreza en términos de servicios de agua segura y saneamiento básico





# Principios de Dublín Modificados

El Agua es un recurso finito y frágil

La Gestión de los recursos hídricos se debe llevar  
acabo con la participación de Los Políticos,  
Expertos y la Comunidad

El Agua es un bien económico, cultural, social y  
religioso y por lo tanto tiene un valor  
económico, social, cultural y religioso.



# Principios Básicos para la Gestión de los Recursos Hídricos

Multi-dimensional  
Multi-uso  
Multi-objetivo.

# Desafíos de la gestión de los recursos hídricos

## Utilización de la cuenca

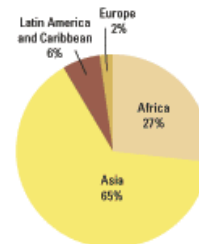
Hidrológica/hidrogeologica como unidad de gestión y no la división política de un estado

Desarrollo del concepto de condominio

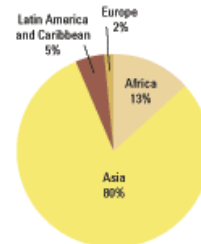
Desarrollo del concepto de sustentabilidad

# AGUA Y SALUD

Cada día mueren 6.000 personas a causa de diarrea.  
La mayoría son niños menores de cinco años.



Water supply,  
distribution of unserved  
populations



Sanitation,  
distribution of unserved  
populations

Figure 2:  
Water supply and sanitation distribution  
of unserved population.

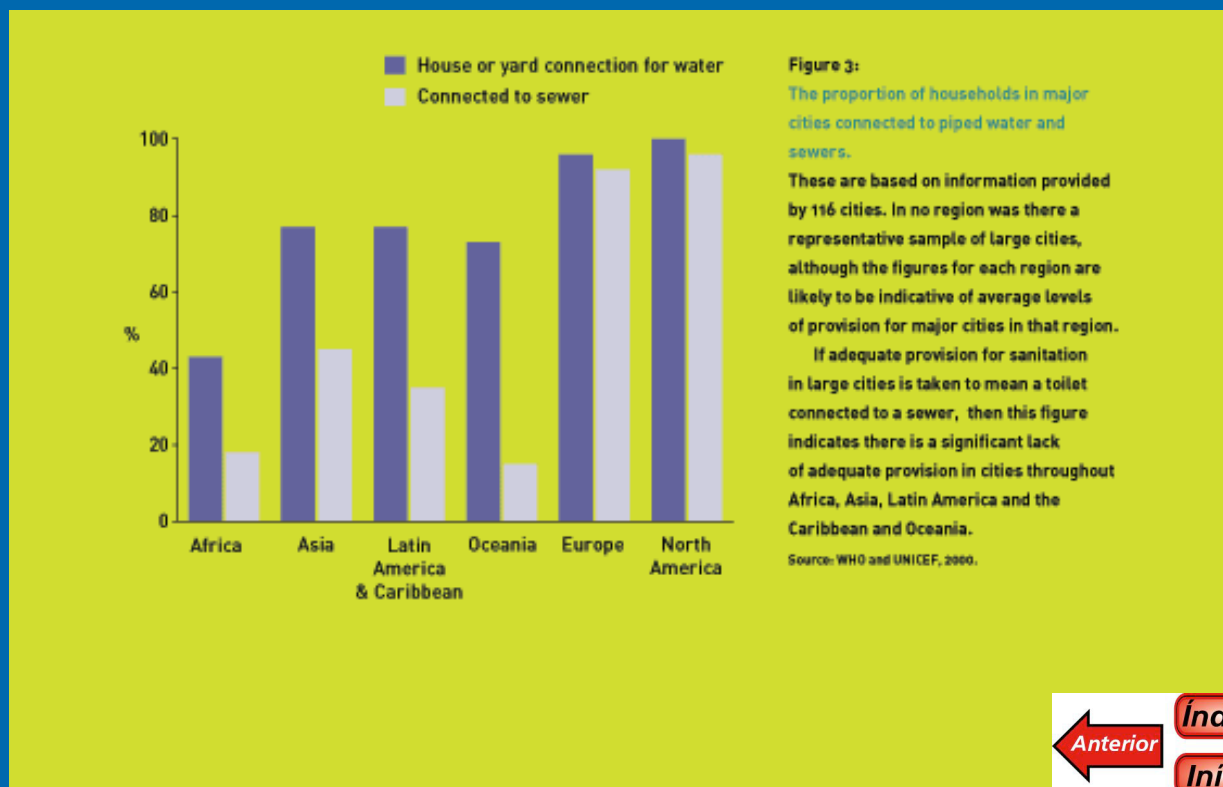
Asia shows the highest number of people unserved by either water supply or sanitation; yet it is important to note that proportionally, this group is larger in Africa due to the difference in population size between the two continents.

Source: WHO/UNICEF Joint Monitoring Programme, 2002.  
Updated in September 2002.

# AGUA Y CIUDADES

Porcentaje de población que vive en asentamientos urbanos alrededor del mundo:

- 38% en 1975
- 47% en 2000
- 54% en 2015
- 60% en 2030 (casi 5.000 millones personas)





# Precios del agua en países desarrollados

**Tabla 13.5: Comparación de los precios del agua en países desarrollados**

Pais	dólares/m <sup>3</sup>
Alemania	1,91
Dinamarca	1,64
Bélgica	1,54
Países Bajos	1,25
Francia	1,23
Reino Unido	1,18
Italia	0,76
Finlandia	0,69
Irlanda	0,63
Suecia	0,58
España	0,57
Estados Unidos	0,51
Australia	0,5
Sudáfrica	0,47
Canadá	0,4

Estas cifras se basan en el suministro a consumidores en oficinas que ocupan 5.000 m<sup>2</sup> de espacio ciudadano y que usan 10.000 m<sup>3</sup>/año. Los países desarrollados muestran un amplio abanico de variación en los precios del agua, desde el precio más bajo en Canadá hasta cinco veces más en Alemania.

Fuente: Watertech Online, 2001.

# Los países pobres pagan más por el agua segura

Ciudad	Coste del agua para uso doméstico (a)	Precio cargado por	Ratio (b/a)
	(conexiones a los hogares: 10 m <sup>3</sup> /mes)	vendedores informales (b)	
	dólares/m <sup>3</sup>	dólares/m <sup>3</sup>	
Vientiane (Laos)	0,11	14,68	135,92
Male* (Maldivas)	5,7	14,44	2,53
Mandalay (Myanmar)	0,81	11,33	14
Faisalabad (Pakistán)	0,11	7,38	68,33
Bandung (Indonesia)	0,12	6,05	50
Delhi (India)*	0,01	4,89	489
Manila (Filipinas)	0,11	4,74	42,32
Cebú (Filipinas)	0,33	4,17	12,75
Davao* (Filipinas)	0,19	3,79	19,95
Chonburi* (Tailandia)	0,25	2,43	9,57
Phnom Penh (Camboya)	0,09	1,64	18,02
Bangkok* (Tailandia)	0,16	1,62	10
Ulanbator (Mongolia)	0,04	1,51	35,12
Hanoi (Vietnam)	0,11	1,44	13,33
Bombay* (India)	0,03	1,12	40
Ho Chi Minh (Vietnam)	0,12	1,08	9,23
Chiangmai* (Tailandia)	0,15	1,01	6,64
Karachi (Pakistán)	0,14	0,81	5,74
Lae* (Papúa Nueva Guinea)	0,29	0,54	1,85
Chittagong* (Bangladesh)	0,09	0,5	5,68
Dacca (Bangladesh)	0,08	0,42	5,12
Yakarta (Indonesia)	0,16	0,31	1,97
Colombo* (Sri Lanka)	0,02	0,1	4,35

# AGUA Y ALIMENTACIÓN

1020 millones de personas en países en desarrollo no tienen acceso a una alimentación suficiente/adecuada

**Table 3: Water requirement equivalent of main food production.**

Product	Unit	Equivalent water in cubic metres
Bovine, cattle	head	4,000
Sheeps and goats	head	500
Meat bovine fresh	kilogram	15
Meat sheep fresh	kilogram	10
Meat poultry fresh	kilogram	6
Cereals	kilogram	1.5
Citrus fruit	kilogram	1
Palm oil	kilogram	2
Pulses, roots and tubers	kilogram	1

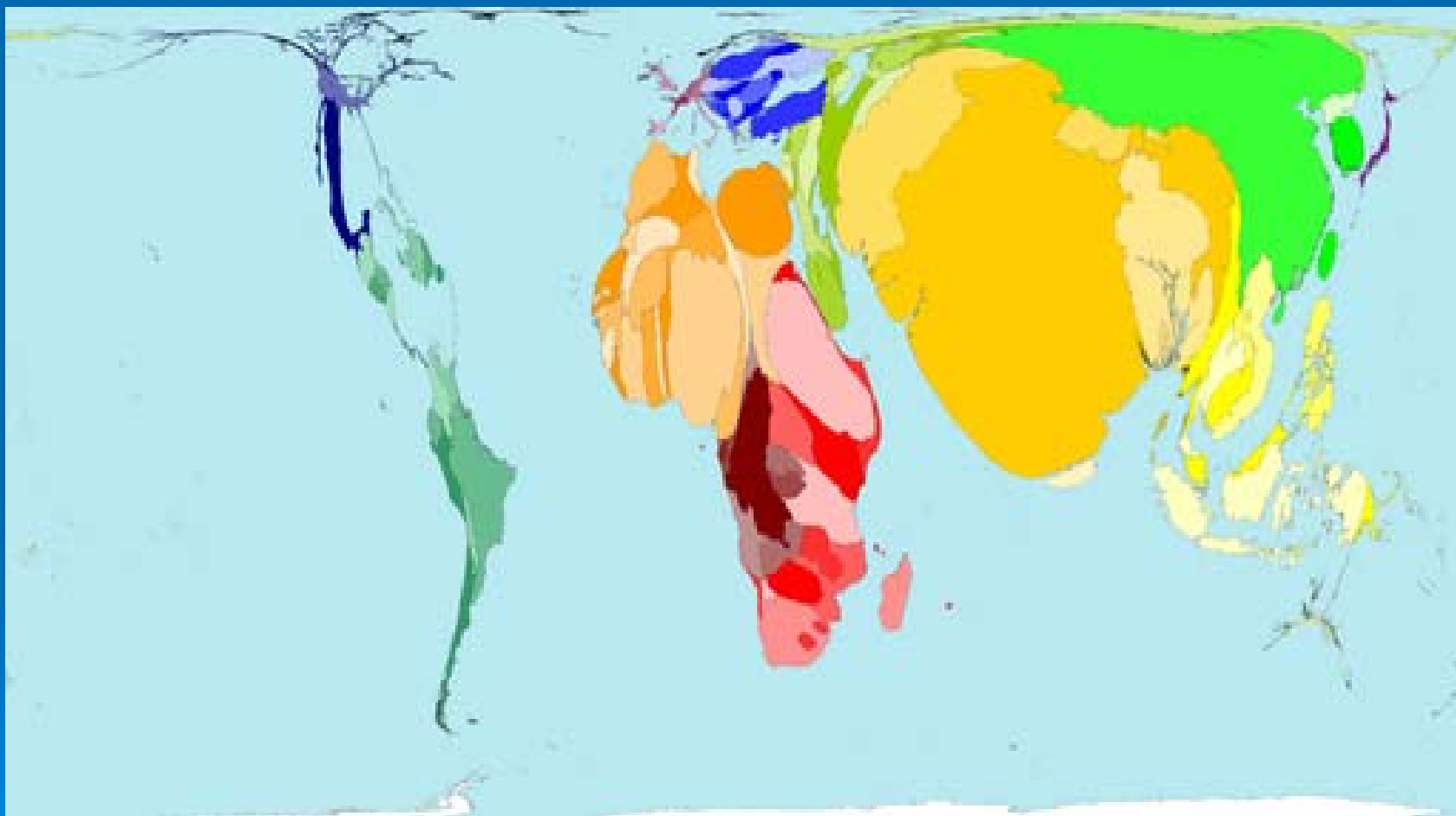
Source: FAO, 1997b.

This table gives examples of water required per unit of major food products, including livestock, which consume the most water per unit. Cereals, oil crops and pulses, roots and tubers consume far less water.





# Mapa de la pobreza en términos de Desarrollo Humano



# Costo anual estimado para lograr los Objetivos del Milenio

Agua segura:

US\$ 858 millones por año

Saneamiento básico:

US\$ 3.813 millones por año

DOLARES CORRIENTES 2002

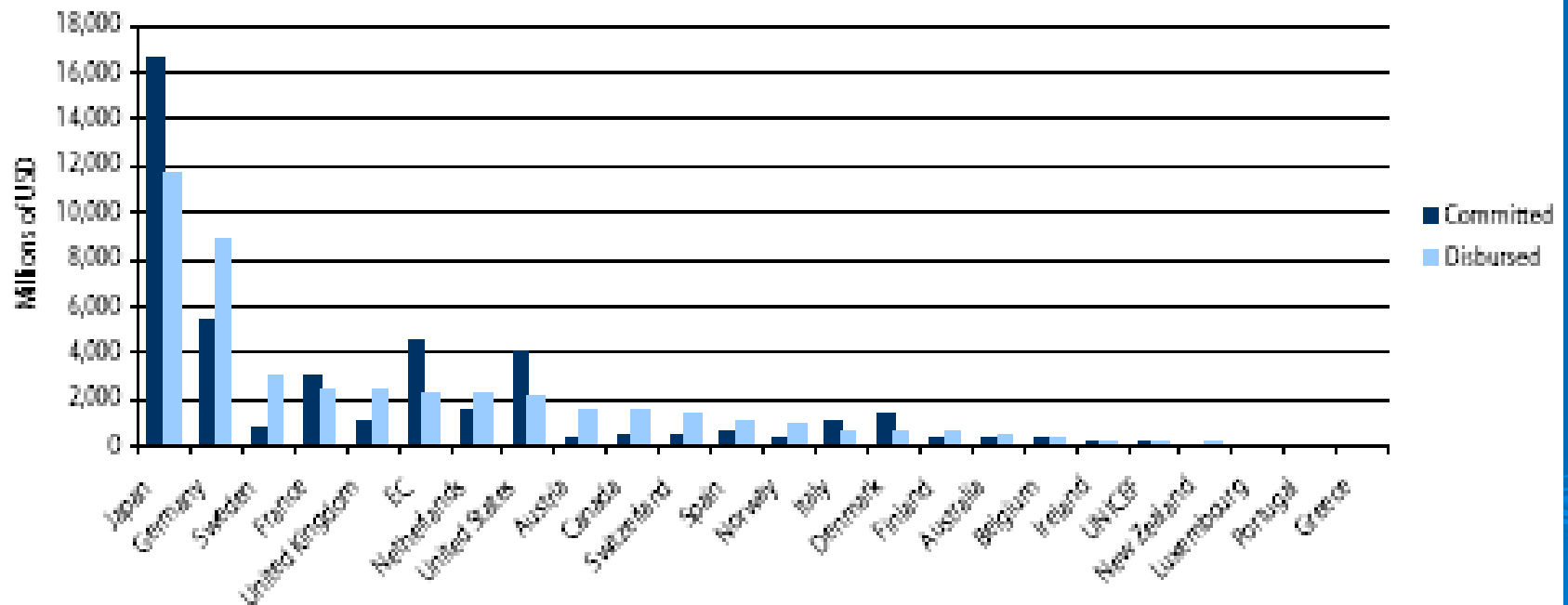
# Costo del salvataje a la Banca solo en USA

700 mil millones de dólares fueron los inyectados por Estados Unidos a su economía para sortear una crisis que empezó en dicha tierra y hoy afecta a todo el mundo.

**104 dólares por cada cabeza que vive en el mundo.**

# Compromisos versus Cumplimientos

Global disbursements to the sectors are nearly equivalent to the commitments made over the past 15 years  
 Figure x: Bi-Lateral / Multi-Lateral Aid - Commitments and Disbursements (1990-2005)





# ¿Qué nos impide avanzar?

- Limitaciones políticas – falta de liderazgo y compromiso político para invertir los recursos y el tema no es prioritario para los políticos
- Limitaciones institucionales – falta de instituciones apropiadas a todos los niveles y disfunción crónica de las instituciones existentes en la cooperación internacional multi y bilateral y los estados
- Limitaciones financieras – falta de comprensión sobre el valor y los costos reales que no son posibles de cumplir en el cuidado y restauración de humedales
- Desafíos Científicos.- mejor conocimiento de las interrelaciones superficial-subterráneo.

# La crisis del Agua es esencialmente una crisis de **GOBERNABILIDAD**

“LOS PRINCIPIOS BÁSICOS DE UNA GOBERNABILIDAD EFICAZ SON:

EDUCACION  
EQUIDAD y ETICA  
INTEGRACION

LA GESTION EFICAZ DEL AGUA DEBE INCORPORAR PRINCIPIOS DE:

PARTICIPACION  
TRANSPARENCIA  
RESPONSABILIDAD



# WASA-GN

Water Assessment & Advisory  
Global Network

***Carlos Fernandez-Jauregui***

***Director***

***c.fernandez-jauregui@wasa-gn.net***





# El papel del agua subterránea en el funcionamiento de los humedales

Juan José Durán Valsero

Instituto Geológico y Minero de España (IGME)

jj.duran@igme.es



## La necesidad de un cambio de visión

- Estático
- Dinámico



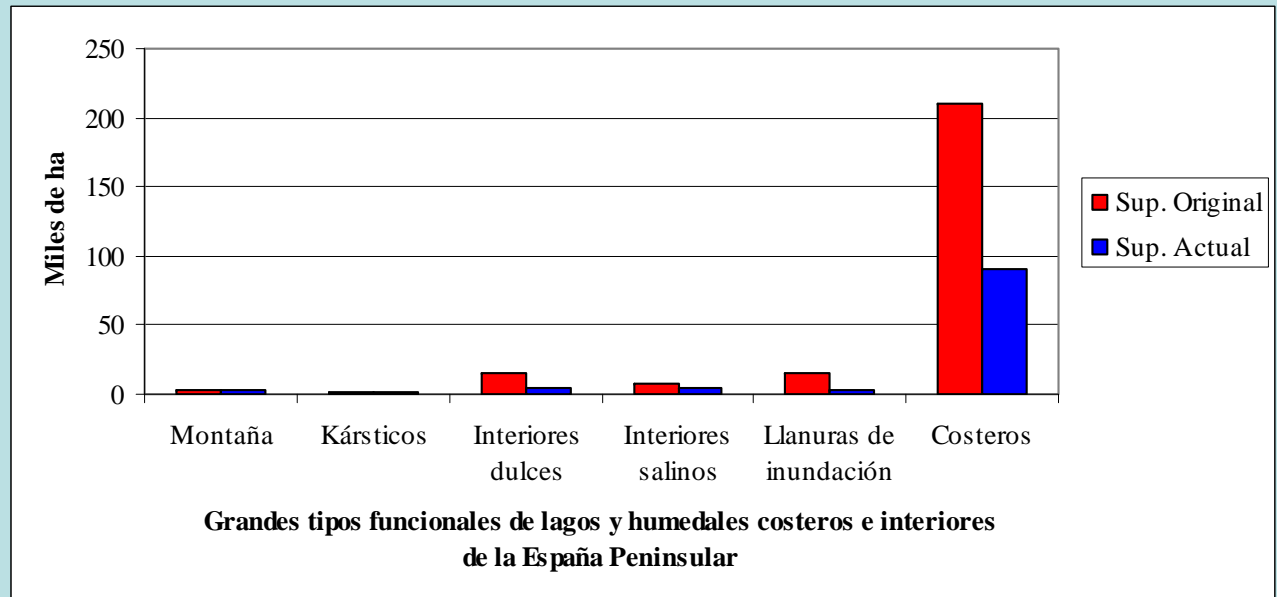
## Dos características claves de un humedal

- Su origen
- El grado de evolución



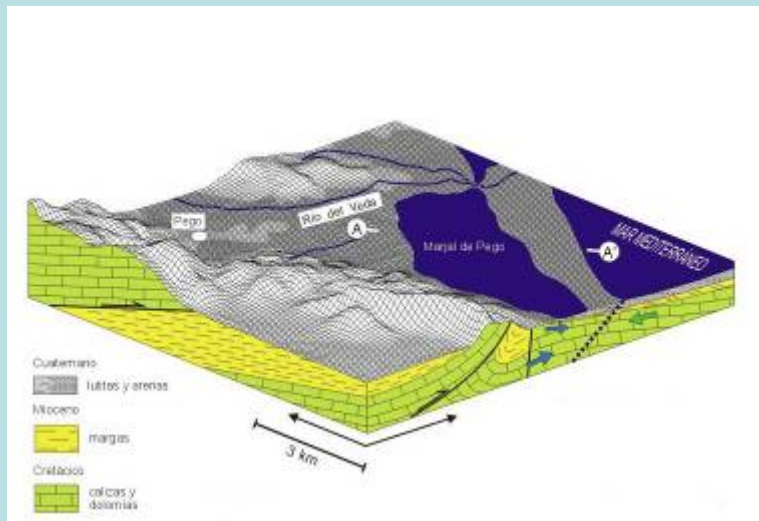
## Los procesos geológicos actuantes

- Pasados
- Presentes
- Futuros



# La importancia del modelo geológico

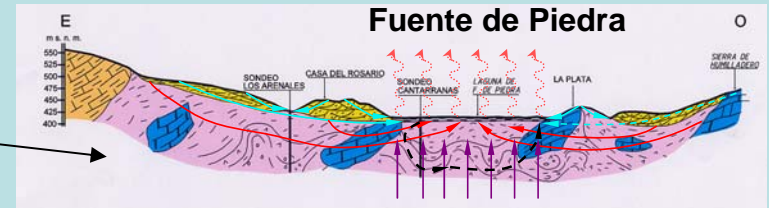
- El modelo conceptual
- El modelo 2D
- El modelo 3D



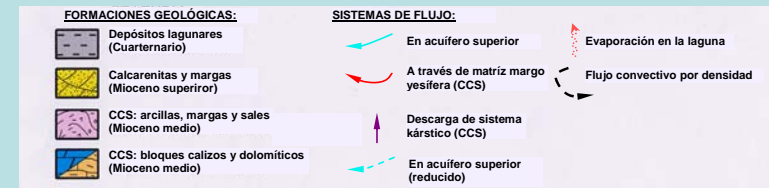


# El modelo hidrogeológico

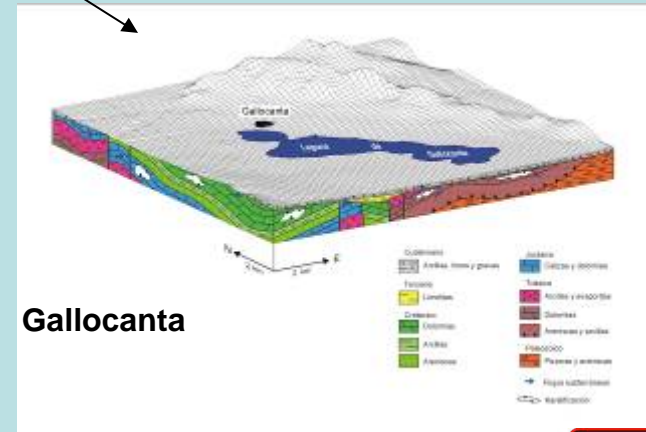
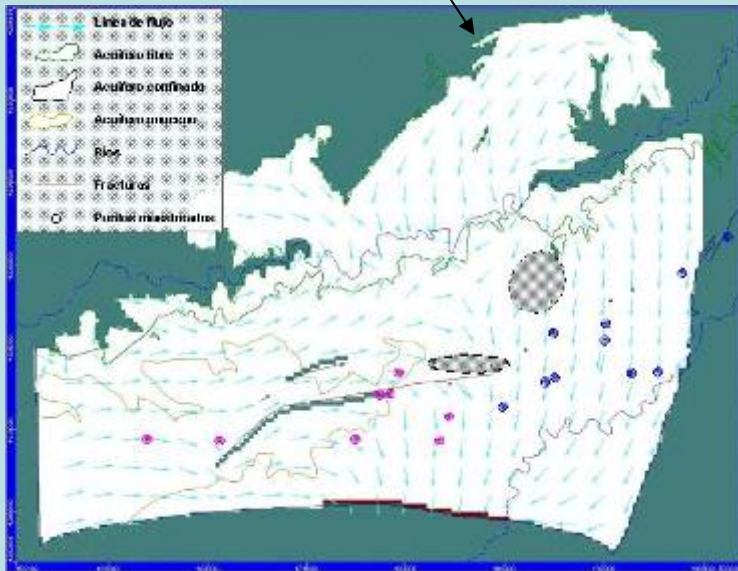
- Conceptual
- Geométrico
- Matemático



Sistema de flujo: acuífero superior (miocuaternario) + matriz margo yesífera (CCS) + sistema kárstico (CCS)  
 Génesis salmuera: proceso evaporativo + evolución hidrogeoquímica + factor litológico

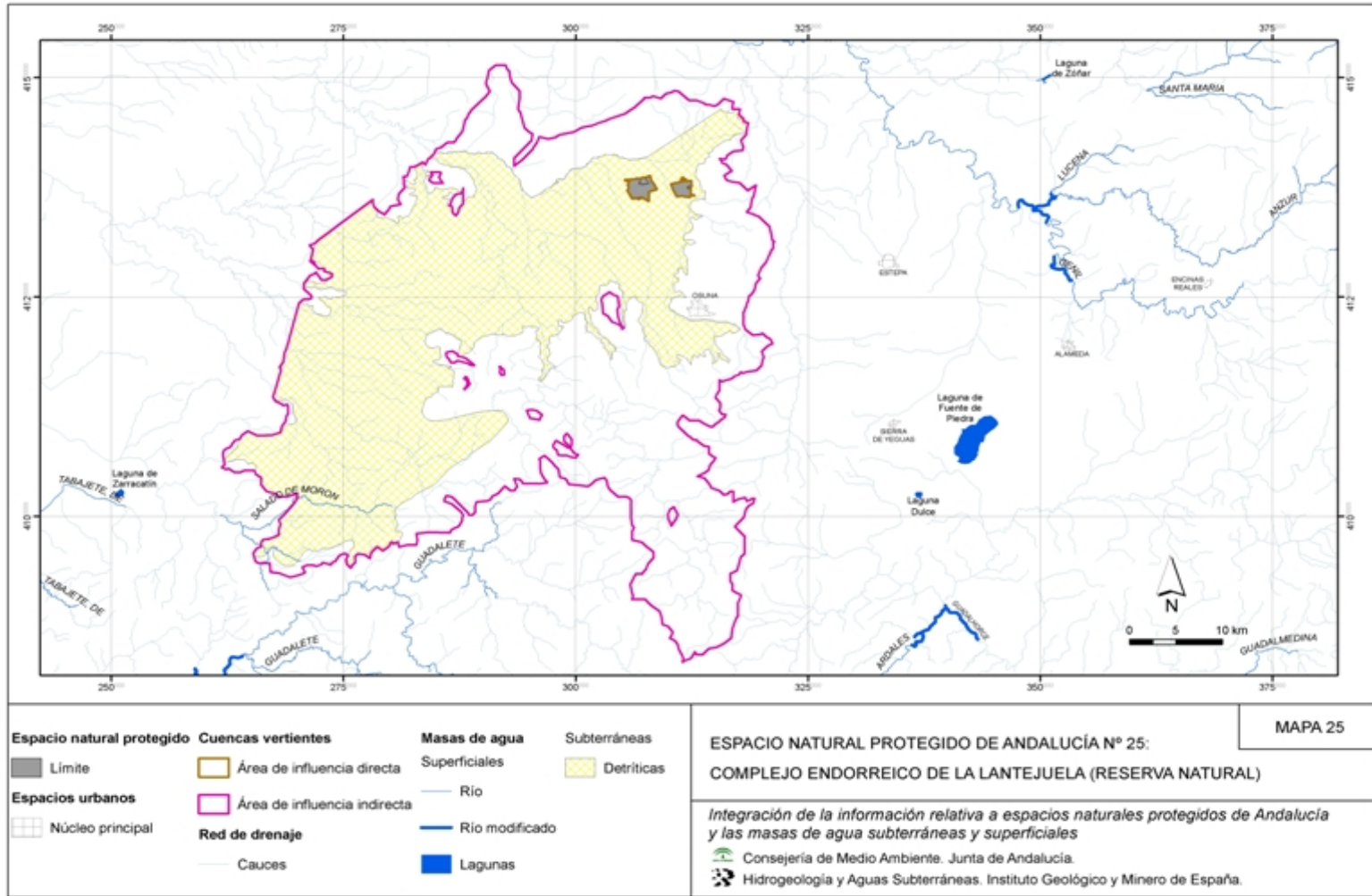


Modelo conceptual del sistema hidrogeológico de la laguna de Fuente de Piedra  
 Modelo genético-evolutivo de sus salmueras



Gallocanta

# El hidrosistema como unidad de referencia



# Relación de los humedales con las aguas subterráneas

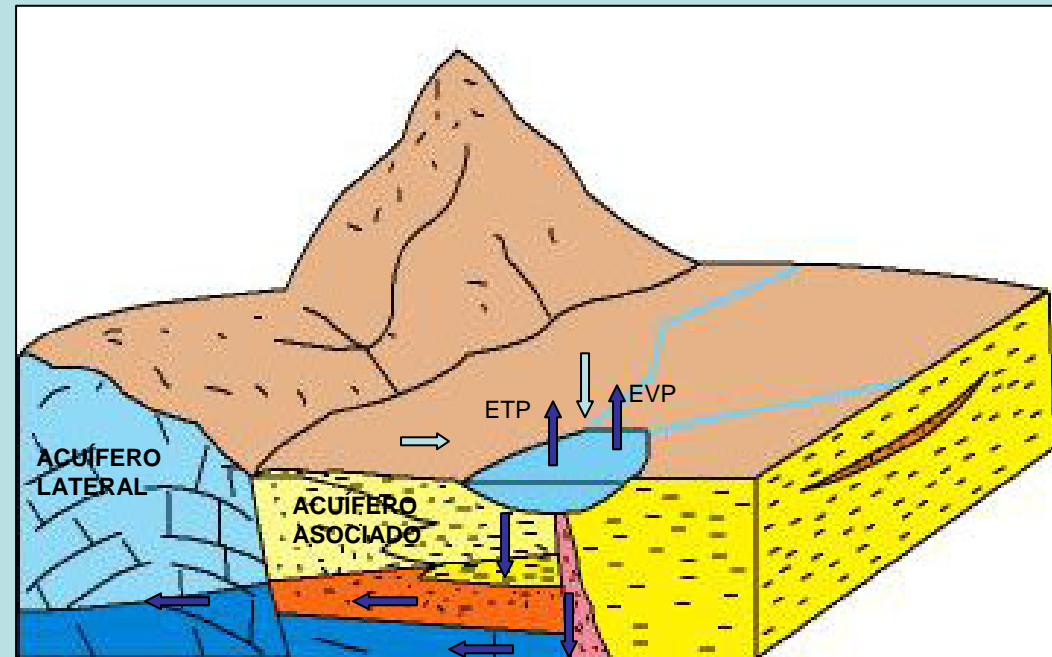
## En régimen de descarga

### *Aportes al sistema*

- Precipitaciones directas de agua sobre la laguna
- Escorrentía superficial procedente de la cuenca vertiente
- Aportes directos antrópicos

### *Salidas del sistema*

- Evaporación directa
- Evapotranspiración
- Salidas naturales
- Bombeos
- Recarga subterránea hacia los acuíferos asociados y acuíferos laterales
- Recarga de aguas subterráneas profundas hacia acuíferos lejanos



# Relación de los humedales con las aguas subterráneas

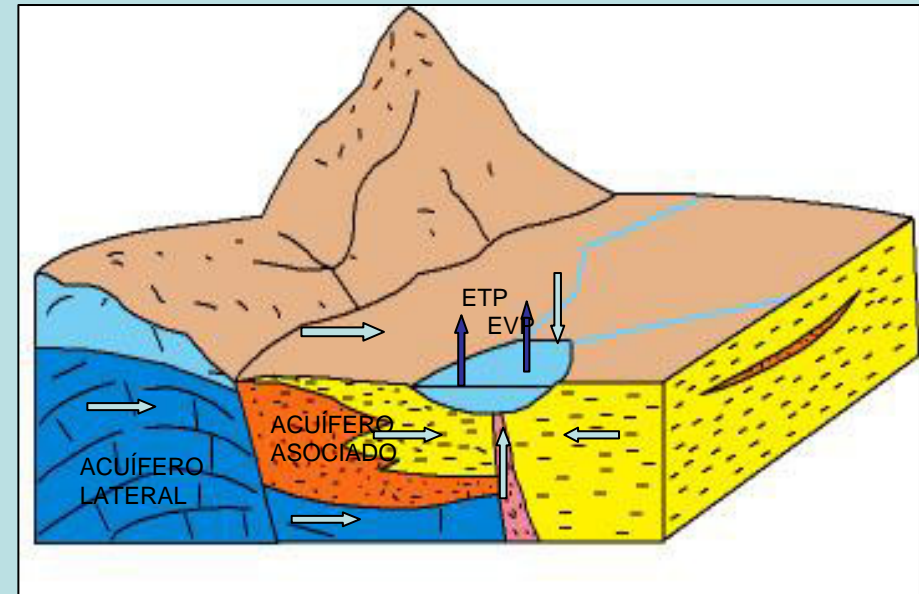
## En régimen de recarga

### *Aportes al sistema*

- Precipitaciones directas de agua sobre la laguna
- Escorrentía superficial procedente de la cuenca vertiente
- Aportes subterráneos procedentes de la descarga de los acuíferos asociados y acuíferos laterales
- Aportes directos antrópicos
- Aportes de aguas subterráneas profundas procedentes de acuíferos lejanos

### *Salidas del sistema*

- Evaporación directa
- Evapotranspiración
- Salidas naturales
- Bombeos



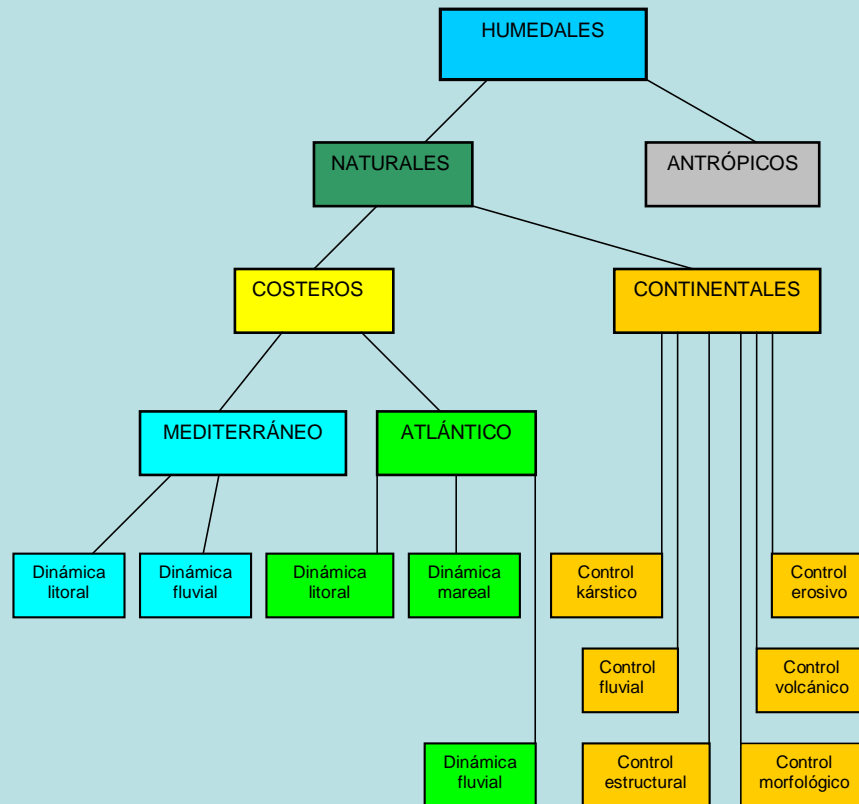


# Los humedales y la geodiversidad

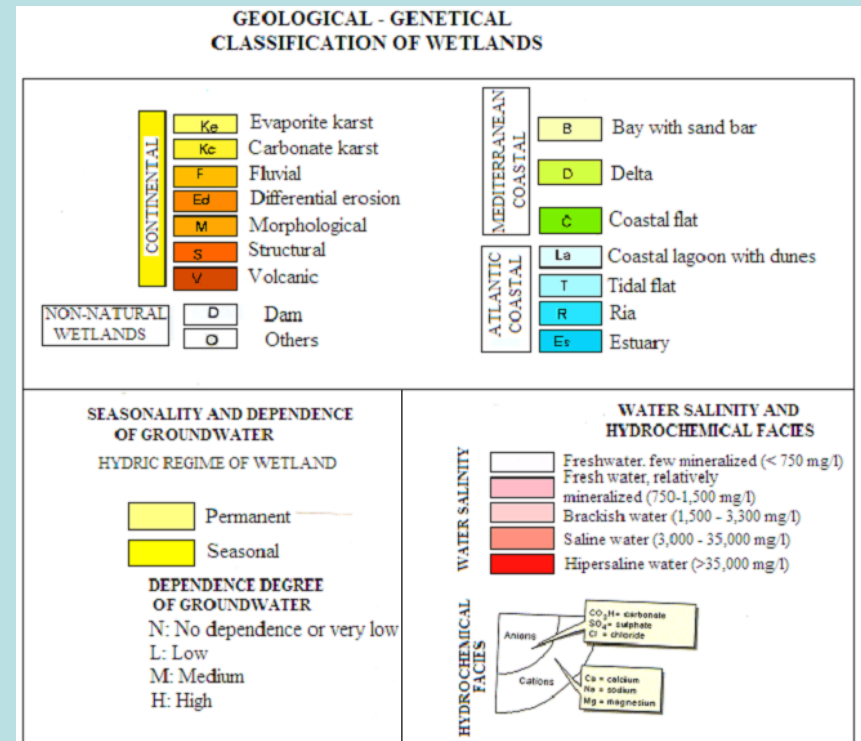
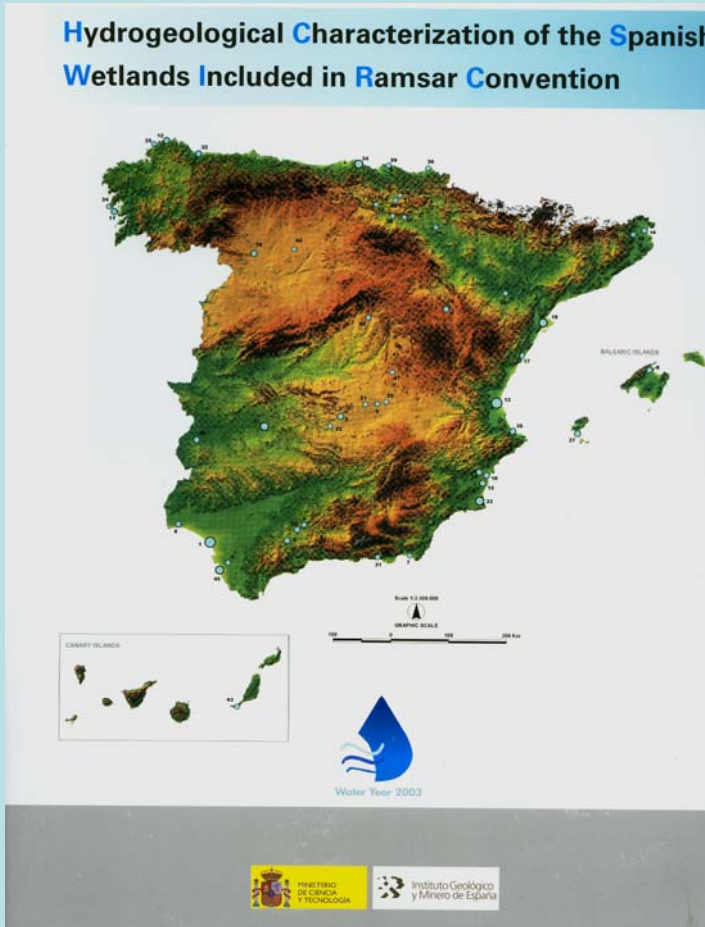
- Patrimonio geológico
- Geodiversidad
- La Directiva Hábitat (92/43/CEE)

