



**MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE,
MEDIO RURAL Y
MARINO**

DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA

**Q 5017001 H
CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO**

ÁREA DE CALIDAD DE AGUAS

TRABAJOS DE CONSULTORIA Y ASISTENCIA

**PRESUPUESTO DEL
ORGANISMO**

CLAVE:
095/09-SNS

REF. CRONOLOGICA:
07/2010

TIPO:

ASISTENCIA TÉCNICA

TÍTULO:

**ESTUDIO DE LA INCIDENCIA DE LA LENGUA SALINA DE LA DESEMBOCADURA
DEL RÍO EBRO EN EL ACUÍFERO SUPERFICIAL DEL DELTA**

PRESUPUESTO DE CONTRATA:

59.714,41 euros

PRESUPUESTO DE ADJUDICACION:

59.682,34 euros

SERVICIO:

ÁREA DE CALIDAD DE AGUAS

DIRECTOR:

FELIPE DELGADO MANGAS

CONSULTOR:

AMPHOS XXI CONSULTING, S.L.

TOMO:

TOMO ÚNICO

EJEMPLAR:

EJEMPLAR 1 DE 2

CONTENIDO:

MEMORIA Y ANEJOS

NUMERO ARCHIVO CALIDAD:

Índice

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 OBJETIVOS	3
1.3 ESTRUCTURA DEL ESTE DOCUMENTO	3
1.4 METODOLOGÍA.....	3
2. PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS	5
2.1 DESCRIPCIÓN DE LAS CAMPAÑAS	5
2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS	6
2.3 INTERPRETACIÓN	8
3. RESULTADOS DE LOS PERFILES VERTICALES DE CE	10
3.1 DESCRIPCIÓN DE LAS CAMPAÑAS	10
3.2 RESULTADOS.....	11
3.2.1 <i>Perfiles en el río</i>	11
3.2.2 <i>Perfiles en los piezómetros</i>	12
3.3 INTERPRETACIÓN DE LOS PERFILES.....	17
4. RESULTADOS DE LOS NIVELES PIEZOMÉTRICOS	21
4.1 DESCRIPCIÓN DE LAS CAMPAÑAS Y OBTENCIÓN DE DATOS	21
4.2 RESULTADOS DE LOS NIVELES MANUALES.....	22
4.2.1 <i>Datos obtenidos</i>	22
4.2.2 <i>Interpretación de los datos manuales</i>	25
4.3 RESULTADOS DE LAS MEDICIONES EN CONTINUO	26
4.3.1 <i>Datos obtenidos medición en continuo</i>	26
4.3.2 <i>Determinación de la posición de la interfaz</i>	28
4.3.3 <i>Interpretación de los datos de las mediciones en continuo</i>	35
5. RESULTADOS DE HIDROQUÍMICA	37
5.1 DESCRIPCIÓN DE LAS CAMPAÑAS	37
5.2 DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS	38
5.2.1 <i>Valoración de los análisis</i>	38
5.2.2 <i>Caracterización hidroquímica</i>	39
5.2.3 <i>Relaciones iónicas</i>	44
5.3 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS	50

5.3.1	<i>Caracterización hidroquímica</i>	50
5.3.2	<i>Relaciones iónicas</i>	55
6.	RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN ISOTÓPICA AMBIENTAL	58
6.1	ISÓTOPOS ESTABLES	58
6.1.1	<i>Descripción de las campañas</i>	58
6.1.2	<i>Resultados</i>	59
6.1.3	<i>Conclusiones</i>	61
6.2	ISÓTOPOS RADIOACTIVOS, TRITIO	63
6.2.1	<i>Descripción de las campañas</i>	63
6.2.2	<i>Descripción de los resultados</i>	64
6.2.3	<i>Conclusiones</i>	66
7.	DISCUSIÓN	68
8.	CONCLUSIONES	73
9.	RECOMENDACIONES	77
10.	BIBLIOGRAFÍA	79

Índice de figuras

Figura 1.1. Situación de los puntos de control.....	2
Figura 1.2. Sistema de canales de riego y drenaje, nivel freático y masas de agua superficial y geología del hemidelta derecho del río Ebro.	2
Figura 1.3. Material utilizado para la realización de las campañas de campo.	4
Figura 1.4. Distribución de las campañas de muestreo y diferentes etapas del ciclo hidrológico del delta del Ebro.....	4
Figura 2.1. Densímetro M50-100.....	6
Figura 2.2. Correlación entre los valores de CE y densidad.....	8
Figura 2.3. Situación de las muestras respecto a los valores de pH y Eh mínimos y máximos registrados en las tres últimas campañas.	9
Figura 3.1. Perfiles verticales de CE en el río Ebro, próximos a la orilla.....	11
Figura 3.2. Perfiles verticales de CE en el centro del río Ebro.....	12
Figura 3.3. Perfiles verticales de CE en el río y piezómetros de la línea 1.	14
Figura 3.4. Perfiles verticales de CE en el río y piezómetros de la línea 2.	15
Figura 3.5. Perfiles verticales de CE en el río y piezómetros de la línea 3.	16
Figura 3.6. Perfiles tipo de CE.	18
Figura 3.7. Caudal del río en Tortosa , régimen de riego en el delta y posición de la interfaz en el río (PR1_1) y el el acuífero superficial (Pz1).....	19
Figura 4.1. Montaje realizado para sujetar los sensores.	22
Figura 4.2. Niveles manuales correspondientes a la primera línea.....	23
Figura 4.3. Niveles manuales correspondientes a la segunda línea.	24
Figura 4.4. Niveles manuales correspondientes a la tercera línea.....	24
Figura 4.5. Niveles manuales medidos en el río y en los piezómetros más cercanos, para las líneas 1 (arriba) y 3 (abajo). Se presenta también posición de la interfaz en el río y en los piezómetros así como el caudal mensual del río.	26
Figura 4.6. Registros en continuo de niveles para todos los puntos sin corrección de densidad.	28
Figura 4.7. Instrumentación de los puntos de control para la determinación de la posición de la interfaz. Donde A es el dispositivo situado en la fase de mayor densidad y B es el situado en la de menor.....	29
Figura 4.8. Variables que intervienen en el cálculo de la posición de la interfaz mediante medidas en continuo de presión a dos profundidades conocidas.	30

Figura 4.9. Evolución del nivel freático y de la posición de la interfaz en el piezómetro Pz11, con dos perfiles verticales de CE (las marcas muestran la posición de los sensores).	32
Figura 4.10. Posición de la interfaz en el medio poroso y en el interior de los piezómetros (Rushton, 1980).	33
Figura 4.11. Posición de la interfaz en el piezómetro Pz9.	34
Figura 4.12. Oscilación diaria en el río Ebro como consecuencia del régimen mareal.	35
Figura 4.13. Régimen mareal registrado en Barcelona (Puertos del Estado).	35
Figura 4.14. Resultados de las mediciones en continuo registradas en la línea 3 y posición estimada de la interfaz en el acuífero.	36
Figura 5.1. Muestreo mediante bomba a dos profundidades específicas.	37
Figura 5.2. Errores en el balance iónico para las campañas 3ª y 4ª.	39
Figura 5.3. Diagrama de Piper (4ª campaña).	40
Figura 5.4. Diagrama de Schöeller-Berkaloff (4ª campaña).	41
Figura 5.5. Diagrama de Schöeller-Berkaloff (5ª campaña).	42
Figura 5.6. Diagrama de Schöeller-Berkaloff (6ª campaña).	42
Figura 5.7. Diagrama de Stiff para las aguas superiores (4ª campaña).	43
Figura 5.8. Diagrama de Stiff para las aguas inferiores (4ª campaña).	43
Figura 5.9. Diagrama de correlación $r_{Na/rCl}$	45
Figura 5.10. Diagrama de correlación $r_{SO4/rCl}$ vs. $Cl(mg/l)$ (4ª campaña).	47
Figura 5.11. Diagrama de correlación $r_{HCO_3/rCl}$ vs. $Cl(mg/l)$ (4ª campaña).	48
Figura 5.12. Representación de la relación $r_{Cl/rBr}$ vs. $Cl(mg/l)$ para la 4ª campaña (14/12/2009).	49
Figura 5.13. Diagrama de Piper mostrando líneas de mezcla (4ª campaña).	50
Figura 5.14. Diagrama de Schöeller-Berkaloff para las muestras superiores, identificando posibles procesos (4ª campaña).	51
Figura 5.15. Diagrama de Schöeller-Berkaloff para las muestras inferiores, identificando posibles procesos (4ª campaña).	52
Figura 5.16. Diagrama de predominancia para el sulfato (T: 25 °C).	53
Figura 5.17. Intensidad y dirección del viento (Agosto 2009/Agosto 2010) para la isla de Buda (Ruralcat, 2010).	57
Figura 6.1. Distribución espacial de δD y $\delta^{18}O$ (2ª campaña).	60
Figura 6.2. Composición isotópica de las muestras y la línea de mezcla río-mar.	60
Figura 6.3. Relación δD vs concentración de cloruro (mg/l) (2ª y 4ª campañas).	61

Figura 6.4. Relación $\delta^{18}\text{O}$ vs concentración de cloruro (mg/l) (2ª y 4ª campañas).	61
Figura 6.5. Representación de la composición isotópica de las muestras recogidas correspondientes a la 4ª campaña.	62
Figura 6.6. Valores de tritio (UT) para las muestras superiores (4ª campaña).	65
Figura 6.7. Valores de tritio (UT) para las muestras inferiores (4ª campaña).	65
Figura 6.8. Valores de tritio registrado en los piezómetros, canal, río Ebro y mar.	66
Figura 6.9. Posibles modelos de flujo para el Tritio.	67
Figura 8.1. Distribución de las facies durante el periodo de drenaje.	74
Figura 8.2. Distribución de las facies durante el periodo de irrigación.	75
Figura 9.1. Instalación de piezómetros puntuales a distintas profundidades.	77

Índice de tablas

Tabla 2.1. Descripción de los sensores físico-químicos.	5
Tabla 2.2. Resultados de los diferentes parámetros físico-químicos registrados en las diferentes campañas.....	7
Tabla 2.3. Datos de CE y densidad (5ª Campaña).....	8
Tabla 3.1. Distribución de los perfiles verticales de CE en las diferentes campañas...	10
Tabla 3.2. CE (mS/cm) para las aguas situadas por encima y por debajo de la interfaz para la 3ª y 4ª campañas.	17
Tabla 4.1. Ubicación de los sensores durante todo el periodo de monitorización.....	21
Tabla 4.2. Niveles medidos manualmente durante todas las campañas.	22
Tabla 5.1. Error de balance correspondiente a la 3ª y 4ª campañas.	38
Tabla 5.2. Concentraciones de cloruros y sodio (meq/l) y relación rNa/rCl.	45
Tabla 5.3. Valores para la relación iónica rSO ₄ /rCl.....	46
Tabla 5.4. Valores de rCl/rHCO ₃ y Cl (mg/l) para las muestras de la 4ª campaña.....	47
Tabla 5.5. Valores utilizados para la realización de la relación iónica rCl/rBr.	49
Tabla 6.1. Puntos de muestreo para los isótopos estables del agua.....	58
Tabla 6.2. Valores de δ ¹⁸ O y δD obtenidos.	59
Tabla 6.3. Diferencia de la composición isotópica y distancia al río Ebro.....	62
Tabla 6.4. Puntos de muestreo para análisis de tritio (4ª campaña).....	63
Tabla 6.5. Resultados de las analíticas de tritio (4ª campaña).	64
Tabla 8.1. Facies identificadas en el acuífero superficial.....	73

1. Introducción

1.1 Antecedentes

Este proyecto es la continuación del estudio “Diseño y acondicionamiento de una red de control de variables ambientales para controlar la incidencia de la lengua salina de la desembocadura del río Ebro en el acuífero superficial del delta” número de expediente “138/08-SNS”. Durante los trabajos realizados en el citado estudio se estableció una red de control ambiental, finalizando el estudio con la obtención de los primeros datos preliminares.

La red de control implementada en dicho estudio consta de 11 piezómetros totalmente ranurados de 10 metros de profundidad, además de la instalación de un punto de medición en el río, en las cercanías de la explotación agrícola de “Mitjorn”. Los puntos de control se disponen en tres líneas perpendiculares al río como se observa en la Figura 1.1. A partir los resultados preliminares obtenidos se producirán variaciones en la estrategia de seguimiento, sobre todo a lo referente al método de muestreo de agua en los piezómetros, parámetros físico-químicos a analizar y a la instalación de los sensores automáticos.

El ciclo hídrico en la superficie del delta está totalmente controlado por los ciclos de irrigación y drenaje del cultivo de arroz. Dichos ciclos se controlan mediante un intrincado sistema de canales, los cuales inundan y drenan la totalidad de los campos (Figura 1.2).