<b>1</b>	<b>HÁBITATS COSTEROS Y VEGETACIÓN HALÓFILA</b>
11	Aguas marinas y medios de marea
12	Acantilados marítimos y playas de guijarros
13	Marismas y pastizales salinos atlánticos y continentales
14	Marismas y pastizales salinos mediterráneos y termoatlánticos
15	Estepas continentales halófilas y gipsófilas
<b>2</b>	<b>DUNAS MARITIMAS Y CONTINENTALES</b>
21	Dunas marítimas de las costas atlánticas
22	Dunas marítimas de la costas mediterráneas
<b>3</b>	<b>HABITATS DE AGUA DULCE</b>
31	Aguas estancadas
32	Aguas corrientes
<b>6</b>	<b>FORMACIONES HERBOSAS NATURALES Y SEMINATURALES</b>
61	Prados naturales
62	Formaciones herbosas secas seminaturales y facies de matorral
63	Bosques esclerófilos de pastoreo (dehesas)
64	Prados húmedos seminaturales de hierbas altas
<b>7</b>	<b>TURBERAS ALTAS. TURBERAS BAJAS Y AREAS PANTANOSAS</b>
71	Turberas ácidas de esfagnos
72	Áreas pantanosas calcáreas
<b>8</b>	<b>HABITATS ROCOSOS Y CUEVAS</b>
81	Desprendimientos rocosos
82	Pendientes rocosas con vegetación casmofítica
83	Otros hábitats rocosos
<b>9</b>	<b>BOSQUES</b>
91	Bosques de la Europa templada
92	Bosques mediterráneos caducifolios
93	Bosques esclerófilos mediterráneos

# Clasificación genética-geológica de los humedales Ramsar españoles



# Clasificación genética-geológica de los humedales Ramsar españoles



# Muchas gracias por su atención



## A-Dominados por la dinámica litoral

- Bahías cerradas mediante el crecimiento y progradación de barras tanto litorales como submarinas

**Prat de Cabanes-Torreblanca**  
**Albufera de Valencia**  
**Albufera de Mallorca**  
**Marjal de Pegó- Oliva**  
**Salinas de Ibiza y Formentera**  
**Salinas de Santa Pola**  
**Salinas de la Mata y Torrevieja**  
**Mar Menor**  
**Salinas del Cabo de Gata**  
**Punta Entinas-Sabinar**



ÁMBITO  
COSTERO  
MEDITERRÁNEO

## **B-Dominados por la dinámica fluvial**

- Deltas. La acción mixta fluvial y marina se ejerce en la desembocadura de un río

**Delta del Ebro**  
**Albuferas de Adra**

- Llanuras costeras. La acción mixta fluvial y marina se ejerce a lo largo de varios ríos cercanos

**Aiguamolls del Ampurdán**



## A-Dominados por la dinámica litoral

- Laguna costera atlántica con cierre dunar

Complejo playas, dunas y laguna de  
Corrubedo  
Valdoviño



## B-Dominados por la dinámica mareal

- Llanuras mareales de rango atlántico

Complejo intermareal Umia-Grove  
Doñana  
Marismas del Odiel  
Bahía de Cadiz  
Txingudi  
Jandía  
Palos y las Madres



## C-Dinámica fluvial

- Rías. Cursos fluviales invadidos por el mar debido descenso relativo del continente

**Rías de Ortigueira y Ladrido**

**Ría de Guernica**

**Ría del Eo**

-Estuarios. Desembocaduras fluviales con predominio de la acción marina

**Marismas de Santoña, Victoria y Joyel  
Txingudi**





## A- Depresiones con control kárstico

### - Karst en carbonatos

Tablas de Daimiel

Laguna de Gallocanta

Bañolas

Vega o Pueblo

Manjavacas

### - Karst en evaporitas

Fuente de Piedra

Lagunas de Laguardia

Zonas húmedas del sur de Córdoba

Lagunas de Cádiz

Hito

Salinas de Añana

Campillos

Chinche

Honda

Los Jarales

Tiscar

Conde

Espera



ÁMBITO  
CONTINENTAL

## B- Depresiones con control fluvial-aluvial

- Llanuras de inundación. Lagunas formadas en zonas de desbordamiento de los cursos fluviales

Embalse de las Cañas

Lagunas de Alcázar de San Juan

El Hondo

Puebla de Beleña

Villafáfila

Pitillas

Nava de Fuentes

Salburúa

Brazo del Este

- Sistemas aluviales

Padul



## C- Depresiones con control morfológico

- Lagunas formadas en zonas planas

Complejo lagunar de La Albuera



ÁMBITO  
CONTINENTAL

## D- Depresiones controlada por erosión diferencial

- Cambios litológicos

Complejo lagunar de la Salada de Chiprana



## E- Depresiones con control estructural

- Depresiones tectónicas

Lagunas de Cádiz (Laguna de Medina)



# Clasificación genética-geológica de los humedales Ramsar españoles



## F- Depresiones con control volcánico

- Calderas magmatofreáticas

Laguna del Prado o de Pozuelo



## G- Depresiones con control glaciar

- Sobreexcavación glaciar

Aigüestortes y L. Sant Maurici  
Peñalara  
Urbión



# Clasificación genética-geológica de los humedales Ramsar españoles

ANTRÓPICO



**G- Embalses**

# **EL PAPEL DEL AGUA SUBTERRÁNEA Y LAS NECESIDADES DE CONOCIMIENTO PARA UNA ADECUADA GESTIÓN**



**Marisol Manzano**  
Universidad Politécnica de Cartagena (España)  
marisol.manzano@upct.es



## ÍNDICE

1. Definición de humedal
2. Relevancia de los humedales
3. Factores de control. Papel del agua subterránea
4. Necesidades de estudio de la hidrología de los humedales
5. Necesidad de clasificar/tipificar los humedales
6. Conclusiones





Humedales:

Áreas inundadas o saturadas por agua superficial o subterránea con una frecuencia y duración suficientes como para mantener, al menos periódicamente, una vegetación típicamente adaptada a la vida en suelos saturados



## 2. RELEVANCIA DE LOS HUMEDALES

1. Realizan **FUNCIONES** (procesos -ecológicos, hidrológicos-) esenciales para el funcionamiento del medio natural y el ser humano.

2. Que generan **SERVICIOS** (beneficios) para el ser humano y para el medio natural (no siempre obvios, especialmente en humedales DAS)

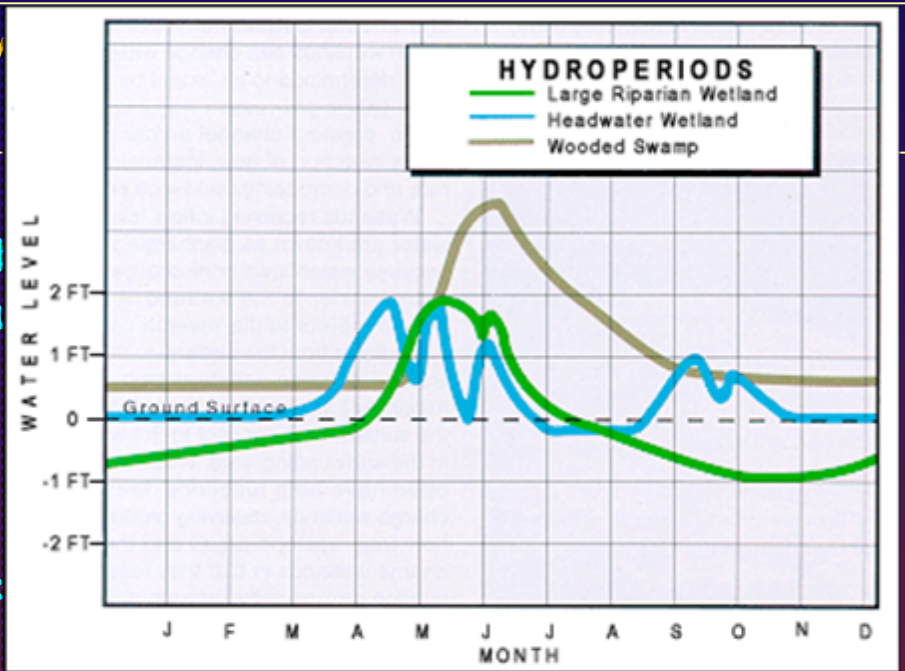
- Seguridad para la especie humana (Función: mitigación de inundaciones)
- Provisión de salud (Función: mejora de la calidad de aguas, suelos y aire)
- Provisión de recursos naturales (Función: generación de madera, carbón
  - No todos los humedales realizan todas las funciones
  - No todas las funciones de un humedal se realizan al mismo nivel
  - Factores de control: ubicación en red hídrica; clima, dimensiones, balance de agua y sales, alteración del medio en el entorno,...
- materiales, turísticos, ... (Ej. etiquetas de calidad J. Andalucía)
- Preservación cultural (Mesopotamia, Titicaca, ...)



# 3. FACTORES DE CONTROL DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS HUMEDALES

## Factores más relevantes que condicionan humedales

- A. Existencia de un lugar físico en el que la lámina libre o saturando el suelo ha sido permanente o recurrente.
- B. Existencia de procesos hídricos recurrentes
  - a) Existencia de una fuente de agua que aporte un régimen físico-químico, variabilidad espacial y temporal
  - b) Hidroperiodo (frecuencia y permanencia de la inundación/saturación)
  - c) Balance hídrico en el humedal y tasa de renovación



Hidroperiodo: patrón temporal de frecuencia y persistencia de inundación / saturación


➡ **HIDROLOGÍA**

La combinación de A y B da lugar a una casuística muy variada  
**NECESIDAD DE ESTUDIAR y CLASIFICAR**

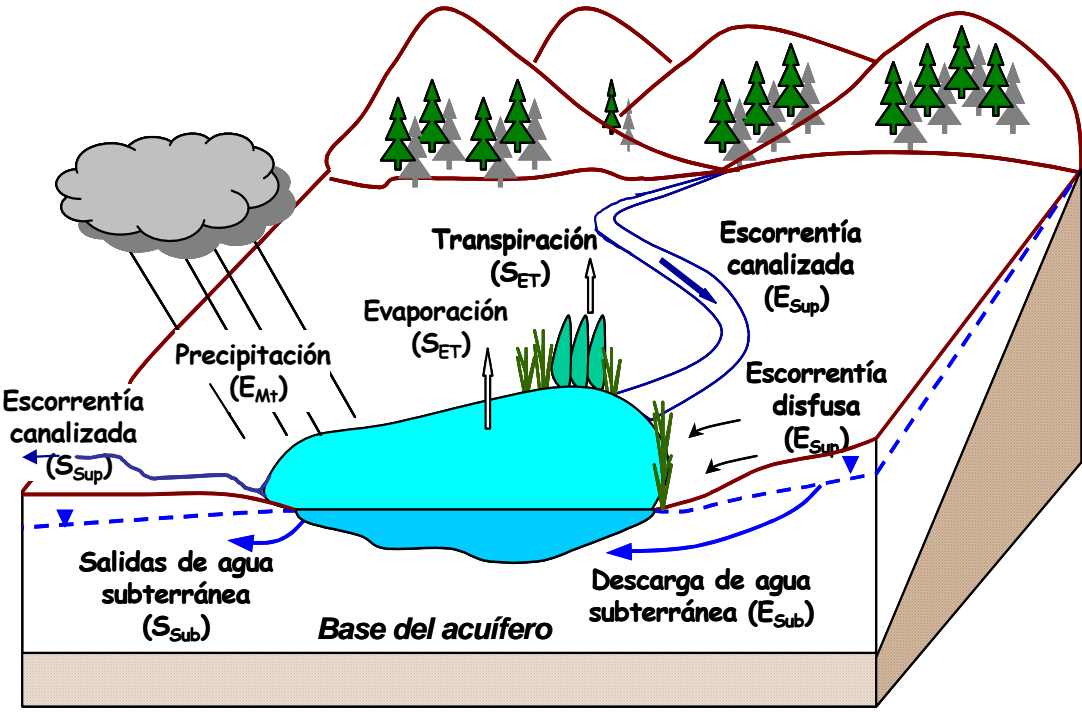


# 3. FACTORES DE CONTROL DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS HUMEDALES

## Procesos hídricos en humedales

1) De flujo   
(A: aporte)  
(E: extracción)

PROCESOS DE APORTE ( $E_x$ ) Y DE EXTRACCIÓN DE AGUA ( $S_x$ ) EN HUMEDALES



- Precipitación (A)
- Condensación hum. atm. (A)
- Flujo superficial (A/E)
- Flujo mareal (A/E)
- Flujo agua subterránea (A/E)
- Evaporación/transpiración (E)
- Procesos artificiales (A/E)

2) De almacenamiento 

- El agua se almacena en la cubeta, en los sedimentos del fondo y en el terreno
- Varía con la superficie húmeda efectiva y la extensión de la hidrofítica



### 3. FACTORES DE CONTROL DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS HUMEDALES

#### Reacciones físico-químicas y bio-geoquímicas

Precipitación y disolución de sólidos y transferencia a la atmósfera debida a cambios de pH y/o Eh. Ej.:

- Reducción de  $SO_4$  a S y precipitación + posible redisolución
- Reducción de  $NO_3$  a N gas y escape o incorporación a sed.
- Escape de  $CO_2$  (orgánico/inorgánico)
- Precipitación de  $CaCO_3$  por escape de  $CO_2$  + subida del pH

Reacciones  
físico  
químicas

y →

bioquímicas  
más  
comunes

Precipitación y disolución debidas a cambios de salinidad. Ej.:

- Precipitación de  $CaSO_4$  (y NaCl) en época seca y disolución en época húmeda (*a largo plazo puede salinizar el humedal*)
- Cambios en la proporción agua dulce/agua marina (costeros)

Reciclado de nutrientes: los organismos vivos pueden extraer y aportar solutos a/del agua (N, P,  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $H_2S$ , Ca, Mg, Sr, Si,...)



# 3. FACTORES DE CONTROL DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS HUMEDALES

## PAPEL DEL AGUA SUBTERRÁNEA

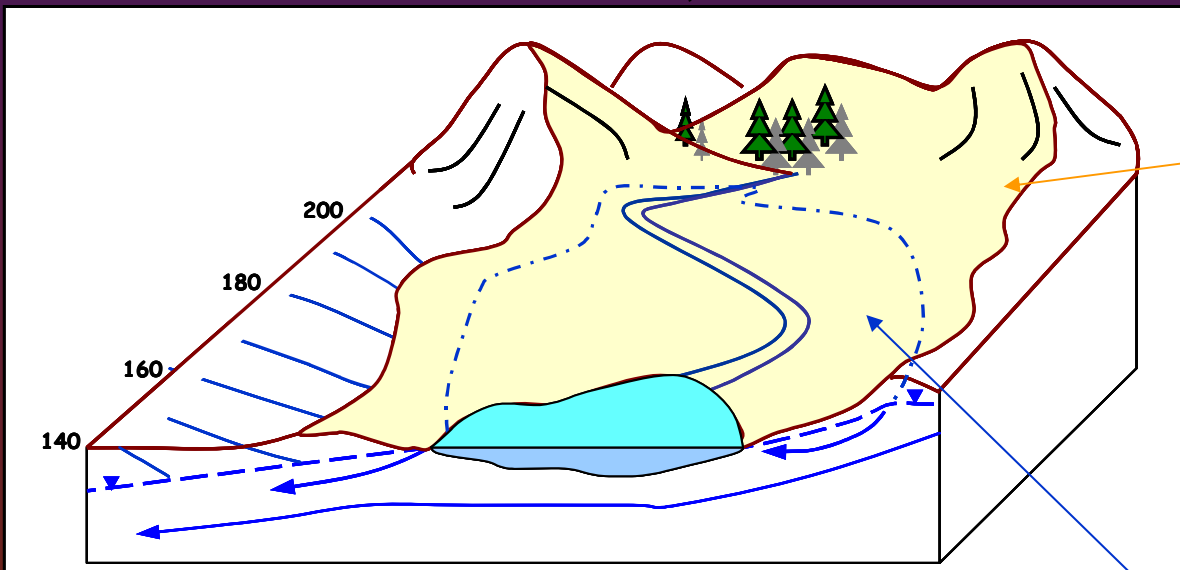
### Procesos hídricos de las aguas subterráneas en los humedales

Procesos hídricos subterráneos relevantes: Recarga, Evaporación, Transpiración, Flujo



Ocurren en la cuenca de recepción (volumen de terreno en 3D que aporta agua al humedal)

Cuenca de recepción: dos componentes cuyos límites físicos no siempre coinciden



**Cuenca superficial:** superficie de terreno vertiente que aporta la escorrentía superficial hacia el humedal

**Cuenca subterránea:** volumen de terreno acuífero que puede aportar flujos subterráneos al humedal

Anterior **Índice** **Inicio** Siguiete

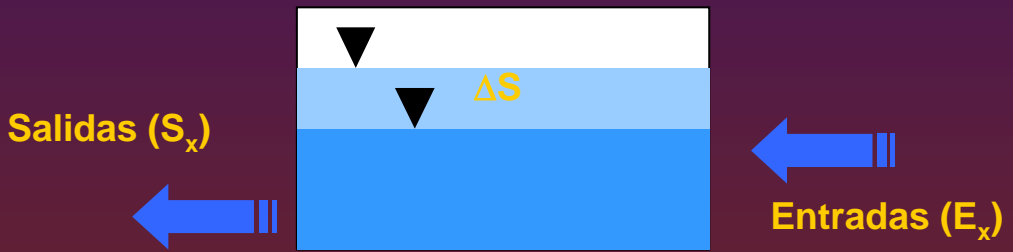
- - - Nivel freático
- 180 Isopieza y nivel piezométrico (msnm)
- ← Línea de flujo de agua subterránea
- - - Límite de la cuenca subterránea
- 🟡 Límite de la cuenca superficial

# 3. FACTORES DE CONTROL DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS HUMEDALES

## Balance de agua en humedales (id. balance de solutos)

Requiere identificar y cuantificar los procesos y mecanismos de aporte, almacenamiento y extracción de agua del humedal

### BALANCE HÍDRICO EN EL HUMEDAL



$$\underbrace{\begin{matrix} E_{Sup} \\ E_{Sub} \\ E_{Mt} \end{matrix}}_{\text{Entradas}} - \underbrace{\begin{matrix} S_{Sup} \\ S_{Sub} \\ S_{ET} \end{matrix}}_{\text{Salidas}} = \underbrace{\Delta S}_{\text{Variación del agua almacenada}}$$

Varias escalas



### 3. FACTORES DE CONTROL DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS HUMEDALES. PAPEL DEL AGUA SUBTERRÁNEA

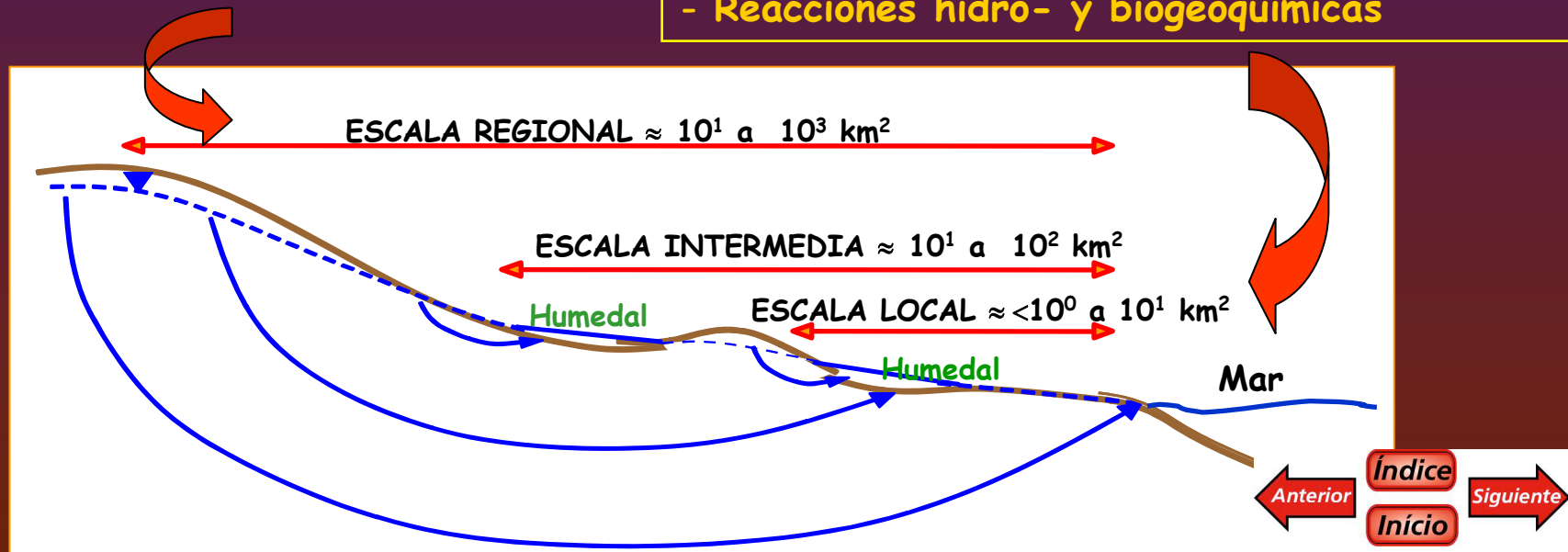
*Procesos hídricos subterráneos relevantes para el humedal:  
ocurren a distintas escalas espaciales y temporales  
(en muchos casos dominan los de una escala determinada)*

#### Ámbitos regional e intermedio:

- Variabilidad temporal/espacial de P
- Variabilidad escorrentía concentrada
- Cambios (naturales/influenciados) en red de flujo subterránea
- Composición química lluvia y terreno + reacciones hidrogeoquímicas

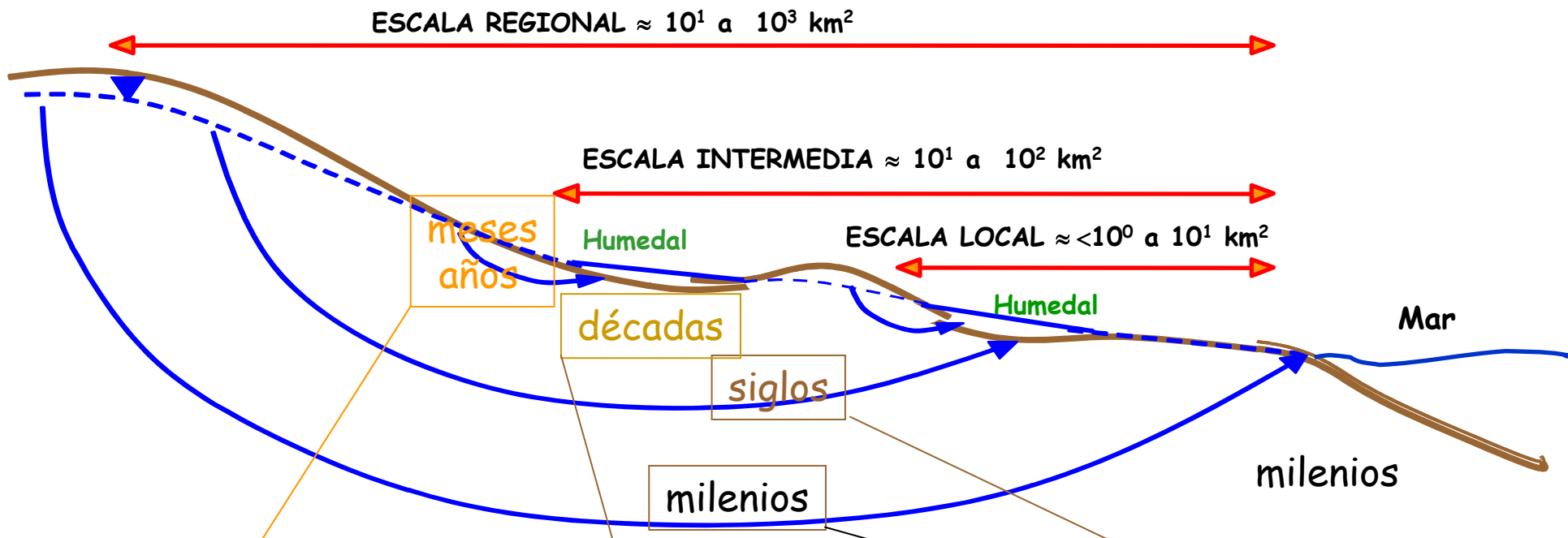
#### Ámbito local: (variabilidad estacional habitual)

- Variabilidad temporal de P sobre el humedal y entorno cercano
- Variabilidad escorrentía difusa
- Evaporación y transpiración
- Gradientes hidráulicos entre el humedal y el terreno y su variabilidad
- Reacciones hidro- y biogeoquímicas



### 3. FACTORES DE CONTROL DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS HUMEDALES. PAPEL DEL AGUA SUBTERRÁNEA

*Traducción en términos de características del agua del humedal*



**Aportes superficiales: cantidad, calidad y regularidad variables**

- Mineralización baja
- Impacto humano
- Composición quizás variable
- Descarga variable

**Aportes subterráneos: generalmente mayor calidad y regularidad**

- Mineralización media
- Impacto humano
- Composición quizás variable (lentamente)
- Descarga poco/nada variable (lentamente)

- Mineralización elevada
- Sin impacto humano
- Composición muy estable (o variable n...)
- Descarga e...





# 4. NECESIDADES DE ESTUDIO DE LA HIDROLOGÍA DE LOS HUMEDALES

## Métodos de estudio y cuantificación de los flujos de agua subterránea

Interacción humedal - acuífero →

Depende de: precipitación, evaporación, transpiración, infiltración, manejo del suelo y del agua (sup y sub), configuración red flujo,...

Flujo de agua subterránea →

Depende de: factores hidráulicos, hidrológicos y geológicos, controlados por  $i$ ,  $k$ ,  $\phi$  y  $S$

..Sencillos de entender, pero difíciles de estimar con cierta precisión!

*Estimaciones aproximadas: la incertidumbre asociada hace que los balances hídricos calculados no tengan significado*

Métodos de estudio →

Imprescindible: realizar observaciones, establecer modelos conceptuales y realizar modelos numéricos para contrastar hipótesis y realizar p



## 4. NECESIDADES DE ESTUDIO

### Conocer el estado de funcionalidad

### Amenazas y afecciones a los HDAS

Derivadas de modificaciones en la red hídrica de la cuenca



- Drenaje
- Canalización de flujos
- Construcción de diques, compuertas, levees..
- Minería
- Vertido material de relleno
- Explotación intensiva de agua subterráneas

Derivadas de los usos del suelo



- Manejo forestal
- Agricultura
- Desarrollo y expansión urbana

Derivadas del cambio climático global



- Modificación de balances (de agua y sales)
- Modificación de la red e flujo (ubicación y magnitud de las recargas y descargas)
- Modificación del tipo y distribución de ecosistemas

## 4. NECESIDADES DE ESTUDIO

### *Preservación, conservación y restauración de la hidrogeología de humedales dependientes de aguas subterráneas*

*Preservación  
hidrología HDAS*

Proteger las condiciones que permiten su funcionamiento y la realización de sus funciones como en la actualidad

*Restauración  
hidrología HDAS*

Máxima recuperación -en el contexto presente- de las condiciones necesarias para un funcionamiento cercano al natural (usar Humedales de Referencia)

**CONOCER: TIPO HIDROLÓGICO BÁSICO, DETALLES ESPECÍFICOS DEL FUNCIONAMIENTO Y ESTADO DE CONSERVACIÓN**

## 5. NECESIDAD DE CLASIFICAR / TIPIFICAR LOS HUMEDALES

### Clasificación de humedales

**Objetivo:** establecer tipologías que faciliten la gestión (estableciendo normas generales y específicas)

**Método:**

- 1) Elegir humedales poco o nada alterados
- 2) Estudiar funcionamiento y establecer modelos (simples)
- 3) Atribuir un modelo de funcionamiento a cada humedal
- 4) Establecer humedales de referencia para cada modelo (realizar en ellos estudios intensivos a largo plazo)

**Gestión:** Evaluar el estado de conservación y de funcionamiento de cada humedal con relación a su humedal de referencia, y establecer actuaciones en consecuencia



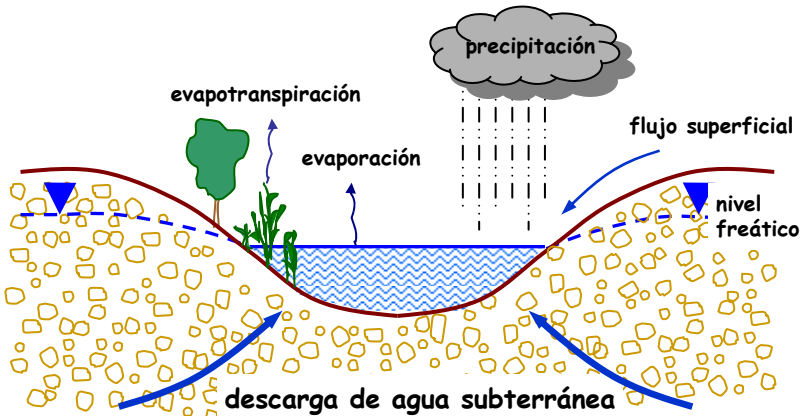


# 5. NECESIDAD DE CLASIFICAR / TIPIFICAR LOS HUMEDALES

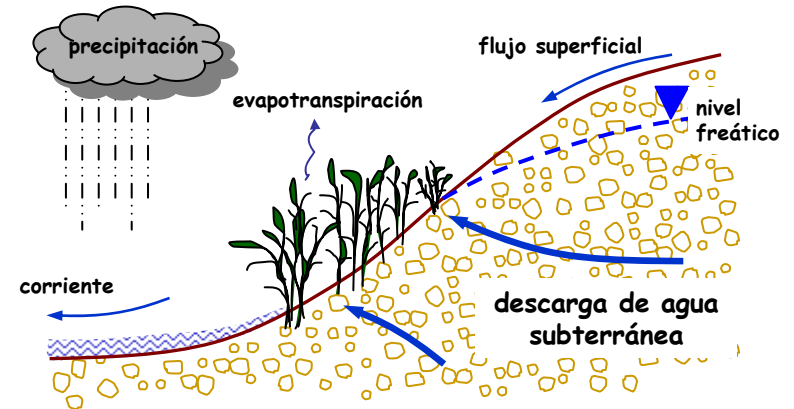
## Clasificación de humedales

## Algunas propuestas iniciales Criterio hidro-mórfico (Novitzki (1979, 1989))

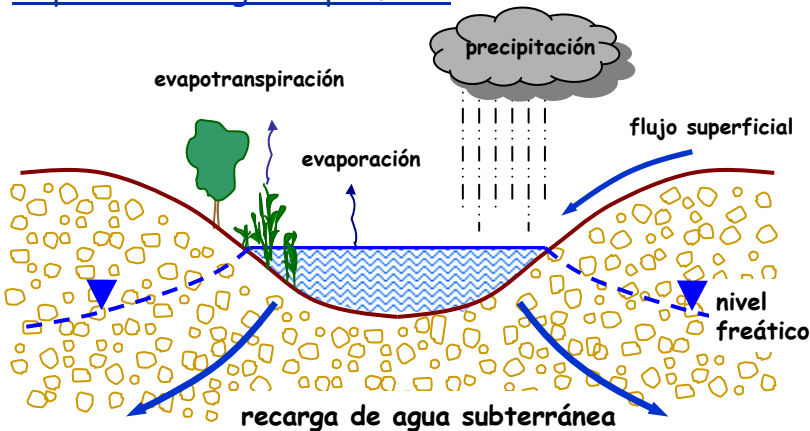
Depresión de agua subterránea



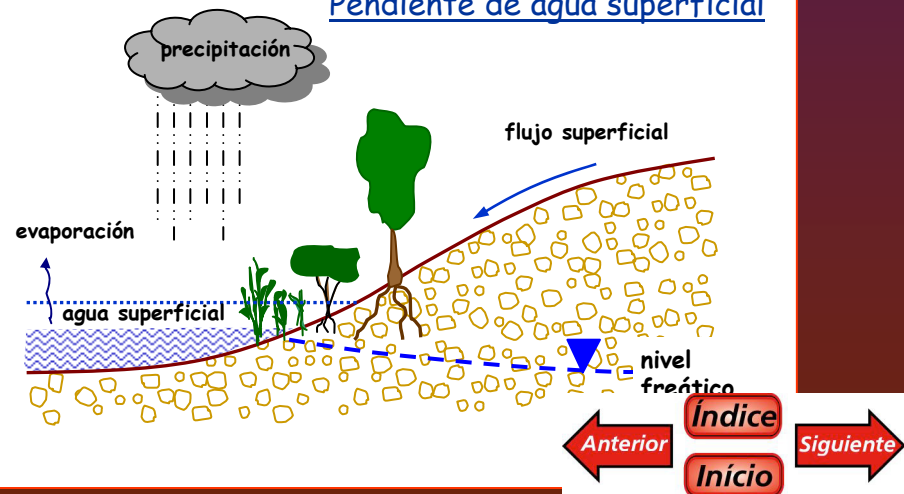
Pendiente de agua subterránea



Depresión de agua superficial



Pendiente de agua superficial



# 5. NECESIDAD DE CLASIFICAR / TIPIFICAR LOS HUMEDALES

## Clasificación hidrológica de humedales

Propuestas actuales: criterios funcionales de complejidad creciente

Factores hídricos básicos a definir

Factores complementarios

Nivel de clasificación	1	2	3
A) MODO DE ALIMENTACIÓN	* <b>Epigénicos</b> <i>(domina origen superficial)</i>	* Agua meteórica (lluvia, nieve/hielo, niebla); escorrentía y flujos vadosos; agua de mar; mixto	
	* <b>Hipogénicos</b> <i>(domina origen subterráneo)</i>	* De acuífero libre * De acuífero confinado * Mixto	* Flujos locales; flujos regionales * Flujos regionales; subregionales; mezcla * Indicar flujos dominantes
	* <b>Mixtos</b>	* Aportes superficiales y subterráneos sin dominio de uno	* Indicar proceso dominante * Indicar longitud flujos
	* <b>Costeros</b>	* De aportes continentales * De aportes marinos * De aportes mixtos	* Indicar origen del agua (escorrentía o descarga de acuífero) * Indicar origen del agua continental
B) MODO DE VACIADO	* <b>Abierto</b>	* Escorrentía superficial * Infiltración	* Río, arroyo, manantial, recarga de acuífero libre,...
	* <b>Cerrado</b>		* <b>Domina: evaporación / evapotranspiración</b>
	* <b>Mixto</b> <i>(sin dominio claro de uno u otro)</i>		* Indicar procesos
	* <b>Aprovechamiento humano</b>		* Indicar modo: bombeo, drenaje, cultivo,...
C) HIDROPERIODO <i>(duración y frecuencia de la inundación)</i>	* <b>Permanentes no fluctuantes</b> * <b>Permanentes fluctuantes</b>	* <b>Intervenidos: indicar tipo de intervención</b> * Indicar causa de fluctuación	* Indicar rango de fluctuación
	* <b>Temporales estacionales</b> * <b>Temporales erráticos</b>	* Indicar periodicidad * Indicar periodicidad	* Indicar rango de fluctuación * Indicar rango de fluctuación
	* <b>Mareales</b>	* <b>Micromareales</b> * <b>Mesomareales</b> * <b>Macromareales</b>	* Indicar detalles adicionales * Indicar detalles adicionales * Indicar detalles adicionales
D) TASA DE RENOVACIÓN <i>(balance de agua y sales)</i>	* <b>Alta</b> * <b>Media</b> * <b>Baja</b>		* En los tres: indicar valores de los componentes del balance de agua y de sales, así como frecuencia y porcentaje de renovación
E) HIDROQUÍMICA	* <b>Salinidad o mineralización</b>	* <b>Tipo hidroquímico</b>	* Variabilidad espacial/temporal
F) HIDRODINÁMICA <i>(configuración de los flujos en la cubeta y entre ésta y el terreno)</i>			* Describir (disponible en el sitio)



## 6. CONCLUSIONES

La hidrología es uno de los principales factores de control de las características de los humedales.

Estudiar la hidrología de un humedal requiere: 1) conocer y entender las fuentes de agua; 2) los modos de vaciado; 2) el balance de agua y de sales y 4) el hidoperiodo

Procesos hídricos de control de los HDAS: a escala regional y local. Reproducir adecuadamente el comportamiento y las características a ambas escalas requiere realizar estudios en 3D.

La clasificación de humedales es necesaria para establecer normas de gestión.

Métodos de clasificación con más éxito: hidro-geomórficos. Combinan aspectos fisiográficos (tipo y origen de la cubeta) e hidrológicos (fuente de aporte dominante, régimen hídrico y tipo hidroquímico)



## 6. CONCLUSIONES

En muchos casos los procesos de agua subterránea están amenazados o muy alterados por actividades antrópicas (cambios usos del suelo y vegetación, modificaciones red de flujo, introducción de contaminantes no degradables en suelo y agua), y también la integridad funcional de los humedales.

Restauración efectiva de la hidrogeología: requiere 1) usar modelos de referencia y 2) conocer la complejidad del medio natural real.







espacios  
naturales de  
ANDALUCÍA

ley de inventario de  
espacios naturales protegidos  
**20**  
años  
gracias a ti



JUNTA DE ANDALUCÍA  
CONSEJERÍA DE MEDIO AMBIENTE

## *LOS HUMEDALES ANDALUCES*

*EL PAPEL DEL AGUA SUBTERRÁNEA  
EN EL FUNCIONAMIENTO DE LOS HUMEDALES*

*Zaragoza 22-23 de octubre*



# NORMATIVA PARA LA PROTECCIÓN DE HUMEDALES EN ANDALUCÍA

- **DECLARACIÓN DE ESPACIOS NATURALES PROTEGIDOS,**  
1984 -1989 se declaran protegidos la mayor parte de los humedales andaluces

LEY 2/1989 por la que se aprueba el inventario de espacios naturales protegido de Andalucía

- **PLAN ANDALUZ DE HUMEDALES,**

Aprobado por **Resolución de 4 de Noviembre de 2002,** del Director General de la Red de Espacios Naturales Protegidos y Servicios Ambientales.

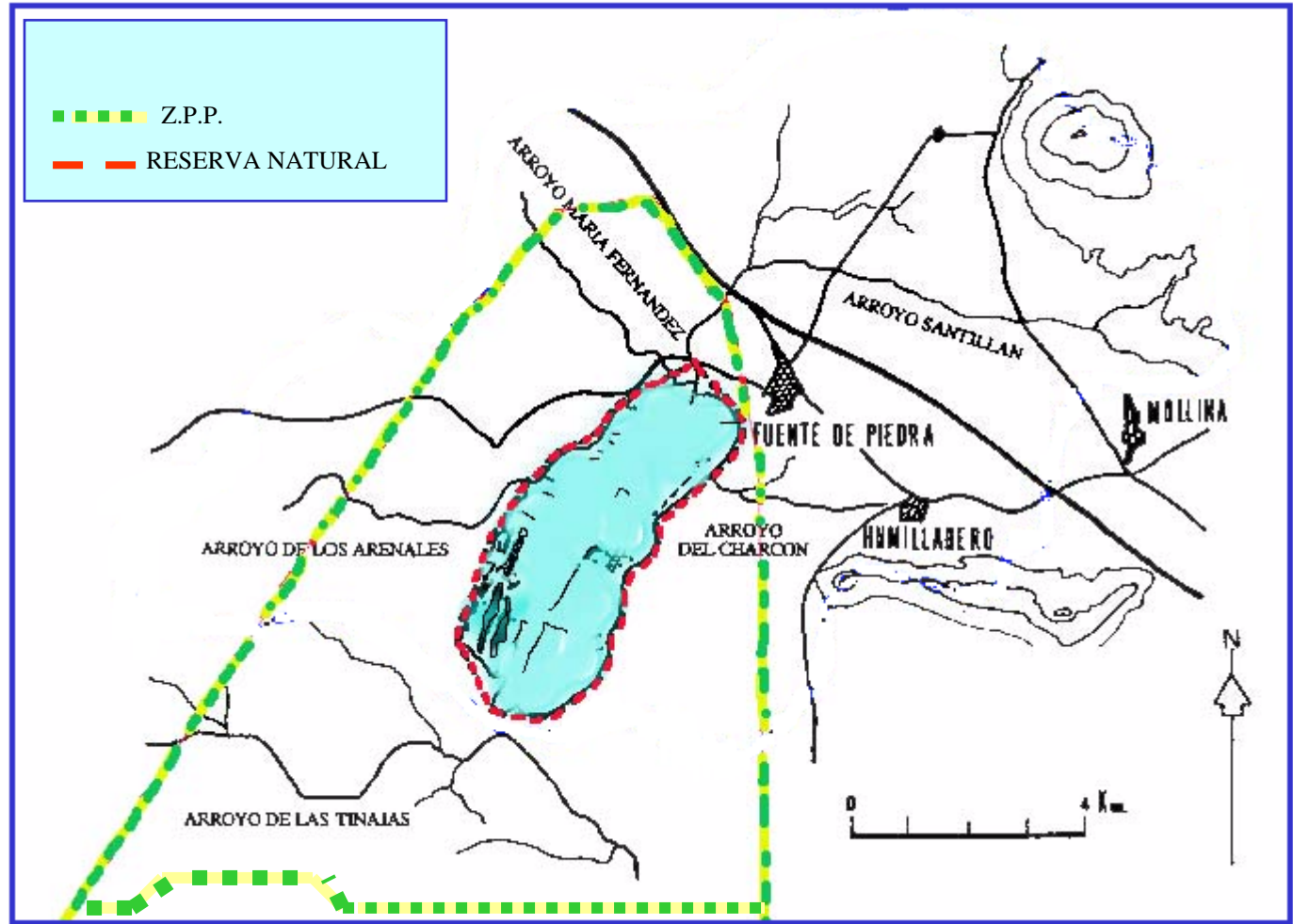
- Inventario de Humedales de Andalucía y el Comité Andaluz de Humedales (Decreto 98/2004, de 9 de marzo)



# Reserva Natural Laguna de Fuente de Piedra



■ ■ ■ ■ ■ Z.P.P.  
■ ■ ■ ■ ■ RESERVA NATURAL



Reserva Natural: 1.554 ha.

Zona Periférica de Protección (Z.P.P.): 6.689 ha

Laguna de Fuente de Piedra - Reserva Integral  
**25 años**  
Gracias a ti



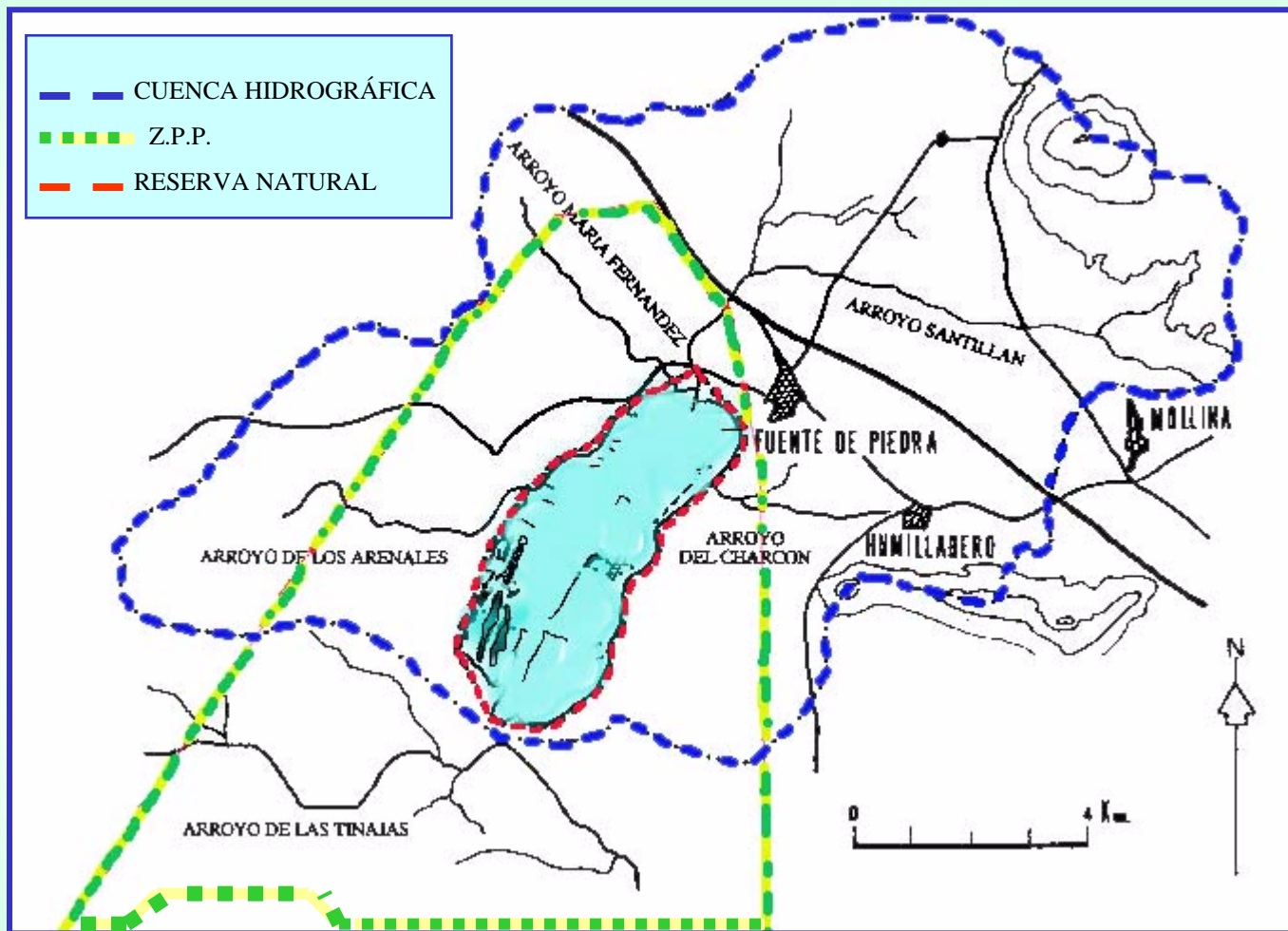


# Reserva Natural Laguna de Fuente de Piedra



espacios  
naturales de  
ANDALUCÍA

Laguna de Fuente de Piedra - Reserva Integral  
**25 años**  
Gracias a ti



Reserva Natural: 1.554 ha.

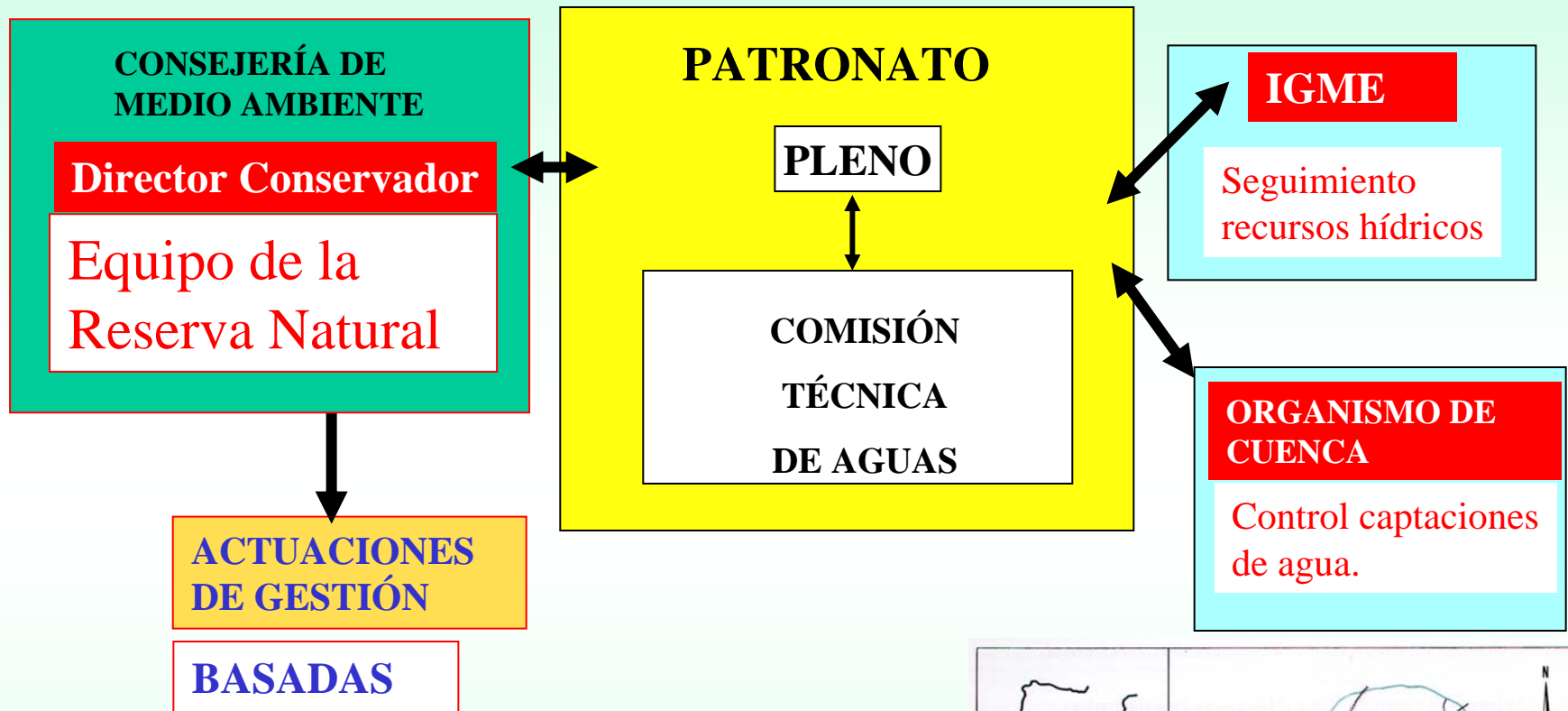
Zona Periférica de Protección (Z.P.P.): 6.689 ha

**Estudio hidrogeológico de la laguna de Fuente de Piedra.** Cuenca endorreica de 15.350 ha





# Gestión de la Reserva Natural



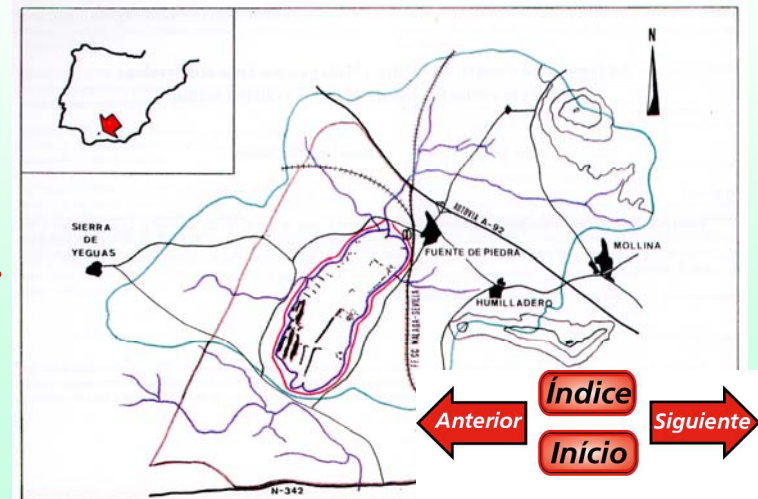
**ACTUACIONES DE GESTIÓN**

**BASADAS**

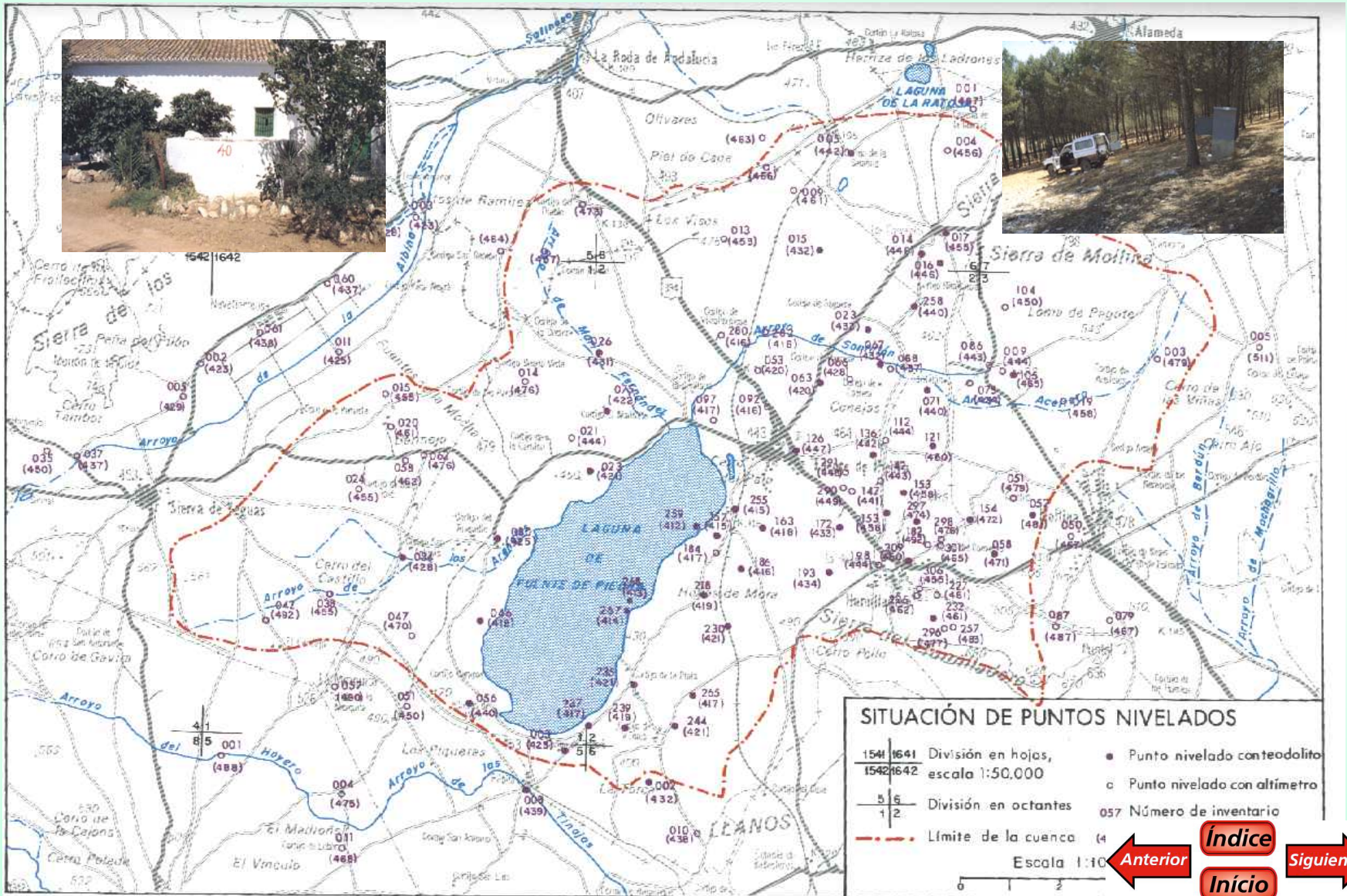
Conocimiento del funcionamiento del sistema.

Seguimiento a largo plazo de parámetros hidrológicos, biológicos, usos y actividades.

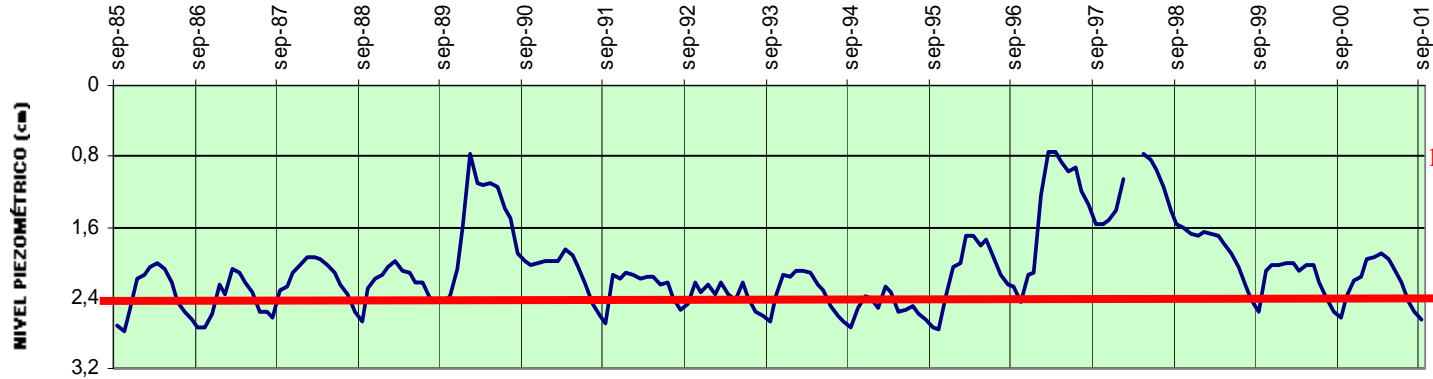
Participación social.



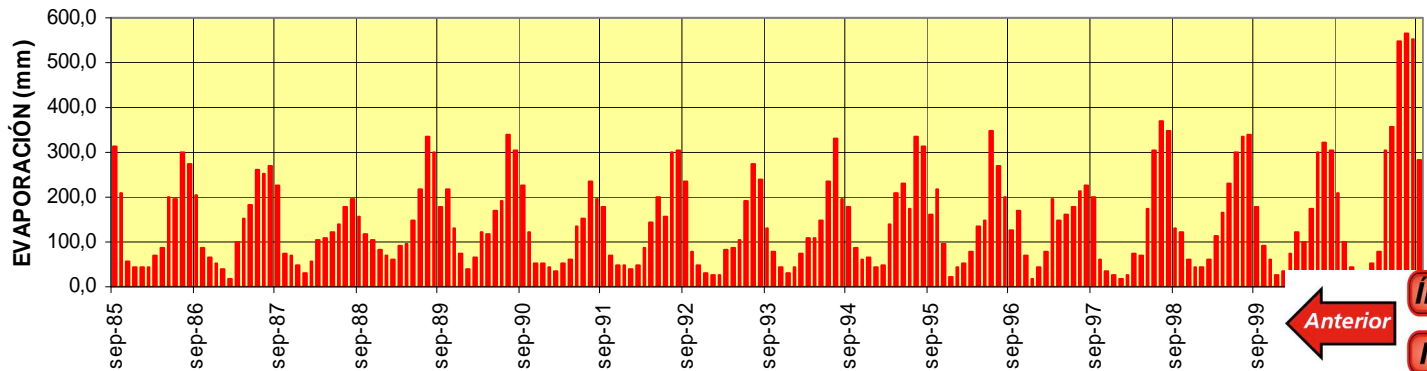
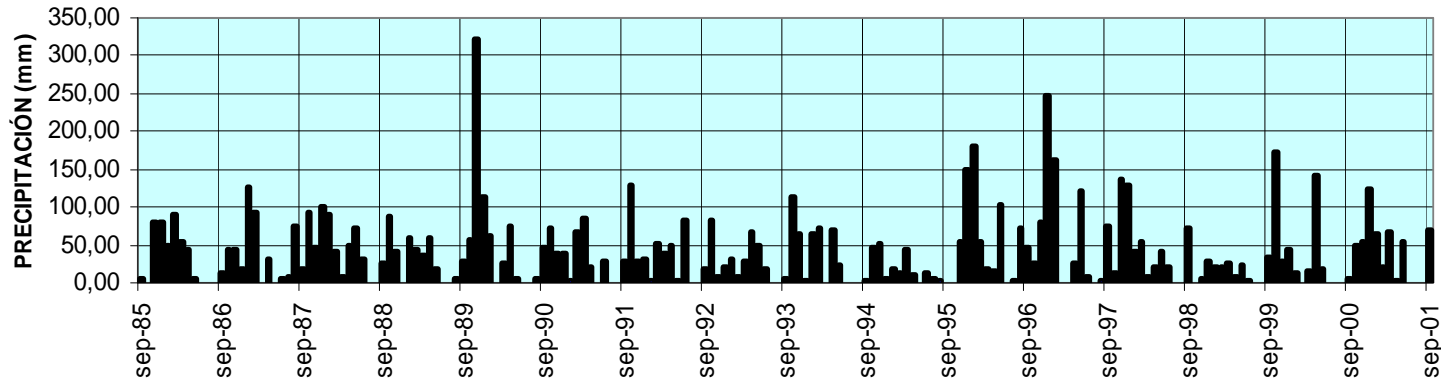
# PUNTOS NIVELADOS



# EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL NIVEL DE AGUA, PRECIPITACIÓN Y EVAPORACIÓN EN FUENTE DE PIEDRA (mar. 85 - sep. 2001)

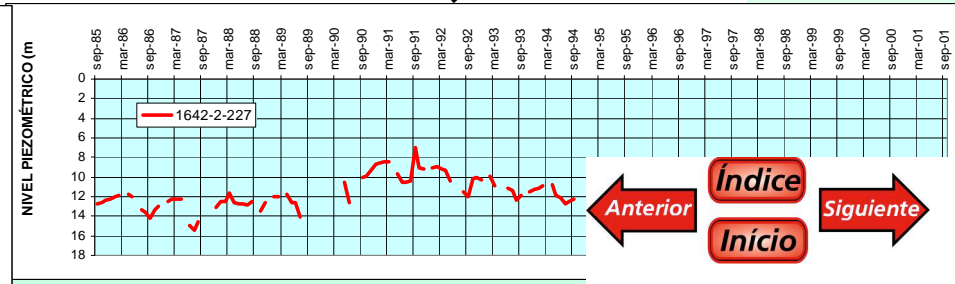
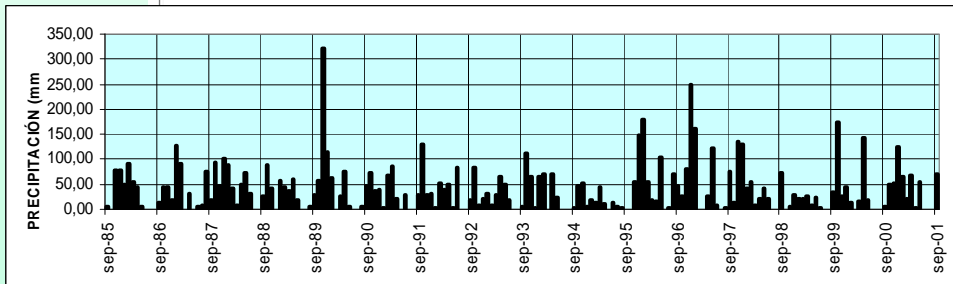
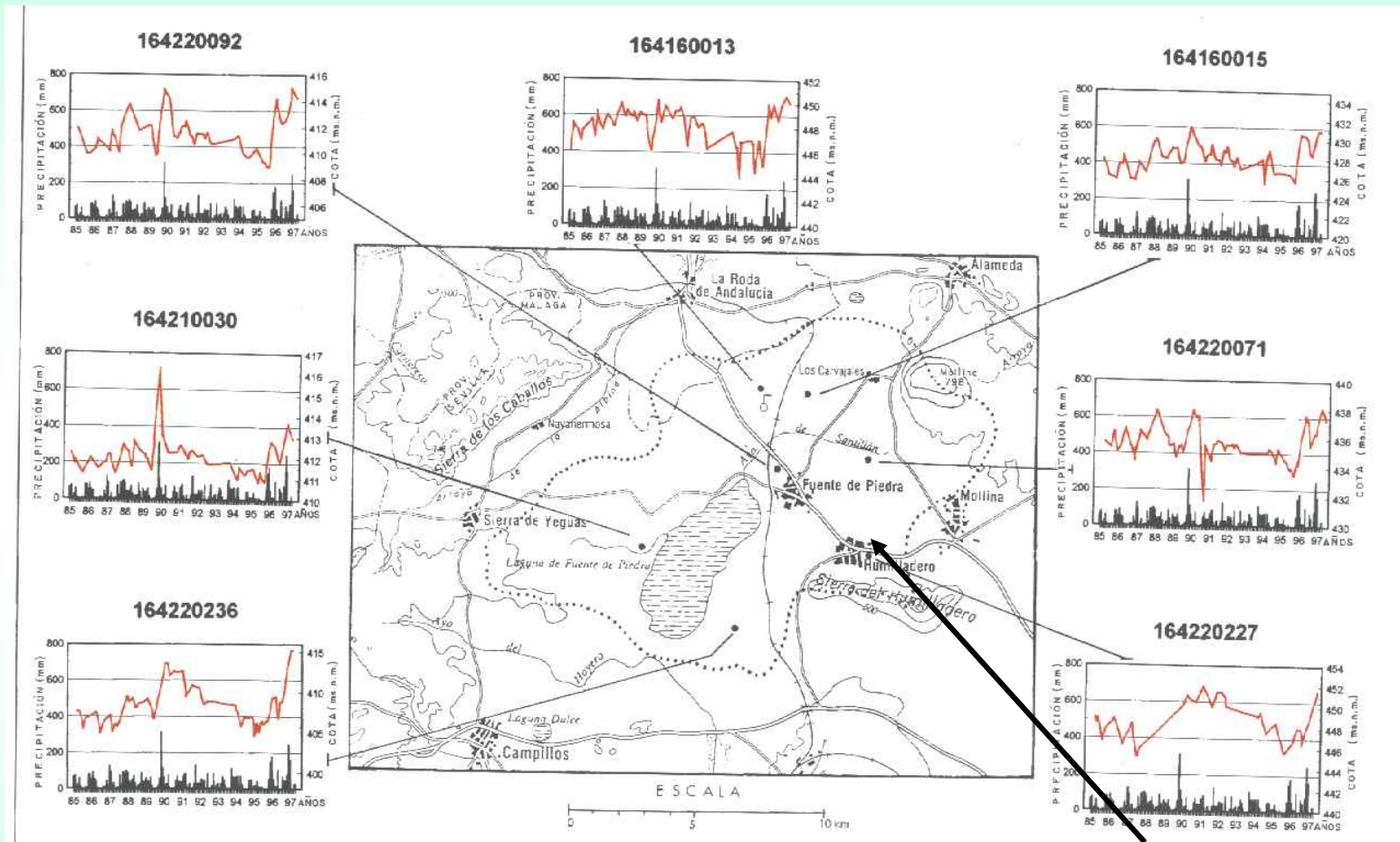


**NIVEL LAGUNA (m)**

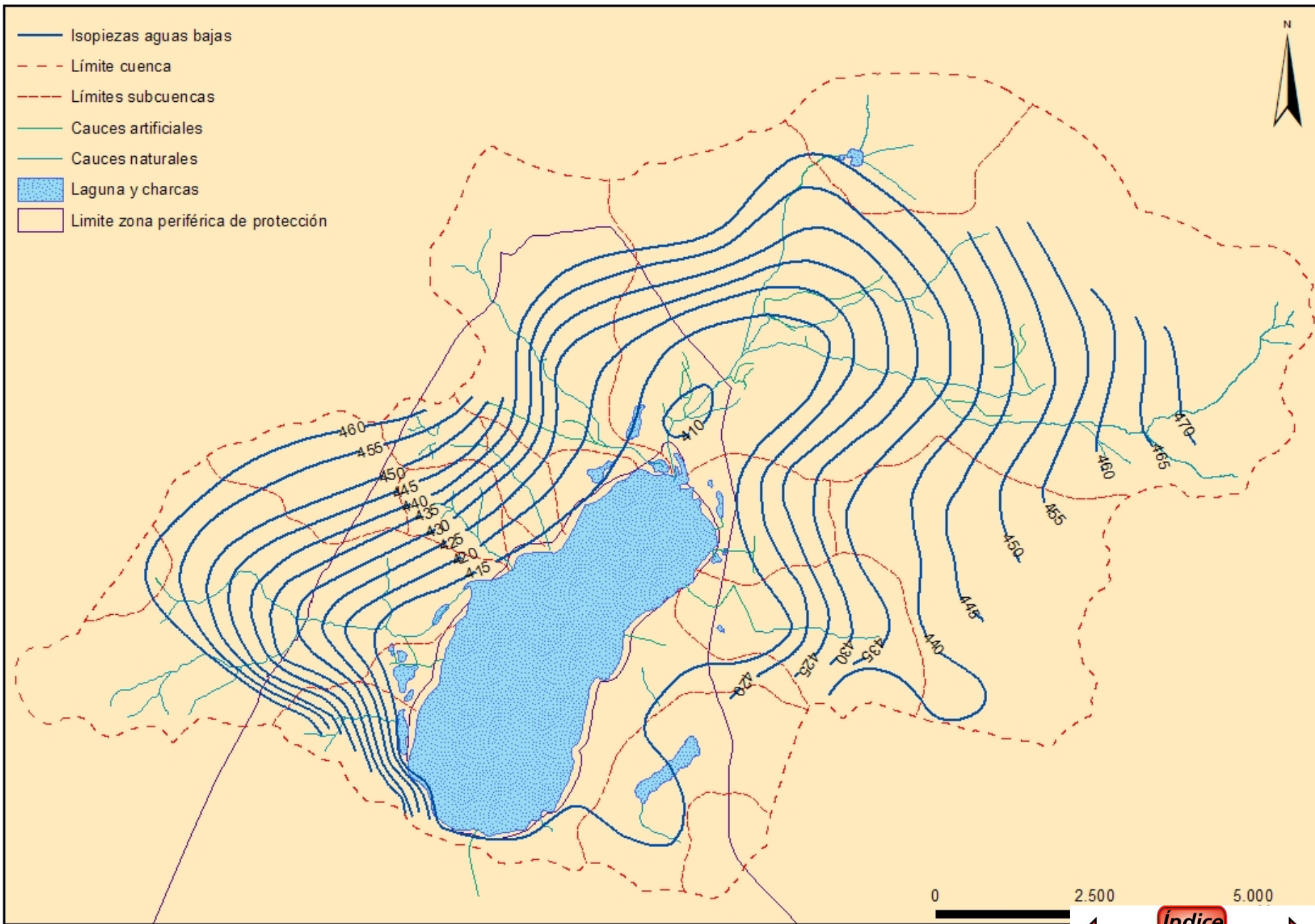




# Seguimiento de parámetros hidrológicos y climatológicos.







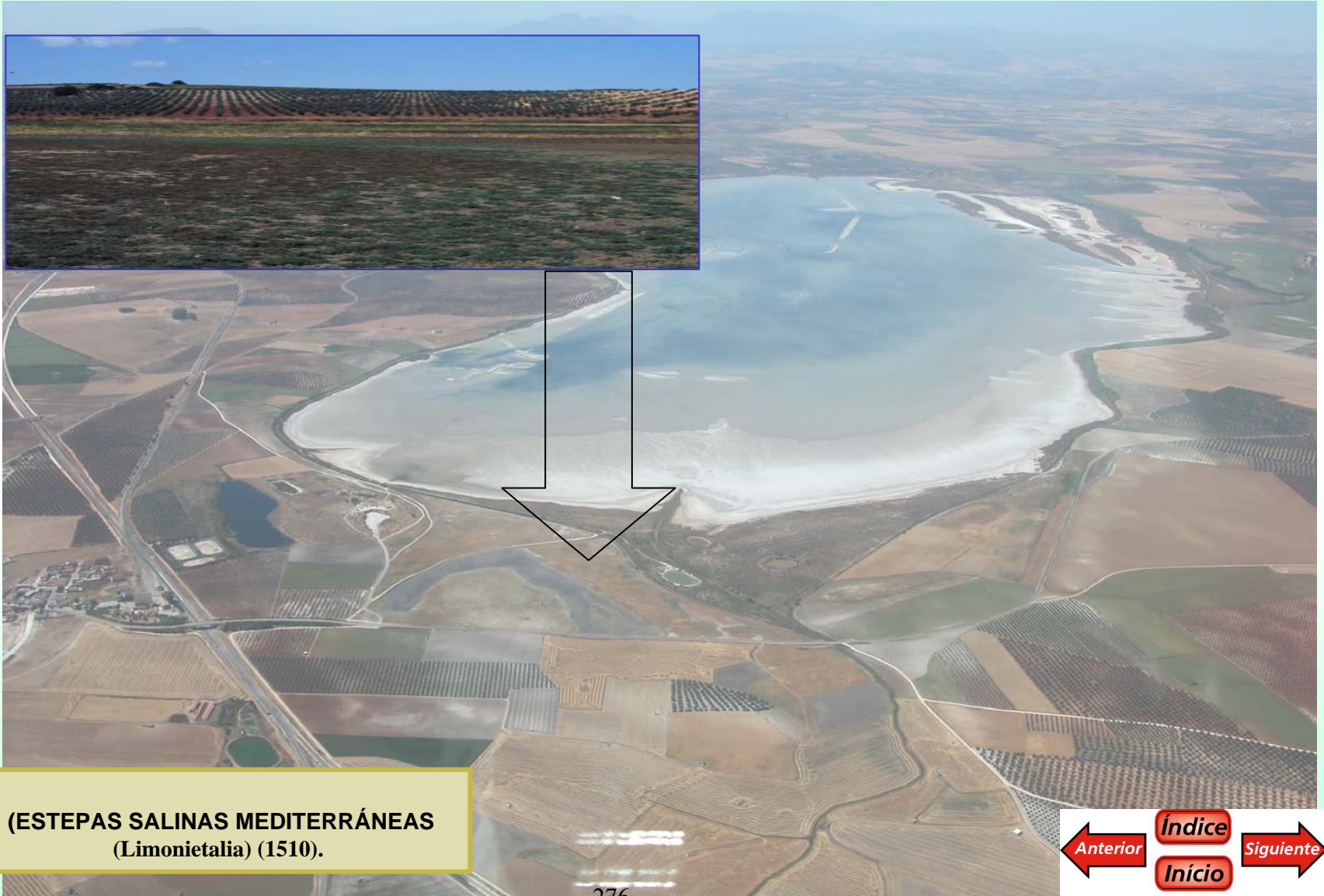
- Isopiezas aguas bajas
- Límite cuenca
- Límites subcuencas
- Cauces artificiales
- Cauces naturales
- Laguna y charcas
- Límite zona periférica de protección



0 2.500 5.000

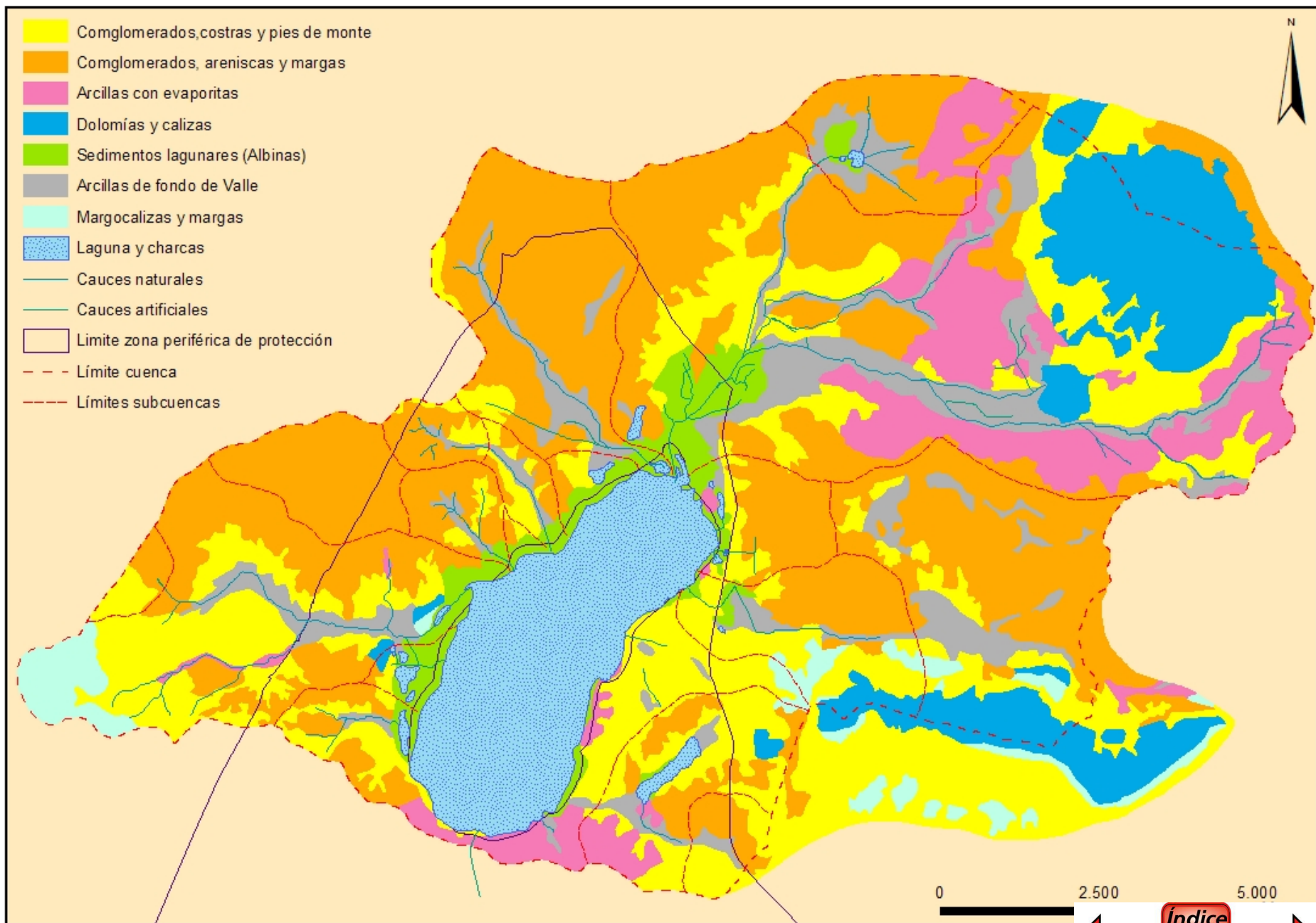
← Anterior
Índice
→ Siguiete

Inicio



**(ESTEPAS SALINAS MEDITERRÁNEAS  
(Limonieta) (1510).**







RESUMEN



## **OBJETIVOS:**

- Definir el **contexto geológico, hidrológico e hidrogeológico** de cada uno de los humedales seleccionados.
- Se han determinado los **componentes del balance hídrico** que intervienen en el funcionamiento de los diferentes humedales en condiciones climáticas medias.
- Realizar una **propuesta de áreas y medidas de protección** que sirvan de base para la gestión hídrica de los humedales.
- Propuestas de puntos de control** de las aguas superficiales y subterráneas en los humedales.



# PROYECTOS DE RESTAURACIÓN



Plan Andaluz de  
HUMEDALES

*Junta de Andalucía  
Consejería de Medio Ambiente*

Restauración de la Laguna de Ruíz Sánchez

## LAGUNA DE LOS PRADOS (Málaga)







280

## **RESUMEN DE LA MESA REDONDA: EL PAPEL DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL FUNCIONAMIENTO DE LOS HUMEDALES**

Moderador y Relator: **Javier HEREDIA\***

(\*) Instituto Geológico y Minero de España. Alenza 1. 28008 Madrid. j.heredia@igme.es

Panelistas: **Juan José Durán**, Instituto Geológico y Minero de España; **Miguel Ángel García Vera**, Confederación Hidrográfica del Ebro; **Marisol Manzano**, Universidad Politécnica de Cartagena; **Manuel Rendón**, Reserva Natural de la Laguna de Fuente de Piedra (Málaga); **María José Viñals**, Universidad Politécnica de Valencia.

**Juan José Durán** inició su intervención comentando que existen temas comunes en relación con la investigación hidrogeológica en general y el papel de las aguas subterráneas en los humedales. Uno de estos temas es la necesidad de cambiar la visión estática, que ha primado hasta ahora, por una visión dinámica, tanto espacial como temporal, considerando la existencia de ciclos hidrológicos y tiempos geológicos. A partir del carácter dinámico del humedal surgen dos aspectos a considerar: su origen y su evolución, estando, a su vez, condicionada esta última por el origen del propio humedal. En este sentido, origen y evolución se conocerán en la medida que se conozcan los procesos geológicos actuantes, tanto los pasados, como los presentes y los posibles en el futuro. Ello permitirá establecer las actuaciones para su preservación y gestión, pues existirán distintas estrategias según el origen del humedal. Asimismo, identificó como otro tema común a la importancia de disponer de modelo geológico conceptual, mejor aún si es en 3D, y considera que una observación análoga se puede hacer sobre el modelo hidrogeológico. Siendo necesario el conocimiento de ambos para llevar a cabo una gestión adecuada y sostenible del humedal. Sin embargo, observa que, en general, este conocimiento es escaso y, a veces, inexistente.