El nivel freático es muy somero, siendo habitual encontrarlo a un metro bajo la superficie, en la zona de estudio. Las principales masas de agua superficial corresponden a espacios lacustres. La geología en el área de estudio comprende los materiales finos del “levée”, las arenas finas de la llanura deltaica y las marismas degradadas, todas las litologías presentan importantes cantidades de materia orgánica.

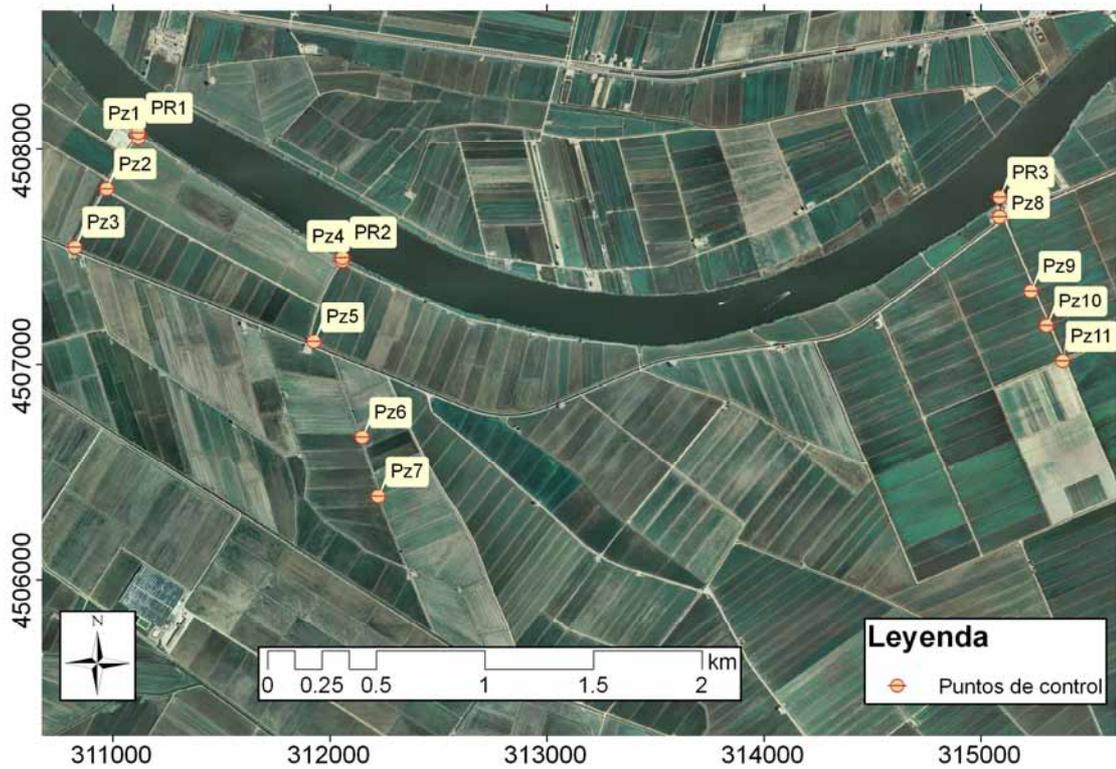


Figura 1.1. Situación de los puntos de control.

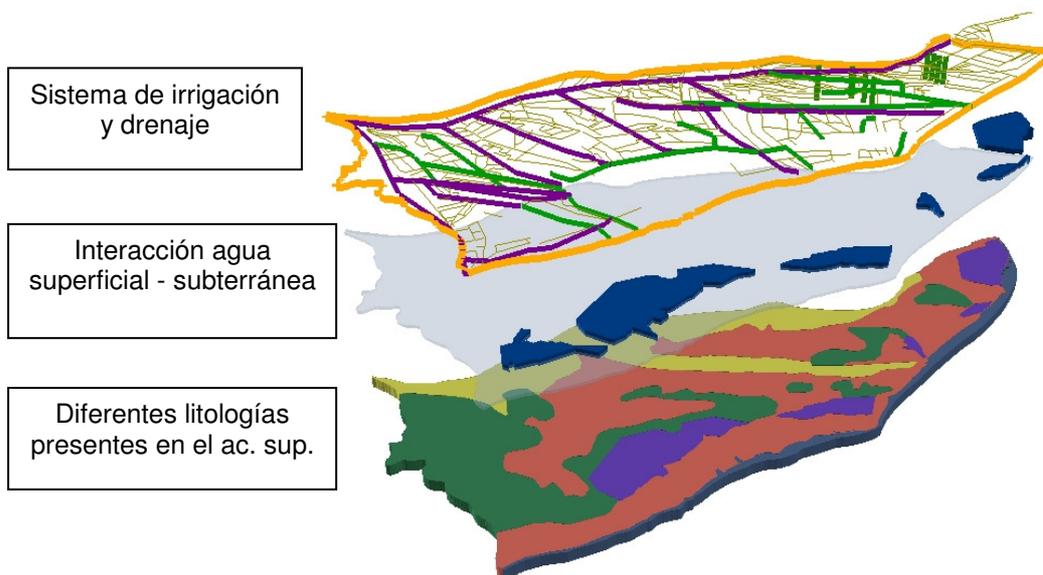


Figura 1.2. Sistema de canales de riego y drenaje, nivel freático y masas de agua superficial y geología del hemidelta derecho del río Ebro.

1.2 Objetivos

El presente estudio tiene como objetivo último la determinación de la incidencia de la lengua salina, provocada por la entrada de mar en el río Ebro, en el acuífero superficial del delta. Para ello se ha explotado la red de control ambiental existente, continuando y ampliando la recogida de datos.

1.3 Estructura del este documento

Para alcanzar los objetivos se han utilizado distintas técnicas de trabajo, desde el control de niveles, muestreo químico e isotópico, medida de parámetros in situ, realización de perfiles verticales de conductividad eléctrica (CE) en los piezómetros y en el río, toma de datos en continuo de nivel, CE, temperatura,...

Cada uno de los capítulos que configuran este informe, después de la introducción, presenta los trabajos realizados y los resultados obtenidos mediante cada una de estas técnicas de trabajo durante todas las campañas realizadas. Después se completa con una integración de todos los resultados y las conclusiones. Finalmente se apuntan unas recomendaciones de trabajos complementarios.

1.4 Metodología

Para caracterizar y establecer las relaciones entre las diferentes tipologías de agua presentes en el delta, se han utilizado un conjunto de herramientas que ofrecen simultáneamente varias visiones complementarias del problema (Figura 1.3).

Los métodos utilizados se recogen seguidamente:

- Medición del nivel freático del acuífero superior y el nivel del río Ebro
 - o Sondas de nivel manual
 - o Sondas de medición de nivel en continuo
- Determinación de los parámetros físico-químicos
 - o Electrodos para medición de temperatura, pH y Eh
 - o Densímetro para medición de densidad
- Determinación de la posición de la interfaz
 - o Sondas de medición en continuo
- Caracterización hidroquímica
 - o Análisis de elementos mayoritarios
- Caracterización isotópica
 - o Análisis de isótopos estables del agua
 - o Análisis de isótopos radioactivos (Tritio)

La explotación de la red de control se ha realizado mediante un total de 6 campañas de campo (Figura 1.4), distribuidas en las diferentes etapas del delta. Durante las

campañas se han realizado mediciones de nivel, parámetros físico-químicos, muestreo químico e isotópico y se han elaborado perfiles verticales de CE en los puntos de control del delta.



Figura 1.3. Material utilizado para la realización de las campañas de campo.

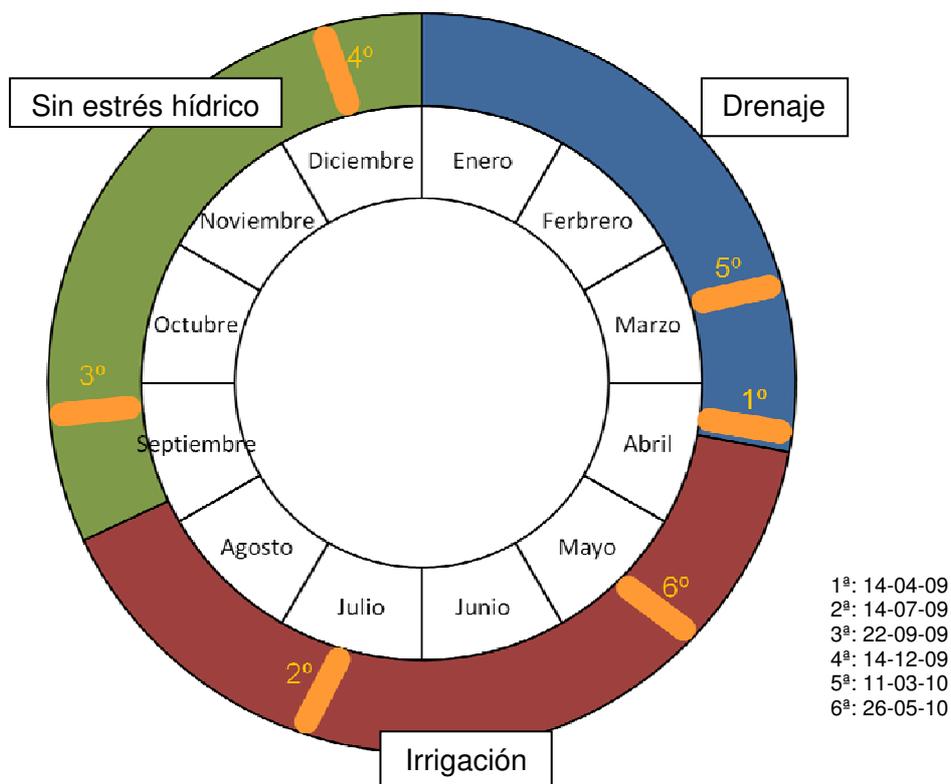


Figura 1.4. Distribución de las campañas de muestreo y diferentes etapas del ciclo hidrológico del delta del Ebro.

2. Parámetros físico-químicos

2.1 Descripción de las campañas

Para la realización de las mediciones de los diferentes parámetros físico-químicos (pH, Eh y CE) se utilizaron equipos de la casa Crison.

Para la medición tanto de pH como EH se ha utilizado el equipo Crison pH25, que consta de dos sondas. La descripción de las sondas se presenta en la Tabla 2.1. Las mediciones de temperatura y las de pH se realizan con un electrodo 50 50 de uso general con cuerpo de plástico. Las mediciones de Eh se realizan con un electrodo de platino Pt 50 55.

Tabla 2.1. Descripción de los sensores físico-químicos.

Sonda	Temperatura	pH	Eh	CE
Escala de medida	de 0 °C hasta 80 °C	de 0 hasta 14	± 1500 mV	5-50.000 μ S/cm
Resolución	de 0.1 °C entre -99.9 y 199.9 °C y 1 °C en el resto de la escala	0.01	1 mV	-
Error de medida	0.2 °C entre -99.9 y 199.9 °C y 1 °C en el resto de la escala	0.01	1 mV	-
Reproducibilidad	de 0.1 °C entre -99.9 y 199.9 °C y 1 °C en el resto de la escala	0.01	1 mV	-

Para las mediciones de conductividad eléctrica se utilizara un equipo Crison CM 35 y una célula de titanio 50 62.

Las mediciones de densidad se han realizado mediante un densímetro de precisión de la clase M50-100 (Figura 2.1) según norma 12791, sin termómetro. El densímetros esta calibrado a 20°C, siendo la escala de medida de 1 a 1.05 g/cm³.

Para la medición de los parámetros físico-químicos se han recogido las muestras de igual manera que para el muestreo químico, tal como se describe en el apartado 5.1 "Descripción de las campañas".

Durante las primeras tres campañas se renovaron los piezómetros, muestreando el agua resultante. Para las tres últimas campañas se realizaron muestreos puntuales a dos profundidades distintas dentro de cada piezómetro, con el propósito de muestrear

diferenciadamente las diferentes aguas estratificadas. Este punto se describe detalladamente en el apartado “Resultados de hidroquímica”.

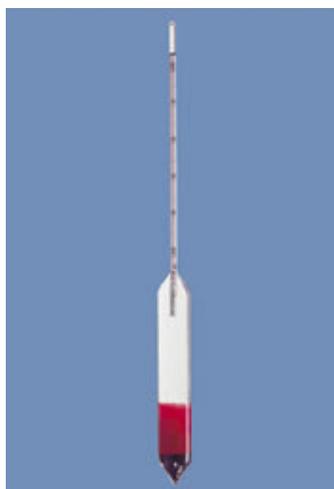


Figura 2.1. Densímetro M50-100.