Juan José Durán propone como otra línea de reflexión la de conocer el contexto de referencia del humedal: marco hídrico, tanto en las aguas superficiales como subterráneas. Esto es, las masas de agua vinculadas al humedal. Por ello, considera que es necesario establecer el límite del hidrosistema, conociendo el régimen del humedal en lo referente a su recarga y su descarga.

A continuación, expone que no sólo se debe considerar como marco europeo de referencia la Directiva Marco del Agua (DMA), sino que otro marco normativo a considerar es la Directiva Hábitat. Además, hizo hincapié en que se considere al humedal como parte del patrimonio geológico y de la geodiversidad de un territorio.

Finalmente, comentó que desde el IGME se ha desarrollado una clasificación genética de

los humedales españoles incluidos en la lista del convenio de Ramsar, la cual se pone a disposición de la comunidad científica y de los gestores.

**Marisol Manzano** coincidió con Juan José Duran respecto a la visión e inquietud temática común en cuanto a la investigación en los humedales y su relación con las aguas subterráneas. En este sentido, señala que a pesar que la definición conceptual usual de humedal da a la vegetación y la fauna propios de estos medios acuáticos un papel dominante, lo cual los convierte en ámbito de estudio habitual de los biólogos, los geólogos e hidrogeólogos tienen un rol destacado en el estudio del funcionamiento de los mismos. Esto es especialmente aplicable a los criptohumedales, en los que no hay lámina de agua visible pero sí una humedad permanente o muy frecuente cuya presencia está controlada por la combinación de la red de flujo hídrico y las características geológicas.

No obstante, desde su punto de vista señala que es necesario reconocer que la visibilidad pública que actualmente tienen los humedales es debido más a la ecología que a la hidrología o la geología. Por supuesto, además de valorárselos por los servicios que brindan al medioambiente y al ser humano. Pero esto implica que, en la práctica, es necesario y muy conveniente que los hidrogeólogos que trabajan en humedales lo hagan conjuntamente con otros tipos de especialistas.

Para terminar su intervención añadió dos comentarios concretos relacionados con lo antes expuesto en la mesa redonda:

1. Si bien conocer la geología subyacente y su origen es fundamental para entender el funcionamiento de un humedal, igualmente importante es conocer el funcionamiento hidrológico, atendiendo tanto a la parte superficial como a la subterránea de la red de flujo hídrico. En muchos casos, el impacto antrópico sobre la red de flujo ha sido tal que ha modificado el funcionamiento y los servicios que brindan los humedales, preponderando este impacto sobre los condicionantes que imponen su génesis geológica. Por lo tanto, a la hora de clasificar humedales con vistas a su gestión es necesario que la clasificación sea hecha no sólo desde un punto de vista genético-geológico, si no también considerando el funcionamiento hidrológico superficial y subterráneo. En este sentido, en cuanto a los sistemas existentes de clasificación de humedales, la aproximación más exitosa en el ámbito internacional desde el punto de vista de su utilidad para la gestión es la genético-funcional. En ella la génesis atiende a la geología y a la hidrología original y actual, y la funcionalidad atiende a los aspectos ecológicos.
2. También desde el punto de vista de clasificar los humedales con vistas a su gestión, es muy conveniente establecer humedales de referencia que sirvan para establecer los objetivos de conservación y/o las medidas de restauración a establecer para otros humedales más degradados. Para ello se deberían buscar humedales arquetípicos de cada tipología, establecidas en la fase de clasificación, entre aquellos cuyo funcionamiento original esté menos influenciado por la actividad antrópica. Dado que los recursos económicos necesarios para establecer suficientemente el funcionamiento de cada humedal individual incluido en el inventario de un ámbito concreto son ingentes, en opinión de la ponente la investigación dirigida a completar conocimiento se debería concentrar en estos humedales de referencia. Los resultados obtenidos se podrían utilizar para establecer los planes de gestión de otros humedales de la misma



tipología, sin necesidad de invertir grandes cantidades de recursos para el estudio de estos.

**Miguel Ángel García Vera**, a través de cinco ideas, presentó algunas de las claves de las aguas subterráneas y la gestión de los humedales desde la perspectiva de la Planificación Hidrológica. En la primera de ellas advierte que el estudio de detalle de los humedales supone elevadas inversiones. Ello lo ejemplifica indicando que estudiar los 121 humedales de la cuenca del Ebro requeriría de 50 a 60 M€, más un gasto de 0.5 a 1 M€/año. Esta inversión sería sin recuperación de costes y, además, haría falta un desarrollo administrativo específico y la creación de equipos técnicos adecuados. En contraste, la demanda social para la recuperación de humedales, aunque creciente, aún es reducida y coexiste con otras prioridades. Por ello, las inversiones en el estudio de humedales se deben ordenar estableciendo prioridades.

La segunda idea atiende a la protección de humedales. Esta se basa en la legislación vinculada a la Red Natura 2000, desarrollada fundamentalmente por las Comunidades Autónomas y en la legislación de las aguas (Directiva Marco del Agua -2000/60/CE-, Reglamento de Planificación Hidrológica -RD 907/2007-, Instrucción de Planificación -Orden ARM/2656/2008-). Conceptos como el buen potencial ecológico de los lagos y los volúmenes ambientales mínimos se hayan muy vinculados al sostenimiento ambiental de los humedales. Se ha avanzado mucho en el inventario de los humedales (de las 70.000 masas de agua superficiales de la Unión Europea, el 15 % -10.500- son lagos, de los que 319 se sitúan en España y de ellos, 121 se hayan en la cuenca del Ebro) pero ahora se requieren datos biológicos para definir indicadores y valores umbrales acorde a los objetivos de calidad. A corto plazo se incluyen los humedales dentro de las redes de control para tener en el futuro información de base para llegar a establecer sus objetivos de calidad y cantidad. Entre estas dos vías se encuentra el Inventario Nacional de Humedales, que está en elaboración. Finalmente, la protección del humedal no la da el pertenecer al inventario en sí misma, sino la norma de protección que haya de tener el humedal.

La tercera idea que destaca es la creciente sensibilidad social hacia las funciones de los humedales que se evidencia en las numerosas actuaciones de restauración ejecutadas en los últimos años.

En cuarto lugar, Miguel Ángel García Vera señala que la aportación de los hidrogeólogos es imprescindible en muchos humedales por la importancia que tienen las aportaciones subterráneas. Por ello, los estudios que acrecienten el conocimiento hidrogeológico contribuirán a mejorar una propuesta de actuaciones. Indica que estos estudios pueden tener las fases siguientes:

1. Inventario y caracterización hidrológica preliminar.
2. Para los casos más problemáticos o en los de interés especial, toma de datos con instrumentación y estudios específicos de campo (recorridos, ejecución de sondeos, medición de columna del agua, batimetría del humedal, estación meteorológica completa, nivelación piezométrica, muestreo hidroquímico e isotópico y perfiles de CE y t ° del humedal y acuífero, aforos en ríos....).

3. Interpretación: mapas de isopiezas, estudio hidroquímico e isotópico y balance hídrico del sistema (humedal, acuífero y cuenca superficial). El balance es fundamental para la toma de decisiones, siendo recomendable hacerlo diario y por fases, balance en la laguna para obtener las escorrentías y balance en el suelo-zona alterada-acuífero calibrando con las escorrentías del balance en la laguna. La metodología es sencilla y rápida de realizar y da óptimos resultados, a pesar de las incertidumbres de los datos y de las componentes de difícil cuantificación (p.ej.: evaporación capilar). Resalta la importancia de integrar los estudios hidrogeológicos con las conclusiones obtenidas de estudios ecológicos, históricos y de teledetección.
4. Desarrollar modelos numéricos de aguas subterráneas para validar el modelo conceptual, analizar alternativas de gestión, hacer simulaciones a futuro y evaluar efectos diferidos debido a la difusividad del medio, que en el caso de las afecciones a los humedales pueden llegar a ser muy importantes.

Por último, Miguel Ángel García Vera advierte que los planes hidrológicos de las demarcaciones hidrográficas, que se presentarán durante el año 2010, indicarán de forma clara la previsión de actuaciones contempladas para el horizonte 2010-2015 para el estudio y restauración de los humedales dentro del marco global de inversiones. Así, la publicación de estos planes permitirá confirmar si el esfuerzo económico previsto está a la altura de la creciente sensibilidad social hacia las importantes funciones de los humedales.

**María José Viñals** puntualizó que además de trabajar en la Universidad Politécnica de Valencia desea hacer su presentación como Directora del Centro Español de Humedales del Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino. Dio inicio a su exposición observando que los humedales más relevantes en España, con la excepción del delta del Ebro y Doñana, son mayoritariamente dependientes de las aguas subterráneas. Por lo cual, España no tendría humedales inscritos en el Convenio de Ramsar, si no fuera por la alimentación que reciben de las aguas subterráneas. Da como ejemplo de esta particularidad los excepcionales humedales costeros de agua dulce existentes en el Levante que son únicos en la cuenca mediterránea, en la que los humedales costeros son salobres o salados. María José Viñals resalta que nuestra peculiaridad es debida a las aguas subterráneas. Y, atendiendo a ello, señala que el área de influencia a considerar en los humedales abastecidos por aguas subterráneas es mucho mayor que exclusivamente el perímetro del humedal, que termina siendo “un detalle” del medio físico. Esta área de influencia se encuentra estrechamente ligada a la cuenca de alimentación del acuífero vinculado al humedal.

Por otro lado, observa la paradoja que un acuífero esté más valorado por el público que un humedal, asociándose este último más a la biota que al medio físico. Explica que esta actitud por parte de la gente se debe a que el agua subterránea de un acuífero es considerada como un bien de utilidad pública, lo cual se valora más que un área protegida, como es un humedal.

Respecto a los humedales comenta que, si bien las funciones, servicios y valores de los humedales varían de uno a otro, éstos destacan en lo concerniente a la provisión y depuración de agua. Estos beneficios muchas veces son intangibles para el público e incluso para los gestores.

Entre los rasgos de estos humedales que preocupan para su gestión, María José Viñals tuvo interés en enfatizar los siguientes:

- La escala espacial, en lo concerniente a su área de influencia. Pues, a veces, su gran extensión dificulta que se pueda establecer la relación causa/efecto que permita al gestor o al público comprender que lo que pasa a muchos kilómetros del humedal tendrá impacto en el mismo.
- La escala temporal. Debido a que en el marco de ésta, la inercia de los humedales alimentados por aguas superficiales es distinta que la de los alimentados por las aguas subterráneas.

Respecto a la gestión sectorial que se hace de los humedales y del agua en España, remarca que existen muchos aspectos que superar. Así, aunque puede ser difícil, la coordinación entre las administraciones es necesaria para establecer una gestión integrada de los humedales. Ofrece como ejemplo de esta dificultad de coordinación la declaración de espacios protegidos que es una política sectorial, que en el caso de los humedales no tiene en cuenta los acuíferos que lo alimentan. Existe un problema de coordinación entre las administraciones que tienen competencia sobre los humedales. Igualmente, ve necesario pensar nuevos modelos de gestión que incorporen nuevas técnicas y metodologías y, a su vez, se debe reclamar una mejora en la planificación hidrológica en lo referente a humedales, que se debe basar en la integración al considerar la interrelación entre las aguas subterráneas y las superficiales y la vinculación entre hidrología y ecología. Finalmente, puntualiza que la gestión debe ser participativa, incorporando a los usuarios, a los investigadores, a los técnicos y a la administración.

**Manuel Rendón Martos** expone que hablará de la gestión, centrándose en la laguna de Fuente de Piedra, para pasar finalmente al ámbito andaluz. Para dar marco a su presentación señala que entre 1984 y 1989 se creó la Red de Espacios Protegidos de Andalucía y en el 2002 se estableció el Plan Andaluz de Humedales, el decreto que aprueba el Inventario de Humedales de Andalucía y la creación del Comité Andaluz de Humedales. Indica que en la actualidad son 186 los humedales que, en su mayoría, son pequeñas lagunas interiores y que para su gestión y conservación es necesario conocer su funcionamiento.

Explica que en el esquema de gestión de la Reserva Natural de la laguna de Fuente de Piedra existe un Patronato en el que participan el IGME y el Organismo de cuenca, llevando la Comisión Técnica de Aguas. Expone que en las actuaciones básicas de gestión se ha establecido una Red de Observación Piezométrica y de Calidad de las aguas que permite hacer un seguimiento de las aguas subterráneas. Remarca que algunas de las series de observación alcanzan casi los 30 años. Uno de los pozos de la red es un antiguo pozo salinero situado en el vaso de la laguna, que a su vez posibilita medir el nivel de agua en la laguna y así permite identificar períodos interanuales en los que la laguna permanece inundada y otros en los que se comporta como una estepa salina.

Manuel Rendón Martos señala que el seguimiento sistemático y prolongado de niveles, junto con un estudio de la Dirección de Obras Hidráulicas, permitió identificar la existencia de una sobreexplotación del acuífero que llevó al organismo de cuenca a adoptar las medidas administrativas correspondientes: Plan de Ordenación de los recursos hídricos, constitución de una Comunidad de Usuarios y paralización de las actuaciones relacionadas con las extracciones de agua en la cuenca, pues sobre el papel se habían otorgado concesiones que superaban ampliamente los recursos renovables. Señala que actualmente estas concesiones se están revisando y que, lógicamente, todo ello genera una situación de tensión entre la

Administración responsable de la conservación y los particulares. Identifica a un tercer agente, que es el Organismo de cuenca, que es quien tiene que dar solución a la situación existente.

Por último, Manuel Rendón Martos indica que la Consejería de Medio Ambiente realizó estudios en 54 humedales de Andalucía, que permitieron hacer una aproximación al conocimiento geológico, hidrogeológico y de componentes del balance hídrico para hacer propuestas de protección. Enfatiza que estos estudios de primera aproximación no son muy caros, que en todos los humedales andaluces se tiene regletas puestas para seguir el nivel de las aguas. En este sentido, el Plan Andaluz de Humedales contempla la necesidad de estudios y conocimiento del funcionamiento hidrológico del humedal y de sus distintos componentes, asumiendo que ello obliga a inversiones.

## DEBATE

Tras la exposición por parte de los panelistas se inició un debate en el cual **Javier Heredia** señala que Marisol Manzano había planteado que para que una clasificación genético/evolutivo fuera útil debería incorporar lo funcional, haciendo hincapié en la hidrología. Sin embargo, Javier Heredia considera que hay otros elementos, como la cobertura vegetal del humedal que trascienden “lo hidrológico” y a su vez influyen sobre éste, por ejemplo con su capacidad de laminación. Por ello, estos otros elementos deben ser tenidos en cuenta e incorporados, pues intervienen en el aspecto funcional. Señala que María José Viñals fue clara en su exposición acerca de la necesidad de integración entre lo físico, lo hidrológico y la ecología. Por otro lado, Javier Heredia reflexiona que la gestión y preservación de un bien medioambiental no está exenta de tensión, con otras demandas hídricas como la explotación agrícola o el abastecimiento. Debido a ello, en muchas ocasiones es obligado realizar tomas de decisión ciertamente “dramáticas” y que por este carácter deben basarse en el rigor del conocimiento para preservar el equilibrio y el beneficio de todos: el medioambiental, el de las personas y el desarrollo del conjunto de la sociedad.

**Bartolomé Andreo**, de la Universidad de Málaga, hace hincapié en que la necesidad de caracterizar geológica, hidrológica e hidrogeológicamente un humedal es un requerimiento básico que debería ser asumido por parte de la Administración como una actuación primera antes que cualquier otro tipo de estudio. Argumentando que ello es debido a que sus conclusiones facilitarían el conocimiento de otros estudios -ecológicos en sus distintos aspectos-, así como la gestión misma del humedal y, si fuera necesario, de su restauración.

**Juan José Durán** advierte que al profundizar en el estudio del humedal se evidencia la necesidad de avanzar en el conocimiento básico: geológico e hidrogeológico. Debido a que todo ello implica un coste económico muy importante, estas actuaciones se deberían concentrar en humedales emblemáticos.

**María José Viñals** puntualiza que la ley de Espacios Protegidos exige, para los humedales que se identifiquen, definir un Plan de Ordenación de Recursos Naturales donde se deberán volcar todos los conocimientos necesarios para, posteriormente, definir un Plan Rector que obliga a establecer un Plan de Uso Público de ese espacio. Aclara que las herramientas administrativas para implementar todo esto existen, pero que no se aplican adecuadamente. Indica que, además, como marco general, la protección del humedal está recogida en la Ley



de Aguas. Sin embargo, señala que para implementar las medidas de protección es necesario definir legalmente los límites espaciales del humedal, pese a ser sistemas fluctuantes. María José Viñals observa que al no estar establecidos estos límites, las autoridades de algunas administraciones han optado por realizar inventarios o catálogos.

**Manuel Rendón** aclara que la Ley de Aguas establece la obligatoriedad de realizar un inventario y, que en el caso de la Junta de Andalucía, esta obliga en el inventario de humedales a definir los límites respectivos, lo cual puede llevar a problemas con los particulares. Especifica que el conocer el funcionamiento hidrológico del humedal permite establecer un límite del humedal con rigor, el cual se incorpora a un inventario que posteriormente se remite al Ministerio de Medio Ambiente para incorporarlo al inventario nacional. Y es a partir de este momento cuando ya tiene una figura de protección, que si bien no es estrictamente legal, sí sirve para detener actuaciones que pueden impactar negativamente sobre el humedal. Manuel Rendón concluye que los instrumentos legales de protección existen si se buscan y pone como ejemplo a las Directivas Habitat, AVES, u otros recursos legales. Las distintas tipologías de humedales casi siempre encuentran encaje en alguna de las directivas que le ofrecen cobertura para su protección. Sin embargo, advierte, la dificultad de establecer los límites es marcada para los humedales fluctuantes.

**Antonio Sastre**, de la Universidad de Alcalá de Henares, dirigiéndose a Miguel Ángel García Vera como representante de la Administración Hídrica, expone que se habla de los humedales como algo conocido, pero que sólo los Planes de cuenca del Júcar, el Ebro y el Guadiana les reconoce un perímetro de protección. Añade que, aún así, el panorama es desolador. Observa que en la normativa se reconoce que el uso del agua por la naturaleza es una restricción previa y superior, pero que ello no se ha llevado a efecto. Pregunta, si la gobernanza del agua permitirá en el futuro tomar decisiones respecto a esto, como por ejemplo considerar o definir “volúmenes ecológicos” análogos a los “caudales ecológicos”. Finalmente, inquiriere si estas cuestiones y, en particular, las vinculadas con los humedales, van a ser recogidas en los nuevos Planes Hidrológicos que se van a evaluar.

**Miguel Ángel García Vera** responde que los planes llevan compromisos económicos y normativos que también son un punto de referencia. En este sentido, señala, existen dos aspectos a atender:

- Uno es la protección ambiental en sí, dadas por las distintas normativas por las que hay que proteger un humedal, pero no por él en sí mismo, si no por los valores ambientales por los que se les protege.
- Y otro está dado por los indicadores ecológicos y ambientales que atienden a la calidad de las aguas. Observa que en la normativa europea no se da relevancia al caudal ecológico o al volumen mínimo como un indicador en sí, algo que sí hace la legislación española al desarrollar normativamente el concepto de caudales ecológicos. Explica que actualmente se trabaja intensamente en ello, pero que se debe tener en cuenta que si ya es complejo establecer los caudales ecológicos en los ríos, todavía los es mucho más en los humedales. La complejidad en el caso de los volúmenes mínimos de los humedales viene dada por la incertidumbre en la evaluación de las componentes del balance, la inexistencia de un conocimiento de detalle suficiente y la elevada variabilidad natural de los volúmenes.

Finalmente, puntualiza que la toma de decisión en la protección de los requerimientos mínimos de un humedal es el resultado de un compromiso –social, económico, etc- que, muchas veces, no es el técnicamente mejor, sino que es el consensuadamente más aceptado. Por ello incide en la importancia que los técnicos pongan el mejor conocimiento posible al servicio de los que van a tomar la decisión.

**Wenceslao Martín**, de la Universidad de Granada, coincide en que la adecuada gestión de un humedal es proporcional al grado de conocimiento del espacio natural. Advirtiendo que se debe ser muy cuidadoso al establecer las restricciones que impone la protección de un humedal, pues la falta de conocimiento puede afectar notablemente a mucha gente. Atendiendo a ello es exigible, no sólo estudios geológicos e hidrogeológicos, sino que éstos tengan unos contenidos mínimos para garantizar el rigor y la pertinencia en las medidas de gestión que se adopten.

**Marisol Manzano** manifiesta que si bien es cierto que una adecuada gestión, y con ello la protección de un humedal, es proporcional al grado de conocimiento del mismo, en su opinión en muchos casos la protección debería adelantarse al conocimiento para preservar la existencia misma del objeto de estudio –el humedal-. Un ejemplo conocido y exitoso de este planteamiento ha sido el convenio de Ramsar, que ha permitido salvar muchos humedales aún antes que se tuviera un conocimiento mínimo de su funcionamiento e incluso de su posible relevancia ecológica. Ello permitió, incluso alentó, el estudio posterior de muchos de estos.

Por otro lado, Marisol Manzano dice que aquí se está hablando sólo de grandes humedales y de su protección y que ello, por supuesto, está bien. Sin embargo, señala que también los pequeños humedales, los criptohumedales o aquellos humedales con un hidroperíodo interanual deben ser protegidos y conservados. Ello se debe a su papel relevante tanto a escala local como, en particular, a escala espacial media, como conectores entre ecosistemas acuáticos de mayor entidad pero muy separados entre sí. La alteración severa y/o desaparición de estos humedales de menor entidad y visibilidad supone muchas veces la pérdida de conexión hídrica y ecológica entre ecosistemas mayores. Advierte que este hecho supondría una pérdida de biodiversidad y también de muchos de los servicios o beneficios que los humedales proporcionan al ser humano sólo por el hecho de existir y funcionar de forma sostenida. En su opinión, el ser humano, comenzando por los especialistas en humedales, debería ser consciente que frecuentemente se realiza un uso directo del agua de un humedal que, eventualmente, puede afectar de manera irreversible al funcionamiento del mismo y que, en contraste con ello, hay un uso indirecto del agua a través de muchos de los servicios que el humedal brinda pero que habitualmente no se contabiliza.

**Javier Heredia** señala que la legislación española y las directivas europeas dan recursos para establecer la protección de un humedal. La ley de aguas también jerarquiza la atención a las distintas demandas y, además, en muchos casos existe un conocimiento suficiente como para establecer una gestión adecuada. Sin embargo, a pesar de todo ello, la gestión hídrica en muchos casos no está exenta de tensión con los usuarios, con las personas presentes en la cuenca de aportación del humedal. Por ello concluye que la gestión, más allá del apoyo legal que tenga, no puede dejar de ser participativa para ser efectiva y para que también la gestión se realice con perspectiva de futuro.

**Miguel Ángel García Vera** indica que los criterios de gestión van cambiando conforme evoluciona la sociedad. Señala que una de las herramientas más importantes para gestionar las

aguas es mediante las concesiones, las cuales han de respetarse siempre que se cumplan las condiciones durante todo su plazo de validez. Observa que, en muchos casos, el límite máximo puede llegar a ser de 75 años. Ante esto, si la sociedad desea cambiar los criterios de gestión que afectan a los usos de agua concedidos no queda más vía que plantear la indemnización a los concesionarios en lo que se les afecte o, en su caso, algún tipo de negociación compensatoria. Actualmente, en los criterios de gestión priman cada vez más los criterios ambientales. No obstante, la materialización de esos nuevos criterios debe realizarse contemporizando con la realidad social existente y, por supuesto, respetando el derecho concesional.

**María José Viñals** considera que existe un conocimiento científico para una gestión conservacionista adecuada. Sin embargo, sitúa el problema en la dimensión social de la componente conservacionista, dado que la mayor parte del suelo es privado, por lo que o bien se compra el suelo o, de forma realista, se negocia para llevar a cabo la gestión hídrica conservacionista.

**Bruno Ballesteros**, del IGME, plantea que el medio ambiente cuesta mucho dinero. Entiende que, actualmente, este coste ambiental se carga sobre los particulares que tienen las tierras o los derechos de agua vinculados a un humedal. En contraste con ello, los humedales y su bienestar ambiental es un derecho de todos los habitantes de un país. Considera que por ello sobre éstos, es decir el Estado, es sobre los que se deberían cargar los costes de gestión de los humedales. Y es este aspecto que debe asumir la Administración.

**Luis Linares**, de la Academia de Ciencias de Málaga, expone que si se carece del nivel de conocimiento necesario para la gestión, se está en inferioridad de condiciones para negociar y discutir en una gestión participativa. Aclara que el conocimiento debe ser el “directo” para que sea útil en la gestión del humedal y que este tipo de conocimiento relativiza la importancia que podrían tener trabajos de investigación como el establecimiento de clasificaciones de humedales.

**Javier San Román**, de la Confederación Hidrográfica del Ebro, señala que además del conocimiento, que cree que existe, es necesaria la divulgación, realizar pedagogía a los regantes y a los políticos. Como parte de esta labor, propone que, para que “los agentes implicados en la gestión”entiendan a los técnicos, sería interesante que lo técnicos divulgaran en otros sitios las experiencias de gestión de los humedales donde trabajan.

**Javier Heredia** resume en “conocimiento, pedagogía y divulgación” a los elementos necesarios para una buena gestión.

**Manuel Rendón** agrega que falta una, la participación de todas las Administraciones. Indicando que ello refleja lo señalado anteriormente que es el Estado, es decir toda la sociedad, los beneficiarios y responsables de la gestión de un humedal.

## AGRADECIMIENTOS

El relator desea agradecer a los panelistas por la revisión del relato de sus respectivas exposiciones y, en particular, a Marisol Manzano, Emilio Custodio y Javier Lambán por su detallada revisión del conjunto del texto.

## CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO DE HUMEDALES ANDALUCES. LAS LAGUNAS DEL SUR DE LAS PROVINCIAS DE CÓRDOBA Y JAÉN

**B. ANDREO\*, F. CARRASCO\*, L. LINARES\*\*, M. RENDÓN\*\*\* y F. ORTEGA\*\*\*\***

(\*) Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga. Andreo@uma.es

(\*\*) Academia Malagueña de Ciencias

(\*\*\*) Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía

(\*\*\*\*) Grupo de Investigación “Ecología y Biodiversidad de Sistemas Acuáticos”.  
Universidad de Jaén

### RESUMEN

El Proyecto “Contexto hidrogeológico de los humedales andaluces” se enmarca dentro de los objetivos del Programa Andaluz de Gestión de Humedales. El estudio realizado pretende ofrecer criterios en los que basar la gestión hídrica y la delimitación de las áreas de protección de algunos de estos humedales. Los incluidos en este trabajo corresponden a las lagunas del sur de las provincias de Córdoba y Jaén.

Estos humedales, como también algunos del norte de la provincia de Málaga, se encuentran relacionados con los materiales arcillosos, detríticos y evaporíticos del Trías incluidos en la Unidad Olistostromica (Complejo Caótico Subbético). Se trata de una unidad geológica constituida por olistolitos (masas de rocas) que sufrieron procesos gravitacionales de movimientos en masa hacia la cuenca sedimentaria del Guadalquivir, durante el Mioceno inferior-medio. Sobre los materiales triásicos se ha producido un modelado kárstico que ha originado depresiones en las que se encuentran las lagunas estudiadas.

En su conjunto, los materiales triásicos se caracterizan por tener una baja permeabilidad, aunque la disolución de las evaporitas y el carácter detrítico que presentan como consecuencia de la traslación tectónica que han sufrido, dan lugar a la existencia de diferentes acuíferos. En ellos circula el agua subterránea, condicionando la génesis de las depresiones en las que se localizan lagunas y la elevada salinidad del agua almacenada en algunas de ellas y en manantiales que existen en su entorno.

Los fenómenos hidrogeológicos observados, no sólo en los propios humedales sino también en los sectores próximos, permiten concluir que el funcionamiento hidrogeológico de estos materiales triásicos puede asimilarse al esquema propuesto por J. Tóth (1963) para las grandes cuencas sedimentarias de baja permeabilidad. De acuerdo con ello los humedales se encuentran en diferentes situaciones hidrogeológicas. En las zonas topográficamente más altas, que constituyen áreas de recarga, las lagunas son de aguas de baja salinidad, poco permanentes en el tiempo y están asociadas a flujos locales. En las zonas topográficamente más bajas surgen las aguas más saladas y de mayor tiempo de permanencia, asociadas a flujos regionales. En una posición intermedia existen lagunas de tránsito, alimentadas por flujos subterráneos de recorrido más corto y se localizan en las depresiones kársticas que intersectan la superficie piezométrica.



**Contexto hidrogeológico de humedales andaluces.  
Las lagunas del Sur de las provincias de Córdoba y Jaén**



B. Andreo<sup>(1)</sup>, F. Carrasco<sup>(1)</sup>, L. Linares<sup>(2)</sup>, M. Rendón<sup>(3)</sup> y F. Ortega<sup>(4)</sup>  
 (1) Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (GHUMA)  
 (2) Academia Malagueña de Ciencias  
 (3) Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía  
 (4) Grupo de Investigación "Ecología y Biodiversidad de Sistemas Acuáticos", Universidad de Jaén



**1. INTRODUCCIÓN**

Los humedales estudiados se encuentran en el Sur de las provincias de Córdoba y Jaén (Fig. 1, Foto 1). Constituyen, en su mayoría, enclaves lagunares estacionales cuyas profundidades medias son pequeñas, ya que generalmente no superan los tres metros.

Este estudio se enmarca dentro de los objetivos del Programa Andaluz de Humedales y con él se pretende caracterizar el funcionamiento hidrológico e hidrogeológico de las zonas húmedas para contribuir a la gestión de las mismas.



Figura 1: Mapa de situación. Foto 1: Laguna de la Quinta (Baena, Córdoba).

**2. GEOLOGÍA**

La región en la que se ubican estas lagunas, pertenece a la Zona Externa de la Cordillera Bética (Fig. 2A). En ella afloran materiales arcilloso-evaporíticos del Triás incluidos en la Unidad Olistostromática (Complejo Caótico Subbético). Se trata de una unidad geológica constituida por olistolitos que sufrieron procesos gravitacionales de movimientos en masa hacia la cuenca sedimentaria del Guadalquivir, durante el Mioceno inferior-medio (Fig. 2B). En su mayor parte, los olistolitos están constituidos por materiales triásicos de facies germano-andaluza, arcillas de versicolores (rojas, verdes, amarillentas) con dolomías negras, areniscas y evaporitas (yeso y halita) (Foto 2).

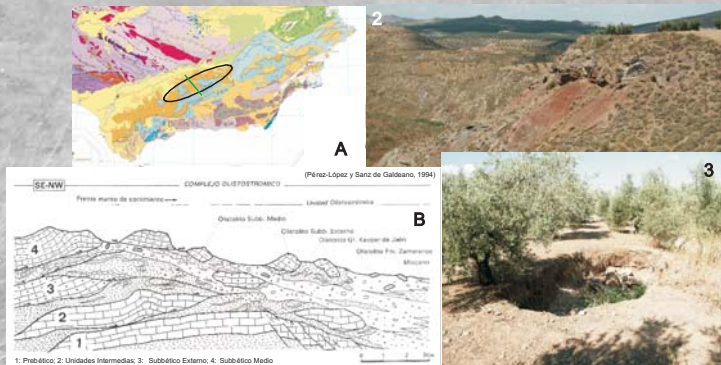


Figura 2. A: Situación geológica de las lagunas. B: Estructura geológica.

Foto 2: Sedimentos triásicos. Foto 3: Colapso en materiales triásicos.

**3. MORFOLOGÍA E HIDROLOGÍA**

Las cuencas vertientes a las lagunas presentan un relieve relativamente suave (Foto 1), surcado por arroyos y ríos. Muchas de las lagunas estudiadas se encuentran situadas en el interfluvio de los arroyos circundantes. En estas cuencas, la escorrentía es de carácter difuso, debido a la ausencia de una red de drenaje organizada, sólo existen cauces de poca entidad que funcionan esporádicamente en momentos de lluvia (Fig. 3A). Algunos cauces presentan mayor desarrollo y funcionamiento torrencial, cuando las precipitaciones son intensas. En estos casos aportan una considerable carga de sedimentos a las lagunas y la progresiva colmatación de las mismas.

Sobre el afloramiento de los materiales triásicos se han desarrollado procesos de karstificación y, consecuentemente, aparecen formas y procesos del modelado kárstico: simas, cavidades, colapsos (Foto 3), dolinas, uvalas y depresiones de mayor entidad en las que se encuentran las lagunas estudiadas.

**4. USOS DEL SUELO**

La mayor parte de los terrenos que rodean a las lagunas están ocupados por olivos de secano y en menor proporción por cereales. En algunas zonas los olivos son de regadío y en estos casos los retomos de riegos producen una aportación de agua a las lagunas que modifica su régimen hídrico natural y origina un mayor periodo de inundación e incluso no llegan a secarse en el estiaje.

Las zonas cultivadas llegan, a veces, hasta el mismo borde lagunar e incluso en algunos casos se ha llegado a cultivar la propia cubeta de la laguna. El arado de las cuencas vertientes está propiciando la colmatación de los vasos lagunares.

**5. HIDROGEOLOGÍA**

En su conjunto, los materiales arcillosos triásicos se caracterizan por tener una baja permeabilidad, aunque la disolución de las evaporitas da lugar a la existencia de diferentes acuíferos. En ellos, circula y se almacena el agua subterránea, con la cual está relacionada la génesis de las lagunas y la alta salinidad del agua almacenada en algunas de ellas y en manantiales que existen en su entorno.

La recarga de los acuíferos se hace por la infiltración de las precipitaciones y, a veces, por retomo de riegos. Las salidas de agua de los acuíferos tienen lugar por bombeos en sondeos utilizados para regadío, recarga a las lagunas, por manantiales, a veces de alta salinidad utilizados en explotaciones salineras y mediante el drenaje subterráneo hacia arroyos y zanjas.

Los niveles piezométricos ponen de manifiesto la existencia de flujos subterráneos hacia las lagunas (lagunas de descarga), desde las lagunas hacia el acuífero circundante (lagunas de recarga) o bien indican que las lagunas se encuentran en una posición intermedia entre las zonas de recarga y descarga del acuífero (lagunas de tránsito), en este caso la laguna no es el último destino de los flujos subterráneos que se dirigen hacia salidas (manantiales) situadas a cotas más bajas (Fig.4).

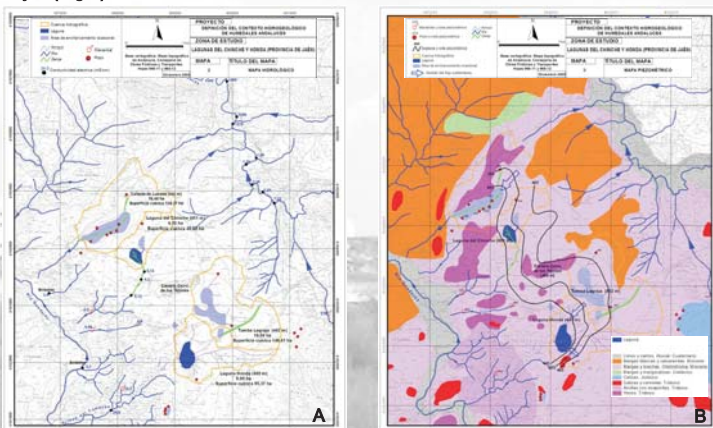


Figura 3: Lagunas de Alcaudete. A: Mapa hidrológico. B: Mapa hidrogeológico.

**6. FUNCIONAMIENTO HÍDRICO DE LAS LAGUNAS**

Las entradas de agua a las lagunas se producen por la lluvia que cae directamente sobre la superficie del vaso lagunar (P en la figura 4), por la escorrentía de su cuenca vertiente (Es) y por aportaciones subterráneas (A). A veces, las entradas se incrementan por excedentes de riegos de los cultivos ubicados en su cuenca vertiente (Rr). Las salidas de agua están constituidas por la evaporación (E), a veces, por infiltración hacia el acuífero adyacente (I), y ocasionalmente, por arroyos emisarios o por drenaje mediante zanjas.

Las facies hidroquímicas del agua de las lagunas evidencian la existencia de flujos subterráneos someros de poca salinidad y flujos profundos, más salinos, asociados a la presencia de evaporitas triásicas. Durante la época estival, normalmente, se secan las lagunas y queda depositada una costra de sales en el vaso lagunar. La aportación de agua subterránea tiene gran influencia en la salinidad del agua embalsada y en el periodo de inundación.

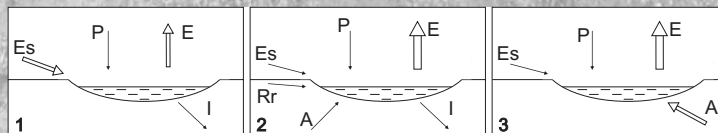


Figura 4: Funcionamiento hídrico de las lagunas. 1: Lagunas de recarga. 2: Laguna de tránsito. 3: Laguna de descarga. La anchura de las flechas es proporcional a la magnitud de los componentes.

**7. CONCLUSIONES**

- Los humedales del Sur de las provincias de Córdoba y Jaén se desarrollan en los materiales del olistostroma del Guadalquivir (Complejo Caótico Subbético) predominantemente formado por sedimentos arcilloso-evaporíticos triásicos.
- Desde el punto de vista geomorfológico las lagunas corresponden a depresiones topográficas de origen kárstico, generalmente situadas en zonas de divisoria hidrográfica.
- Los sedimentos arcilloso-evaporíticos no son impermeables, sino que tienen comportamiento acuífero. Existe en ellos un flujo subterráneo desde las zonas topográficamente más altas (lagunas de recarga, humedales de aguas dulces, poco permanentes en el tiempo, asociadas a flujos locales) hasta zonas topográficamente más bajas (lagunas de descarga, de mayor tiempo de permanencia, y/o cauces tributarios del Guadalquivir donde se encuentran las aguas más saladas y de mayor temperatura, asociadas a flujos regionales). Otras lagunas se encuentran en una posición intermedia entre las zonas de recarga y descarga del acuífero (lagunas de tránsito).



## **FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DEL SISTEMA LAGUNAR DEL MARGEN E DEL SALAR DE ATACAMA (CHILE)**

**Ona CORNELLÀ\*, Joaquín SALAS\*, Ramón ARAVENA\*\*, Edwin GUZMÁN\*\*\*, Jordi GUIMERA\*, Corrado TORE\*\*\*, Wolf VON IGEL\*\*\*\*, Álvaro HENRÍQUEZ\*\*\* y Andrés FOCK\*\*\***

(\* ) Amphos21, S.L. Passeig Garcia i Faria, 49-51, 1-1. 08019 Barcelona.  
ona.cornella@amphos21.com

(\*\* ) Department of Earth and Environmental Sciences. University of Waterloo. 200  
University Avenue West. Waterloo. Ontario. Canada, N2L 3G1

(\*\*\* ) SQM, Salar, S.A. Los Militares 4290. Santiago. Chile

(\*\*\*\* ) Amphos21 Chile. Napoleón 3200, Oficina 306. Santiago. Chile

### **RESUMEN**

El Salar de Atacama es una de las regiones más áridas del mundo. Con 3000 km<sup>2</sup> es el segundo salar más grande después del de Uyuni, en Bolivia. En su margen E aparecen numerosos cuerpos lacustres, de carácter temporal o permanente, de los cuales, los de mayor extensión, forman parte de la Reserva Nacional Los Flamencos. Este entorno es el hábitat de una fauna autóctona especialmente protegida, entre la que destacan diversos tipos de aves.

El subsuelo del Salar está constituido por niveles acuíferos salinos, con salmueras intersticiales ricas en litio y sales potásicas. La explotación de estos recursos se está realizando sin que se produzcan afecciones al equilibrio del ecosistema lacustre. Para ello es fundamental el control sobre el conocimiento del funcionamiento hidrogeológico del sistema, identificando los parámetros clave como (1) la distribución de las litologías acuíferas y acuitardos, (2) los sistemas de recarga (pluviometría, fluvimetría y régimen de los acuíferos adyacentes), (3) la hidrodinámica e interconexión entre las aguas superficiales (lagunas y cursos fluviales) y las aguas subterráneas, (4) la climatología (pluviometría y evaporación, principalmente) y (5) el régimen de explotaciones de la salmuera y el agua dulce del entorno. En este contexto, SQM (Sociedad Química y Minera de Chile) contrató a Amphos 21 para llevar a cabo esta tarea.



## FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DEL SISTEMA LAGUNAR DEL MARGEN E DEL SALAR DE ATACAMA (CHILE)

Ona Cornellà (1), Joaquín Salas(1), Ramón Aravena (2), Edwin Guzmán (3), Jordi Guimerà (1), Corrado Tore (3), Wolf von Igel (4), Álvaro Henríquez (3), Andrés Fock (3)

(1) Amphos21, S.L. Passeig Garcia i Faria, 49-51, 08019 Barcelona, España  
 (2) Department of Earth and Environmental Sciences, University of Waterloo 200 University Avenue West, Waterloo, Ontario, Canada  
 (3) SQM, Salar, S.A. Los Militares 4290, Santiago, Chile  
 (4) Amphos21 Chile: Napoleón 3200, Oficina 306, Santiago, Chile  
 Contacto: ona.cornella@amphos21.com

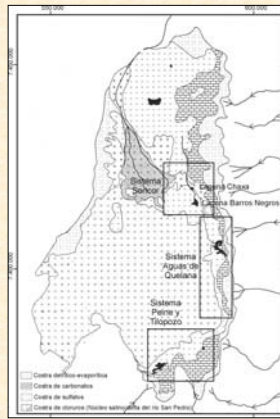
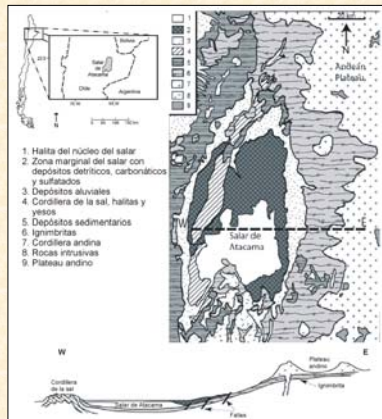
### Introducción

El Salar de Atacama es una de las regiones más áridas del mundo. En su margen E aparecen numerosos cuerpos lacustres, de carácter temporal o permanente, de los cuales, los de mayor extensión, forman parte de la Reserva Nacional Los Flamencos. Este entorno es el hábitat de una fauna autóctona especialmente protegida, entre la que destacan diversos tipos de aves. El subsuelo del Salar está constituido por niveles acuíferos salinos, con salmueras intersticiales ricas en litio y sales potásicas. La explotación de estos recursos se está realizando sin que se produzcan afecciones al equilibrio del ecosistema lacustre. Este póster, sin embargo, se refiere al margen oriental del Salar, por donde tiene lugar la mayor parte de la recarga del núcleo. Para ello SQM S.A. ha encargado a la empresa Amphos21 S.L. la realización de una serie de estudios que han permitido formular un modelo conceptual sobre el funcionamiento hidrogeológico de este margen.

Los estudios realizados se han centrado en (1) el estudio geológico de las formaciones sedimentarias identificadas en el subsuelo de las lagunas, (2) la parametrización hidráulica de las diferentes unidades (acuíferos y acuitados), y (3) la identificación de los sistemas de recarga y la evolución de los niveles piezométricos de esta zona del Salar (pluviometría, evaporación, fluvimetría y régimen de explotaciones). La metodología ha integrado (a) observaciones de terreno realizadas a lo largo del año 2008, (b) medidas de aforo y balances de agua realizados a lo largo de las principales vías de drenaje y en las lagunas, (c) tres campañas de muestreo químico e isotópico de aguas superficiales y subterráneas, (d) datos históricos de piezometría y tres campañas de medida de niveles, y (e) reconocimiento del material extraído de las perforaciones realizadas en el entorno de las lagunas. Paralelamente, en algunos sectores particulares se han realizado ensayos de bombeo para la determinación de los principales parámetros hidrogeológicos. La revisión de antecedentes y las fotos aéreas y satelitales, tomadas desde los años 60 hasta la actualidad, han sido determinantes para establecer las tendencias evolutivas pasadas.



### Contexto geológico y naturaleza del subsuelo del Salar



El Salar de Atacama es una cuenca endorreica limitada al W por la Cordillera de Domeyko y la Cordillera de la Sal y al E por los Andes (Figura 1). El interior de la cuenca está principalmente constituido por una serie de facies evaporíticas (superficialmente "costras"; Bevacqua, 1992), cuya distribución está controlada por una secuencia de precipitación en orden de solubilidades crecientes (carbonatos, sulfatos y cloruros) (Figura 2). La distribución de estas facies no es concéntrica respecto al depocentro del Salar, como consecuencia del desigual aporte hídrico en las zonas perimetrales. En el entorno de las lagunas (zona S de Barros Negros; Figura 3), el substrato litológico está caracterizado por la intercalación de depósitos sedimentarios y evaporíticos (mayoritariamente sulfatos), que evidencian la interrelación entre ambos ambientes sedimentarios en los márgenes del Salar. Por lo general, los depósitos detriticos son grandecrecientes hacia el depocentro de la cuenca, lo que indica que el área fuente de los sedimentos se encuentra en los conos aluviales que enlazan el Salar con el sector volcánico de los Andes.

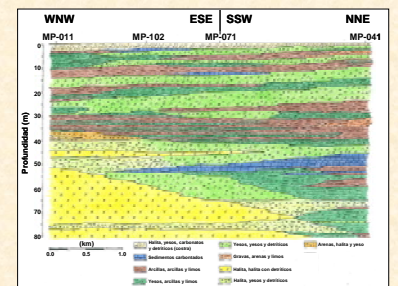
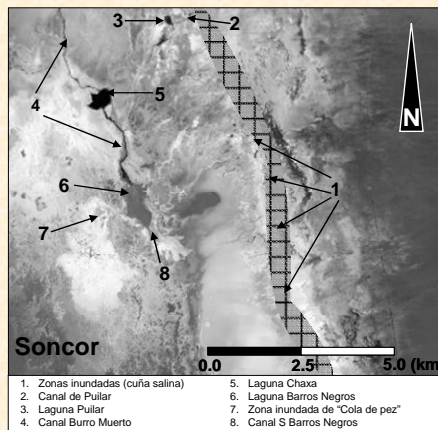


Figura 3 (derecha). Localización de los puntos de registro sedimentológico de los que se ha realizado la correlación estratigráfica de la derecha, que muestra las facies presentes en el subsuelo del sector lagunar S de Barros Negros.

Estos cuerpos limosos y arcillosos pueden jugar un papel fundamental en la caracterización y la compartimentación hidrogeológica en el acuífero local (existencia de capas de baja permeabilidad confinantes). Las diferencias de nivel medidas en las formaciones detritico-evaporíticas situadas entre los niveles de finos (Figura 2) refuerzan esta posibilidad. Por otra parte, la permeabilidad vertical estimada mediante ensayos de bombeo en multipiezómetros para las capas limosas (con un promedio inferior a 2·10<sup>-7</sup> m/s) confirman que se tratan de niveles confinantes de baja permeabilidad relativa.

### Origen y tipos de lagunas del margen E del Salar. Lagunas del Sector Soncor



Según su ubicación geográfica, los cuerpos de agua superficiales se han agrupado en tres sistemas: (1) el sistema Soncor, en la zona N del margen E del Salar, formado principalmente por las lagunas de Chaxa, Barros Negros y Puillar, (2) el sistema Aguas de Quelana, en el centro del margen E, constituido por pequeñas lagunas de carácter no permanente, y (3) el sistema Peine y Tilopozo, donde se localizan las lagunas Salada, Saladita, Interna, La Punta y La Brava (Figura 2). Genéticamente, las lagunas tienen dos orígenes. La primera tipología (Chaxa y Barros Negros), son lagunas de carácter permanente y gran extensión (varias hectáreas), alimentadas por aguas superficiales (Canal de Burro Muerto). Su ubicación se encuentra desplazada unos kilómetros al W de los límites de las costras evaporíticas y los depósitos detriticos del margen de la cuenca. La segunda tipología (Puillar, Aguas de Quelana, Peine y Tilopozo) son cuerpos lacustres de menor extensión, originados por la presencia de afloramientos de agua subterránea ligados a la dinámica de una cuña salina. Esta cuña de agua subterránea se genera de forma similar a las de las zonas costeras, aunque con un contraste de densidades mucho mayor: 1.0 gr/cm<sup>3</sup>, las aguas subterráneas del margen E procedentes del drenaje de las litologías volcánicas y detriticas, y 1.23 gr/cm<sup>3</sup>, las salmueras del núcleo salino. Como consecuencia, se genera un cordón de lagunas superficiales en los que los eventos de evaporación y precipitación de costra evaporítica son especialmente intensos. Como consecuencia las aguas aumentan su salinidad y densidad infiltrándose y mezc: lándose con las salmueras del núcleo salino.

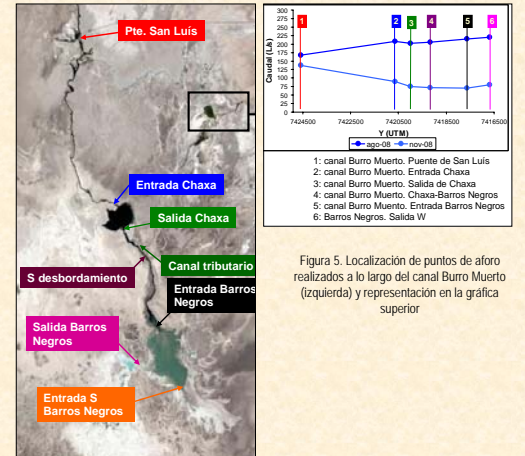


Figura 5. Localización de puntos de aforo realizados a lo largo del canal Burro Muerto (izquierda) y representación en la grafica superior

**Laguna Puillar**  
 Puillar es una laguna directa y exclusivamente alimentada por aguas subterráneas procedentes del acuífero aluvial y volcánico del margen E del Salar que ascienden por la presencia de la cuña salina (Figura 4 y 5).

**Laguna Chaxa**  
 Chaxa presenta una dinámica estrechamente ligada al régimen de caudales del canal Burro Muerto. Las observaciones de terreno y los estudios hidroquímicos indican que este canal es la única vía de entrada y salida de agua de la laguna. Los tiempos de residencia del agua en el sistema lacustre son cortos. No hay evidencias morfológicas ni hidroquímicas e isotópicas que relacionen las aguas subterráneas locales con las aguas de la laguna (ni por procesos de recarga o de descarga e infiltración) (Figura 4 y 5).

**Laguna Barros Negros**  
 La mayor parte de la recarga de la laguna se efectúa a través del canal Burro Muerto. Durante el invierno, el volumen de la recarga superficial diluye el efecto que sobre el quimismo e isotopia de las aguas de la laguna tiene la recarga de origen subterráneo. En verano, el caudal circulante por el canal Burro Muerto desciende prácticamente a la mitad, lo que permite apreciar mejor a contribución de la recarga subterránea a la laguna. Se han caracterizado dos zonas de desbordamiento en el sector W de la laguna. La principal salida de agua superficial se localiza a través de un canal ubicado en el sector central de la orilla W. El volumen rebalsado se evapora, pero mayoritariamente se infiltra en el subsuelo del paraje conocido como "cola de pez". Esta agua circula hipodérmicamente, alterando grandes extensiones de costra sulfatada, como consecuencia de la existencia de un medio limoso de baja permeabilidad en los primeros 10 metros. Hacia el centro del Salar, estos materiales se acuñan y pasan lateralmente a facies evaporíticas de mayor permeabilidad. Es entonces cuando estas aguas hipodérmicas o subsuperficiales se infiltran hacia el acuífero evaporítico del núcleo salino (Figura 4 y 5).

### Conclusiones y agradecimientos

En el marco del proyecto realizado entre SQM S.A. y Amphos21 S.L. se ha construido el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del margen E del Salar de Atacama y del sistema lacustre del sector Soncor. Los procesos de interconexión entre las aguas superficiales y las subterráneas han sido identificados mediante la integración de los datos (1) geomorfológicos y sedimentológicos (2) hidroquímicos e isotópicos, y (3) piezométricos e hidroclimáticos, obtenidos mediante una serie de campañas de muestreos, medidas de nivel y reconocimiento de terreno. Esta información es representativa de los diferentes escenarios que tienen lugar a lo largo del ciclo hidroclimático anual. En este sentido, se ha podido establecer que las aguas de la laguna de Puillar proceden, exclusivamente, de la descarga del acuífero volcánico-detritico del margen E del Salar, en el sector de la cuña salina. Sin embargo, Chaxa está recargada exclusivamente por las aguas superficiales del canal Burro Muerto, mientras que Barros Negros presenta un sistema de recarga mixto de aguas superficiales y parcialmente de aguas subterráneas. Puillar y Barros Negros tienen zonas de desbordamiento, a través de las cuales parte del agua recarga el acuífero evaporítico del núcleo salino.

Este estudio fue financiado por la Gerencia de Hidrogeología Salar, SQM Salar S.A. Un especial agradecimiento al personal del Grupo de Hidrogeología.

### Bibliografía

- Bevacqua P., 1992. Geomorfología del Salar de Atacama y Estratigrafía de su núcleo y delta, Segunda Región de Antofagasta, Chile. Memoria de Títilo. Universidad Católica del Norte, Antofagasta, 284 pp.
- Kampf A., 2002. Evaporation and land surface energy budget at the Salar de Atacama, Northern Chile. Thesis for the degree of Master Science in Hydrogeology, University of Nevada, Reno.
- Mardones L., 1986. Características geológicas e hidrogeológicas del Salar de Atacama. El litio, un nuevo recurso para Chile. Editorial Universitaria, Santiago de Chile.
- Munoz N., Charrier R. y Jordan T., 2002. Interacción northern Chile. Revista geológica de Chile, 29 (1).
- Munoz J. F. y Ortiz G.A., 2004. Funcionamiento t México, vol. XIX (3), pp. 69-81
- Ramírez C. F. y Gardweg M. P., 1982. Carta Minera, 122 pp.
- Risacher F. y Alonso H., 1996. Geoquímica del 134.



## **PRIMEROS RESULTADOS SOBRE EL ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DEL SINCLINAL DE FUENTES Y SU RELACIÓN CON LOS COMPLEJOS LAGUNARES DE ARCAS Y DEL RÍO MOSCAS (CUENCA, ESPAÑA)**

**A. DE LA HERA PORTILLO\*, M. MARTÍNEZ PARRA\*, E. LÓPEZ-PAMO\* y E. SANTOFIMIA PASTOR\***

(\*) Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid.  
a.delahera@igme.es

### **RESUMEN**

Los complejos de humedales de Arcas y del río Moscas representan dos complejos lagunares desarrollados en acuíferos kársticos yesíferos notablemente activos. De hecho, la mayor parte de las cubetas lagunares constituyen dolinas y uvalas formadas por procesos de disolución y colapso. Desde el punto de vista hidrogeológico, ambos complejos se localizan sobre la masa de agua subterránea de la Serranía de Cuenca (080.015) dentro de la demarcación hidrográfica del Júcar. Los estudios realizados hasta la fecha son de índole eminentemente limnológica y biogeoquímica, sin embargo, los datos hidrológicos disponibles, parecen indicar que se trata de humedales dependientes en alto grado de las aguas subterráneas. No obstante, dentro de cada uno de los complejos, es posible distinguir humedales con diferente intensidad de la fluctuación de la lámina de agua, lo cual pone de manifiesto diferentes relaciones de dependencia respecto de las aguas subterráneas.

El estudio hidrogeológico que se está realizando pretende un doble objetivo. Por un lado, estimar los volúmenes de agua que participan en el balance hídrico de dos humedales piloto seleccionados, uno en el complejo lagunar de Arcas y otro en el complejo lagunar del río Moscas, en los que se procederá a realizar su batimetría con objeto de determinar la geometría y volumen de las cubetas. Por otro lado, realizar el análisis químico de las aguas que llenan las cubetas y de las aguas subterráneas subyacentes, dirigido a determinar la calidad química de las aguas que alimentan estos humedales y sus rangos de variación intranual e interanual.

**Palabras clave:** *Arcas, agua subterránea, humedales, río Júcar, río Moscas, Serranía de Cuenca*



# Jornada EL PAPEL DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL FUNCIONAMIENTO DE LOS HUMEDALES CIAMA, La Alfranca, Pastriz (Zaragoza), 22 y 23 de Octubre 2009

## PRIMEROS RESULTADOS SOBRE EL ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DEL SINCLINAL DE FUENTES Y SU RELACIÓN CON LOS COMPLEJOS LAGUNARES DE ARCAS Y DEL RÍO MOSCAS (CUENCA, ESPAÑA)

DE LA HERA, A.; MARTÍNEZ, M.; LÓPEZ-PAMO, E. Y SANTOFIMIA, E.  
 Instituto Geológico y Minero de España (IGME). C/ Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid. España  
 Email: [a.delahera@igme.es](mailto:a.delahera@igme.es)

### RESUMEN

Los complejos de humedales de Arcas y del río Moscas representan dos complejos lagunares desarrollados en acuíferos kársticos yesíferos notablemente activos. De hecho, la mayor parte de las cubetas lagunares constituyen dolinas y uvalas formadas por procesos de disolución y colapso. Desde el punto de vista hidrogeológico, ambos complejos se localizan sobre la masa de agua subterránea de la Serranía de Cuenca (080.015) dentro de la demarcación hidrográfica del Júcar. Se han realizado estudios de índole eminentemente limnológica y biogeoquímica (Camacho, 1997). Los datos hidrologógicos disponibles, parecen indicar que se trata de humedales dependientes en alto grado de las aguas subterráneas (Sanz, 2005). Se observa que la fluctuación de la lámina de agua pone de manifiesto diferentes relaciones de dependencia respecto de las aguas subterráneas.

El estudio hidrogeológico que se está realizando pretende un triple objetivo. 1. Determinar el funcionamiento hidrogeológico y hidrodinámico local. 2. Estimar los volúmenes de agua que participan en el balance hídrico de cuatro humedales piloto seleccionados, dos de ellos en el complejo lagunar de Arcas (Arcas-4 y Barragán) y otros dos en el complejo lagunar del río Moscas, en los que se ha realizado un mapa batimétrico con objeto de determinar la geometría y volumen de las cubetas. 3. Análisis químico de las aguas que llenan las cubetas y de las aguas subterráneas subyacentes, dirigido a determinar la calidad química de las aguas que alimentan estos humedales y sus rangos de variación intranual e interanual.

### INTRODUCCIÓN



Los Complejos de Arcas y del Río Moscas se localizan en la comunidad autónoma de Castilla-La Mancha, dentro de la provincia de Cuenca y concretamente dentro de los términos municipales de Valdetórtola, Villar de Olalla y Arcas del Villar, el primero; y de Fuentes y Arcas del Villar, el segundo. El complejo de Arcas se ubica en la margen derecha del río San Martín, y el complejo del Río Moscas, en la margen izquierda de dicho río, siendo ambos ríos afluentes del Júcar por la izquierda. Ambos complejos están separados apenas 7 kilómetros y presentan un notable parecido desde el punto de vista geológico y geomorfológico. Además ambos constituyen karst en yesos hidrogeológicamente activos y heterogéneos. Prueba de ello es el hecho de que la fluctuación del nivel freático induce a procesos mecánicos activos de colapso, formándose dolinas-lago.

Desde el punto de vista geológico, los complejos lagunares se ubican a ambos flancos del sinclinal de Fuentes, sobre los yesos de la facies Garumnense (tránsito Cretácico-Terciario). El agua subterránea procede de la recarga a través de los afloramientos yesíferos del entorno; mientras que la salida del flujo tiene lugar por dolinas-surgencias. Apenas existen manantiales y los inventariados por el IGME, están actualmente secos. La calidad química de las aguas muestreadas en los pozos y sondeos de la zona corresponde a aguas de facies sulfatadas cálcicas con conductividades comprendidas entre 2.200 y 4.000 microS/cm.

### METODOLOGÍA

El estudio se está desarrollando siguiendo dos fases simultáneas:

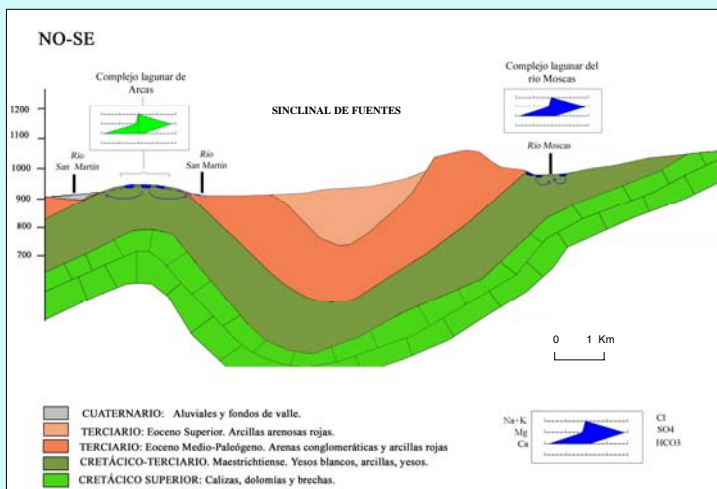
#### 1. Estudio hidrogeológico convencional.

Inventario de puntos de agua, inventario de manantiales, inventario de lagunas, campañas de muestreo, análisis físico-químicos e isotópicos para caracterizar el comportamiento del acuífero y las relaciones ríos-acuíferos y humedales-acuíferos.

#### 2. Estudio hidrológico de lagunas piloto.

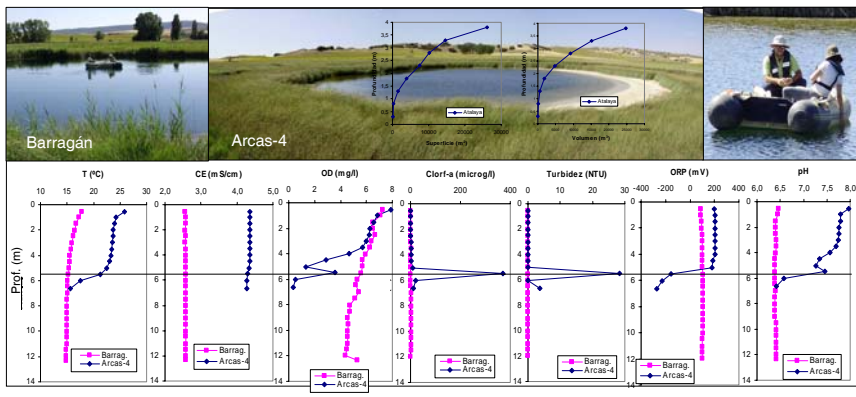
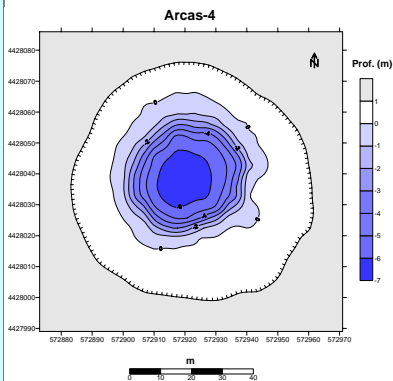
Se han seleccionado dos lagunas piloto en el Complejo de Arcas (Arcas-4 y Barragán) y dos lagunas piloto en el Complejo del Río Moscas (Atalaya y Ojo de la Corba). En los trabajos de campo desarrollados en Julio 2009 se han desarrollado las siguientes actividades:

- Realización de batimetría y cubicación de las cubetas.
- Perfiles verticales de diversos parámetros físico-químicos.
- Instalación de Datta Logger para registro de la temperatura en la parte superficial y profunda de las lagunas piloto.
- Toma de muestras de agua y análisis físico químicos de lagunas y ríos.
- Aforos directos en los cauces de los Ríos San Martín y Moscas.



### RESULTADOS

El estudio de los perfiles verticales realizados en el mes de Julio en las lagunas, determinando temperatura, conductividad, oxígeno disuelto (OD), clorofila-a, turbidez, Eh y pH, vs profundidad, muestra dos patrones diferentes de columna de agua. En un tipo de lagunas, la columna de agua es relativamente homogénea, mientras que en otro, presenta una marcada estratificación. Las lagunas del primer tipo (Barragán y Ojo de la Corba) tienen menor temperatura (15-18 °C) y sus aguas son más diluidas, tal como refleja el valor de su conductividad (2,3-2,6 mS/cm), y a pesar de la época del año, no se observa descenso del nivel del agua, la cual siempre tiene oxígeno disuelto a cualquier profundidad (50-90% de saturación). En el segundo tipo (Arcas-4 y Atalaya), se observa estratificación térmica, con temperaturas más elevadas en la capa superior (23-26 °C; epilimnion), que en la inferior (hipolimnion) que presenta temperaturas semejantes a las lagunas del tipo anterior (14-15°C). Esta estratificación térmica favorece que el epilimnion esté prácticamente saturado en oxígeno disuelto, mientras que la capa inferior pueda llegar a ser anóxica (p. ej. Arcas-4). La conductividad de estas lagunas suele ser algo mayor (rango 2,6-4,4 mS/cm). Se considera que las lagunas del primer tipo están bien conectadas hidráulicamente con las aguas subterráneas, evitando su constante alimentación subterránea, su calentamiento superficial y la consiguiente estratificación. Por el contrario, en las lagunas del segundo tipo, el flujo del agua subterránea es insuficiente para evitar su estratificación y contrarrestar las pérdidas por evaporación.



### Referencias

Camacho, A. (1997). *Ecología de los microorganismos fotosintéticos en las aguas microaerobias y anóxicas de la laguna de Arcas*. Te Martínez-Parra, M. (en elaboración). *Hidrogeología de la Serranía de Cuenca*. Tesis Doctoral en elaboración.  
 Martínez-Parra, M.; de la Hera, A.; López-Pamo, E.; Santofimia, E.; Moreno, M.J. y Montero, E. (2010, en prensa). *Características geo-karst en yesos de los Complejos lagunares de Arcas y del Río Moscas (Cuenca)*. IV Congreso Internacional sobre el Karst (resumen a Sanz, E. (2005). *El karst en yesos de Fuentes (Cuenca)*. Comunicación presentada en Fundación Cueva de Nerja.

## **IMPLICACIONES AMBIENTALES Y SOCIOECONÓMICAS DEL RELLENO Y DEGRADACIÓN DE LOS HUMEDALES DE ORIGEN KÁRSTICO DEL VALLE DEL EBRO**

**J.P. GALVE\*, F. GUTIÉRREZ\*, J.A. SÁNCHEZ\*, P. LUCHA\* y J. GUERRERO\***

(\*) Universidad de Zaragoza. Pedro Cerbuna, 12. Edificio Geológicas. 50009 Zaragoza.  
jjpgalve@unizar.es

### **RESUMEN**

El sector central del valle del Ebro está caracterizado por el desarrollo de un karst cubierto en evaporitas cuya manifestaciones más evidentes son la formación de dolinas en el aluvial del río Ebro. Estas dolinas en algunos casos poseen una profundidad suficiente para hacer aflorar el nivel freático del acuífero detrítico aluvial, dando lugar a lagunas de aguas permanentes con un elevado interés ecológico y ambiental en un entorno semiárido.

La progresiva urbanización del entorno metropolitano de la ciudad de Zaragoza ha provocado la casi desaparición de estas zonas húmedas: en los últimos 50 años su superficie se ha reducido en más del 90%. Esta desaparición se ha producido por relleno de las depresiones con áridos, escombros y, en ocasiones, vertidos ilegales de origen industrial, lo que constituye una fuente permanente de contaminación del citado acuífero.

El relleno de las dolinas ha supuesto también la pérdida de información sobre las zonas donde la subsidencia por karstificación es especialmente activa. Las edificaciones e infraestructuras de transporte sitas en estas zonas presentan al poco tiempo de su construcción graves problemas estructurales por subsidencia y colapso, lo que provoca graves problemas económicos y sociales.

# IMPLICACIONES AMBIENTALES Y SOCIOECONÓMICAS DEL RELLENO Y DEGRADACIÓN DE LOS HUMEDALES DE ORIGEN KÁRSTICO DEL VALLE DEL EBRO



J.P. Galve<sup>1</sup>, F. Gutiérrez<sup>1</sup>, J.A. Sanchez<sup>1</sup>, P. Lucha<sup>1</sup>, J. Guerrero<sup>1</sup>

(1). Universidad de Zaragoza

## Contexto geológico

El sector central del Valle del Ebro está caracterizado por el desarrollo de un karst cubierto en evaporitas cuya manifestaciones más evidentes son la formación de dolinas en el aluvial del Río Ebro.

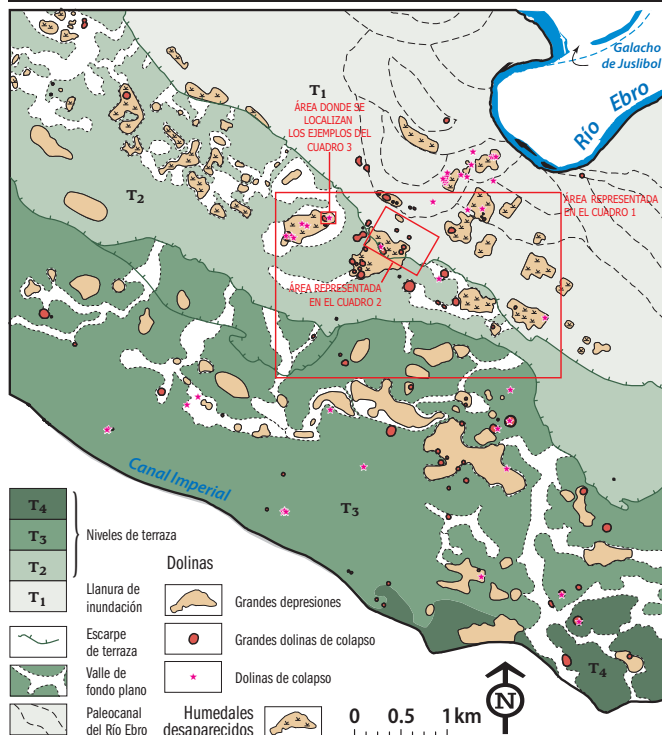


Ojo del Fraile. Humedal localizado en una dolina (Casetas, Zaragoza)



Estas dolinas en algunos casos poseen una profundidad suficiente para hacer aflorar el nivel freático del acuífero detrítico aluvial, dando lugar a lagunas de aguas permanentes con un elevado interés ecológico y ambiental en un entorno semiárido.

## Cartografía de dolinas de la zona Oeste de Zaragoza

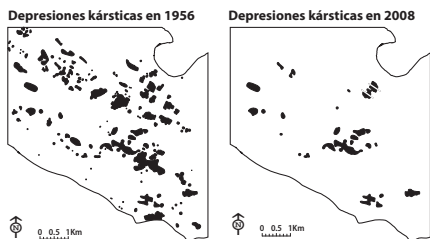


## Degradación de los humedales de origen kárstico del Valle del Ebro

La progresiva urbanización del entorno metropolitano de la ciudad de Zaragoza ha provocado la casi desaparición de estas zonas húmedas: en los últimos 50 años su superficie se ha reducido en más del 90%.

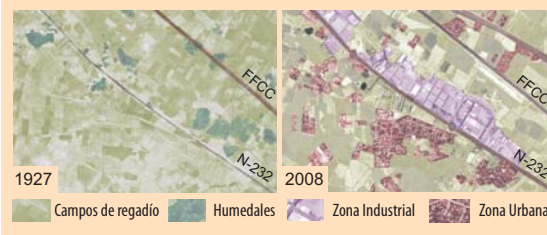


Esta desaparición se ha producido por relleno de las depresiones con áridos, escombros y, en ocasiones, vertidos ilegales de origen industrial, lo que constituye una fuente permanente de contaminación del citado acuífero.



El relleno de las dolinas ha supuesto también la pérdida de información sobre las zonas donde la subsidencia por karstificación es especialmente activa.

Cuadro 1. Cambios de usos de suelo en el entorno de la carretera N-232



## Daños ocasionados por la ocupación de humedales de origen kárstico

Las edificaciones e infraestructuras de transporte sitas en estas zonas presentan al poco tiempo de su construcción graves problemas estructurales por subsidencia y colapso, lo que provoca graves problemas económicos y sociales.

Cuadro 2. Daños actuales observados en una zona industrial situada sobre un antiguo humedal de origen kárstico



Cuadro 3. Ejemplos de daños

- 1) Vivienda afectada por subsidencia en la que se tuvo que derribar la sección situada a la derecha de la imagen a causa de su excesivo basculamiento. La deformación que sufría el edificio se observa actualmente en el muro de ladrillo rojo que limita la propiedad.
- 2) Vivienda apuntalada situada a unos metros de la carretera N-232 afectada por la subsidencia continuada del terreno.
- 3) Colapso súbito ocurrido en 2006 en una zona verde de un aparcamiento a pocos metros de la carretera N-232. Engulló





## **GÉNESIS Y FUNCIONAMIENTO DE LAS ZONAS HÚMEDAS DE BALEARES EN RELACIÓN CON LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS**

**Begoña GARCÍA PARDO\***, **Margarita JUNCOSA DARDER\*\***, **Concepción GONZÁLEZ CASASNOVAS\*\*\***, **María Teresa MAESTRO SALMERÓN\*** y **Loreto RUIZ HERRERO\***

(\*) EPTISA Servicios de Ingeniería, S.L. Arápiles, 14. 28015 Madrid.  
bgarciapardo@eptisa.com ; tmaestro@eptisa.es

(\*\*) HIDROMA, S.L. Costa de la Pols, 6, 2º 3ª. 07002 Palma de Mallorca.  
mjuncosadarder@yahoo.es

(\*\*\*) Direcció General de Recursos Hídrics. Govern Balear. Conselleria de Medi Ambient.  
Gremi de Sabaters nº 7, 2ª planta. 07009 Palma de Mallorca. conchuela@teleline.es

### **RESUMEN**

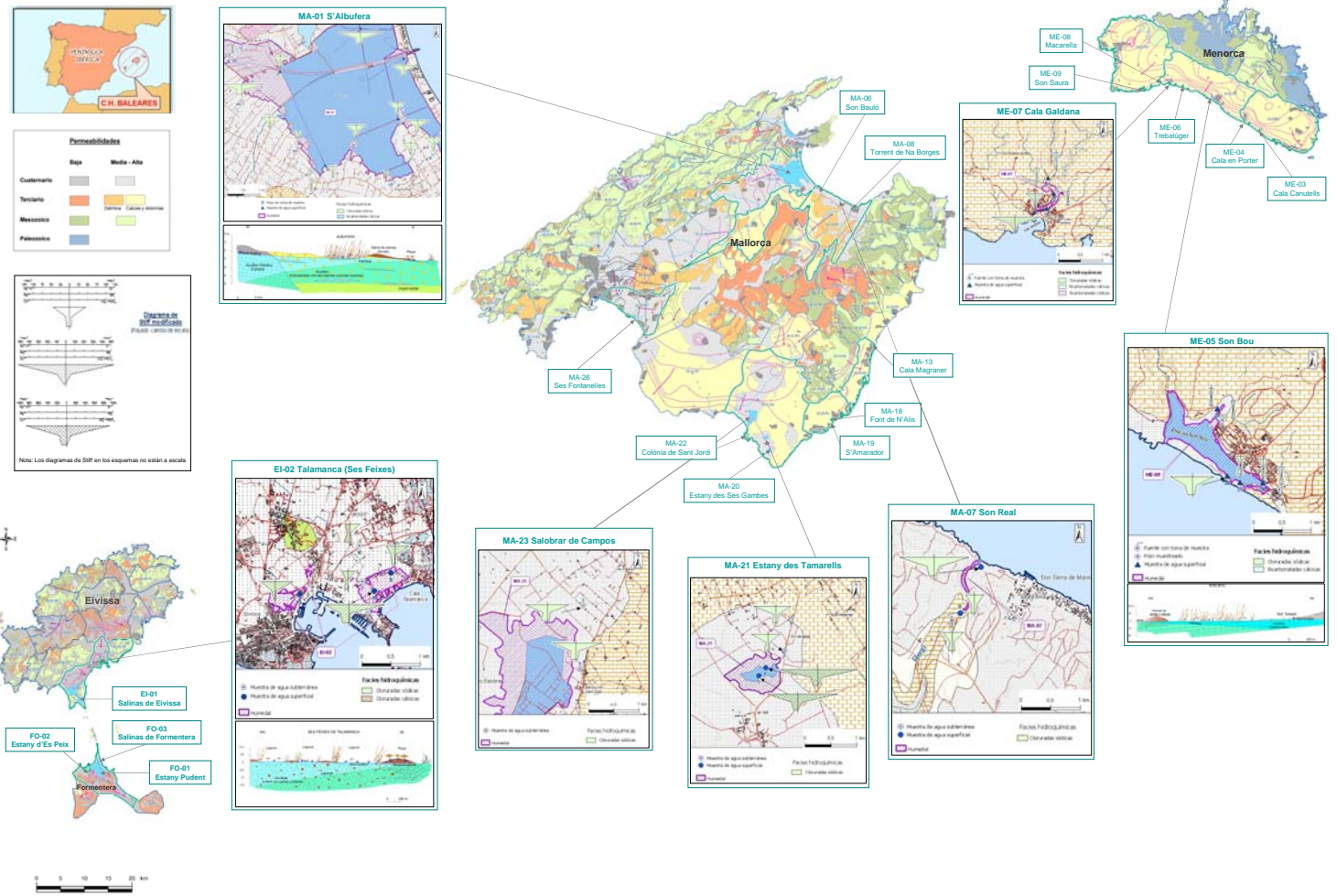
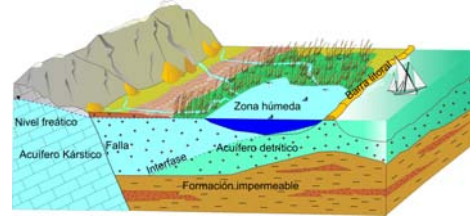
En las Islas Baleares hay un importante número de humedales localizados, en gran parte, en zonas próximas al mar. Se han estudiado 24 de estos humedales: 12 en la isla de Mallorca, 7 en Menorca, 2 en Eivissa y 3 en Formentera. Se ha determinado el funcionamiento hidrogeológico de cada humedal, teniendo en cuenta las características geológicas e hidrogeológicas del entorno, así como las características hidroquímicas de la zona encharcada y del acuífero relacionado. El funcionamiento de gran parte de los humedales es muy similar, y tiene lugar según un modelo que se repite en varias zonas del Mediterráneo, en el que una franja de costa con un cordón de dunas, topográficamente algo más elevada, separa del mar una zona interior relativamente deprimida. Ésta recibe aportes de agua dulce a partir de cursos de agua superficial en época de lluvias, de agua del acuífero y de agua salada del mar. Al cortar el nivel freático la topografía del terreno en estas zonas deprimidas, se produce la surgencia de agua del acuífero, originándose las charcas. El contorno de las lagunas es, pues, el del afloramiento de la superficie piezométrica. Las oscilaciones estacionales del nivel piezométrico, con cotas más altas en época de lluvias y cotas más bajas en época de estiaje, condiciona las condiciones de salinidad de los humedales.



# GÉNESIS Y FUNCIONAMIENTO DE LAS ZONAS HÚMEDAS DE BALEARES EN RELACIÓN CON LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

El **objetivo** del estudio es la definición del **funcionamiento hidrogeológico** de varios humedales de las Islas Baleares, teniendo en cuenta las características geológicas e hidrogeológicas del entorno, así como las características hidroquímicas de la zona encharcada y del acuífero relacionado. Se han estudiado **24 humedales** localizados, en gran parte, en zonas próximas al mar: 12 en la isla de Mallorca, 7 en Menorca, 2 en Eivissa y 3 en Formentera.

El **funcionamiento** de gran parte de los humedales es muy similar, y tiene lugar según un modelo que se repite en varias zonas del Mediterráneo, en el que una franja de costa con un cordón de dunas, topográficamente algo más elevada, separa del mar una zona interior relativamente deprimida. Ésta recibe aportes de agua dulce a partir de cursos de agua superficial en época de lluvias, de agua del acuífero y de agua salada del mar. Al cortar el nivel freático la topografía del terreno en estas zonas deprimidas, se produce la surgencia de agua del acuífero, originándose las charcas. Las oscilaciones estacionales del nivel piezométrico, con cotas más altas en época de lluvias y cotas más bajas en época de estiaje, condiciona la salinidad de los humedales.