2.2 Descripción de los resultados

Los resultados obtenidos durante todas las campañas se presentan recogidos en la Tabla 2.2. El promedio de la CE para las tres primeras campañas es de 27 mS/cm, mientras que para la cuarta campaña la capa superior presenta un valor promedio de 17 mS/cm y la inferior de 60 mS/cm. Dichos valores evidencian que durante la renovación del piezómetro se produce una mezcla de ambas capas. El valor promedio de pH es de 7.4, mostrando escasa variación durante las diferentes campañas o en diferentes piezómetros.

Durante la 5ª campaña se obtuvieron los datos de CE y densidad del agua de los piezómetros muestreados (Tabla 2.3), registrándose los valores máximos de CE de todo el estudio.

La correlación de los valores de densidad con la CE muestra una relación lineal, aumentando la densidad en función del contenido en solutos disueltos (Figura 2.2).

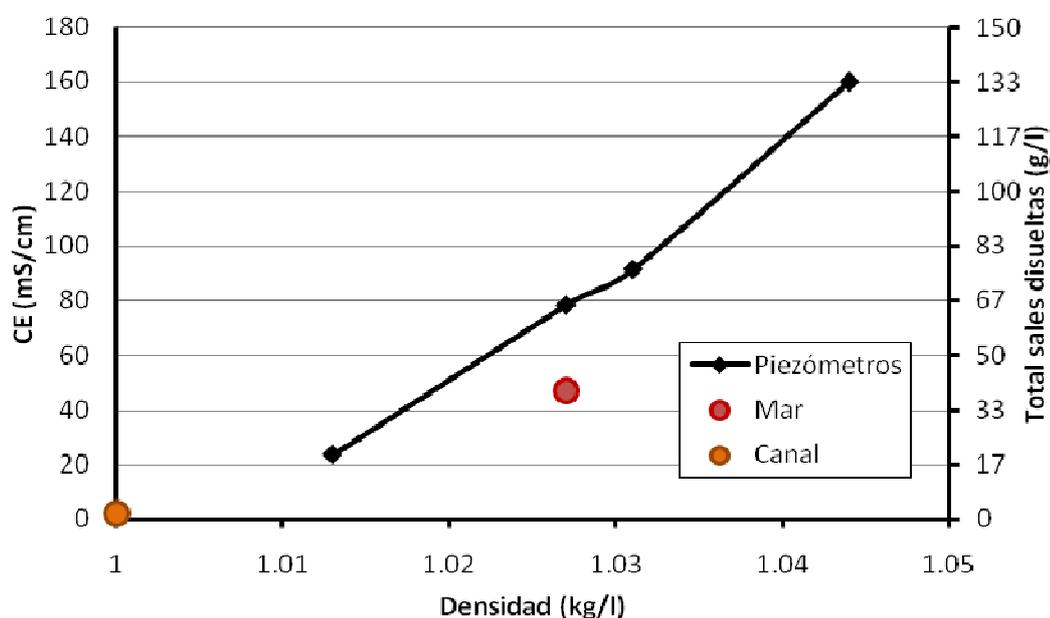
Tabla 2.2. Resultados de los diferentes parámetros físico-químicos registrados en las diferentes campañas.

Pz	1ª Cam. (14-04-09)			2ª Campaña (14-07-09)				3ª Campaña (22-09-09)			
	CE (mS/cm)	pH	T (°C)	CE (mS/cm)	pH	T (°C)	Eh (SHE) (mV)	CE (mS/cm)	pH	T (°C)	Eh (SHE) (mV)
1	18.5	7.8	16.6	9.3	7.6	20.0	160.1	26.3	7.6	20.0	77.1
2	9.7	7.5	15.0			21.0	210.1	31.5	7.3	20.0	67.1
3	9.6	7.6	15.3	8.4	7.4	22.0	52.1	21.6	7.4	24.0	45.1
4	14.1	7.3	16.3	12.8	7.4	19.0	94.1	69.5	7.3	19.9	85.2
5	24.0	7.6	16.0	5.0	7.6	19.0	25.1	16.0	7.5	20.6	40.7
6	9.7	7.3	14.9	16.6	7.2	20.0	66.1	41.9	7.3	19.2	82.7
7	39.2	8.0	15.5	85.5	7.5	20.0	74.1	110.9	7.5	20.8	85.5
8	1.7	7.5	15.6	1.2	7.4	20.0	-13.9	12.8	7.2	20.0	-16.9
9	5.3	7.9	14.5	22.5	7.3	19.0	60.1	62.5	7.4	20.0	46.1
10	2.9	7.1	14.8	28.9	7.1	21.0	75.1	39.6	7.1	20.0	60.1
11	30.0	7.5	14.5	43.3	6.9	20.0	86.1	41.2	6.9	20.0	84.1

Pz	4ª Campaña (14-12-09)				5ª Campaña (11-03-10)			6ª Campaña (26-05-10)		
	CE (mS/cm)	pH	T (°C)	Eh (SHE) (mV)	CE (mS/cm)	pH	Eh (SHE) (mV)	CE (mS/cm)	pH	Eh (SHE) (mV)
1t	9.4	7.6	15.8	78.2	22.1	7.7	17.5			
1b	16.0	7.6	15.7	53.3	23.6	7.7	-5.5			
2t	3.5	7.5	11.0	260.8						
2b	20.7	7.4	11.0	136.8						
3t	17.3	7.4		197.0						
3b	88.3	7.4		90.0						
4t	19.4	7.6	14.0							
4b	21.0	7.9	13.0							
5t	3.8	7.7	12.7	105.5						
5b	5.7	7.5	16.8	69.5						
6t	10.0	7.2			78.3	7.3	124.5			
6b	32.0	7.0			91.4	7.3	88.5			
7t	52.0	7.8	12.0	198.1						
7b	147.0	7.3	12.0	166.1						
8t	1.2	7.5	17.0	-45.7						
8b	12.0	7.5	17.0	-27.7						
9t	54.3	7.2	13.3	83.1				33.1	7.1	84.5
9b	116.0	7.1	13.3	82.1				89.1	7.2	87.5
10t	1.7	7.3	13.8	192.7						
10b	99.6	7.2	16.0	93.1						
11t	13.1	7.0	15.0	108.8	160.0	7.3	75.5	85.1	7.5	67.5
11b	97.6	7.1	15.0	92.8	155.0	7.4	82.5	111.0	7.2	61.5

Tabla 2.3. Datos de CE y densidad (5ª Campaña)

Punto de muestreo	CE (mS/cm)	Densidad (kg/l)
1t	22.1	1.009
1b	23.6	1.013
6t	78.3	1.027
6b	91.4	1.031
11t	160	1.044
11b	155	1.047
Mar	47.6	1.027

**Figura 2.2. Correlación entre los valores de CE y densidad.**

Como se observa en dicha figura, la CE del agua del mar es de 47,6 mS/cm correspondiendo a 39,6 g/l de sales disueltas. La muestra de canal presenta 1,2 g/l en sales disueltas y una CE de 1,3 mS/cm, tal como se muestra en las analíticas (Anejo 1).

2.3 Interpretación

Los datos de CE obtenidos muestran una clara diferenciación entre dos capas presentes en el acuífero superficial. La capa superior está compuesta por agua de irrigación (<5 mS/cm) o agua salobre (<20 mS/cm), producto de la mezcla con la capa inferior. La capa inferior presenta conductividades similares a las del agua del mar

(≈ 60 mS/cm) o mucho mayores (>80 mS/cm) correspondiente a salmueras. La densidad registrada también evidencia la existencia de salmueras, observándose densidades mayores a las del agua del mar en diferentes puntos. Los valores registrados en la 4ª campaña muestran Eh mayores para las aguas superiores, correspondiendo todos a valores normales para las aguas subterráneas. Aún así los valores de Eh no indican un ambiente reductor, aislado de la atmósfera, correspondiendo valores normales en aguas subterráneas (Figura 2.3) (Garrels y Christ, 1965).

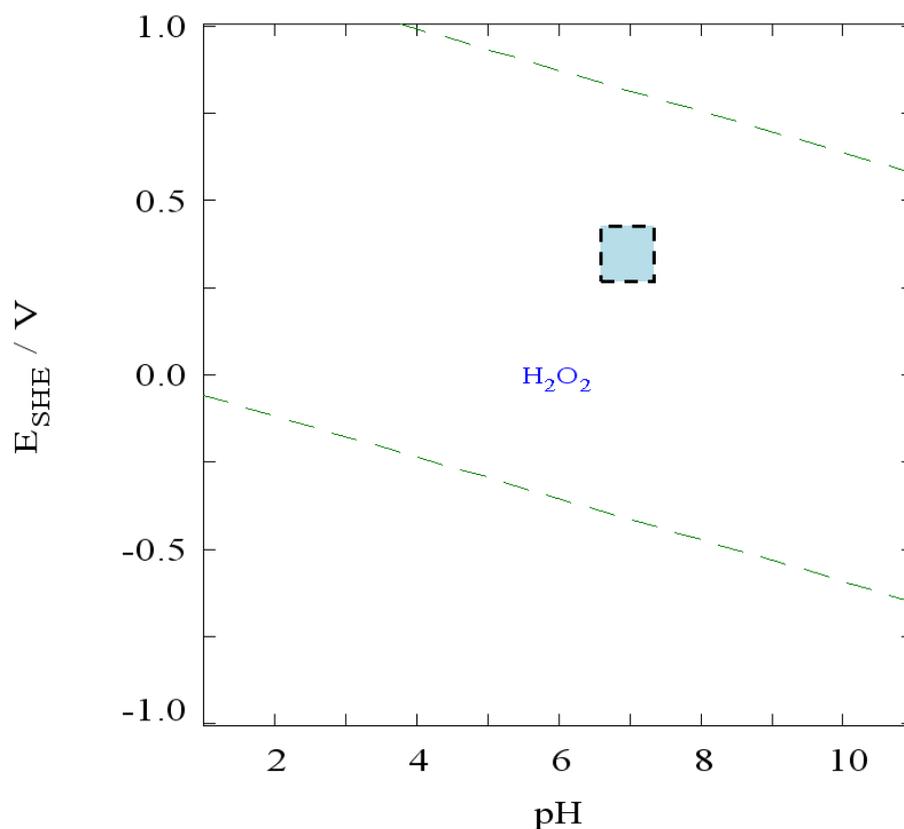


Figura 2.3. Situación de las muestras respecto a los valores de pH y Eh mínimos y máximos registrados en las tres últimas campañas.

3. Resultados de los perfiles verticales de CE

3.1 Descripción de las campañas

En muchos casos, la composición de las aguas subterráneas presenta variaciones en profundidad incluso a pequeña escala. El muestreo de varios metros de piezómetro ambiental puede evidenciar procesos de mezcla entre diferentes aguas (Appelo y Postma, 2007).

Los puntos de control utilizados para elaborar los perfiles verticales de CE han sido los 11 piezómetros de la red de control y 6 puntos en el río Ebro, frente a las líneas de control. Como resultado de todas las campañas de campo, se han obtenido más de 80 perfiles de CE (Tabla 3.1).

Tabla 3.1. Distribución de los perfiles verticales de CE en las diferentes campañas.

Punto de control	14/7/09	22/9/09	14/12/09	11/3/10	26/5/10
Pz1		√	√	√	√
Pz2		√	√	√	√
Pz3		√	√	√	√
Pz4	√	√	√	√	√
Pz5		√	√	√	√
Pz6		√	√	√	√
Pz7		√	√	√	√
Pz8	√	√	√	√	√
Pz9	√	√	√	√	√
Pz10		√	√	√	√
Pz11		√	√	√	√
PR1_1		√	√	√	√
PR1_2		√	√	√	√
PR2_1		√	√	√	√
PR2_2		√	√	√	√
PR3_1		√	√	√	√
PR3_2		√	√	√	√

Los piezómetros realizados para la red de control de variables ambientales, son en su totalidad piezómetros ambientales. Por lo tanto, la columna de agua presente en el piezómetro es equivalente a la existente en el acuífero, pudiendo realizarse perfiles verticales, de los cuales se obtiene la variación de CE y temperatura en profundidad.

Para realizar los perfiles verticales de CE se ha utilizado un sensor autónomo con almacenamiento de datos del tipo diver CTD, capaz de medir presión, temperatura y CE. Se ha utilizado una cinta métrica junto al diver para controlar la ubicación de cada medición, poniendo especial énfasis en el tramo donde el cambio de CE es más acentuado.

Para cada perfil se han realizado un promedio de 80 mediciones, variando en función de la profundidad del piezómetro y de la posición del nivel freático.