El objetivo de la **Directiva Marco del Agua (DMA)** con respecto a los humedales es poco concreto, aunque el funcionamiento ecológico e hidrológico de éstos sea importante a la hora de alcanzar el objetivo final que no es otro que lograr el Buen Estado de las aguas. Los humedales deben considerarse dentro de los objetivos medioambientales fijados por la DMA ya que pueden:

- ✓ depender de una Masa de Agua Subterránea,
- ✓ ser o formar parte de una Masa de Agua Superficial, y/o
- ✓ ser o formar parte de una Zona Protegida

Nota: Los cortes y el esquema tridimensional proceden de: IGME y Govern de les Illes Balears (2009). Los caminos del agua en las islas Baleares. Acuíferos y manantiales. En prensa.

Begoña GARCÍA PARDO (EPTISA Servicios de Ingeniería S.L. bgarciapardo@eptisa.com)  
Margarita JUNCOSA DARDER (HIDROMA S.L.)  
Concepción GONZÁLEZ CASANOVAS (Direcció General de Recursos Hídrics, Govern Balear)  
Marta Teresa MAESTRO SALMERÓN (EPTISA Servicios de Ingeniería S.L.)  
Loreto RUIZ HERRERO (EPTISA Servicios de Ingeniería S.L.)  
Apoyo en la realización de figuras: Ana Peñaña Arce (Episa Servicios de Ingeniería, S.L.)

Isla	Humedal	Código humedal	Código MAS	Relación con aguas subterráneas	Masas de agua superficial		Masas de agua más modificadas	Uso recreativo	Nitratos	Aguas residuales	Naturra 2000
					Agua de transición	Lagos					
Mallorca	Albufera de Mallorca	MA-01	18.11, M/18.11-M2	si	Albuferas y lagunas interiores		Salinas				ES0000038
	Ses Fontanelles	MA-06	18.14-M2	si	Praderas litorales						
	Son Bauló	MA-06	18.16-M2	si	Balsas de desembocadura de torrentes						
	Son Real	MA-07	18.16-M2	si	Balsas de desembocadura de torrentes						
	Na Borges	MA-08		si	Balsas de desembocadura de torrentes						ES5310029
	Cala Magraner	MA-13	18.20-M2	si	Balsas de desembocadura de torrentes						ES0000040
	Font de Na Lis	MA-18	18.20-M1	si	Balsas de desembocadura de torrentes						ES0000145
	S'Amador	MA-19		si	Balsas de desembocadura de torrentes						ES0000145
	Estany de ses Gambes	MA-20		si		Lagunas endorreicas					ES0000228
	Estany des Tamarells	MA-21	18.21-M2	si		Lagunas endorreicas					ES0000228
Menorca	Colònia Sant Jordi	MA-22		no			Salinas				ES0000037
	Salobrar de Campos	MA-23		si	Praderas litorales						ES0000037
	Canutells	ME-03	19.01-M1	si	Balsas de desembocadura de torrentes						ES0000237
	Son Bou	ME-05		si	Albuferas y lagunas interiores						ES0000238
	Talaballer	ME-06		si	Balsas de desembocadura de torrentes						ES0000239
	Cala Galdana	ME-07	19.01-M2	si	Balsas de desembocadura de torrentes						ES0000239
	Macarella	ME-08		si	Balsas de desembocadura de torrentes						ES0000240
	Calà en Porter	ME-04	19.01, M/19.01-M2	si	Balsas de desembocadura de torrentes						ES0000237
	Son Saura	ME-09	19.01-M3	si	Albuferas y lagunas interiores						ES0000240
	Salinas d'Eivissa	EI-01	20.06-M2	si	Praderas litorales		Salinas				ES0000084
Eivissa	Feixes de Talamanca	EI-02	20.03, M2/20.06-M2	si	Praderas litorales						
	Estany Pudent	FO-01		no	Albuferas y lagunas interiores		Salinas				ES0000084
	Estany des Peix	FO-02	21.01-M3	no	Albuferas y lagunas interiores		Salinas				ES0000084
Formentera	Salinas de Formentera	FO-03		no	Praderas litorales		Salinas				ES0000084

## **CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA HIDROGEOLÓGICO COMPLEJO MEDIANTE MÚLTIPLES TÉCNICAS: LAGUNA DE FUENTE DE PIEDRA (MÁLAGA, SUR DE ESPAÑA)**

**Javier HEREDIA\*, José M<sup>a</sup> RUIZ\* y Alfredo GARCÍA DE DOMINGO\***

(\*) Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid.  
j.heredia@igme.es ; jm.ruiz@igme.es ; a.garcia@igme.es

### **RESUMEN**

La Laguna de Fuente de Piedra (Málaga, sur de España) -declarada Reserva Natural- fue uno de los tres primeros humedales españoles incluidos en el Convenio de Ramsar y es el segundo lugar en importancia de anidamiento de flamencos del Mediterráneo occidental. El sistema hidrogeológico de la Laguna de Fuente de Piedra se caracteriza por su gran complejidad debido al fuerte contraste entre las densidades del agua dulce de los niveles más superficiales del acuífero asociado, el agua salobre y las salmueras, tanto profundas como subsuperficiales. La salmuera alcanza valores de salinidad de un orden de magnitud superior al agua del mar. El sistema hidrogeológico descarga en la laguna, al igual que el sistema hídrico superficial, conformando una cuenca endorreica. Una gestión hídrica sostenible es fundamental en la estrategia conservacionista de esta Reserva Natural. Ello requiere un modelo conceptual consistente, cuya definición se debe basar en una caracterización rigurosa del sistema hidrogeológico de la laguna. La complejidad del medio hidrogeológico ha obligado a realizar su caracterización mediante la aplicación de múltiples técnicas: hidrogeológicas, hidroquímicas, isotópicas, geofísicas, numéricas e hidrodinámicas. Por tratarse este sistema de un ambiente extremo, en general, la implementación, ejecución e interpretación rigurosa y coherente de estas técnicas entrañó notables dificultades. El objetivo de definir una conceptualización consistente del sistema ha condicionado que los trabajos de caracterización tengan un marco regional, trascendiendo al ámbito estricto de la cuenca de la laguna. En el trabajo aquí presentado se exponen los aspectos más relevantes en relación con la aplicación de algunas de las técnicas utilizadas: ensayos de flujo con trazadores radioactivos; identificación de origen de salmueras mediante isótopos ambientales; uso complementario de la tomografía eléctrica y los SEDT en la identificación espacial de la salmuera y la litología; restitución de paleorelieves mediante modelado geostadico.





# CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA HIDROGEOLÓGICO COMPLEJO MEDIANTE MÚLTIPLES TÉCNICAS: LAGUNA DE FUENTE DE PIEDRA (MÁLAGA)

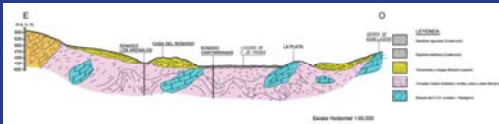
## Introducción



- La laguna de Fuente de Piedra posee una cuenca endorreica, se sitúa en la divisoria atlántico-mediterráneo (norte de Málaga).
- La superficie de la laguna es de 13.5 km<sup>2</sup> y la de la cuenca de 150 km<sup>2</sup>.
- P<sub>Media anual</sub>: 467 mm/a, ETP<sub>Media anual</sub>: 830 mm/a.
- Régimen hídrico estacional y aguas hipersalinas, de facies cloruradas sódicas, con salmueras que casi alcanzan la saturación en halita (360 g/L).
- Es uno de los más importantes ecosistemas del Mediterráneo por la nidificación del flamenco rosa (*Phoenicopterus ruber roseus*).
- Este humedal se incluyó en el convenio de Ramsar en 1983 y se declaró Reserva Natural en 1989.



## Caracterización Geológica e Hidrogeológica



**Localización:** en las Zonas Externas de la Cordillera Bética, en el Complejo Caótico Subbético (CCS).

**Génesis:** procesos de karstificación, subsidencia y disolución, que afectaron a materiales yesíferos-salinos.

**Sistemas acuíferos:**

- **Acuífero superior:** Mio-cuaternario, detrítico libre, su espesor definido por el paleorelieve pre-mioceno.

- **Acuífero inferior:** sobre el CCS, dos sistemas de flujo:

- **Superior:** sobre arcillas, yesos y bloques calcáreos, baja permeabilidad.
- **Inferior:** sobre yesos, sales y bloques calcáreos, alta permeabilidad, kárstico en carga (flujo regional).

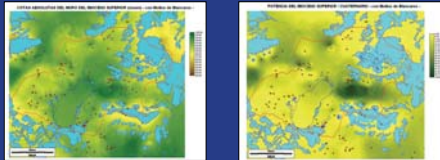
**Principal rasgo del sistema hidrogeológico:** existencia de salmueras, algunas de las cuales casi alcanzan valores de la saturación en halita (360 g/L).

**Modelo genético-evolutivo de las salmueras:** procesos de evaporación y concentración en el ámbito de la laguna; evolución hidrogeoquímica por largos tiempos de tránsito a través de la matriz margo-yesífera y disolución de materiales evaporíticos del CCS.

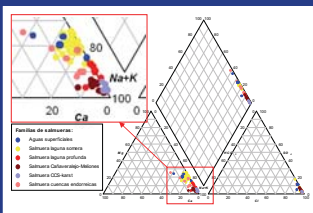


## Técnicas de Interpolación (soporte SIG) Kriging, Media móvil

Identificación el muro del acuífero Mio-cuaternario, depocentros y divisoria de aguas.



## Caracterización Hidroquímica e Isotópica



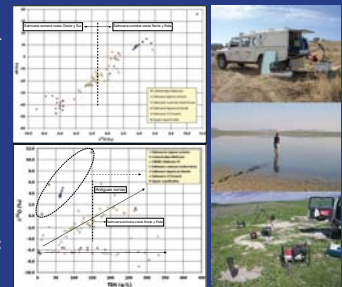
- Muestreo y análisis de aguas: iones mayoritarios e isótopos (<sup>18</sup>O, D, T, <sup>14</sup>C, <sup>36</sup>Sr, <sup>34</sup>S).
- Monitorización de la evolución espacio-temporal de la salinidad del agua: perfiles de CE.

**Resultados:**

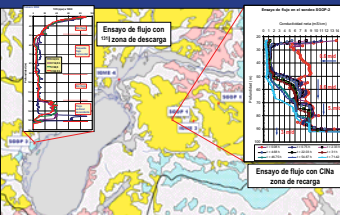
- Familias de aguas acorde al ambiente hidrogeológico respectivo.

- Se discriminan las salmueras, por su génesis y evolución:

- Salmueras afectadas por procesos de evaporación y concentración: cloruradas sódicas con un contenido significativo de ión magnesio.
- Salmueras resultantes de la disolución de las rocas evaporíticas existentes: exclusivamente cloruradas sódicas.



## Caracterización Hidrodinámica y Piezométrica



**Ensayos de Flujo en pozo único:**

- Por dilución: trazadores artificiales (sal y/o <sup>131</sup>I)
- Se identifican: flujos en zonas de recarga y descarga.

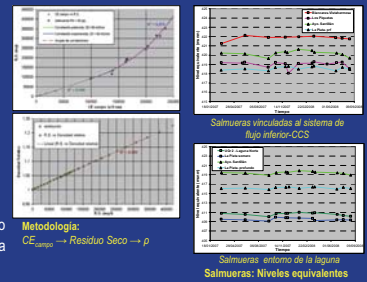
**Estudio piezométrico:**

- Acuífero Mio-cuaternario:

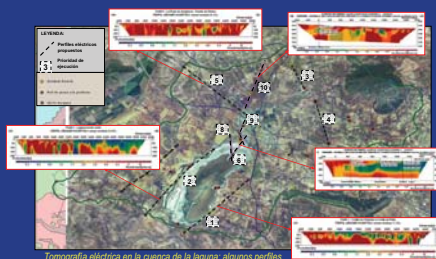
- Niveles piezométricos, *h*: control mensual de la red de observación
- Patrón de flujo: descarga a la laguna.

- Salmueras:

- Niveles piezométricos equivalentes, *h<sub>eq</sub>*: 1, medición de niveles, *h*, y perfiles de CE mensuales en red sistemática en salmueras; 2, restitución de la densidad relativa, *ρ*, a partir de la *CE<sub>campo</sub>*; 3, cálculo de *h<sub>eq</sub>* = *ρ* · *h*.
- Patrón de flujo: 1, regional, en salmueras vinculadas al sistema kárstico del CCS, suave gradiente decreciente (0.3 - 0.5 ‰) hacia el Sur -cuenca mediterránea-; 2, local, en el entorno de la laguna, gradiente ascendente.



## Estudios Geofísicos



- Técnicas aplicadas: tomografía eléctrica, sondeos electromagnéticos en el dominio de tiempo (SEDT), reinterpretación de SEV's (campana 1983).

- Información de apoyo: sondeos con columna litológicas y/o perfiles de CE.

- Resultados:

- Caracterización hidrogeológica: 1, nivel altamente conductor bajo la laguna y su entorno; 2, nivel conductor bajo el vaso de la laguna es de mayor entidad y profundidad; 3, nivel resistivo (en término relativo) bajo las salmueras; 4, embolsamientos de salmueras en la cuenca distantes de la laguna (> 4 km).

- Metodológicos: 1, Tomografía eléctrica y SEDT adecuados para identificar la existencia de salmueras; 2, no parecen idóneos para diferenciar litologías; 3, buena correlación entre: SEV's, registros de conductividad eléctrica (CE) en sondeos, perfiles tomográficos y SEDT's.



## Conclusiones

1, El sistema hidrogeológico está conformado por tres sistemas de flujo estratificados según su densidad, el TSD varía desde los 319 mg/L, en las calizas de las sierras -acuífero superior-, hasta los 335 g/L, en cuerpos de salmuera del sistema kárstico del CCS -acuífero inferior-; 2, Existen 2 tipos de salmueras: a, una es producto de la circulación a través de los materiales evaporíticos karstificados del CCS, se observa en dos ámbitos: a unos 50 m bajo la laguna y en cuerpos de salmueras, diseminados por la cuenca y b, otra es resultado de procesos de concentración evaporativa, se emplaza bajo la laguna y su entorno, a pocos metros de profundidad.

## AGRADECIMIENTOS

A Manuel Rendón, Director Conservador de la RN de la Laguna de Fuente de Piedra, y a todo su personal por su apoyo generoso; a Antonio Martínez y Fernando Ruiz de los Ríos por su colaboración en el trabajo de campo y a Luis Araguás compañero que supo orientar en los primeros años de trabajo y amigo .

## **HYDRODYNAMICS AND HYDROCHEMISTRY OF THE SALBURUA WETLAND (ALAVA, BASQUE COUNTRY)**

**Miryam MARTÍNEZ LÓPEZ DE SABANDO\*, Miren MARTÍNEZ SANTOS\*, Jesús  
Ángel URIARTE\* e Iñaki ANTIGÜEDAD AUZMENDI\***

(\*) Universidad del País Vasco. Departamento de Geodinámica. Grupo de Hidrogeología.  
Campus UPV-EHU. Sarriena Auzoa, Z/G. 48940 Leioa (Bizkaia).  
miryameguiluz@gmail.com

### **RESUMEN**

El humedal de Salburua se encuentra localizado en el sector oriental del acuífero cuaternario de Vitoria-Gasteiz y está constituido por dos lagunas (Betoño y Arkaute) y su entorno ribereño. El humedal ha sido recuperado recientemente de un periodo de desecación para su uso agrícola, perdiendo así su potencial valor ecológico como humedal natural.

El humedal presenta una capacidad característica depuradora de las aguas que circulan a través de él, disminuyendo e incluso eliminando la carga de nitratos en las aguas subterráneas a su paso por el humedal. Desde el año 2007 en una parte del humedal (balsa de Arkaute y su zona ripariana) se ha instalado una red específica de control piezométrico y de calidad de las aguas subterráneas. Hoy en día se sigue mejorando esta red de control con objeto de estudiar y comprender la hidrodinámica y la hidroquímica sujeta al humedal de Salburua y cómo afectan los procesos bio-geo-químicos a la calidad de las aguas subterráneas que circulan a través de él.

La red de flujos subterráneos nos indica que existen variaciones hidroquímicas de las aguas tras el paso por el humedal, debido a procesos bio-geo-químicos, condicionados a su vez por la hidrodinámica de la zona. La configuración del relieve margoso y las diferentes potencias de los materiales cuaternarios a lo largo del humedal también juegan un papel importante en la red de flujos subterráneos.



# HYDRODYNAMICS AND HYDROCHEMISTRY OF THE SALBURUA WETLAND (Alava, Basque Country)

Miryam M. L. de Sabando, Miren Martínez, Jesus Angel Uriarte, Iñaki Antigüedad.

Hydrogeology Group, University of the Basque Country, 48940 Leioa, Basque Country (Spain).

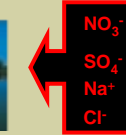
## PROBLEMATIC OF THE SITE

Nitrates used in agriculture are the main cause of general pollution in vulnerable zones. Wetlands play an important role as nitrates reducers. The Salburua wetland is located within a vulnerable zone (quaternary aquifer characterized by low permeability materials). The restoration of the wetland, drained some decades ago, attests to the attenuation of nitrates in groundwater coming from farmlands, exceeding 50 mg/L NO<sub>3</sub>. The main goal of this study is to shed some light on the relationship between hydrochemistry and hydrodynamics related to anthropogenic pollution.

DIRECTIVE 91/676 (1991)  
European Union

- Reduce pollution.
- Need to declare "Vulnerable Zones."
- Codes of good agricultural practices.
- Groundwater affected: threshold 50 mg/L NO<sub>3</sub>.

Salburua wetland is part of the Ramsar Convention (1971) "For the conservation and wise use of the Wetlands of International importance and their resources".



The Basque Country Government declared the Salburua Wetland (object of this study) as a vulnerable zone. This wetland is characterized by its attenuation capacity leading to reduction and even elimination the nitrates contained in groundwater passing through.

## SITE DESCRIPTION & METHODOLOGY:



Fig. 1. Location of the study area and the piezometric network installed in the Salburua wetland environment. The piezometric network includes deep, shallow piezometers and several points measurements.

Salburua wetland is located in the Eastern Sector of the Quaternary aquifer of Vitoria-Gasteiz. It consists of two ponds (Betoño and Arkaute) and the riparian environment. After its use as an agricultural area it was recovered in 1998 after a period of drying, losing its ecological potential value. This study is focused on the Arkaute pond (28 ha) and surroundings.

Currently there is a piezometric network consisting on 22 piezometers (which have been leveled, due to the flatness of the riparian zone) and several control points in the ditches and streams around the pond (Fig. 1). This network is sampled monthly. The piezometers are 2-4 m deep (depth at the level of the contact between the quaternary material (alluvial deposits, mainly clayey, though sandy and silty deposits also occur) and underlying marls (of very low permeability); the other three piezometers are 14 m deep, making it possible to sample water from the marls underneath.

One of the aims of the case under study is to determine the morphology of the quaternary-marl contact in order to understand the dynamics of groundwater flow in the wetland, due to its large influence on the hydrodynamics (Fig. 2).

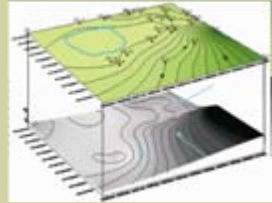


Fig. 2. Geographical representation of the reliefs of the marls substrate and the topography of the study area.

Since the hydrochemistry of the shortest piezometers (where the marls are closer to the surface and therefore the thickness of the quaternary deposits is lower) is different from that of the other short piezometers it is important to characterize the morphology of the marls relief. The flow direction (from agricultural areas towards the wetland) is SSE-NNW. It is also likely to occur vertical flows from the marls towards the quaternary materials, determining the hydrochemistry of the water flowing through the wetland.

## HYDRODYNAMIC RESULTS

There are two principal flow directions in the wetland: SSE-NNW and E-W converging in the wet zone. It was thought that the flows converge in the Arkaute pond, but nowadays this theory is discarded, since the pond does not correspond to the exit of the groundwater flows.

On the one hand during the wet season the principal groundwater flow direction is directed towards the pond and all the levels show higher levels than that at the pond. The Errekabarri stream provides water to the eastern sector within the riparian zone (SM-2, SM-8 and SM-5). The level of the pond represents the lowest position (Fig. 3).

On the other hand, during the dry season the pond shows higher levels than the others, except for the SM-9, SM-10 and SM-12, showing always the highest levels in the study area. The flow in these piezometers is always south-north towards the pond. The pond also drains groundwater into the Errekabarri stream, as it is the case for the rest of the riparian zone. However, the flow in the riparian zone and wetland area is usually to the north. That is why it is proposed a connection between the pond and the riparian zone with the Errekabarri stream or with the Alegria river by means of underground flow (located further to the north).

In the wetland the piezometric response to precipitation depends on the area. This is due to the different vertical permeability of the quaternary deposits infiltration of the rain water into the land, for sand levels allow better percolation than clay materials. Horizontal flows through the quaternary materials (which conforms the flows along the quaternary low permeability aquifer) and through the marls (also low permeability due to the fractures) also occur. They show a vertical component. (Fig. 4).

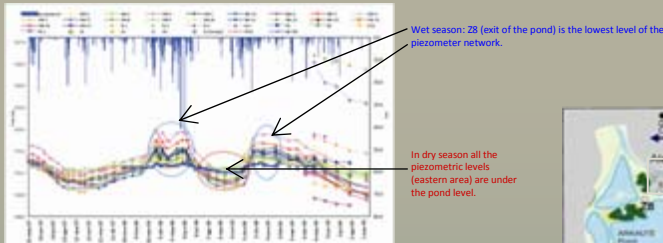


Fig. 3: Temporal and spatial levels evolution of piezometric network in Salburua wetland and its immediate environment.

Whit the firsts rainfall, the piezometers that have faster response are SM-1, SM-2, SM-5 which are located nearest of stream (input groundwater), this may be due to an input from the stream water into the eastern of riparian zone. Piezometers that have a slower response are: SM-3, SM-4, SM-7.

## Conceptual model of groundwater flow in Salburua Wetland and the riparian zone.

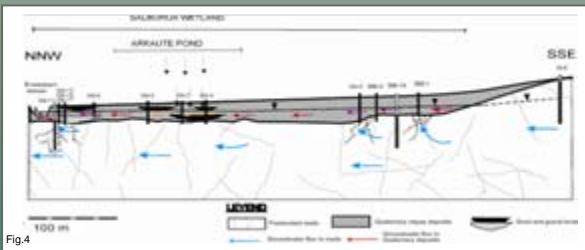


Fig. 4

## HYDROCHEMISTRY RESULTS

Salburua wetland is located in a farm environment. Therefore the complexity and variability (spatial and temporal) of biogeochemical processes are crucial when it comes to understanding its hydrochemistry. Depending on the season and the depth at which the marl substrate is located (with possible vertical groundwater inputs) there is a clear groundwater zonation (Fig. 5), apart from the attenuation of nitrate from agricultural fields.

Wetlands have very specific features such as high concentration of organic matter in the sediments, slow flows conditioned by topography, existence of low permeability shallow levels, carbon availability.

There are several areas which present maximum concentrations (all the year) and other areas where further dilution occurs by rainwater infiltration (sandy or silty materials).

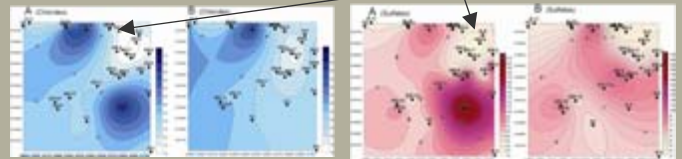


Fig. 5: Map concentrations of chloride and sulfate in high water level (A) and low water level (B). This is an example of the difference of the hydrochemistry in a small wetland due to the variability of the substrate and biogeochemical conditions.

There are specific zones where the hydrochemistry of the piezometers (shallow piezometers) consists of a mixture of groundwater coming from the marl and groundwater circulating into the quaternary level (SM-3, SM-6, SM-16, AM-17, N-3...). This kind of water is chemically different from the rest of the groundwater circulating through the quaternary. These mixture areas exceed the average levels of chlorides, sulfates and sodium, more characteristic of water circulating through the marls.

Marl substrate show an "impermeable" basement, with the quaternary aquifer located above. Although it was considered as an impermeable substrate it, it can also show a transmissive behaviour due to the rate of fracturing. The existence of highly fractured areas allows more water circulation through them.

There are different groups of groundwater in terms of their hydrochemistry (Fig. 5 & 6):

- 1: water from the quaternary, with low chloride (10-40 mg/L), sulphate (10-60 mg/L) and sodium (10-30 mg/L) alkalinity (100-300 mg/L) concentration. High calcium and nitrates concentration around 50-100 mg/L, 10-40 mg/L respectively. Hydrochemistry typical of wetland soils.
- 2: marls groundwater from deep piezometers (10 m), presenting high sulphate (>100 mg/L), chloride (>50 mg/L), sodium (200-500 mg/L) HCO<sub>3</sub> (>500 mg/L) contents (50-100 mg/L) but low concentrations of calcium and nitrates.
- 3: mixture of the types listed above. Vertical flows circulating through the fractures developed in the marls that reach the quaternary aquifer and causes a mixture of water.

\* The high concentration of sodium and chlorides in groundwater of marls (>3-4 m deep) is also influenced by water coming from sulphurous springs (600 mg Na<sup>+</sup>/L, 306 mg Cl<sup>-</sup>/L) located upstream of the wetland. Groundwater is transported through deep fracturation zones in the marls reaching specific points in the quaternary materials of the Salburua wetland.

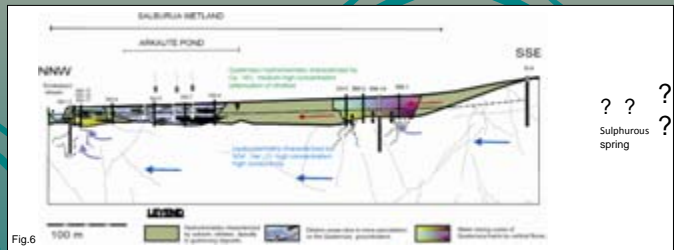


Fig. 6

## Conclusions:

- The flow pattern of the semiconfined aquifer presents complex hydrodynamics affected by the quaternary materials, the marl substrate and the role of the fractures.
- Extensive piezometric network permits to know the general flow diagram of the wetland. The groundwater circulating along the wetland doesn't discharge into the Arkaute pond, the output is the Errekabarri stream. Hydrochemistry has helped us (anomalous) of sodium and chloride in deep water is due to the contributions of groundwater from the sulphurous springs.
- Both natural and anthropogenic contaminants have been detected although further study of Sulphur and Oxygen Isotopes are required to determine the sources of the high sulfate concentrations in groundwater flowing through the wetland and

Acknowledgments  
Thanks to: Ministerio de Ciencia e Innovación (CGL2006-06485/HID), Gobierno Vasco (Grupo Consolidado IT-392), Universidad del País Vasco - Euskal Herriko Unibertsitatea, and Centro de Estudios Ambientales (CEA) del Ayuntamiento de Vitoria-G



## **CONTEXTO HIDROLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO DE LA LAGUNA DE LOS PRADOS (MÁLAGA)**

**Matías MUDARRA MARTÍNEZ\*, Bartolomé ANDREO NAVARRO\* y Manuel RENDÓN MARTOS\*\***

(\*) Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (GHUMA). mmudarra@uma.es

(\*\*) Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía

### **RESUMEN**

Dentro del programa de Rehabilitación de Espacios Naturales Degradados puesto en marcha por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía existe el objetivo de restaurar todos aquellos humedales que se han visto degradados por causa de la actividad humana. Este es el caso de la Laguna de Los Prados que se encuentra situada al oeste de la ciudad de Málaga, en la margen izquierda del curso bajo del río Guadalhorce, muy próxima a su desembocadura. Este humedal está incluido en el Proyecto “Contexto hidrogeológico de los humedales andaluces” que se enmarca dentro de los objetivos del Programa Andaluz de Gestión de Humedales, mediante el cual se intenta obtener el conocimiento suficiente para la gestión de las diferentes lagunas que existen en la geografía andaluza.

Desde el punto de vista hidrológico, la laguna tiene una superficie aproximada de 16,4 ha y no es permanente en el tiempo. Sólo presenta agua en situaciones climáticas húmedas. La red de drenaje en el entorno del humedal está muy poco desarrollada, debido, en parte, a la escasa pendiente y a las modificaciones antrópicas de la zona. Únicamente, en los terrenos del norte del humedal, existe cierto grado de desarrollo de la red de drenaje, pero muy alterada por la actividad humana.

La Laguna de Los Prados se ha desarrollado sobre materiales detríticos de edad Plioceno y Cuaternario. Los sedimentos pliocenos afloran principalmente en el vaso y en la parte septentrional de la laguna. Se trata de margas, y localmente sedimentos arenosos de grano muy fino con intercalaciones de niveles detríticos (gravas y arenas). Los sedimentos cuaternarios aparecen principalmente al sur de la laguna. Son gravas, arenas y limos de origen aluvial, depositados durante los diferentes episodios de inundación del río Guadalhorce. A techo de estos últimos sedimentos se han observado arcillas oscuras con marcas de raíces, indicativas de que parte de esta zona ha sido un lugar encharcadizo o palustre en tiempos históricos.

El funcionamiento hidrogeológico de la Laguna de Los Prados está condicionado por su conexión hidráulica con los materiales del plioceno, y también con el acuífero aluvial cuaternario. Recibe aportación del primero y descarga hacia el segundo. Este funcionamiento presenta dos situaciones hídricas extremas: una para aguas bajas, en la que la laguna está seca, y otra para aguas altas, en la que sí existe agua en ella.





# Contexto hidrológico e hidrogeológico de la Laguna de Los Prados (Málaga)



Matías Mudarra Martínez<sup>(1)</sup>, Bartolomé Andreo Navarro<sup>(1)</sup> y Manuel Rendón Martos<sup>(2)</sup>  
 (1) Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (GHUMA)  
 (2) Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía



## 1. INTRODUCCIÓN

Dentro del Programa Andaluz de Humedales de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía se están llevando a cabo investigaciones para la contextualización hidrológica e hidrogeológica de las zonas húmedas. Estos estudios tienen como objetivo mejorar la gestión y, en algunos casos, plantear la rehabilitación/restauración hidrológica de dichas zonas. Recientemente se ha realizado un estudio de la Laguna de Los Prados, al oeste de la ciudad de Málaga, con objeto de caracterizar su funcionamiento hidrológico e hidrogeológico para una eventual rehabilitación.



Figura 1. Imagen satélite del área occidental de la ciudad de Málaga y del Bajo Guadalhorce en la que se puede apreciar la Laguna de Los Prados y su entorno. Imágenes tomadas de Google Earth.

La Laguna de los Prados está situada en la margen izquierda del curso bajo del Río Guadalhorce (Fig. 1), muy próxima a su desembocadura. El humedal propiamente dicho tiene una superficie de 16,4 ha, con una longitud de 810 m en la dirección ESE-ONO y anchura de 400 m, en la dirección NNE-SSO. El vaso está situado a una cota de 9 m s.n.m.



Foto 1: Panorámica general de la Laguna de Los Prados y área adyacente.  
 Foto 2: Vista hacia el noroeste de la laguna (febrero 2009).

La climatología del área en la que se encuentra el humedal es de tipo mediterráneo, caracterizado por una estación seca y calurosa (de mayo a septiembre) y un periodo de temperaturas más bajas (de octubre a abril), durante el cual se registran las precipitaciones. La precipitación media anual es de 538 mm y la temperatura media anual es 18.1 °C.

## 2. HIDROLOGÍA

La Laguna de Los Prados no es permanente en el tiempo (Fig. 2). Sólo presenta agua en situaciones climáticas húmedas. Su cuenca vertiente natural tiene una superficie aproximada de 76,4 ha y la red de drenaje está muy poco desarrollada, debido, en parte, a la escasa pendiente y a las modificaciones antrópicas de la zona (vías de comunicaciones, canalizaciones, urbanizaciones, polígonos industriales). Únicamente, en los terrenos pliocenos y cuaternarios del norte del humedal, existe cierto grado de desarrollo de la red de drenaje.

## 3. HIDROGEOLOGÍA

Los materiales presentes en el entorno de la laguna están incluidos en la masa de agua subterránea del Bajo Guadalhorce. En esta masa de agua existen varias formaciones acuíferas, de las cuales, sólo el acuífero cuaternario aluvial está presente en el entorno del humedal (Fig. 2). No obstante, en la parte alta de la serie de los sedimentos pliocenos hay tramos de arenas finas que constituyen acuíferos pobres (acuitardos). El nivel piezométrico en estos sedimentos, en las proximidades de la laguna, está a poca profundidad. El drenaje del agua existente en los niveles de arenas finas pliocenas se puede observar en los rezumes que hay en el talud de las líneas férreas ubicadas al norte del humedal.

El acuífero aluvial cuaternario tiene muy poco espesor en los alrededores de la laguna. Los rellenos antrópicos que la rodean están sobre los materiales aluviales en el borde sur de la laguna, lo que permite que ambas litologías permanezcan conectadas hidrogeológicamente, sobre todo en condiciones de aguas altas. También existe conexión hidrogeológica entre los materiales cuaternarios y los del plioceno.

## 4. FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO

El funcionamiento hidrogeológico de la Laguna de Los Prados está condicionado por su conexión hidráulica con los materiales del plioceno y con el acuífero aluvial

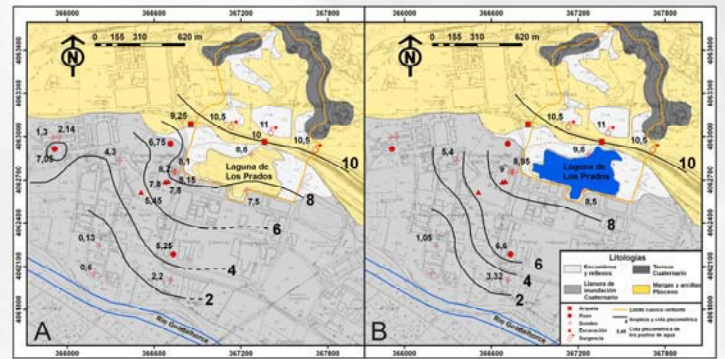


Figura 2. Mapas piezométricos orientativos del entorno de la Laguna de Los Prados para las situaciones de aguas bajas (A) y aguas altas (B)

cuaternario (Fig 2 y 3). Recibe aportación del primero y descarga hacia el segundo. Este funcionamiento presenta dos situaciones hídricas extremas: una para aguas bajas, en la que la laguna está seca, y otra para aguas altas, en la que sí existe agua en ella. En el acuífero aluvial cuaternario, en situación de aguas altas, también se produce una subida del nivel piezométrico: entre 1,3 m, en el entorno de la laguna, y 1 m, aproximadamente, en las inmediaciones del Río Guadalhorce. Como consecuencia del ascenso del nivel freático en el acuífero cuaternario, se dificulta el drenaje subterráneo de los materiales pliocenos hacia él, lo cual contribuye al mantenimiento de la lámina de agua en la laguna.

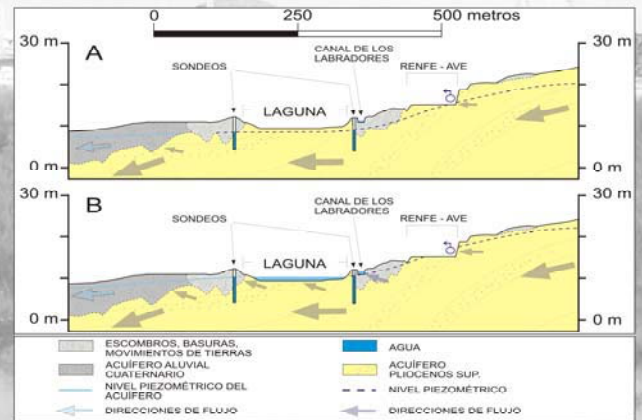


Figura 3. Esquema de funcionamiento hídrico de la Laguna de Los Prados y su entorno, en situación de aguas bajas (A) y de aguas altas (B).

Las entradas de agua a la laguna (Fig. 4) proceden de la escorrentía superficial (Es), actualmente muy mermada por las actuaciones antrópicas, y de la aportación subterránea de los materiales pliocenos (A). Las salidas (Fig. 4) se producen por la evaporación directa (E), aunque las extracciones de agua, mediante bombeos, también pueden afectar a la laguna. No es posible cuantificar las diferentes componentes del balance hidrológico de la laguna.

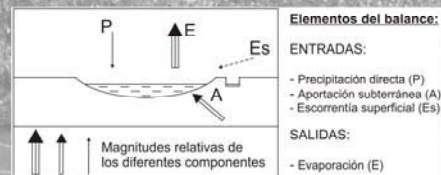


Figura 4. Esquema del balance hídrico de la Laguna de Los Prados.

## 5. CONCLUSIONES

El estudio hidrogeológico realizado en el entorno de la Laguna de Los Prados pone de manifiesto que este humedal guarda una estrecha relación hidrogeológica con los materiales pliocenos sobre los que se ubica. Estos sedimentos constituyen un acuífero pobre (acuitardo) que está en conexión hidrogeológica con el acuífero cuaternario aluvial del Guadalhorce. Por otra parte, en condiciones naturales, a la laguna llegaba agua de escorrentía superficial procedente de la cuenca vertiente. Este comportamiento ha sido modificado por la actividad antrópica, principalmente en las últimas décadas.

Los impactos y peligros que afectan al régimen hídrico de la Laguna de Los Prados hacen que, actualmente, ésta se encuentre sometida a una importante degradación hídrica. Tal es así, que es muy difícil plantear una restauración de las condiciones naturales originales de funcionamiento hídrico. Incluso, una rehabilitación o una recreación hídrica resultarían complicadas de llevar a cabo y difíciles de mantener.



## ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE LAS LAGUNAS DE ESTAÑA Y EL ACUÍFERO DE ESTOPIÑÁN (HUESCA, ESPAÑA)

C. PÉREZ BIELSA\* y L.J. LAMBÁN JIMÉNEZ\*

(\*) Instituto Geológico y Minero de España. Oficina de Proyectos de Zaragoza. Manuel Lasala 44, 9ºB. 50006 Zaragoza. c.perez@igme.es

### RESUMEN

La zona de estudio se sitúa en las Sierras Marginales Pirenaicas, donde destacan el Sinclinal de Estopiñán, compuesto por dos niveles permeables: Cretácico Superior y Eoceno, y las lagunas endorreicas kársticas de Estaña. Con objeto de determinar el funcionamiento hidrológico e hidrogeológico del sistema, se realizó una primera caracterización hidrogeoquímica e isotópica ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$  y  $^3\text{H}$ ) de las aguas subterráneas, lagunas y precipitación, a partir de los datos obtenidos en 2007, diferenciando los principales tipos de agua subterránea y deduciendo cualitativamente los procesos hidroquímicos dominantes. Los datos obtenidos en las campañas complementarias realizadas entre marzo y septiembre de 2008, han permitido corroborar dichos grupos, y se ha observado en general una relativa estabilidad química temporal. Por otro lado, la interpretación de los perfiles multiparamétricos realizados ha permitido confirmar el carácter monomítico del Estanque Grande, con una estratificación del agua entre los meses de marzo a octubre y una termoclina entorno a los 6 m de profundidad. Además, se está realizando un estudio cartográfico, apoyado por campañas de geofísica, que están permitiendo tener una idea aproximada de la continuidad en profundidad de los materiales cartografiados, así como un estudio piezométrico, complementado con la perforación de varios sondeos en las proximidades de las Lagunas. Ello permitirá obtener información de las aguas subterráneas existentes en las inmediaciones de las Lagunas. Se presentan además otros estudios que se están realizando, como balances de agua en el suelo y balance en las Lagunas, así como los próximos estudios a realizar en la zona ripariana.

**Palabras clave:** *acuífero carbonatado, hidrogeología, medio kárstico, Lagunas de Estaña, Sinclinal de Estopiñán*







## EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA HUMANA EN LA DISTRIBUCIÓN DE RADIONÚCLIDOS EN LAS AGUAS DE LA MARJAL DE PEÑÍSCOLA

V. RODELLAS\*, J. GARCIA-ORELLANA\*, E. GARCIA-SOLSONA\*, P. MASQUÉ\*,  
J.A. DOMÍNGUEZ\*\*, B. BALLESTEROS\*\* y M. MEJÍAS\*\*

(\*) Institut de Ciència i Tecnologia Ambientals. Departament de Física. Universitat Autònoma de Barcelona. Facultat de Ciències. Campus UAB. 08193 Cerdanyola del Vallès

(\*\*) Instituto Geológico y Minero de España. Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid

### RESUMEN

La Marjal de Peñíscola (Castellón) es un humedal litoral que presenta una casi total dependencia de las aguas subterráneas, con aportaciones provenientes del acuífero profundo del Maestrazgo y del acuífero superficial de la Plana de Vinaroz-Peñíscola. Esta zona húmeda, drenada hacia el mar a través de tres canales principales, está sujeta a una fuerte presión urbanística con propósitos principalmente turísticos. Así, la desviación del canal principal para la construcción de un camping, la creación de nuevos “ullals” y los bombeos realizados durante la construcción de nuevos edificios, son ejemplos de influencias antrópicas en la marjal que han alterado su funcionamiento hidrológico natural. En este estudio se evalúa la influencia de las actividades humanas en la distribución de radionúclidos naturales en el agua y sedimentos de la Marjal de Peñíscola. Las altas concentraciones de los isótopos de Ra medidas en las aguas de la marjal (hasta  $3 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$  de  $^{226}\text{Ra}$ ) y su relación con la salinidad sugieren que el enriquecimiento de Ra está regulado por la dinámica de la intrusión marina, influenciadas a su vez por las actividades antrópicas en la zona. Por otro lado, las elevadas actividades de Rn en agua (entre  $1\text{-}600 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$ ), que pueden crear un problema de protección radiológica ambiental, se atribuyen a la desviación del canal principal, que favorece la circulación de las aguas del humedal por áreas cuyos sedimentos presentan las concentraciones más elevadas de  $^{226}\text{Ra}$  (hasta  $700 \text{ kBq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ).





# EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA HUMANA EN LA DISTRIBUCIÓN DE RADIONÚCLIDOS EN LAS AGUAS DE LA MARJAL DE PEÑÍSCOLA

V.RODELLAS<sup>1</sup>, J.GARCIA-ORELLANA<sup>1</sup>, E. GARCIA-SOLSONA<sup>1</sup>, P.MASQUÉ<sup>1</sup>, J.A.DOMÍNGUEZ<sup>2</sup>, B.BALLESTEROS<sup>2</sup>, M.MEJÍAS<sup>2</sup>

Valenti.Rodellas@uab.cat

1. Institut de Ciència i Tecnologia Ambientals - Departament de Física, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193, Barcelona  
2. Instituto Geológico y Minero de España, 28003, Madrid

EL PAPEL DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL FUNCIONAMIENTO DE LOS HUMEDALES

22-23 Octubre 2009, Pastriz, Zaragoza

## INTRODUCCIÓN

El incremento de la presión antropogénica en las zonas litorales ha derivado en la degradación o desaparición de numerosos humedales. Sin embargo, el número de estudios referentes a los efectos de las alteraciones antrópicas en la geoquímica de los humedales es aún limitado. El objetivo del presente trabajo es evaluar la influencia de las actividades humanas en la distribución de radionúclidos naturales (Ra y <sup>222</sup>Rn) en el agua de la Marjal de Peñíscola.

Los isótopos de Ra (<sup>223</sup>Ra, <sup>224</sup>Ra, <sup>226</sup>Ra y <sup>228</sup>Ra) y <sup>222</sup>Rn se utilizan como trazadores naturales de procesos de mezcla de aguas y de descarga de agua subterránea, debido a su enriquecimiento en aguas subterráneas en comparación con aguas superficiales y su particular comportamiento geoquímico. Además, la acumulación de gas <sup>222</sup>Rn en interiores representa un problema de protección radiológica ambiental.



Fig. 1. La Marjal de Peñíscola (N del litoral de Castellón).

## ÁREA DE ESTUDIO

La Marjal de Peñíscola (Castellón; fig. 1) es un humedal litoral que depende de los aportes de las aguas subterráneas procedentes del acuífero cársico profundo del Maestrazgo y del acuífero detrítico superficial de la Plana de Vinaroz-Peñíscola.

Esta zona húmeda drena al mar a través de tres canales principales y está sujeta a una fuerte presión urbanística que ha alterado su funcionamiento hidrológico natural.

## MUESTREO

Estaciones de muestreo (fig. 2):

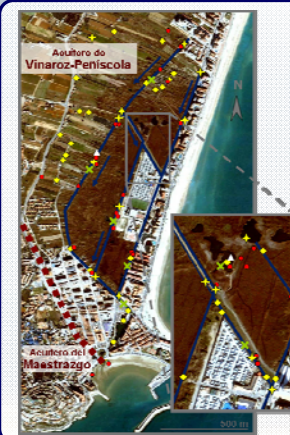
### Muestras de agua

- salinidad y temperatura (#47)
- isótopos de Ra y <sup>222</sup>Rn (#16)

### Muestras de suelos

- <sup>228</sup>Ra, <sup>226</sup>Ra, <sup>238</sup>U, <sup>40</sup>K (#29) y <sup>230</sup>Th, <sup>234</sup>U (#4)

### Experimentos de difusión (#2) y desadsorción (#7)



## ANÁLISIS

### Muestras de agua:

- Filtración a través de fibras-MnO<sub>2</sub> para extraer el Ra [1].

- <sup>223</sup>Ra y <sup>224</sup>Ra: RaDeCC [2]
- <sup>226</sup>Ra y <sup>228</sup>Ra: espectrometría y [3]

- <sup>222</sup>Rn: RAD7 [4]

### Muestras de suelos:

- <sup>228</sup>Ra, <sup>226</sup>Ra, <sup>238</sup>U, <sup>40</sup>K: espectrometría y
- <sup>230</sup>Th, <sup>232</sup>Th, <sup>234</sup>U: espectrometría α

Fig. 2. Localización de los puntos de muestreo. Los acuíferos están delimitados por una línea discontinua.

Muestras salinidad (◇); Muestras Ra y <sup>222</sup>Rn (⊕); Muestras suelos (●); Experimentos difusión (△); Experimentos desadsorción (×)

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Marjal de Peñíscola presenta una progresiva salinización de sus aguas. Al norte de la zona de estudio y en los pozos superficiales las salinidades presentan valores de 1, mientras que en la desembocadura del humedal se registran valores de 6. La distribución de los isótopos de Ra y <sup>222</sup>Rn sigue un patrón similar al de la salinidad (fig. 3).

### Fuentes de Ra

- Desadsorción partículas en suspensión < 3% Ra
- Difusión sedimentos < 20% Ra
- Aportes aguas subterráneas norte < 10% Ra

### Fuentes de <sup>222</sup>Rn

- Desintegración <sup>226</sup>Ra disuelto < 1% <sup>222</sup>Rn
- Difusión sedimentos < 1% <sup>222</sup>Rn
- Aportes aguas subterráneas norte < 2% <sup>222</sup>Rn

La entrada de agua subterránea salobre es la principal fuente de Ra y <sup>222</sup>Rn en la Marjal de Peñíscola.

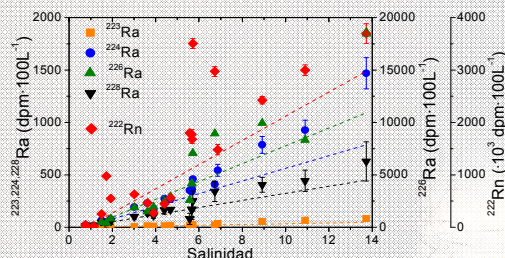


Fig. 3. Actividad de Ra y <sup>222</sup>Rn en función de la salinidad de las muestras de agua.

El cociente de actividades (AR) <sup>228</sup>Ra/<sup>226</sup>Ra disminuye con la salinidad hasta valores entre 0,03 y 0,06 (fig. 4). Estos valores coinciden con los cocientes <sup>228</sup>Ra/<sup>226</sup>Ra mínimos observados en los suelos de la marjal (franja verde en fig. 4). Asimismo, los cocientes obtenidos en las aguas más dulces del humedal (Sal ~ 1) también son similares a los <sup>228</sup>Ra/<sup>226</sup>Ra AR de los suelos colindantes. Estas coincidencias evidencian que el enriquecimiento de Ra de las aguas subterráneas salobres tiene lugar durante su advección a través de los suelos de la marjal.

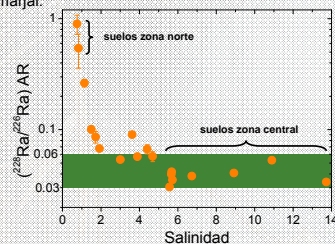


Fig. 4. Cocientes de actividades <sup>228</sup>Ra/<sup>226</sup>Ra en función de la salinidad de la muestra de agua.

Considerando la distribución de <sup>228</sup>Ra y <sup>226</sup>Ra en los suelos, la descarga de agua subterránea salobre principalmente tiene lugar a través de los sedimentos de la zona central de la marjal, cuyas actividades de <sup>226</sup>Ra son más elevadas y con cocientes <sup>228</sup>Ra/<sup>226</sup>Ra entre 0,03 y 0,06 (fig. 5).

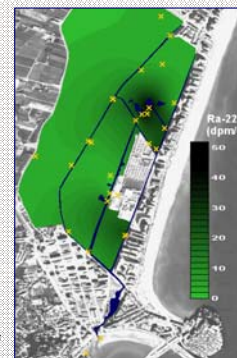


Fig. 5. Distribución de la actividad de <sup>226</sup>Ra en los suelos de la marjal.

### Efectos de las alteraciones antrópicas

Diversas actuaciones antrópicas han alterado el funcionamiento hidrológico de la marjal (fig. 6): la intensa explotación de los recursos hídricos debido a la presión turística, el bombeo de agua por el sector de la construcción y la creación de espejos de agua con finalidades turísticas han favorecido un aumento de la intrusión marina. Además, la desviación del canal principal para la construcción de un camping canaliza la circulación del agua hacia la zona central, donde los sedimentos están más enriquecidos en <sup>226</sup>Ra y tiene lugar la mayor parte de la descarga de agua subterránea salobre, la principal fuente de radionúclidos.

Considerando la correlación positiva entre Ra y <sup>222</sup>Rn y salinidad, estas actuaciones favorecen un enriquecimiento en radionúclidos en el agua de la marjal.

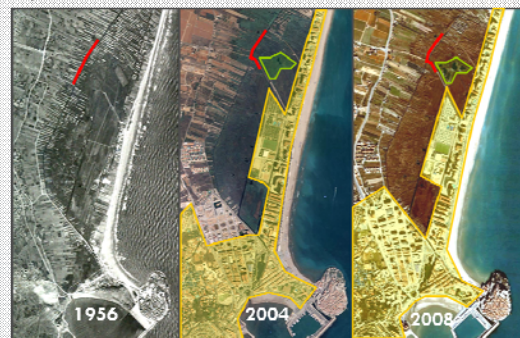


Fig. 6. Evolución de la Marjal de Peñíscola (1956, 2004, 2008).

— Desviación del canal principal hacia la zona central; — Edificios construidos alrededor del humedal; — Espejos de agua construidos con finalidades eco-turísticas.

## CONCLUSIONES

Las elevadas actividades de Ra y <sup>222</sup>Rn observadas en las aguas de la Marjal de Peñíscola están claramente influenciadas por las distintas actuaciones antrópicas en el ámbito de la marjal, principalmente con propósitos turísticos. La altas concentraciones de <sup>222</sup>Rn medidas en las aguas del humedal y en aire interior de algunos locales (hasta 360·10<sup>3</sup> dpm·100L<sup>-1</sup>) constituyen un problema de protección radiológica ambiental.

## REFERENCIAS

[1] Moore, 1976. Deep-Sea Res 23, 647-651; [2] Moore & Arnold, 1996. J Geophys Res 101, 1321-1329; [3] Charette et al., 2001. Limnol Oceanogr 46, 465-470; [4] Burnett & Dulaiova, 2003. J Environ Radioactiv 69 (1-2), 21-35.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los miembros del Laboratorio de Radio (UAB) por la colaboración en el laboratorio y el trabajo de campo parcialmente financiado por el proyecto EDASE (CGL2006-09274/I)





## GRADO DE DEPENDENCIA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS E ÍNDICE DE FUNCIONAMIENTO HIDROLÓGICO EN LOS PRINCIPALES HUMEDALES CONTINENTALES DE LA DEPRESIÓN DEL GUADALQUIVIR

**Miguel RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ\***, **Francisco MORAL\*** y **José BENAVENTE\*\***

(\*) Universidad Pablo de Olavide. Carretera de Utrera, km 1. 41013 Sevilla.  
mrodrod@upo.es ; fmormar@upo.es

(\*\*) Instituto del Agua de la Universidad de Granada. Ramón y Cajal, 4. 18071 Granada.  
jbenaven@ugr.es

### RESUMEN

Se analizan los principales índices morfométricos, hidrogeoquímicos y climáticos en 26 lagunas de la depresión del Guadalquivir relacionadas con los materiales del frente subbético. Se ha comprobado que, en la mayoría de los casos, el ámbito de la cuenca vertiente superficial (CVS) es la unidad hidrológica a partir de la cual estos hidrosistemas reciben la recarga, tanto superficial como subterránea, de forma que son las unidades básicas para planificar su gestión hídrica. De esta manera, los materiales que afloran en las cuencas tendrían un comportamiento de acuitado y los materiales detríticos y, por tanto, porosos, acumulados en el centro de las mismas por la escorrentía generada, almacenarían esa agua, funcionando como un pequeño acuífero de fondo de cubeta. En otros sistemas se han detectado variaciones respecto a este modelo de funcionamiento general, en algunos casos debido a que existen entradas de agua (subterránea o superficial) que proviene de fuera de la cuenca vertiente y en otros porque hay salidas de agua diferentes a la evapotranspiración (bombeos, rebosaderos o drenajes). En cualquier caso, todas las lagunas estudiadas se relacionan con las aguas subterráneas, ya que el acuífero de fondo de cubeta se ha detectado en cada uno de los humedales estudiados. El área media de inundación (AMI) en cada laguna está condicionada por dos factores principales: la extensión de la CVS y la lluvia útil, excedente del balance hídrico del suelo, en cada complejo endorreico. Se constata que las AMIs se ajustan a estos dos factores en las lagunas endorreicas cuyo funcionamiento no está alterado por actividades antrópicas y que se ajustan al modelo conceptual propuesto. Se ha desarrollado un Índice de Funcionamiento Hidrológico (IFH) que relaciona las AMIs con las CVSs y la lluvia útil a partir de balances de agua en el suelo para condiciones climáticas medias. Con este índice se han podido establecer rangos para detectar si un humedal se ajusta o no al modelo conceptual propuesto. La morfología de la cubeta lacustre (profundidad máxima) es el factor fundamental relacionado con el hidroperiodo de las lagunas. Por otra parte, la hidrogeoquímica, que es altamente variable en estos sistemas, también se relaciona con el funcionamiento hidrogeológico de las lagunas y puede utilizarse como una variable más para determinar su funcionamiento hídrico.

Finalmente, se han relacionado todas estas variables mediante análisis cluster y se han establecido agrupaciones que están en función del comportamiento hidrogeológico observado. Las principales modificaciones antrópicas que se han detectado en las lagunas aún poco alteradas, se relacionan con los procesos de colmatación de los vasos lacustres a consecuencia de cambios en los usos del suelo, aunque, en general, la mayoría de los humedales estudiados tienen un estado hidrológico aceptable salvo excepciones. Se ha constatado que son muy sensibles a cualquier modificación de las cubetas o las cuencas como pequeños drenajes, rebosaderos, etc. y a la colmatación de las cubetas.





# Grado de dependencia de las aguas subterráneas e índice de funcionamiento hidrológico en los principales humedales continentales de la Depresión del Guadalquivir

Miguel Rodríguez-Rodríguez<sup>1</sup> • Francisco Moral<sup>1</sup> • José Benavente<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Pablo de Olavide. Carretera de Utrera, km 1, 41013 Sevilla. [mrodod@upo.es](mailto:mrodod@upo.es), [fmormar@upo.es](mailto:fmormar@upo.es)  
<sup>2</sup> Instituto del Agua de la Universidad de Granada. Ramón y Cajal, 4, 18071 Granada. [jbenaven@ugr.es](mailto:jbenaven@ugr.es)

## Objetivos, métodos y modelo propuesto

### Objetivos:

Es el objetivo principal de este estudio comprobar, mediante el análisis de las variables básicas que inciden en su funcionamiento hídrico, el **grado de dependencia** de las aguas subterráneas en humedales relacionados con los materiales subbéticos de la Depresión del Guadalquivir. Para ello, se ha partido de un modelo conceptual de funcionamiento hidrológico y se han analizado conjuntamente las variables climáticas, morfométricas e hidrogeoquímicas que intervienen en este funcionamiento.

### Métodos:

Se ha realizado un análisis climático con objeto de cuantificar los recursos hídricos medios anuales en cada zona. La lluvia útil (L.U.) se ha cuantificado a partir de balances de agua en el suelo en cada uno de los sistemas estudiados. La metodología de detalle para el cálculo de estas variables está disponible en la bibliografía (Moral et al., 2008). Para el análisis hidroquímico se han empleado series temporales en las lagunas estudiadas desde el año 1997 hasta la actualidad. Las áreas medias de inundación (AMIs) y cuencas vertientes (CVS) se han determinado mediante el análisis del Modelo Digital del Terreno de Andalucía (M.M.A., 2005) y posterior revisión in campo. El **Índice de Funcionamiento Hidrológico (IFH)** se ha calculado a partir de las variables morfométricas y climáticas mediante la ecuación  $IFH = (CVS/AMI) \cdot (L.U./1000)$ . Finalmente, la metodología estadística ha consistido en un análisis cluster, mediante el método de agregación de Ward y utilizando la distancia euclídea, de las principales variables morfoclimáticas.

### Origen de las cuencas y modelo conceptual:

El origen de estas cuencas es discutido, si bien los procesos genéticos deben estar relacionados con fenómenos tectónicos y de tipo halocinético (Calaforra y Pulido-Bosch, 1999) en los materiales evaporíticos de origen triásico o con la karstificación de estos materiales, que constituyen el sustrato de las cuencas en la mayor parte de los casos. Las 26 lagunas estudiadas (Fig. 1) se sitúan en relación con los materiales del frente subbético y los materiales del complejo olistostromático de la Depresión del Guadalquivir. La mayoría de las cubetas, endorreicas, se formaron en un medio continental sobre materiales poco permeables (arcillas o margas), siendo rellenadas progresivamente con materiales fluvio-lacustres. Estos materiales tienen una cierta porosidad y constituyen acuíferos de pequeño tamaño denominados "acuífero de fondo de cubeta". Así, el modelo de laguna de campiña empleado en este trabajo y que se puede observar en la figura, se basa en la existencia de estos acuíferos bajo las lagunas (Moral et al., 2008).

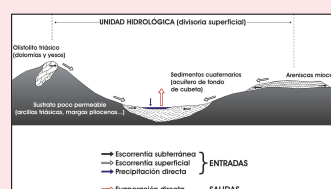
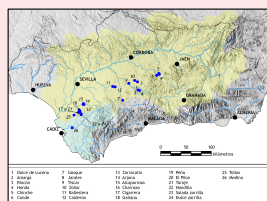


Fig. 1.- Localización de las lagunas estudiadas (izquierda) y modelo conceptual (derecha).

## Parámetros morfoclimáticos y salinidad del agua

NOMBRE	CVS	AMI	CVS/AMI	Lluvia útil (mm)	IFH	Salinidad mediana (g/l)	Prof. Máx.
Balsa	332,4	11,8	28,4	39,9	2,93	0,3	1,10
Amarga	255,4	5,0	50,7	76,8	3,90	4,0	4,30
Bilbao	276,5	9,4	29,5	119,5	2,77	1,2	5,40
Honda	96,2	8,5	11,4	72,0	0,82	21,2	1,50
Chiclana	49,5	3,4	14,5	72,0	1,08	1,0	0,20
Condo	1108,5	61,5	18,0	72,0	1,30	5,7	1,20
Gosque	1196,7	63,3	27,7	114,6	3,17	9,8	3,00
Jarabá	88,5	5,5	16,1	76,8	1,25	7,8	1,80
Túcar	272,3	11,9	22,9	50,5	1,14	16,5	1,12
Zaier	1011,4	45,9	22,0	89,4	3,46	1,6	15,00
Ballestera	145,2	28,4	5,7	54,0	0,31	18,0	0,50
Calderón	95,1	5,9	16,1	54,0	0,74	29,1	2,90
Zarcadón	324,1	62,5	5,2	90,0	0,47	37,5	0,70
Aljara	148	9,9	14,8	90,0	1,41	1,2	3,90
Alcaparrasa	128,7	8	21,5	90,0	1,93	7,8	1,10
Chiclana	72,5	4,9	14,8	100,8	1,91	0,3	0,20
Cigarrera	96,3	4,2	22,9	101,8	2,33	1,3	1,20
Gallina	26,7	1,7	15,6	101,8	1,46	0,9	1,10
Peta	104	5,7	18,4	101,8	1,89	7,8	2,45
Pinos	99	3	33,0	101,8	1,41	1,1	1,25
Tarpo	154	11,4	13,5	101,8	1,38	1,1	3,40
Hondilla	37	2,4	14,2	102,0	1,45	1,3	3,60
Balsa Jarama	119,7	12	10,0	102,0	1,02	3,8	2,00
Dulce Zorra	58,7	3,3	17,7	102,0	0,95	2,3	2,50
Tobos	500	14,7	3,3	127,0	1,16	2,7	0,30
Medina	1800	120	15,0	142,0	2,13	2,9	3,50

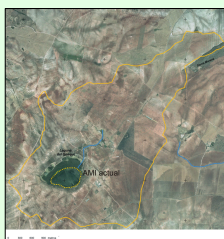


Figura 2.- Ortofotografía (1998-99) y CVS de la laguna del Gosque. Se incluye el AMI actual de laguna. IFH = 3,2.

Tabla 1.- Características morfométricas, climáticas y de salinidad mediana en las lagunas estudiadas. CVS: Cuenca vertiente superficial (ha); AMI: Área de inundación (ha); IFH: Índice de Funcionamiento Hidrológico.

Las AMIs oscilan entre  $1,7 \cdot 10^4$  m<sup>2</sup> (Gallina) y  $120 \cdot 10^4$  m<sup>2</sup> (Medina). La relación CVS/AMI se sitúa en un rango entre 5 y 50, con un valor medio de 17,8 (Tabla 1). La mayoría de las lagunas presentan aguas salobres (salinidad: 0,5-30 g/l) y son relativamente someras (salvo Zañar y Rincón, tienen menos de 5 m de profundidad máxima). El IFH propuesto permite la caracterización del estado de cada humedal. Para las 26 lagunas estudiadas, varía entre 3,90 (Amarga) y 0,31 (Ballestera). El 70% de las lagunas tienen un IFH cercano al intervalo entre 1 y 2.

Si el IFH es mayor de 3, esto podría indicar que la laguna pierde buena parte de sus recursos hídricos por otras vías, aparte de la evapotranspiración desde la cubeta. Así, la laguna puede ser "perdedora" y recargar al acuífero (laguna Amarga). En otros casos, los recursos pueden estar siendo extraídos mediante explotación intensiva de las aguas subterráneas (laguna del Gosque, Fig. 2). Un IFH entre 0 y 1 indica lo contrario: lagunas que podrían estar recibiendo aportes externos a su cuenca vertiente superficial. Estos aportes pueden ser naturales, por descarga subterránea de un acuífero extenso (lagunas Ballestera o Calderón) o podrían deberse a regadíos con aguas superficiales.

## Análisis estadístico de las variables estudiadas

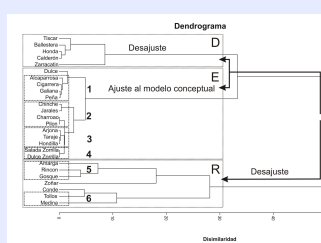


Figura 3.- Dendrograma (cluster) por individuos obtenido al relacionar las variables de la tabla 1.

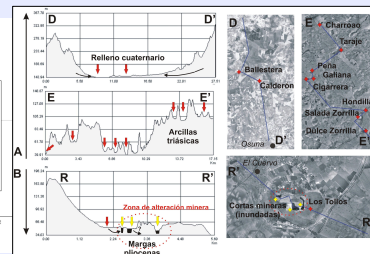


Figura 4.- Ejemplos de humedales que se ajustan a cada uno de los tres modelos de funcionamiento hidrológico propuestos: lagunas D (corte D-D'), lagunas E (corte E-E') y lagunas R (corte R-R').

## CONCLUSIONES

En la figura 3 se observa una segregación de individuos que puede estar relacionada con el grado de semejanza/diferencia con el modelo conceptual propuesto y el IFH. Así, las lagunas con un IFH alto (>3) o que tienen rebosadero - por tanto, que no se ajustan al modelo conceptual - se agrupan como lagunas R (lagunas de recarga). Del mismo modo, las lagunas con un IFH menor que 1 se pueden clasificar como lagunas de descarga (D), ya que reciben agua de fuera de su CVS. El resto de lagunas (E) se ajustan al modelo conceptual propuesto. Es el caso, entre otros, de las ocho lagunas de los complejos de Lebrija y Espera (Fig. 4).

Estas lagunas se alimentan, fundamentalmente, de la escorrentía superficial y subterránea generada en sus cuencas vertientes. Todas ellas se relacionan con las aguas subterráneas, ya que el acuífero de fondo de cubeta se ha detectado en cada uno de los humedales estudiados. En ese sentido, las lagunas continentales estudiadas se consideran ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas en ambientes semiáridos y, como tales, se les debe aplicar la legislación vigente, tanto a nivel nacional como europeo. En general, la mayoría de los humedales estudiados son muy sensibles a cualquier modificación de las cubetas o las cuencas y a la colmatación de las mismas.

La unidad básica de gestión en estos ecosistemas sería la CVS, ya que son altamente dependientes de la escorrentía generada en la misma

### Agradecimientos

Este trabajo ha estado parcialmente financiado por los convenios entre las Universidades de Granada y Pablo de Olavide (Sevilla) y la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir titulados "Caracterización hidroclimática de los humedales de las provincias de Sevilla Cádiz y "Caracterización hidroclimática de humedales de la cuenca del Guadalquivir". Las revisiones del manuscrito original, realizadas por J.M. Calaforra, han mejorado la calidad del trabajo presentado en el número especial del BGM.

### Referencias

Calaforra, J.M. y Pulido-Bosch, A. (1999). Gypsum karst features as evidence of diapiric processes in the Betic Cordillera, Southern Spain. *Geomorphology*, 29: 251 - 264.  
 M.M.A. (2005). Modelo Digital del Terreno de Andalucía. Relieve y Topografía. Junta de Andalucía. Consejería de Medio Ambiente, Sevilla.  
 Moral, F., M. Rodríguez-Rodríguez, J. Benavente, M. Beltrán y F. Ortega. (2008). Caracterización hidroclimática de las lagunas de la campiña andaluza central. 334 pp. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, Sevilla.



## CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO DE LAS LAGUNAS DE PALOS, LAS MADRES Y EL PORTIL (SUR DE LA PROVINCIA DE HUELVA)

D. SÁNCHEZ\*, B. ANDREO\*, F. CARRASCO\*, L. LINARES\*\*, M. RENDÓN\*\*\* y F. ORTEGA\*\*\*\*

(\* ) Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga. Andreo@uma.es

(\*\* ) Academia Malagueña de Ciencias

(\*\*\* ) Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía

(\*\*\*\* ) Grupo de Investigación “Ecología y Biodiversidad de Sistemas Acuáticos”.  
Universidad de Jaén

### RESUMEN

Al sur de la provincia de Huelva, cerca de la desembocadura del río Odiel, se localizan varias lagunas costeras de carácter permanente que han sido estudiadas en el proyecto “Contexto hidrogeológico de los humedales andaluces”, dentro del Programa Andaluz de Gestión de Humedales. Se trata de las lagunas Primera de Palos, de la Jara, de la Mujer y de las Madres, las cuales constituyen el complejo lagunar denominado “Lagunas de Palos y las Madres”, protegido bajo la figura de *Paraje Natural* desde el año 1989, y la laguna de El Portil, declarada *Reserva Natural* ese mismo año y situada unos 15 km al oeste de las cuatro anteriores.

Las superficies de estas lagunas van desde algo más de 1 ha (laguna de la Mujer) hasta las 63 ha de la laguna de las Madres, con altitudes que no superan en ningún caso los 5 m sobre el nivel del mar y profundidades de hasta 3 m.

Los materiales que constituyen la zona donde se asientan estas lagunas son de tipo detrítico, fundamentalmente arenas, con edades comprendidas entre el Neógeno y el Cuaternario.

Todas estas lagunas tienen su origen en el cierre de antiguas vaguadas o cauces fluviales, en su mayor parte de origen tectónico, por el avance de un frente dunar costero que interrumpe los flujos al mar de sus cuencas vertientes, dificulta el drenaje y, en consecuencia, forma los humedales. En el caso de la laguna de las Madres se trata de una fosa tectónica subsidente en la que se produjo un depósito continuado de materia orgánica.

La entrada de agua a estas lagunas se produce a través de aportes hídricos subterráneos, los cuales permiten mantenerlas en un estado de inundación permanente, la precipitación directa en el vaso lagunar, la escorrentía que se genera en sus respectivas cuencas vertientes y los retornos de riegos, en tanto que la salida de agua se produce principalmente por evaporación y, en menor medida y sólo durante las épocas más húmedas, por el drenaje a través de emisarios efluentes hacia el mar.





# Contexto hidrogeológico de las lagunas de Palos, Las Madres y El Portil (Sur de la provincia de Huelva)



D. Sánchez<sup>(1)</sup>, B. Andreo<sup>(1)</sup>, F. Carrasco<sup>(1)</sup>, L. Linares<sup>(2)</sup>, M. Rendón<sup>(3)</sup> y F. Ortega<sup>(4)</sup>  
 (1) Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (GHUMA)  
 (2) Academia Malagueña de Ciencias  
 (3) Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía  
 (4) Grupo de Investigación "Ecología y Biodiversidad de Sistemas Acuáticos", Universidad de Jaén

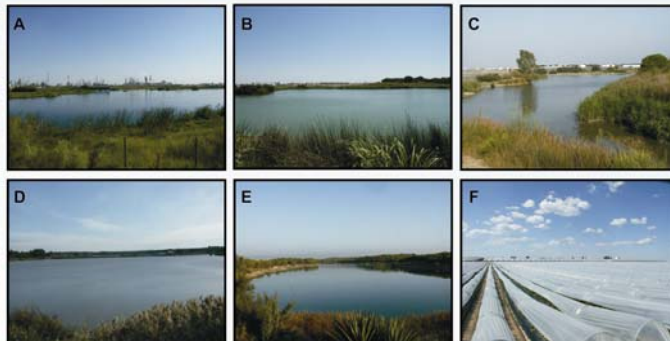


## LOCALIZACIÓN

Al sur de la provincia de Huelva, cerca de la desembocadura del río Odiel, se localizan varias lagunas costeras de carácter permanente. Se trata de las lagunas Primera de Palos, de la Jara, de la Mujer y de las Madres, las cuales constituyen el complejo lagunar denominado "Lagunas de Palos y las Madres", protegido bajo la figura de Paraje Natural desde el año 1989, y la laguna de El Portil, declarada Reserva Natural ese mismo año y situada unos 15 km al oeste de las cuatro anteriores.

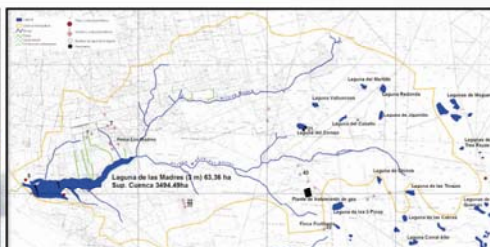
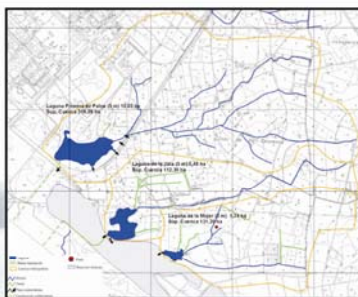


Arriba: Localización de las lagunas estudiadas. Derecha: A: Laguna Primera de Palos. Al fondo, polígono industrial Nuevo Puerto. B: Laguna de la Jara. C: Laguna de la Mujer. D: Laguna de las Madres. E: Laguna de El Portil. F: Plantaciones de fresas bajo plástico, muy frecuentes en los alrededores de las lagunas de Palos y las Madres.



## HIDROLOGÍA SUPERFICIAL

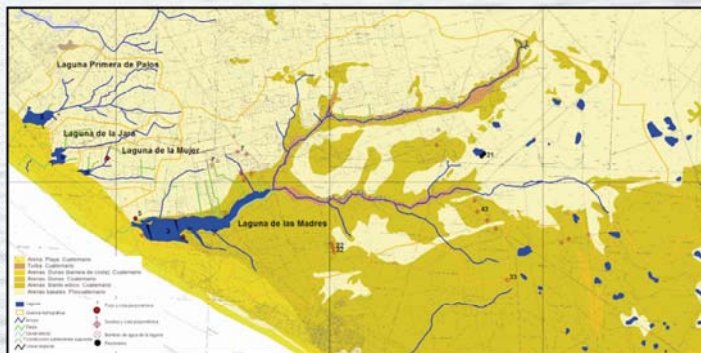
Las superficies de estas lagunas van desde algo más de 1 ha (laguna de la Mujer) hasta las 63 ha de la laguna de las Madres, con altitudes que no superan en ningún caso los 5 m sobre el nivel del mar y profundidades de hasta 3 m. La superficie de sus respectivas cuencas vertientes van desde las 112 ha (laguna de la Jara) hasta las 3.500 ha de la laguna de las Madres. Todas estas lagunas disponen de emisarios que limitan el nivel de inundación. Las cuencas vertientes a estas lagunas poseen una red de drenaje relativamente bien desarrollada, en algunos casos muy modificada como consecuencia de la implantación del cultivo de fresas (lagunas Primera de Palos, Jara y Mujer).



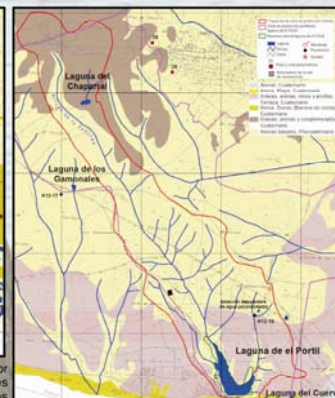
Izquierda: Red de drenaje superficial de las lagunas Primera de Palos, Jara y Mujer. Al sur de ellas existe una extensa área con numerosas charcas originadas por la extracción de áridos. Arriba: Red de drenaje de la laguna de las Madres. En el sector oriental de su cuenca vertiente se localizan más de un centenar de pequeñas lagunas estacionales. Derecha: Red de drenaje de la laguna de El Portil. En su entorno se ubican otras pequeñas lagunas con un ciclo de inundación estacional.

## CONTEXTO GEOLÓGICO E HIDROGEOLOGÍA

La zona de estudio está situada en el sector suroccidental de la Cuenca del Guadalquivir. Los materiales que constituyen esta región son de tipo detrítico, fundamentalmente arenas, con edades comprendidas entre el Neógeno y el Cuaternario. Las lagunas de Palos y las Madres se localizan en el extremo occidental del acuífero detrítico Almonte-Marismas. En este sector las cotas piezométricas tienen a descender hacia la costa y hacia el Oeste, lo cual implica la existencia de flujos subterráneos que, procedentes del Noreste, se dirigen hacia el Suroeste donde, en su trayectoria hacia el mar (su nivel de base) descargan, en parte, en las lagunas. La laguna de El Portil se encuentra en el sector costero del acuífero detrítico Ayamonte-Huelva. En esta zona las cotas piezométricas disminuyen desde el Norte hacia la costa (el mar constituye el nivel de base del acuífero). Esto implica la existencia de flujos subterráneos procedentes de sectores septentrionales que acaban en la laguna de El Portil. Las surgencias de agua localizadas en uno de los bordes de la laguna y la permanencia del estado de inundación durante todo el año, constituyen evidencias de la existencia de estos aportes subterráneos.



Arriba: Mapa litológico e hidrogeológico de las lagunas de Palos y las Madres. En este sector el acuífero presenta un espesor saturado de 25-50 m y bajos valores de transmisividad, hecho puesto de manifiesto por los escasos rendimientos de las captaciones y los elevados tiempos de recuperación. Derecha: Mapa litológico e hidrogeológico de la laguna de El Portil. Las pequeñas lagunas estacionales situadas en el sector septentrional representan, desde un punto de vista funcional, lagunas de recarga.



## ESQUEMAS DE FUNCIONAMIENTO

La entrada de agua a estas lagunas se produce a través de aportes hídricos subterráneos (A), los cuales permiten mantenerlas en un estado de inundación permanente, la precipitación directa (P) en el vaso lagunar, la escorrentía (Es) que se genera en sus respectivas cuencas vertientes y los retornos de riegos (Rr), en tanto que la salida de agua se produce principalmente por evaporación (E) y, en menor medida y sólo durante las épocas más húmedas, por el drenaje a través de emisarios efluentes hacia el mar (Em).



## CONCLUSIONES

Las lagunas de Palos, las Madres y El Portil tienen su origen en el cierre de antiguas vaguadas o cauces fluviales, en su mayor parte de origen tectónico, por el avance de un frente dunar costero que interrumpe los flujos al mar de sus cuencas vertientes, dificulta el drenaje y, en consecuencia, forma los humedales. En el caso de la laguna de Las Madres, se trata de una fosa tectónica subsidente en la que se produjo un depósito continuado de materia orgánica (turba). En todas estas lagunas los aportes subterráneos procedentes de los acuíferos sobre los que se asientan (Almonte-Marismas, en el caso de las lagunas de Palos y las Madres, y Ayamonte-Huelva en el caso de la laguna de El Portil) constituyen una componente importante de entrada de agua, aportes que permiten que estas lagunas permanezcan inundadas durante todo el año.



## **DEPENDENCIA AGUAS SUPERFICIALES-AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA CUENCA DEL RÍO ANDARAX (ALMERÍA)**

**F. SÁNCHEZ-MARTOS\*, J. GISBERT GALLEGO\*, L. MOLINA SÁNCHEZ\* y A. PULIDO-BOSCH\***

(\*) Dpto. de Hidrogeología y Química Analítica. Universidad de Almería. Campus Universitario. 04120 Almería. fmartos@ual.es

### **RESUMEN**

La cuenca del río Andarax (2265 km<sup>2</sup>) presenta una litología muy variada y una gran complejidad tectónica. Todo esto junto con la climatología del área ha determinado que la dinámica hidrológica de los principales cauces posea una fuerte dependencia de las aguas subterráneas. En este póster se muestra esta interacción aguas subterráneas-aguas superficiales, analizándola desde el punto de vista hidrológico e hidrogeoquímico, y centrándose en los tres cauces más extensos de la cuenca: río Andarax, río Nacimiento y rambla de Tabernas.

El río Andarax presenta una tipología de río continuo en el área de cabecera, temporal en su zona media y discontinua en la zona baja. La interacción aguas subterráneas y aguas superficiales favorece la diversidad de sus aguas superficiales, con un amplio rango de salinidad y variedad de facies. En el área de cabecera la influencia subterránea influye sobre el quimismo de las aguas superficiales elevando el contenido en NO<sub>3</sub>. Desde esta zona el cauce discurre en contacto directo con los materiales carbonatados de Sierra de Gádor y la descarga subterránea con aguas de buena calidad estabiliza, desde el punto de vista químico, las aguas superficiales. En el tramo final, las aguas presentan un carácter discontinuo y alcanzan los mayores contenidos salinos de todo el cauce. El río Nacimiento es un río discontinuo y su tramo medio presenta un pequeño caudal permanente, directamente relacionado con una descarga subterránea difusa relacionada con el afloramiento de rocas metamórficas impermeables. En la rambla de Tabernas existen una notable variedad de zonas húmedas asociadas a pequeñas corrientes de aguas superficiales salinas con un gran continuidad temporal. Su disposición está asociada a la presencia de descargas subterráneas, influenciadas para la disposición y la tectónica de los depósitos miocenos aflorantes en la depresión de Tabernas.