Cabe destacar que el valor máximo de medida de la CE de los sensores utilizados es de 80 mS/cm. Dicho valor es inferior a la CE en algunos de los tramos muestreados, donde se realizaron mediciones con equipo específico (Tabla 2.2).

3.2 Resultados

3.2.1 Perfiles en el río

Los perfiles obtenidos en el río Ebro presentan una marcada interfaz, situada a unos 2 metros de profundidad (-2 msnm) (Figura 3.1 y Figura 3.2).

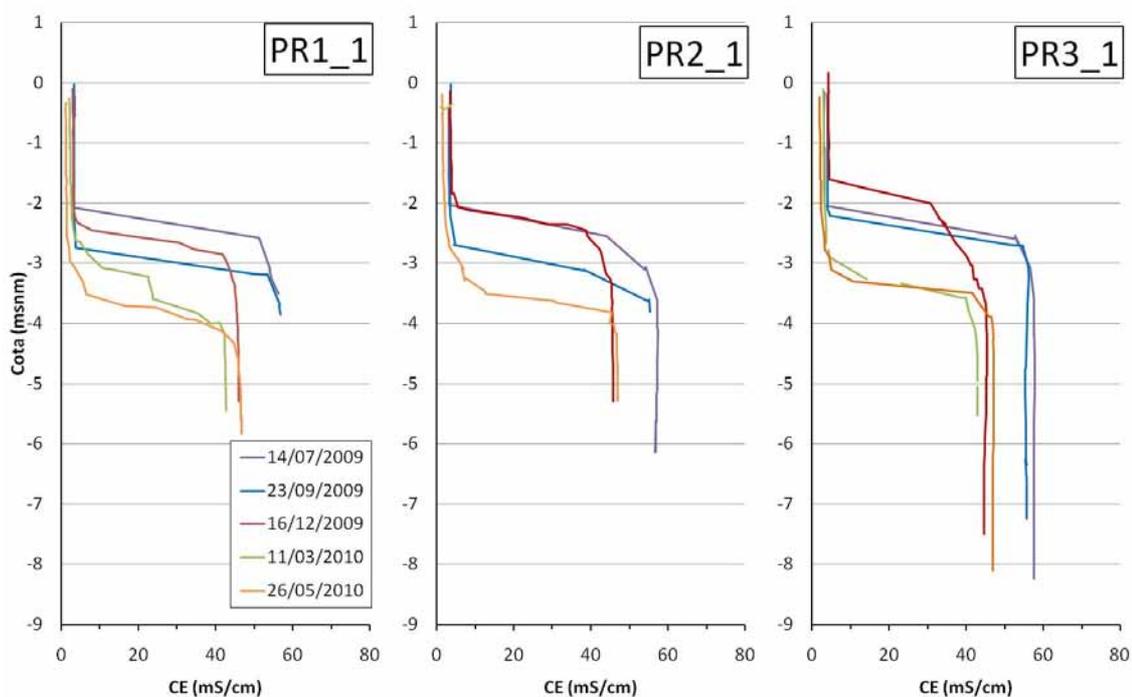


Figura 3.1. Perfiles verticales de CE en el río Ebro, próximos a la orilla.

La variación con el tiempo no es muy grande, y se corresponde con los cambios en el caudal del río. La interfaz separa el agua continental (<5 mS/cm) situada en la capa superior, del agua marina (~55 mS/cm) en la parte inferior. Los valores de conductividad de las dos facies varían muy poco, no observándose ningún proceso de mezcla. De este modo, la interfaz es siempre muy abrupta y su oscilación vertical a lo largo del año es del orden de 1,5 metros.

Respecto a la variación espacial, no se aprecia variación significativa entre los puntos de control situados en el centro del río (Figura 3.2) y los situados en las proximidades de la orilla (Figura 3.1). En cambio, se parecía que, para una misma fecha, la interfaz siempre está en una posición ligeramente más elevada en los puntos más cercanos al mar. Cabe recordar que los dos puntos PR1_* están aguas arriba, en frente de la línea 1 de piezómetros. Los puntos PR2_* están en frente de la línea 2 de piezómetros y los PR3_*, todavía más aguas abajo, en frente de la línea 3 de piezómetros.

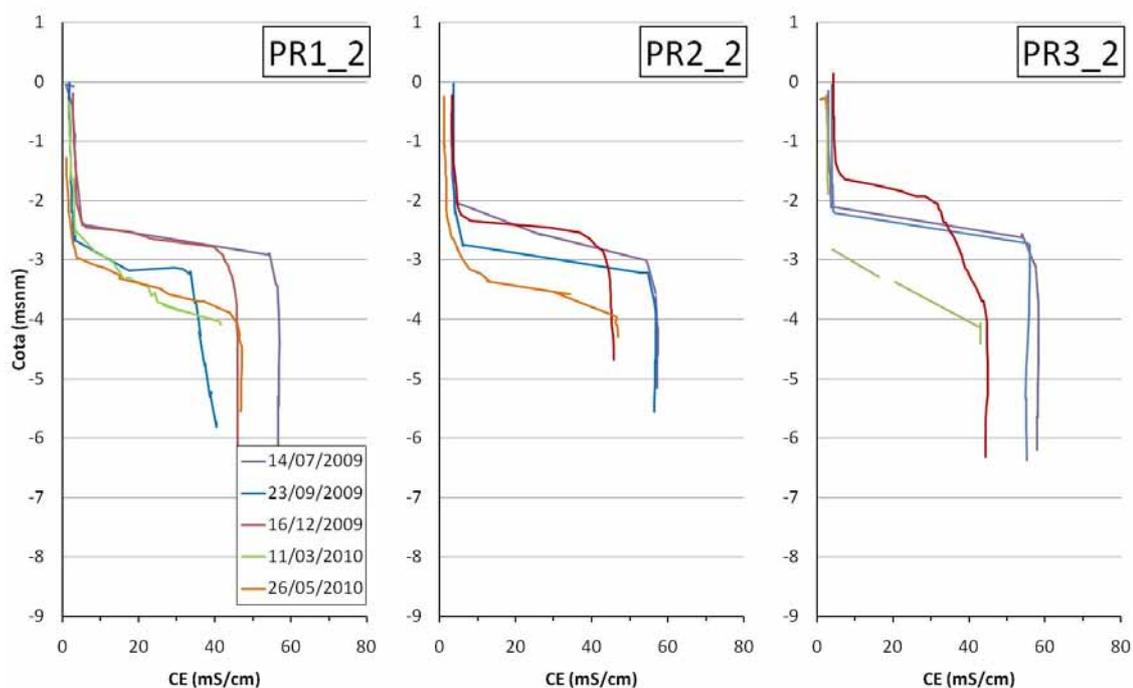


Figura 3.2. Perfiles verticales de CE en el centro del río Ebro.

3.2.2 Perfiles en los piezómetros

Aunque el comportamiento de los distintos piezómetros es heterogéneo, en general la distribución vertical de CE en los piezómetros muestra variaciones anuales muy importantes derivadas del ciclo riego y drenaje. En la Figura 3.3 se presentan los

perfiles correspondientes a línea 1, los cuales muestran una estratificación entre agua salobre (<20 mS/cm), dispuesta en la capa superior, y agua marina (40-60 mS/cm).

Los perfiles de línea 2 (Figura 3.4) presentan la misma estratificación que la línea 1, con dos capas formadas por agua salobre en la zona superior y agua marina en la inferior. Sin embargo, se observa una interfaz más difusa.

La línea 3 (Figura 3.5), aguas abajo, presenta la misma estratificación que las anteriores, pero además, con la presencia de una nueva capa inferior, con valores superiores a los 80 mS/cm (umbral máximo de medida). Mediante mediciones manuales, se han registrado valores de hasta 160 mS/cm en la capa más inferior (Tabla 2.2).

Las campañas de septiembre y diciembre de 2009 corresponden a dos estadios distintos y se puede considerar que representativos de dos situaciones diferentes (Tabla 3.2). Tomando los valores promedio de CE de cada uno de los dos estratos de agua, se observa que existe una marcada estratificación, evidenciada por una diferencia de 40 mS/cm de promedio entre ambas aguas, para las dos campañas.

Por otro lado, comparando la variación de CE en cada estrato, se observa que en la capa superior las diferencias son en general muy pequeñas con la excepción de los puntos Pz7 y Pz10, que tienen comportamientos extremos y opuestos.

En general, justo antes de iniciar el riego por inundación de los campos en el mes de Abril, es cuando el sistema está más salinizado. Si el perfil no está salinizado en toda su vertical (ocurre en algún piezómetro), la interfaz ocupa su posición más elevada a lo largo del año y, además, suele ser más abrupta, hay menos mezcla, puesto que a esta posición se ha llegado de forma paulatina.

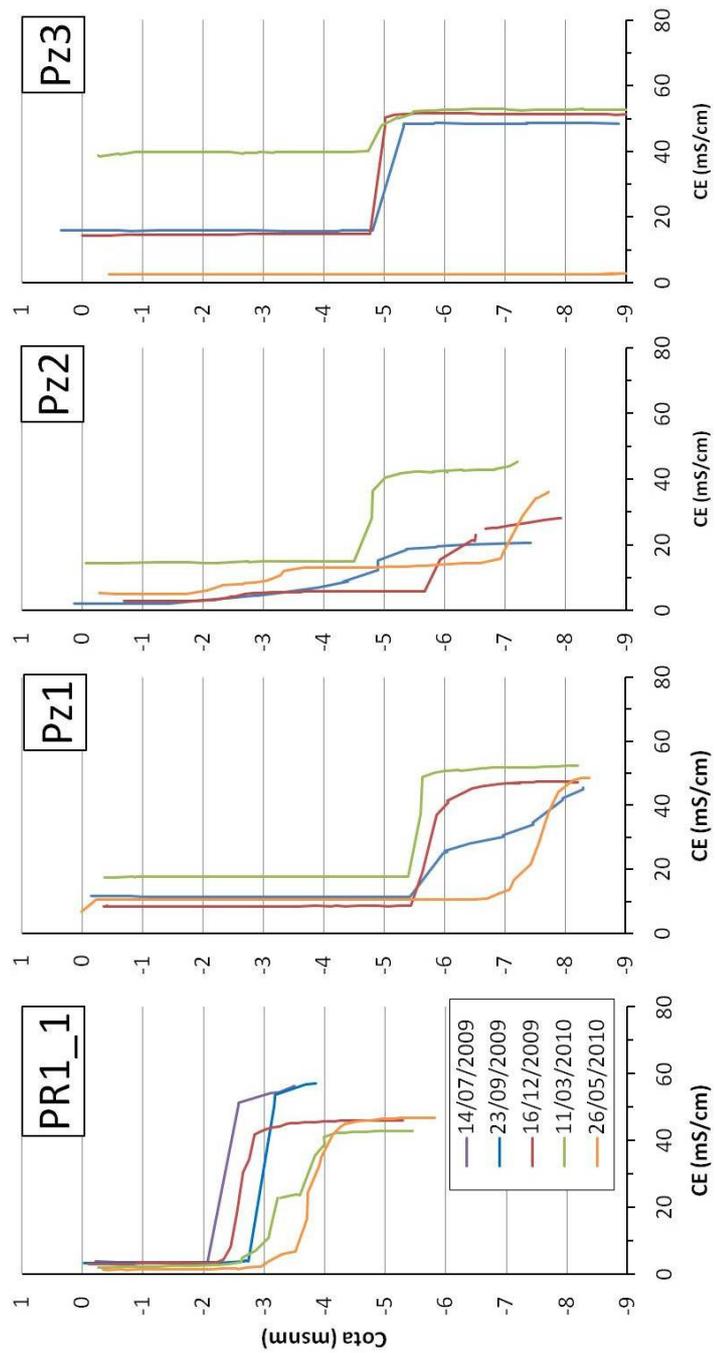


Figura 3.3. Perfiles verticales de CE en el río y piezómetros de la línea 1.

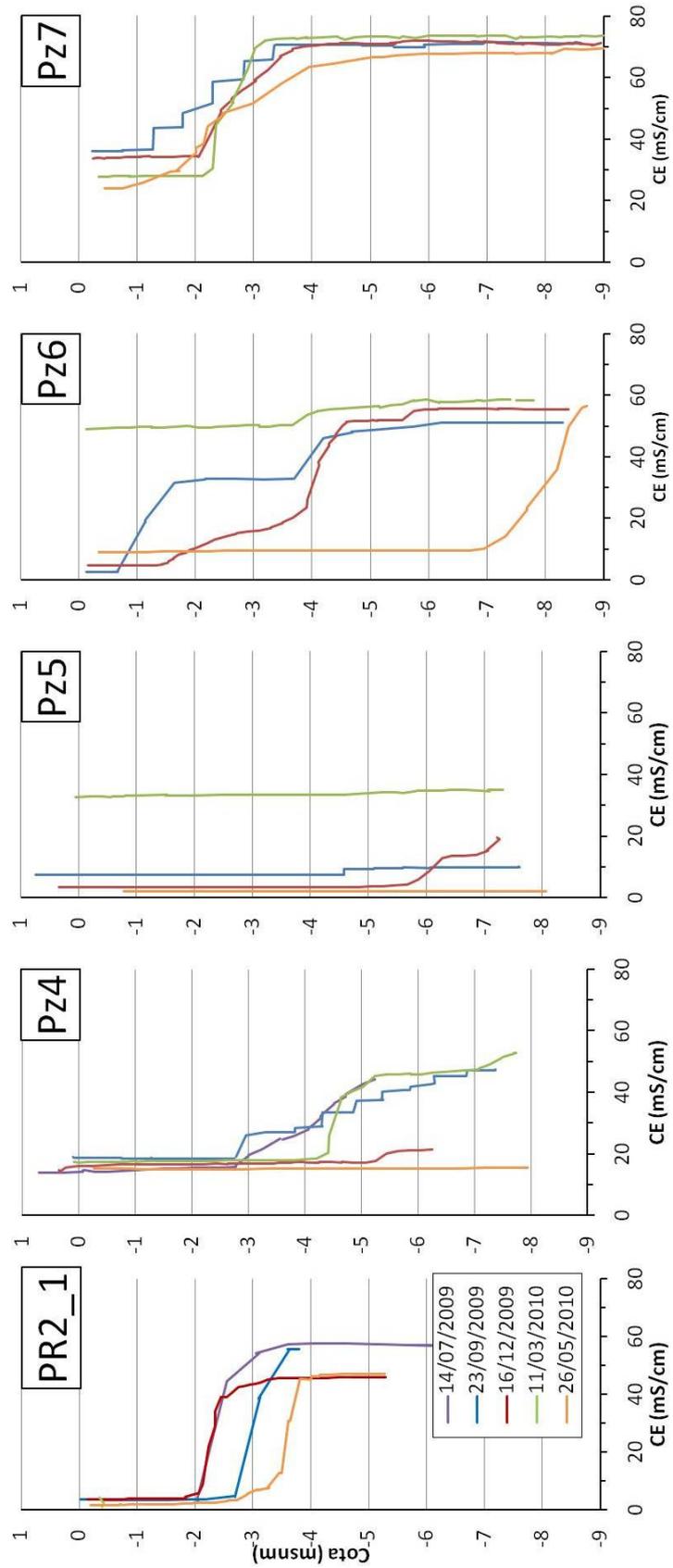


Figura 3.4. Perfiles verticales de CE en el río y piezómetros de la línea 2.

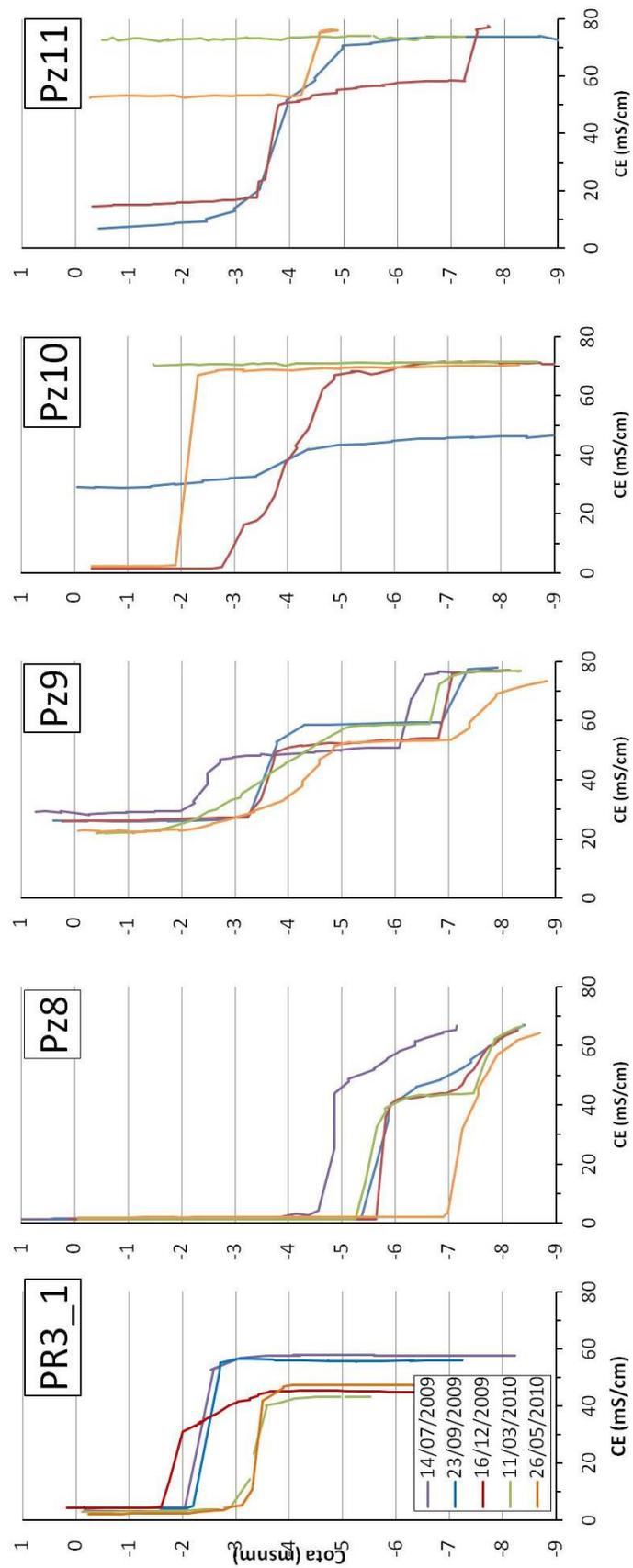


Figura 3.5. Perfiles verticales de CE en el río y piezómetros de la línea 3.

Tabla 3.2. CE (mS/cm) para las aguas situadas por encima y por debajo de la interfaz para la 3ª y 4ª campañas.

	3ª Campaña (23/09/09)		4ª Campaña (10/12/09)		Diferencia	
	CE superior	CE inferior	CE superior	CE inferior	CE superior	CE inferior
Pz1	12	45	8,5	47	3,5	-2
Pz2	1,8	20	2,8	30	-1	-10
Pz3	15,8	48,5	14,6	51	1,2	-2,5
Pz4	18,7	45	14	21	4,7	24
Pz5	7,5	9,6	3,5	19	4	-9,4
Pz6	2,6	51	4,8	55	-2,2	-4
Pz7	3,6	71	34	71	-30,4	0
Pz8	1,26	67	1,2	58	0,06	9
Pz9	26	77,8	26	76	0	1,8
Pz10	29	46,5	1,6	71	27,4	-24,5
Pz11	6,6	74	14,3	75	-7,7	-1
PR1_1	3	56,5	2,8	46	0,2	10,5
PR1_2	2	40	2,8	46	-0,8	-6
PR2_1	3,7	55,4	3,5	45	0,2	10,4
PR2_2	3,7	56,7	3,5	45	0,2	11,7
PR3_1	4	55,2	4,3	45	-0,3	10,2
PR3_2	4	55,2	4,3	45	-0,3	10,2

3.3 Interpretación de los perfiles

En la totalidad de las campañas se ha observado la existencia de tres tipologías diferenciadas de aguas, presentes tanto en los piezómetros como en el río Ebro. Estas aguas se encuentran separadas por una interfaz, caracterizada por el cambio brusco en la CE del orden de 40 mS/cm de diferencia. Esta fuerte estratificación en los piezómetros se produce debido a la diferencia de densidad y al aporte continuado durante gran parte del año de agua dulce, debido al ciclo de riego y drenaje de los campos de cultivo.

Todos los piezómetros de la línea 1 se sitúan en el "levée", formado por materiales de baja conductividad hidráulica, pudiendo causar una menor movilidad del agua, generando una interfaz más marcada que en los perfiles de la línea 2, durante todo el año. Así mismo, la presencia de una zona de mezcla de varios metros en la línea 2 parece no tener incidencia en la composición química e isotópica, como se verá más adelante.

La línea 3 se encuentra distanciada de las líneas 1 y 2, las cuales están relativamente próximas.

De las observaciones realizadas durante las campañas se han podido establecer tres comportamientos característicos o perfiles tipo (Figura 3.6), uno para el río y dos para los piezómetros, que se repiten en todas las campañas realizadas. El perfil tipo I hace referencia a los perfiles realizados en el río Ebro, presentando la parte superior CE de 4 mS/cm (agua dulce continental) y de 45 mS/cm (agua marina) en la parte inferior. La interfaz se sitúa en los -2 msnm. El perfil tipo I se caracteriza por mantener los valores de CE y la posición de la interfaz poco variable durante las sucesivas campañas, correspondiendo al río Ebro.

El perfil tipo II se corresponde con valores de CE bajos en la parte superior (≈ 5 mS/cm), muy similares a la del agua dulce continental de los canales. La interfaz se sitúa en aproximadamente -4 msnm, donde se produce un cambio brusco hasta situarse en CE cercanas o superiores a la del mar (45 mS/cm). El perfil tipo III se caracteriza por una alta CE, en comparación con los otros perfiles tipo. La zona superior del perfil tipo III tiene una CE de aproximadamente 20 mS/cm, aumentando hasta valores de más de 70 mS/cm. La interfaz es bastante variable, situándose en aproximadamente -5.5 msnm.

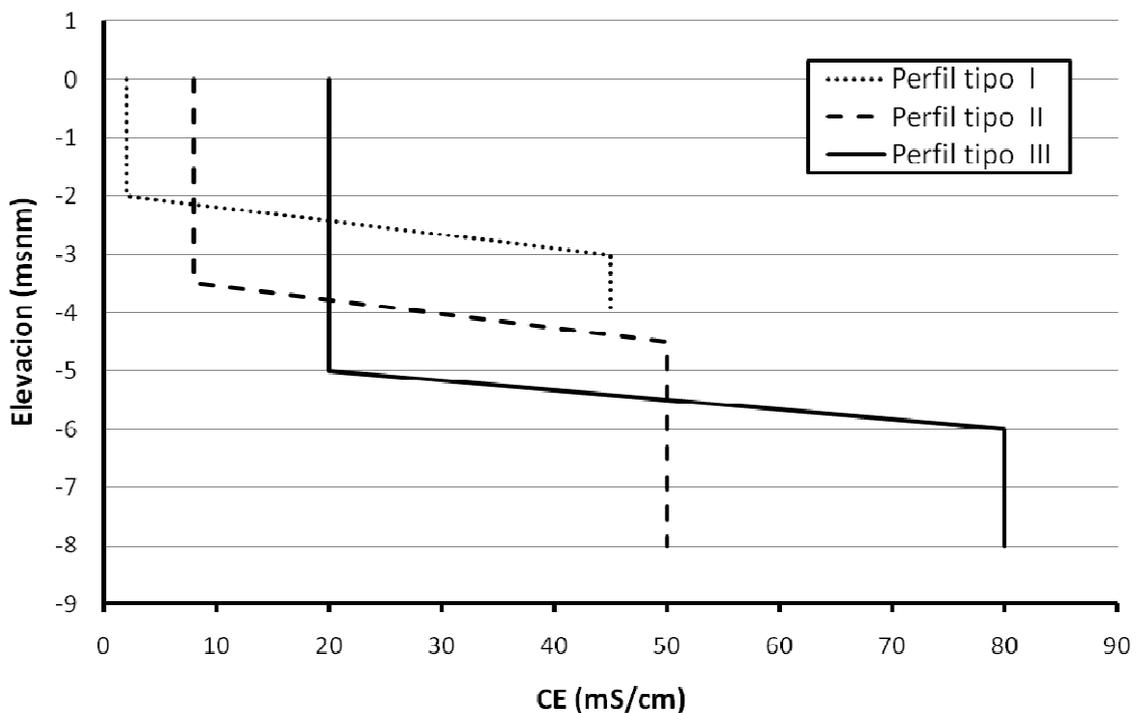


Figura 3.6. Perfiles tipo de CE.

El perfil tipo II también incluye los perfiles con salmuera (>80 mS/cm) en la parte inferior. Así mismo, se han observado combinaciones del perfil tipo I y II, formando dos escalones o interfases, debido al ciclo de riego y drenaje. El ejemplo más representativo es el piezómetro Pz9, donde se observa un aumento de la CE en profundidad, formando dos escalones. En dicho piezómetro el agua se encuentra estratificada como sigue (de arriba abajo): agua salobre (<20 mS/cm), agua marina (50-60 mS/cm), salmuera (>80 mS/cm).