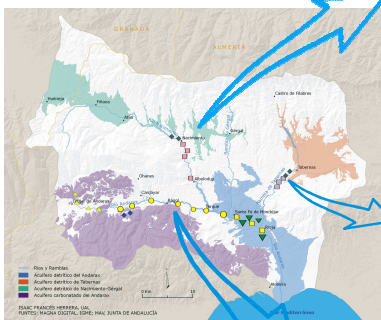
# Dependencia aguas superficiales-aguas subterráneas en la cuenca del río Andarax (Almería)

F. Sánchez-Martos\*, J. Glabert Gallego, L. Molina Sánchez y A. Pulido-Bosch  
 G.I Recursos Hídricos y Geología Ambiental. Universidad de Almería. Campus Universitario. 04120 Almería.  
 \*fmartos@ual.es



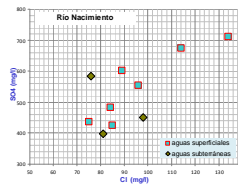
## Introducción

La dinámica hidrológica de los principales cauces en la cuenca del río Andarax posee una gran variabilidad espacial y temporal y muestra una notable dependencia de las aguas subterráneas. En este póster se analiza esta interacción aguas subterráneas-aguas superficiales, desde el punto de vista hidrogeológico, en los tres cauces más extensos de la cuenca: río Andarax, río Nacimiento y rambla de Tabernas.



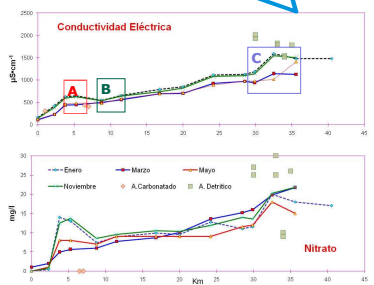
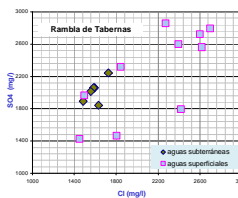
## Río Nacimiento

- Discontinuo.
- Homogeneidad en la salinidad ( $1300 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) de las aguas superficiales y subterráneas
- En su tramo final existe una corriente permanente como consecuencia de la alimentación del acuífero detrítico, en relación con el afloramiento de materiales impermeables.
- Descarga difusa a través del cauce y aporte de manantiales

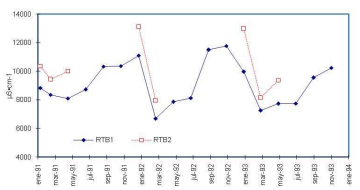


## Rambla de Tabernas

- Caudal discontinuo.
- Aguas salinas ( $6000-1300 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )
- Aportes laterales con aguas salinas, que soportan posteriormente un proceso de evaporación y disolución de sales en el propio cauce
- Descarga concentrada en pequeñas surgencias laterales.



Evolución longitudinal de la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) y del contenido  $\text{NO}_3$  ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) de las aguas superficiales y subterráneas (acuífero carbonatado y acuífero detrítico).



Evolución temporal de la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ), de las aguas superficiales en la rambla de Tabernas.

## Río Andarax

### Area A

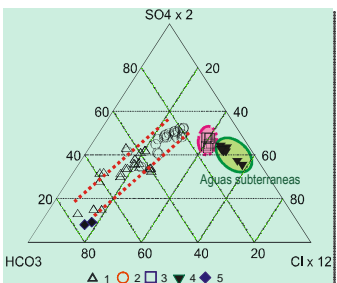
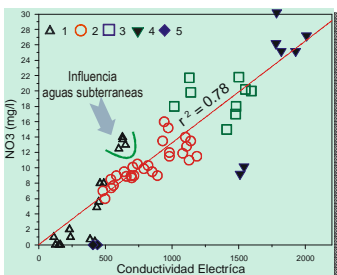
- Corriente superficial es continua
- Conductividad baja ( $200 - 650 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )
- Pequeña depresión con materiales detríticos y una intensa actividad agrícola tradicional
- En las aguas superficiales se observa un aumento del contenido en  $\text{NO}_3$  y la conductividad eléctrica.
- Origen: Lavado del  $\text{NO}_3$ , parcialmente fijado en la zona no saturada y/o infiltrado en el acuífero como consecuencia de las actividades agrícolas, que posteriormente se moviliza hasta alcanzar las aguas superficiales del río.
- Descargas difusa.

### Area B

- Corriente superficial es continua y tiene una cierta temporalidad
- Conductividad es baja y muy estable ( $450 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )
- Las aguas superficiales presentan una estabilización de la temperatura, conductividad eléctrica y contenidos iónicos en un pequeño tramo del río.
- El cauce discurre en contacto directo con los materiales carbonatados de Sierra de Gádor y la descarga subterránea, con aguas de buena calidad, disminuye la salinidad de las aguas superficiales
- Descargas difusa en el cauce y aportes laterales desde manantiales y galerías.

### Area C

- Corriente es temporal y tiene carácter discontinuo
- Máximos contenidos salinos de todo el río ( $1100 - 1650 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )
- Las aguas superficiales presentan una evolución diferente al resto de puntos situados aguas arriba.
- La composición de las aguas superficiales muestra una ligera influencia clorurada que se superpone sobre en la evolución general sulfatada de las aguas superficiales.
- La presencia de depósitos margosos, que se encuentran tectónicamente elevados, favorecen el flujo de aguas más profundas y más salinas hacia los niveles más superficiales del acuífero detrítico. Esta influencia es más visible durante el estiaje, cuando las aguas superficiales alcanzan una salinidad similar a las aguas subterráneas del acuífero detrítico.
- Descarga difusa en el cauce



Distribución de los contenidos en  $\text{NO}_3$  con respecto a la conductividad eléctrica de las aguas y diagrama triangular  $\text{HCO}_3 - \text{SO}_4^{2-} \times 2 - \text{Cl} \times 12$ . Se han separado los grupos correspondientes a las aguas superficiales (1: área de cabecera, 2: área central, 3: área final) y a las aguas subterráneas (4: acuífero detrítico 5: acuífero carbonatado).

## Agradecimientos

A la Junta de Andalucía, financiadora del proyecto PO6-RNM-01696 O6-RNM-01696

## LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LOS HUMEDALES: EL CASO DEL HUMEDAL DE LA LAGUNA DE EL HITO (CUENCA)

A. SASTRE MERLÍN\*, A. JURADO GAMO\* y S. MARTINEZ PEREZ\*

(\*) Universidad de Alcalá. Departamento de Geología. Facultad de Ciencias. Nacional II, km 33,600. 28871 Alcalá de Henares. antonio.sastre@uah.es

### RESUMEN

El humedal de la laguna de El Hito, ubicado en el interfluvio de las cuencas altas de los ríos Cigüela y Záncara, constituye un elemento relevante del patrimonio geoambiental de Castilla-La Mancha (Reserva Natural), además de ser un espacio reconocido como Lugar Ramsar y estar integrado en la Red Natura 2000. Éste presenta una superficie de unas 290 hectáreas en los periodos de máxima inundación, imbricado en una cuenca endorreica de 42 km<sup>2</sup>.

El territorio que lo alberga presenta un aspecto árido en un paisaje dominado por extensos pediplanos, estando catalogado aquél como “sin acuíferos” en virtud de su desfavorable substrato geohidrológico, por lo que la manifestación del humedal se ha atribuido a la simple acumulación del agua de las precipitaciones en los periodos más lluviosos. No obstante, los estudios realizados hasta la fecha ponen de manifiesto la contribución de las aguas subterráneas a la dinámica de este geosistema, demostrando cómo la propia cubeta lagunar se comporta como una zona de descarga difusa del flujo subterráneo subyacente a la cuenca endorreica que le da acogida.

En el presente trabajo se muestran los datos más relevantes que permiten comprender el funcionamiento de este humedal, de notable interés científico y ambiental, soporte de interesantes comunidades vegetales halófilas así como de gran cantidad de aves acuáticas y esteparias.

**Palabras clave:** *Humedales, patrimonio geoambiental, lagunas salinas, estructura geohidrológica, Mancha Alta Conquense*

### INTRODUCCIÓN

En el sector nororiental de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana, se ubica el humedal de El Hito (Figura 2), en el que la “Laguna de El Hito” constituye el elemento fisiográfico más destacado (Figura 1).





Figura 1. Laguna de El Hito.

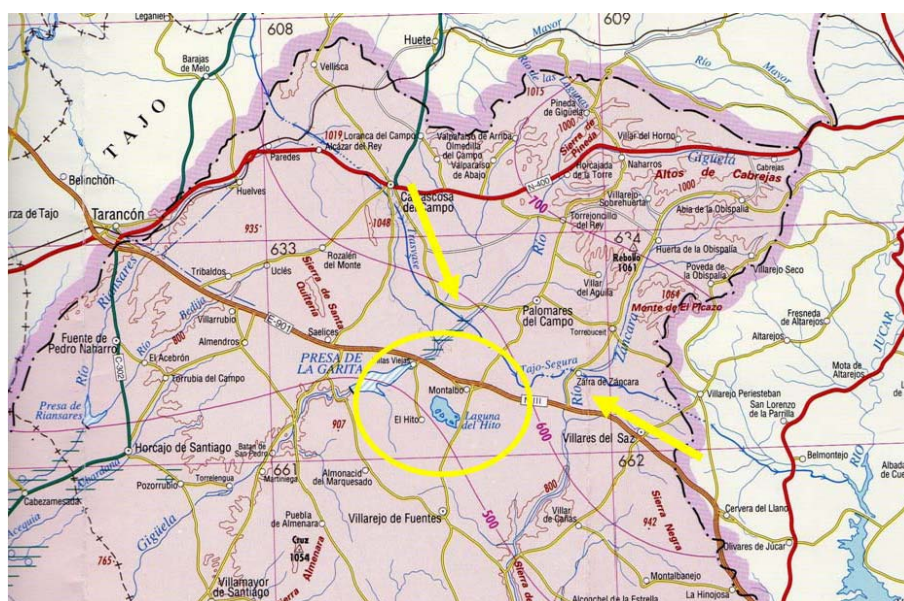


Figura 2. Localización del “humedal de El Hito”.

Es una laguna episódica, de comportamiento estacional, con una superficie máxima inundada de 290 ha y una profundidad máxima de 15-20 cm, cuya cuenca es de unos 42 km<sup>2</sup>.

En un entorno árido, la cubeta lagunar constituye un enclave ambientalmente relevante (Sastre et al., 2008), lo que ha dado origen a su declaración de Reserva Natural (BOE, 2002) y a su inclusión ese mismo año en la Lista del Convenio de Ramsar. Está catalogada como Lugar de Importancia Comunitaria (Comisión Europea, 2006), paso previo a su consideración como “Zona de Especial Conservación”. Finalmente, constituye un espacio protegido en el marco del Plan Especial del Alto Guadiana (CHG, 2007).

## MEDIO FÍSICO

La región se sitúa al pie de las estribaciones orientales de la sierra de Altomira, en la Depresión Intermedia, enmarcada entre los relieves mesozoicos de la serranía de Cuenca (Sistema Ibérico) al este y la sierra de Altomira al oeste. La depresión constituye una fosa tectónica rellena de sedimentos terciarios de naturaleza carbonatada, limosa y, sobre todo, yesífera, de edad oligocena y miocena (Figura 3).



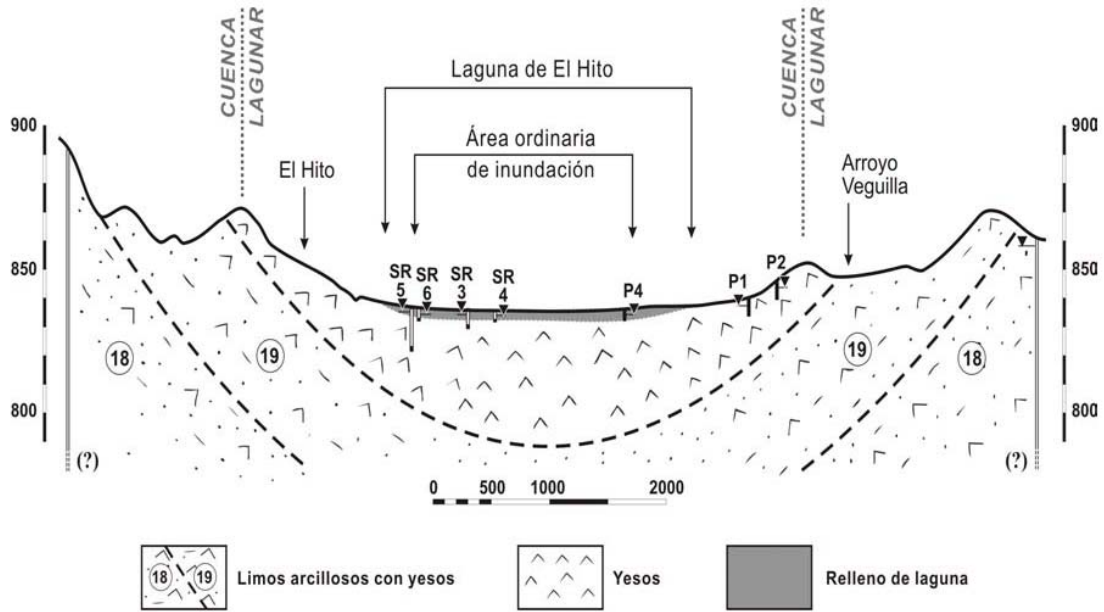


Figura 3. Perfil hidrogeológico SW-NE de la cuenca vertiente del humedal de El Hito.

El comportamiento hidrogeológico de estos materiales es el de un conjunto semi-impermeable que localmente se hace semipermeable allí donde aparecen paquetes calcáreos, seguramente afectado por la formación de colapsos derivados de disoluciones de los yesos, generando subsidencias o incluso pequeñas dolinas. (Figura 4).

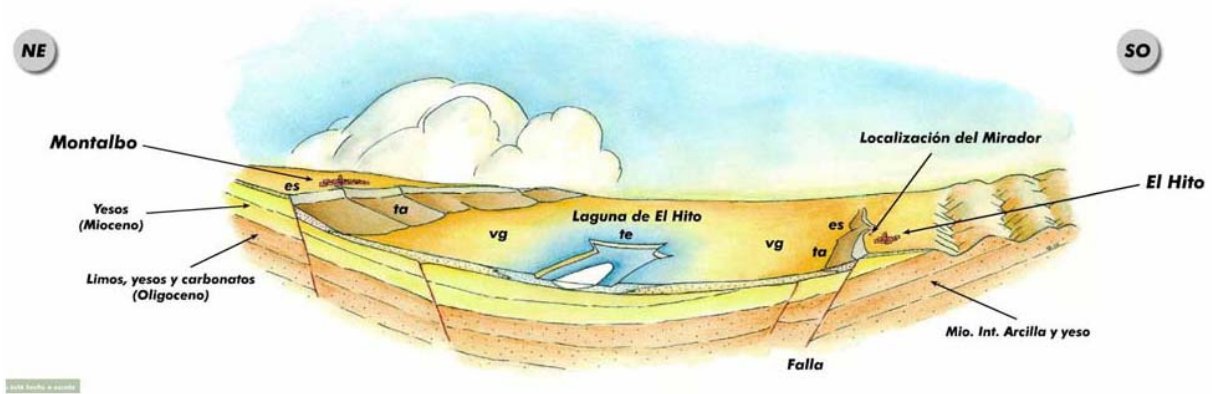


Figura 4. Rasgos geomorfológicos de la cuenca vertiente del humedal de El Hito.

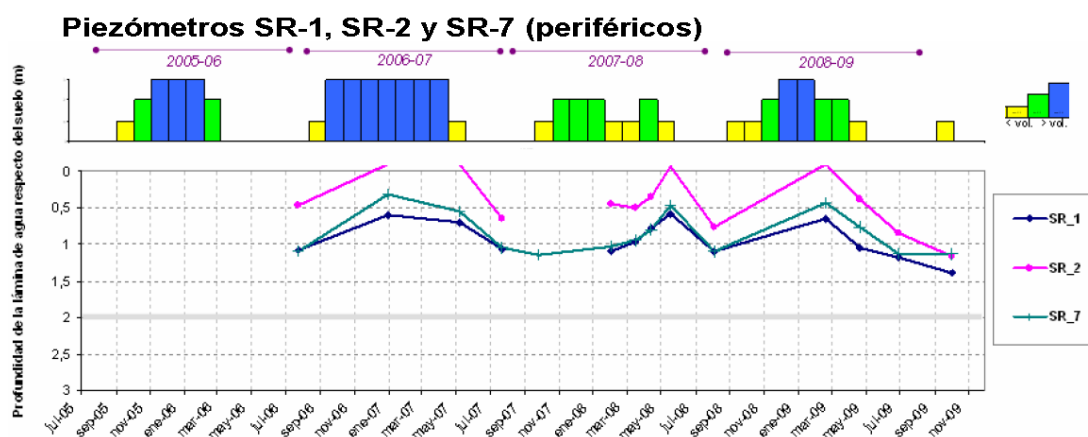
La precipitación media anual es de 509 mm, aunque es característica la irregularidad interanual. La distribución anual revela una marcada diferencia estacional, con un acusado déficit estival. La temperatura media anual es de 13,6°C, siendo el mes más frío enero (3,5°C) y el más cálido julio (23,5°C).



## RÉGIMEN GEOHIDROLÓGICO

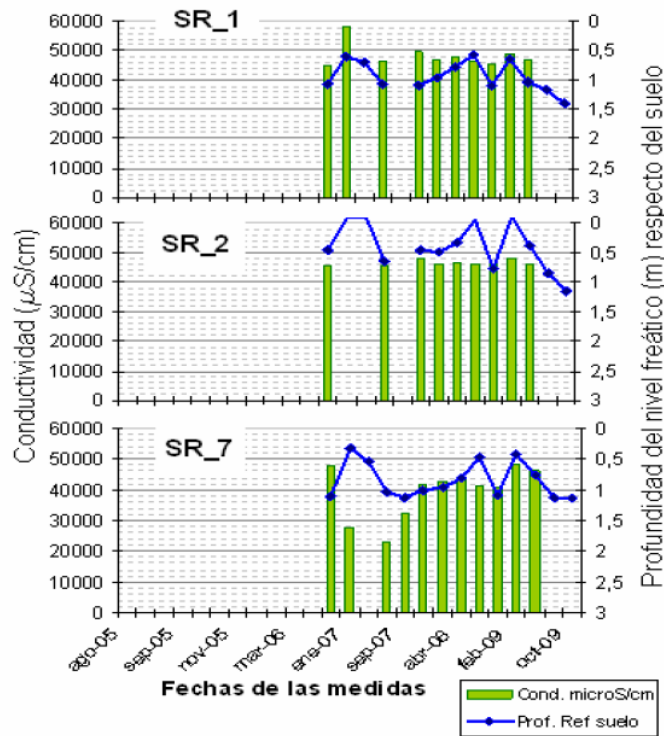


Figura 5. Puntos de muestreo (SR: piezómetros; P: pozos), evolución de niveles piezométricos y conductividad.

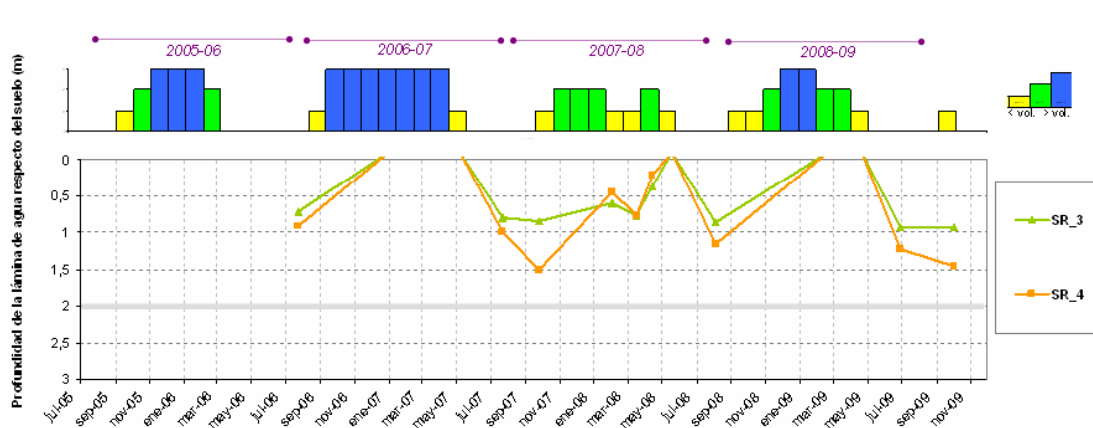


Con un profundidad de 3 metros, el nivel del agua no desciende por debajo de 1,5 metros, oscilando en torno a 0,5 metros a lo largo del año hidrológico, en estrecha relación con el régimen de precipitaciones de la zona.

La conductividad muestra un valor bastante constante en torno a 45000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

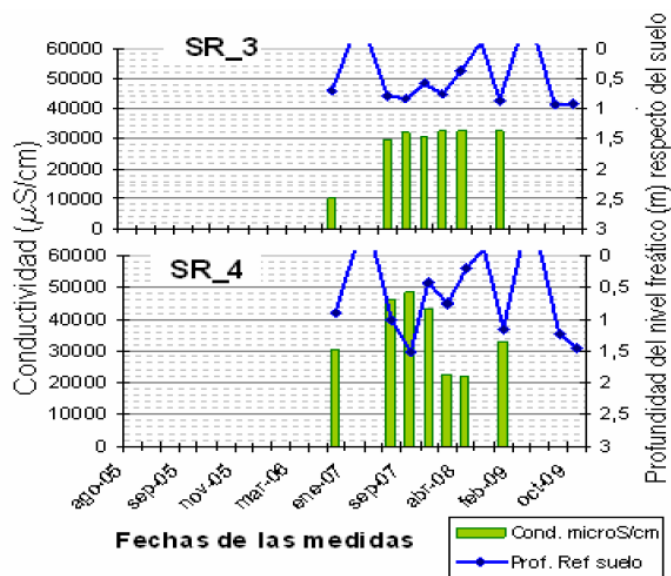


**Piezómetros SR-3 y SR-4 (sector central de la laguna)**

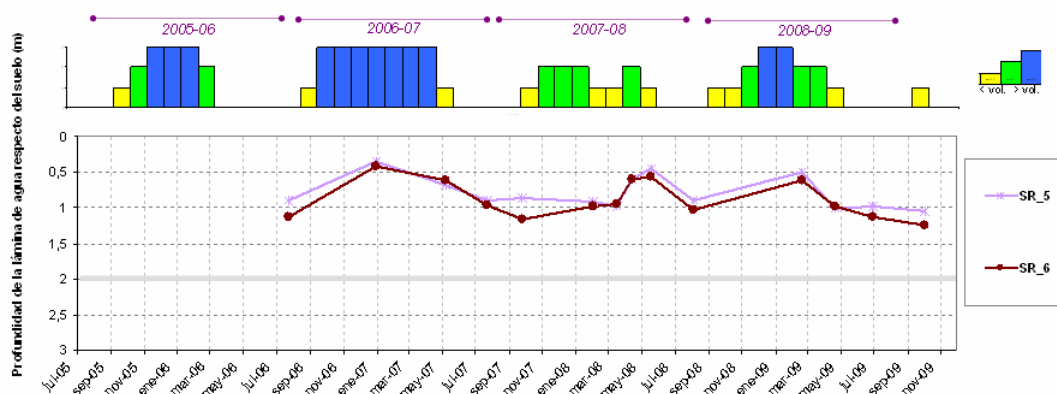


Reproducen el mismo esquema que SR-5 y SR-6, presentando el piezómetro SR-3 (6 m) un potencial hidráulico algo más elevado que el SR-4 (3 m).

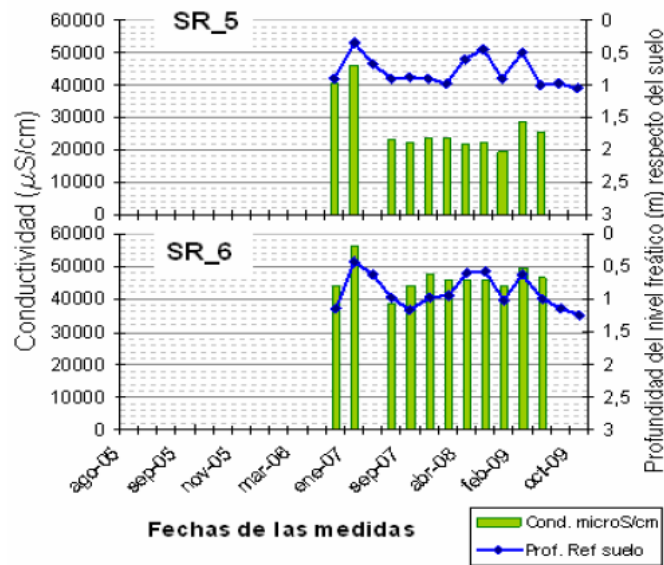
Al situarse en plena zona encharcable, el SR-4 presenta una mayor oscilación en el valor de la conductividad eléctrica. En las muestras del SR-3 la conductividad es inferior a las del SR-4.



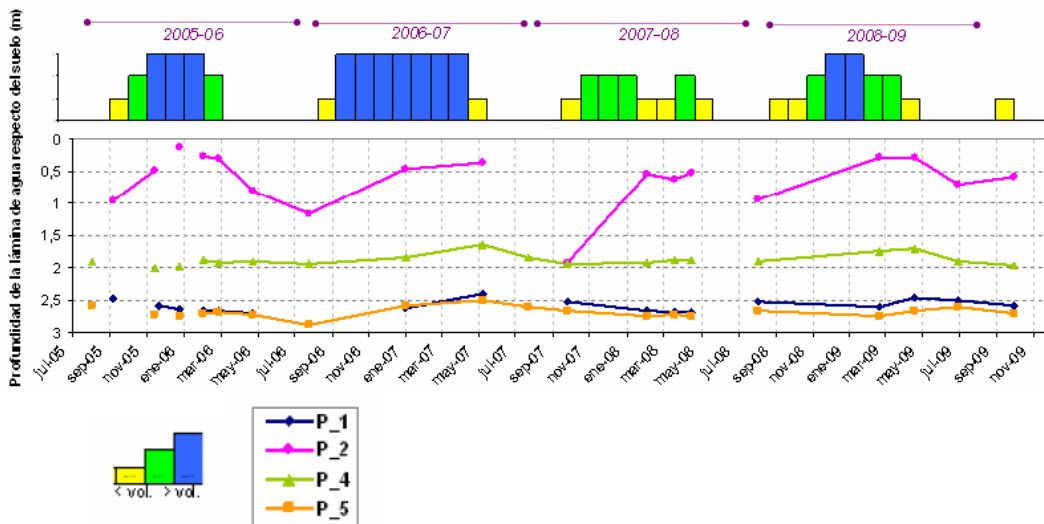
### Piezómetros SR-5 y SR-6



El piezómetro SR-5 tiene una profundidad de 15 m frente a los 3 m de SR-6, situándose uno inmediatamente al lado del otro. El nivel del agua del primero mantiene un potencial hidráulico ligeramente superior al más superficial.



**Pozos de observación P-1, P-2, P-4 y P-5**

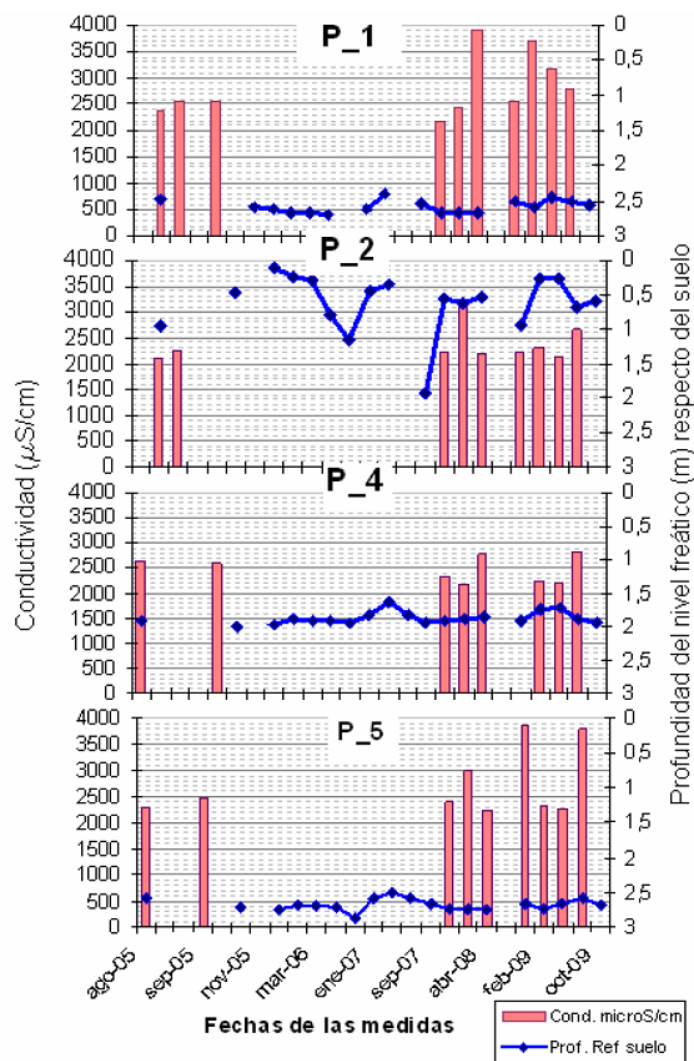


Los pozos P-1, P-4 y P-5 el nivel freático se dispone a profundidades entre 2 y 2,5 m.

En el pozo P-2, situado en las inmediaciones de la divisoria hidrográfica de la cuenca lagunar, llama la atención la oscilación de niveles.

La conductividad eléctrica de las muestras recolectadas en ellos, con valores entre 2000 y 3000 µS/cm, es muy inferior a los registros de los piezómetros.





Todas las muestras son sulfatadas, con porcentajes siempre bajos de bicarbonatos y variables de cloruros -20-30% en la laguna, 6-20% en los piezómetros y 2-10% en los pozos-. Con respecto al contenido catiónico, las muestras de la laguna presentan un perfil cálcico-magnésico, las de los pozos cálcico y las de los piezómetros magnésico (Figura 6).

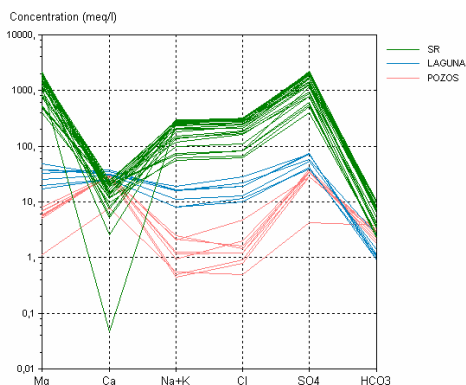


Figura 6. Diagrama de Schoeller de las muestras de agua de la laguna, pozos y piezómetros.

La laguna muestra un quimismo intermedio entre el sistema de flujo “profundo” – piezómetros- y el sistema de flujo superficial –pozos-.

## CONCLUSIONES

- Queda acreditada la contribución de las aguas subterráneas a la existencia del humedal, tanto con argumentos piezométricos como hidroquímicos.
- No obstante, es el agua de lluvia la que contribuye de forma relevante a la presencia de agua en superficie.
- No se han observado manifestaciones de interfases de salinidad bajo la superficie lagunar.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- B.O.E. (2003). *Resolución 18/12/2002, de inclusión de la Laguna de El Hito en la Lista del Convenio de Ramsar.*
- D.O.C.E. (2006). *Decisión de la Comisión de 19 de julio de 2006, por la que se adopta la Lista de Lugares de Importancia Comunitaria de la región biogeográfica mediterránea.*
- D.O.C.M. (2002). *Decreto 26/2002 de declaración de Reserva Natural de la Laguna de El Hito.* Consejería de Agricultura y Medio Ambiente JCCM.
- SASTRE, A.; MARTÍNEZ, S.; JURADO, A. y ACASO, E. (2008). *Geohidrología del humedal de El Hito (Provincia de Cuenca).* IX Simposio de Hidrogeología. Elche (28-30 de enero). NIPO: 657-08-013-4.
- SASTRE, A.; JURADO, A.; MARTÍNEZ, S.; ACASO, E. y MARTÍNEZ, J. (2008). *Humedales continentales y patrimonio geoambiental: reconocimiento didáctico del humedal de la Laguna de El Hito (Cuenca).* XV Simposio sobre Enseñanza de la Geología. Guadalajara (7-12 de julio). NIPO: 657-08-028-3. ISBN: 978-84-7840-765-1.

# LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LOS HUMEDALES: EL CASO DE EL HUMEDAL DE LA LAGUNA DE EL HITO (CUENCA).

Sastre Merlín A., Jurado Gamo A. y Martínez Perez S.  
Dpto. de Geología. Universidad de Alcalá



## 1. INTRODUCCIÓN

En el sector nororiental de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana, se ubica el Humedal de El Hito (figura 1), en el que la "Laguna de El Hito" constituye el elemento fisiográfico más destacado (figura 2).



Figura 1: Localización del "Humedal de El Hito"



Figura 2: Laguna de El Hito

Es una laguna episódica, de comportamiento estacional, con una superficie máxima inundada de 290 ha y una profundidad máxima de 15-20 cm, cuya cuenca es de unos 42 Km<sup>2</sup>. En un entorno árido, la cubeta lagunar constituye un enclave ambientalmente relevante (Sastre et al, 2008), lo que ha dado origen a su declaración de Reserva Natural (BOE, 2002 y a su inclusión ese mismo año en la Lista del Convenio de Ramsar. Está catalogada como Lugar de Importancia Comunitaria (Comisión Europea, 2006), paso previo a su consideración como "Zona de Especial Conservación". Finalmente, constituye un espacio protegido en el marco del Plan Especial del Alto Guadiana (CHG, 2007).

## 2. MEDIO FÍSICO

La región se sitúa al pie de las estribaciones orientales de la Sierra de Altomira, en la Depresión Intermedia, enmarcada entre los relieves mesozoicos de la Serranía de Cuenca (Sistema Ibérico) al Este y la Sierra de Altomira al Oeste. La Depresión constituye una fosa tectónica rellena de sedimentos terciarios de naturaleza carbonatada, limosa y, sobre todo, yesífera, de edad oligocena y miocena (figura 3).

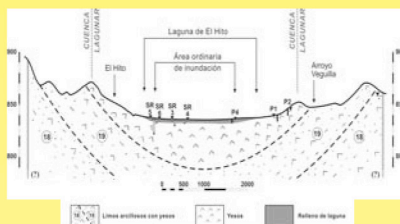


Figura 3: Perfil hidrogeológico SW-NE de la cuenca vertiente del humedal de El Hito.

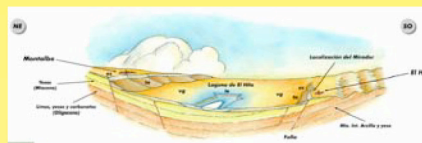


Figura 4: Rasgos geomorfológicos de la cuenca vertiente del humedal de El Hito

El comportamiento hidrogeológico de estos materiales es el de un conjunto semi-impermeable que localmente se hace semipermeable allí donde aparecen paquetes calcáreos, seguramente afectados por la formación de colapsos derivados de disoluciones de los yesos, generando subsidencias o incluso pequeñas dolinas. (figura 4).

## 3. RÉGIMEN GEOHIDROLÓGICO



**Piezómetros SR-1, SR-2 y SR-7 (periféricos)**  
Con una profundidad de 3 metros, el nivel del agua no desciende por debajo de 1,5 metros, oscilando en torno a 0,5 metros a lo largo del año hidrológico, en estrecha relación con el régimen de precipitaciones de la zona.

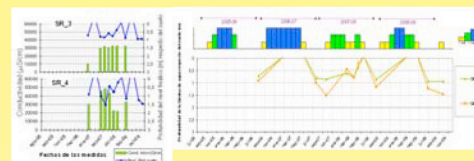
La conductividad muestra un valor bastante constante en torno a 45000 µS/cm.

### Piezómetros SR-5 y SR-6

El piezómetro SR-5 tiene una profundidad de 15 m frente a los 3 m de SR-6, situándose uno inmediatamente al lado del otro. El nivel del agua del primero mantiene un potencial hidráulico ligeramente superior al más superficial.



Figura 5: Puntos de muestreo (SR: piezómetros; P: pozos), evolución de niveles piezométricos y conductividad



### Piezómetros SR-3 y SR-4 (sector central de la laguna)

Reproducen el mismo esquema que SR-5 y SR-6, presentando el piezómetro SR-3 (6 m) un potencial hidráulico algo más elevado que el SR-4 (3 m).

Al situarse en plena zona encharcable, el SR-4 presenta una mayor oscilación en el valor de la conductividad eléctrica. En las muestras del SR-3 la conductividad es inferior a las del SR-4.

### Pozos de observación P-1, P-2, P-4 y P-5

Los pozos P-1, P-4 y P-5 el nivel freático se dispone a profundidades entre 2 y 2,5 m.

En el pozo P-2, situado en las inmediaciones de la divisorio hidrográfica de la cuenca lagunar, llama la atención la oscilación de niveles.

La conductividad eléctrica de las muestras recolectadas en ellos, con valores entre 2000 y 3000 µS/cm, es muy inferior a los registros de los piezómetros.

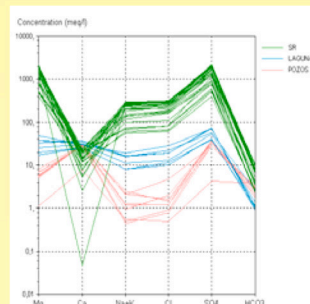


Figura 6: Diagrama de Schoeller de las muestras de agua de la laguna, pozos y piezómetros

Todas las muestras son sulfatadas, con porcentajes siempre bajos de bicarbonatos y variables de cloruros -20-30% en la laguna, 6-20% en los piezómetros y 2-10% en los pozos-. Con respecto al contenido catiónico, las muestras de la laguna presentan un perfil cálcico-magnésico, las de los pozos cálcico y las de los piezómetros magnésico (figura 6).

La laguna muestra un quimismo intermedio entre el sistema de flujo "profundo" -piezómetros- y el sistema de flujo superficial -pozos-.

## 4. CONCLUSIONES

- Queda acreditada la contribución de las aguas subterráneas a la existencia del humedal, tanto con argumentos piezométricos como hidroquímicos
- No obstante, es el agua de lluvia la que contribuye de forma relevante a la presencia de agua en superficie
- No se han observado manifestaciones de interfaces de salinidad bajo la superficie lagunar

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- B.O.E. (2003). Resolución 18/12/2002, de inclusión de la Laguna de El Hito en la Lista del Convenio de Ramsar.
- D.O.C.E. (2006). Decisión de la Comisión de 19 de julio de 2006, por la que se adopta la Comunidad de la región biogeográfica mediterránea.
- D.O.C.M. (2002). Decreto 26/2002 de declaración de Reserva Natural de la Laguna de y Medio Ambiente JCCM.
- Sastre, A.; Martínez, S.; Jurado, A. y Acaso, E. (2008). Geohidrología del humedal de Simposio de Hidrogeología, Elche (28-30 de enero). NIPCO: 657-08-013-4.
- Sastre, A.; Jurado, A.; Martínez, S.; Acaso, E. y Martínez, J. (2008). Humedales como reconocimiento didáctico del humedal de la Laguna de El Hito (Cuenca). XV Simposio de Guadalupe (7-12 de julio). NIPCO: 657-08-028-3. ISBN: 978-84-7840-765-1.





## PATROCINADORES



**CIAMA-La Alfranca**



**Agència Catalana de l'Aigua**



Instituto Pirenaico de Ecología



*Consejo de  
Protección de  
la Naturaleza  
de Aragón*



**CIHEAM**  
Instituto Agronómico  
Mediterráneo de Zaragoza



**CONFEDERACIÓN  
HIDROGRAFICA  
DEL EBRO**



Fundación Biodiversidad

→ **CEHUM**

Centro Español de Humedales



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena



**UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA**  
Departamento de Ciencias de la Tierra



Zaragoza Global