Respecto a la estratificación en el río Ebro, se observa que al disminuir el caudal se produce un ascenso de la interfaz, disminuyendo la presencia de agua dulce. Este fenómeno ha sido estudiado con anterioridad (Movellán, 2003), estableciéndose que uno de los principales factores que controlan la posición de la lengua salina en el río Ebro es el caudal que circula por el mismo. La moderada variabilidad de la posición de la interfaz en el río Ebro ($\sim 1,5$ m), puede estar motivada por el control sobre el caudal del río, establecido por las presas aguas arriba. Ello facilita la permanencia en la zona de estudio, de agua marina en el río durante gran parte del año.

La Figura 3.7 muestra los caudales mensuales (máximo, medio y mínimo) registrados en la estación de aforo de Tortosa.

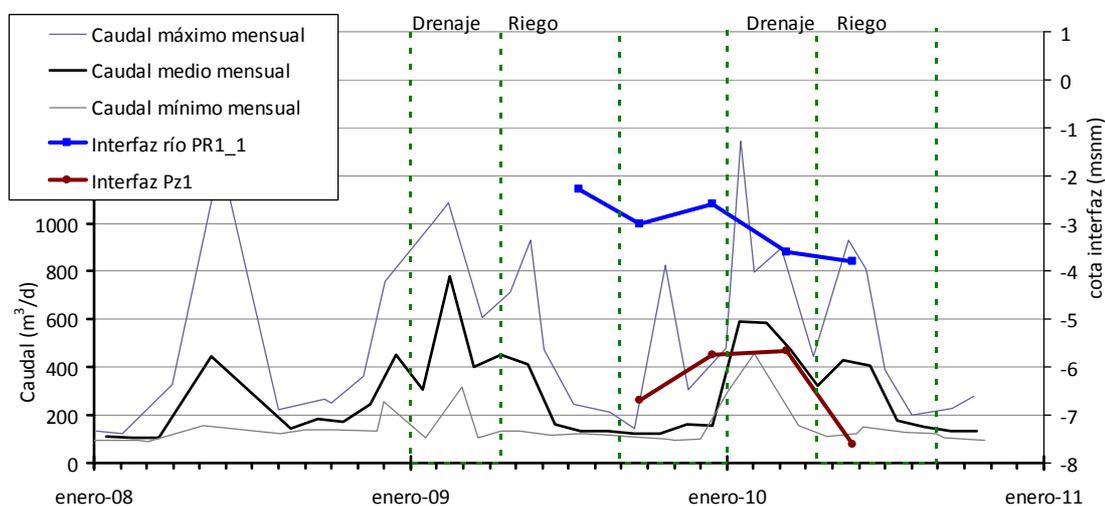


Figura 3.7. Caudal del río en Tortosa , régimen de riego en el delta y posición de la interfaz en el río (PR1_1) y el el acuífero superficial (Pz1).

En general el caudal es más importante entre noviembre y julio y decrece considerablemente entre julio y octubre. Así mismo se muestra la evolución de interfaz en el río Ebro (PR1_1) a lo largo de 5 campañas de muestreo. Se observa un descenso de la interfaz, como consecuencia de un aumento significativo del caudal.

Por otro lado, el mismo gráfico muestra la posición de la interfaz en un piezómetro cercano al río (Pz1). En el piezómetro la interfaz siempre está mucho más profunda que en el río y su evolución a lo largo del tiempo responde directamente al régimen de cultivo de los campos de arroz. Al final de la época de riego, después de varios meses de aporte de agua dulce, la interfaz está profunda, cuando se para el aporte de agua empieza el ascenso que es máximo durante el periodo de drenaje. Cuando vuelve a empezar el riego, el descenso vuelve a ser significativo. Esta evolución es ajena a la evolución de la interfaz en el río.

4. Resultados de los niveles piezométricos

4.1 Descripción de las campañas y obtención de datos

Las campañas de medición de niveles se han llevado a cabo mediante una sonda de nivel para mediciones manuales, y sensores automáticos del tipo diver CTD y CERA, para la medición de nivel, CE (sólo en los del tipo CTD) y temperatura en continuo. Además se utiliza un sensor tipo Baro para medir la presión atmosférica y realizar compensación de presión.

El número y posición de los sensores automáticos se modificó después de la 4ª campaña, en base a los resultados que se iban obteniendo. A partir de la 4ª campaña (14-15/12/2009) la nueva distribución permite la medición de nivel, posición de la interfaz y demás variables ambientales en dos tipologías de aguas presentes en los piezómetros, debido a la alta estratificación. Además, se incorporó un nuevo sensor tipo CERA, sumando un total de cinco. Todas estas modificaciones se recogen en la Tabla 4.1, donde se resumen las ubicaciones y profundidades de los cinco sensores automáticos instalados, a los que hay que sumar un sexto sensor tipo BARO.

Tabla 4.1. Ubicación de los sensores durante todo el periodo de monitorización.

Punto	Código	Prof. (m)	ID	Tipo ^x	SN	Inicio datos		Final datos	
						Fecha	Camp.	Fecha	Camp.
			6	BARO	D8778	13/07/09	2ª	26/05/10	6ª
Pz4	Pz4	6,04	1	CTD	86888	13/07/09	2ª	15/12/09	4ª
Pz7	Pz7	6,07	2	CTD	87181	14/07/09	2ª	15/12/09	4ª
Pz9	Pz9	5,98	4	CTD	86960	13/07/09	2ª	15/12/09	4ª
Río	PR3	0,6	3	CTD	87164	14/07/09	2ª	11/03/10	5ª
Pz9	Pz9b	6	4	CTD	86960	15/12/09	4ª	25/05/10	6ª
Pz9	Pz9t	2	5	Cera	C3303	15/12/09	4ª	10/03/10	5ª
Pz11	Pz11b	8	1	CTD	86888	15/12/09	4ª	11/03/10	5ª *
Pz11	Pz11t	2	2	CTD	87181	15/12/09	4ª	26/05/10	6ª
Pz9	Pz9t	2	3	CTD	87164	11/03/10	5ª	26/05/10	6ª
Río	PR3	0,6	5	Cera	C3303	11/03/10	5ª	26/05/10	5ª **

^x CTD: Conductividad eléctrica, temperatura y presión. Cera: Temperatura y presión. BARO: Presión atmosférica para compensación.

* Debido a la colmatación del piezómetro, en la 6ª campaña no se puede recuperar el sensor.

** El sensor Cera instalado en el río en la 5ª campaña se perdió, sólo hay datos del río hasta la penúltima campaña (5ª).

Los sensores fueron sujetos en la arqueta del piezómetro mediante un cable de acero inoxidable, sujetacables y grilletes como se puede observar en la Figura 4.1, correspondiente al piezómetro Pz11.



Figura 4.1. Montaje realizado para sujetar los sensores.

4.2 Resultados de los niveles manuales

4.2.1 Datos obtenidos

Los niveles medidos manualmente durante las campañas muestran una oscilación uniforme en casi la totalidad de los puntos. La Figura 4.2, Figura 4.3 y Figura 4.4 presentan los resultados obtenidos durante todas las campañas (Tabla 4.2). No siempre ha sido posible realizar la medición del río, debido a inundaciones puntuales del punto de control, sobre todo en los correspondientes a las líneas 2 y 3.

Tabla 4.2. Niveles medidos manualmente durante todas las campañas.

Punto	Nivel (msnm)
-------	--------------

Pz	14/04/2009	14/07/2009	22/09/2009	14/12/2009	11/03/2010	26/05/2010
Pz1	0.026	0.356	0.256	0.316	-0.064	0.216
Pz2	0.373	0.483	0.593	-0.357	0.213	0.543
Pz3	0.007	0.367	0.357	0.357	0.027	0.457
Pz4	0.221	0.261	0.271	0.471	0.291	0.271
Pz5	0.451	0.851	0.751	0.781	0.351	0.861
Pz6	-0.261	0.399	0.349	0.419	0.039	0.329
Pz7	0.054	0.274	0.204	0.264	-0.066	0.254
Pz8	0.214	0.474	0.484	0.564	0.364	0.544
Pz9	0.213	0.563	0.393	0.293	-0.217	0.553
Pz10	-0.253	0.417	0.217	0.167	-1.153	0.177
Pz11	-0.093	0.247	0.107	0.077	-1.283	-0.013
Río en PR1		-0.118	-0.018	0.062	0.042	-0.238
Río en PR2			0.052	0.482		
Río en PR3	0.395		0.455	0.545		

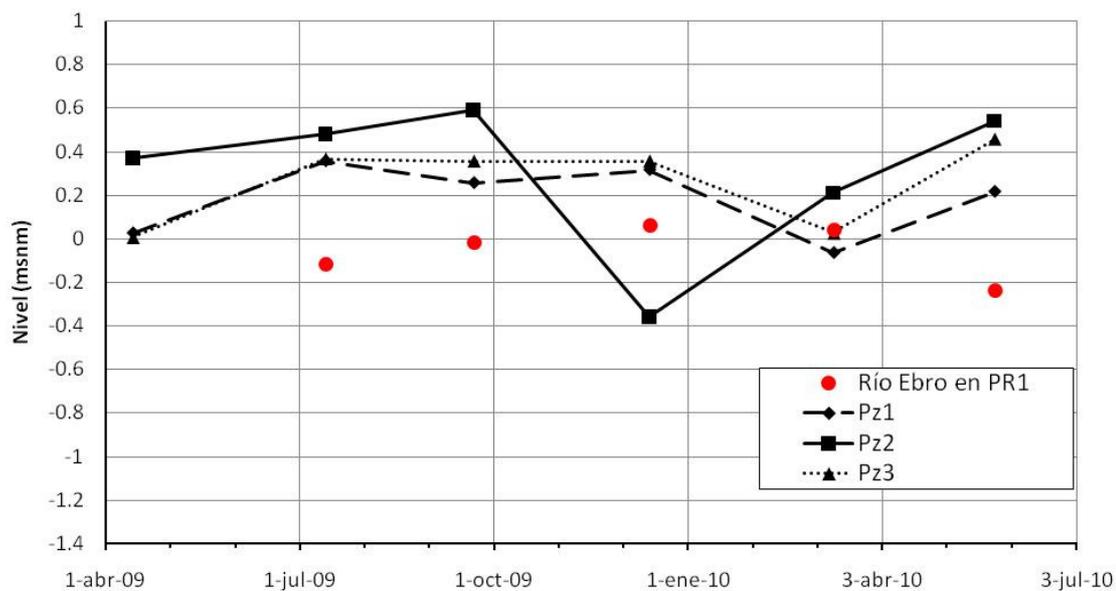


Figura 4.2. Niveles manuales correspondientes a la primera línea.

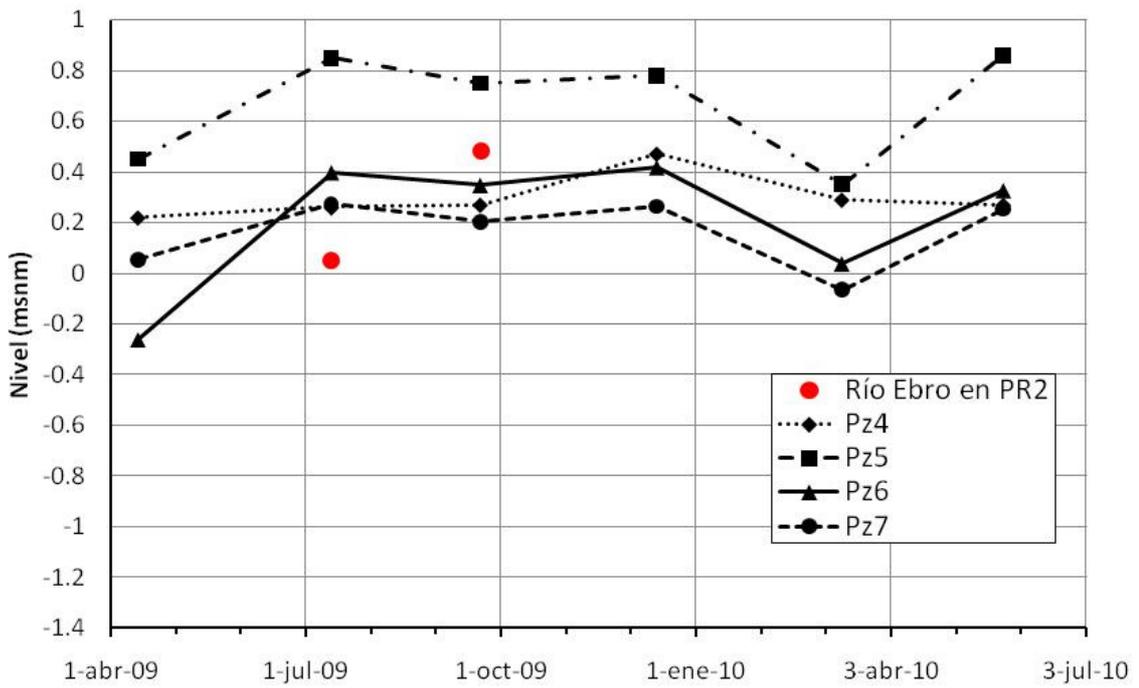


Figura 4.3. Niveles manuales correspondientes a la segunda línea.

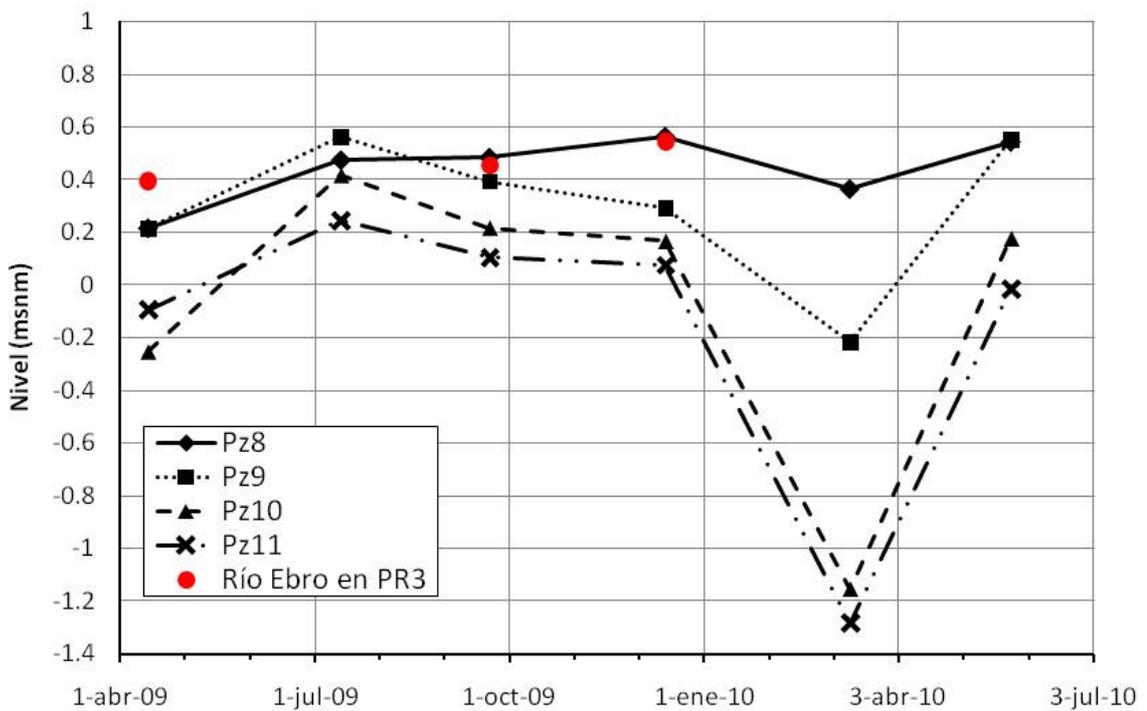


Figura 4.4. Niveles manuales correspondientes a la tercera línea.

4.2.2 Interpretación de los datos manuales

Con la observación de los niveles manuales se pueden identificar las diferentes tendencias y anomalías puntuales. En la línea 1 de piezómetros (Figura 4.2) los niveles de los piezómetros Pz1 (al lado del río) y Pz3 (al lado del canal de la Dreta) son muy similares y oscilan poco. En cambio, en el piezómetro Pz2 se observan oscilaciones estacionales. Puede que la presencia del canal amortigüe las oscilaciones del nivel freático. En las líneas 2 (Figura 4.3) y 3 (Figura 4.4) los piezómetros ubicados al lado del canal (Pz5 y Pz8, respectivamente), también muestran un comportamiento similar.

En la línea 3 pueden observarse descensos importantes en los piezómetros Pz10 y Pz11, alcanzando valores menores a -1 msnm, hacia al final de la estación de drenaje. Dicha descenso, aunque en menor medida, también puede ser observada en el piezómetro Pz9. Estos descensos fuertes en este sector pueden ser favorecidos por la presencia de la estación de bombeo próxima a Pz11.

La tendencia general de los niveles en el área de estudio es que de Abril a mediados de Julio, temporada de riego, el nivel sube. Después se mantiene y empieza a bajar en Octubre cuando después de la cosecha, cuando el aporte de agua es escaso o nulo. A partir de Octubre se observa un descenso suave generalizado, que a partir de Enero, es más pronunciado. Este comportamiento de oscilaciones anuales de más de 1 metro no se registra (o en mucha menor medida) en los 3 piezómetros más cercanos al río o al canal de la Dreta.

El nivel promedio del río Ebro se ajusta en la mayoría de campañas con el nivel promedio del acuífero, medido en los piezómetros más cercanos al río (Figura 4.5). Las diferencias de nivel entre el río Ebro y el acuífero son poca entidad, por lo que los flujos horizontales de intercambio entre el río y el acuífero serían poco relevantes. De este modo, parece poco probable que se generen caudales significativos entre el río y el acuífero superficial debido al bajo gradiente y la poca conductividad hidráulica del "levée".

La observación detallada de la evolución de niveles y de posición de interfaz en el río y los piezómetros permite deducir que la dinámica del río y del acuífero son independientes. Mientras que en el río dependen del caudal instantáneo del río, en los piezómetros (y en el acuífero), responde al régimen de riego y de drenaje de los cultivos.

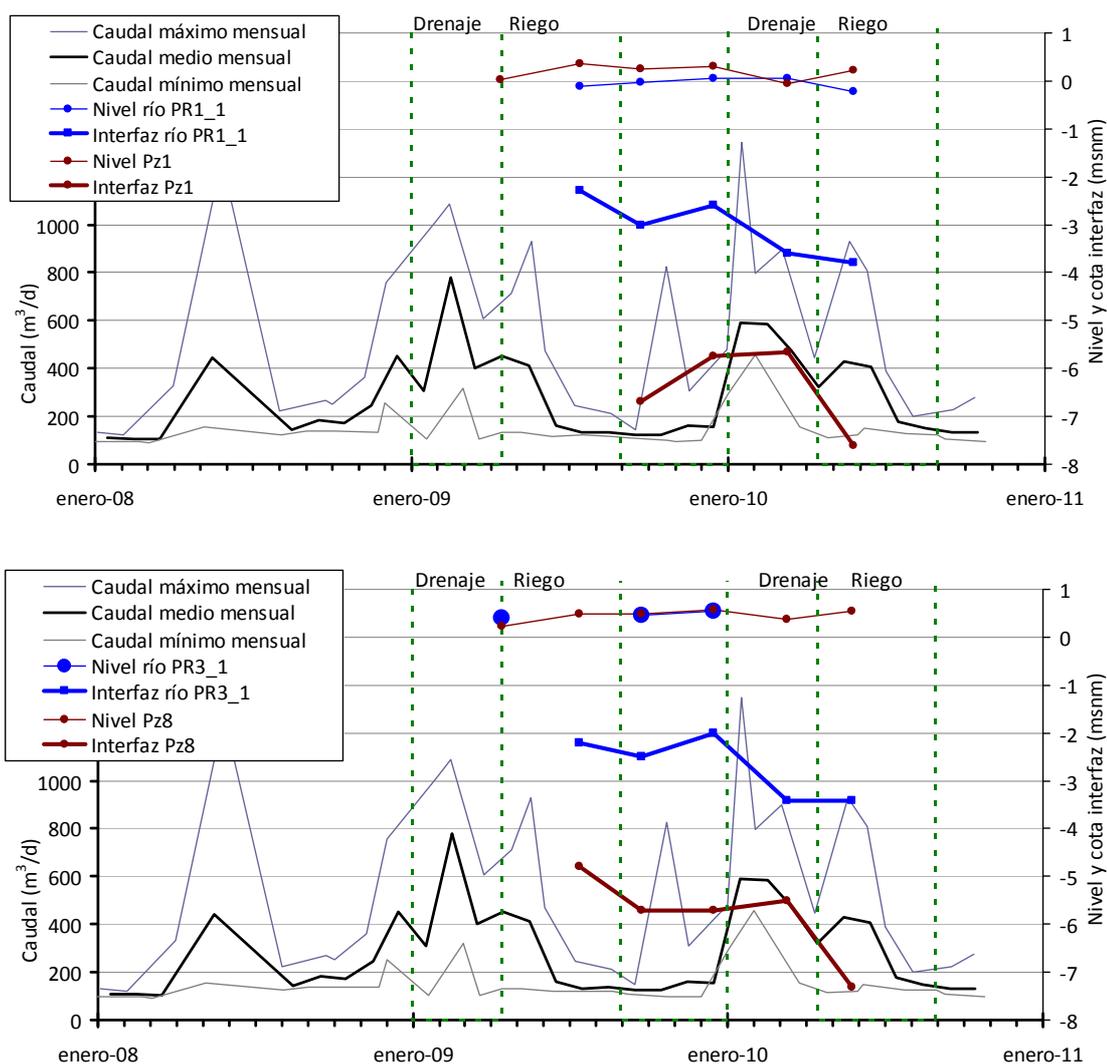


Figura 4.5. Niveles manuales medidos en el río y en los piezómetros más cercanos, para las líneas 1 (arriba) y 3 (abajo). Se presenta también posición de la interfaz en el río y en los piezómetros así como el caudal mensual del río.

4.3 Resultados de las mediciones en continuo

4.3.1 Datos obtenidos medición en continuo

Mediante la instrumentación de los distintos piezómetros durante distintos periodos con medidores automáticos (Tabla 4.1) se han obtenido series continuas de presión que, una vez compensada con la presión atmosférica, permiten obtener la posición del nivel freático respecto al nivel de referencia. En general esta medida de la posición del

nivel freático es totalmente válida porque la densidad del agua no varía nunca en la vertical del piezómetro, ni entre piezómetros ni a lo largo del tiempo.

En el caso del acuífero superficial del delta, hay variaciones importantes de la densidad del agua en la vertical de los piezómetros, entre piezómetros y a lo largo del tiempo, por ello, la serie obtenida del nivel no es del todo coincidente con la posición real del mismo. Aun y así, se obtiene una información muy valiosa sobre evolución temporal de los niveles. Además, si se puede combinar la información de la presión con la de la densidad del agua (obtenida a partir de la CE registrada en los sensores tipo CTD), se pueden realizar correcciones con la densidad que permiten subsanar en gran parte los inconvenientes mencionados.

Todos los datos de nivel obtenidos con corrección de la presión atmosférica pero sin corrección de densidad muestran el comportamiento de los distintos piezómetros equipados así como del punto en el río (Figura 4.6).

La serie correspondiente al río (PR3) es continua hasta la penúltima campaña, en la última campaña el sensor había desaparecido. La línea 2 (piezómetros 4 y 7) fue monitorizada hasta la campaña de diciembre y muestra un comportamiento muy monótono. El Pz7, en particular, siempre ha mostrado un perfil muy salinizado y escasa variación de nivel. A partir de diciembre se equipan los piezómetros Pz9 y Pz11 de la línea 3 con dos sensores. Entonces, los niveles obtenidos con los dos sensores en el mismo punto casi coinciden pero no del todo pues la salinidad del agua varía en la vertical y en el tiempo y difiere de agua dulce. A partir de la penúltima campaña la sonda en Pz9t (top) quedó por encima del nivel freático durante algún tiempo y la del Pz11b (bottom) no se pudo recuperar en la última campaña.

Una interpretación más en profundidad se hace en las secciones siguientes.

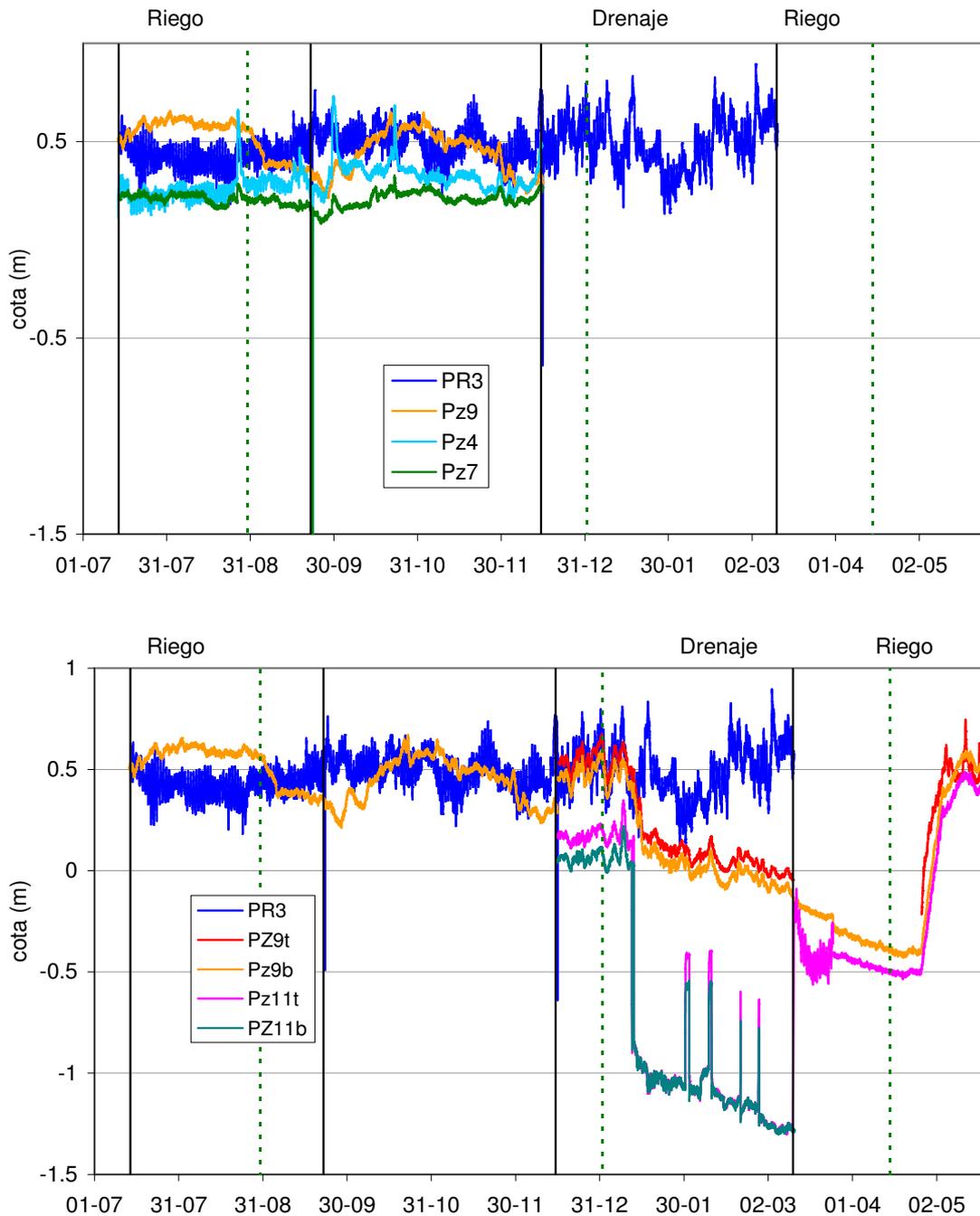


Figura 4.6. Registros en continuo de niveles para todos los puntos sin corrección de densidad.

4.3.2 Determinación de la posición de la interfaz

El acuífero superior del delta presenta una marcada estratificación debida a la diferencia de densidad de las diferentes aguas que lo componen. Dicha diferencia de densidad viene controlada por la presencia de sales en disolución, las cuales se han

caracterizado mediante la elaboración analíticas de mayoritarios, perfiles verticales de CE y mediciones en campo mediante el uso de densímetros (Tabla 2.3 y Figura 2.2).

Mediante los perfiles de CE en cada campaña se ha establecido la posición puntual de la interfaz, para el seguimiento de la misma en continuo se ha llevado a cabo la instrumentación de la línea 3 de piezómetros a partir del 15 de diciembre de 2009. Para realizar las mediciones se utilizaron simultáneamente dos sensores por piezómetro de control (Figura 4.7). Ambas sondas realizan la medición de presión bajo el supuesto que se encuentran situadas en agua dulce ($\rho = 1 \text{ g/cm}^3$), circunstancia que no se da en su actual posición.

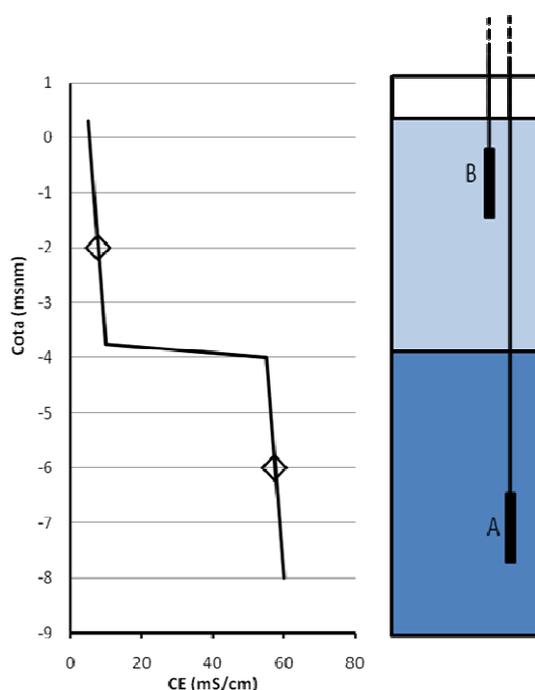


Figura 4.7. Instrumentación de los puntos de control para la determinación de la posición de la interfaz. Donde A es el dispositivo situado en la fase de mayor densidad y B es el situado en la de menor.

Por tanto, es posible la determinación de la posición de la interfaz si se encuentra entre los dos dispositivos de medición.

Para el control de la variación del nivel freático se utiliza la sonda B, controlando la variación de presión del agua superior a la interfaz. La sonda A controla la variación de presión del agua inferior, con lo cual se establece la posición de la interfaz en cada momento. Para ello, se han asumido algunas hipótesis tales como:

- Densidad constante en cada una de las dos fases.

- Sólo existe una interfaz y siempre está ubicada entre los dos sensores.
- La densidad varía linealmente con la CE.
- La densidad puede variar en el tiempo, pero de forma homogénea en cada fase.

Conociendo exactamente la posición de los dos sensores de presión, se puede calcular la posición de la interfaz, respecto, por ejemplo al sensor superior, como se muestra a continuación (Figura 4.8).

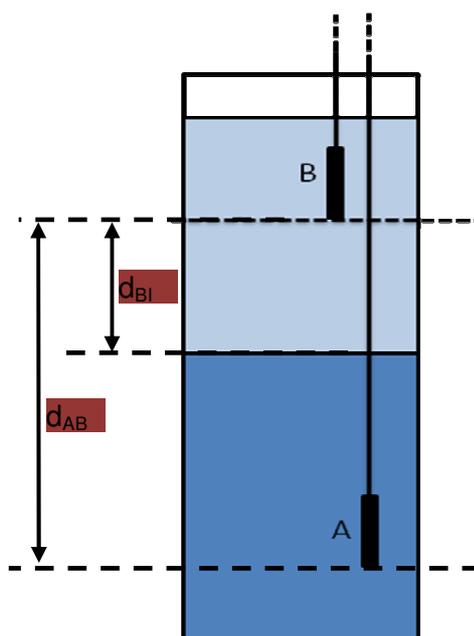


Figura 4.8. Variables que intervienen en el cálculo de la posición de la interfaz mediante medidas en continuo de presión a dos profundidades conocidas.

De la Figura 4.8 se obtiene la expresión siguiente, donde la incógnita a resolver es d_{BI} .

$$d_{BI} = \frac{d_{AB}\rho_S + P_B - P_A}{\rho_S - \rho_D}$$

Donde;

- d_{BI} : distancia entre la interfaz y el sensor superior (m)
- d_{AB} : distancia entre los dos sensores (m)
- ρ_S : densidad del agua de la capa inferior (kg/m^3)
- ρ_D : densidad del agua de la capa superior (kg/m^3)
- P_A : presión registrada en el sensor inferior (kg/m^2)
- P_B : presión registrada en el sensor superior (kg/m^2)

Cabe hacer hincapié en la incertidumbre derivada de las observaciones de campo y de las hipótesis mencionadas, tratándose en todo momento de una aproximación al cálculo de la posición de la interfaz.

La Figura 4.9 muestra el piezómetro Pz11 durante un periodo que incluye el inicio del drenaje. Inicialmente el acuífero se encuentra estratificado, mostrando un agua salobre sobre un agua marina. Una vez se inicia el bombeo, según las observaciones realizadas en el piezómetro y los cálculos posteriores, el agua dulce desaparece bruscamente, debido a la proximidad al pozo. Durante las paradas de la bomba, se vuelve a estratificar el acuífero, debido al aporte lateral de agua salobre. Finalmente, el acuífero en las proximidades del pozo está totalmente salinizado, como se aprecia en el segundo perfil de CE.

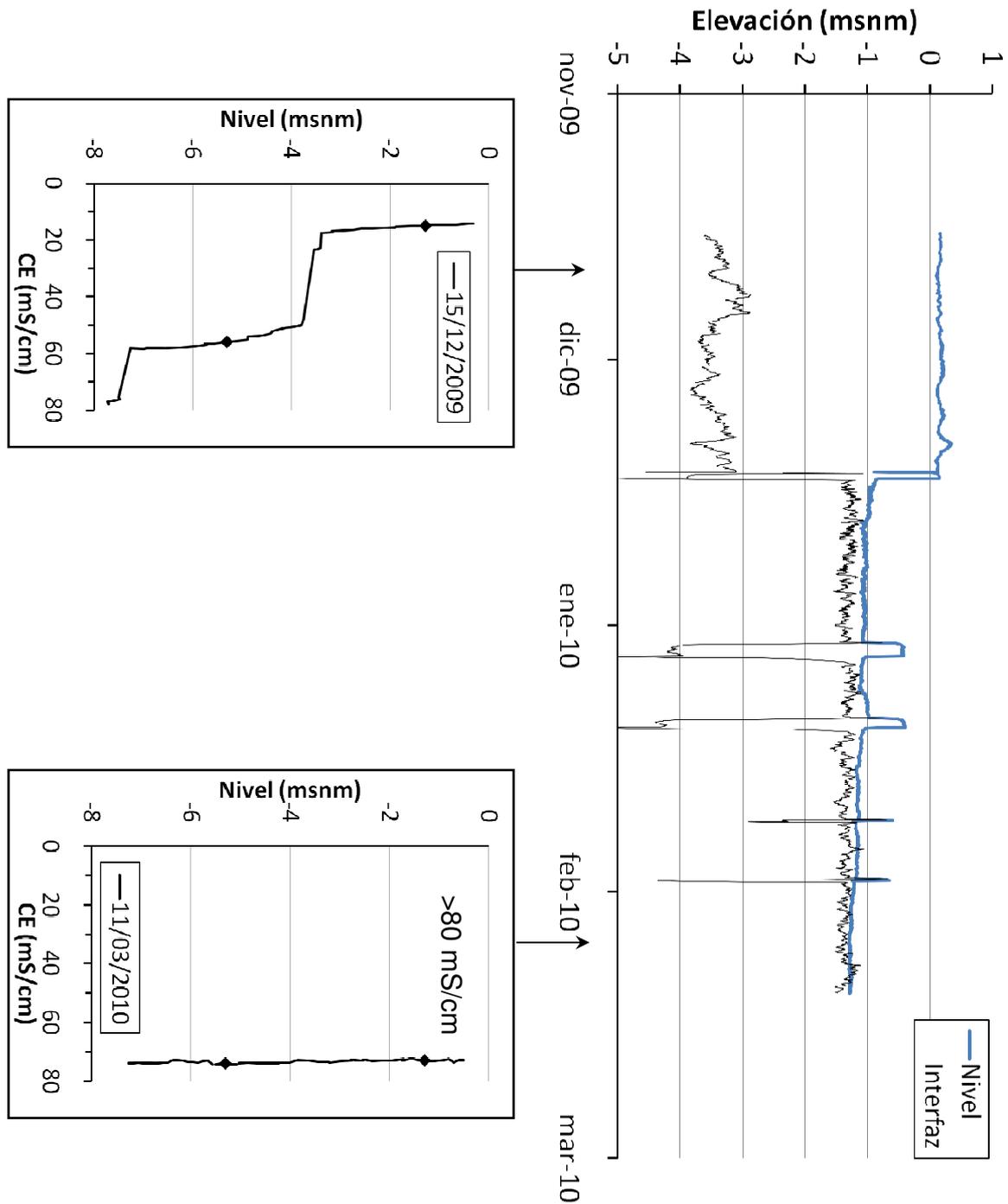


Figura 4.9. Evolución del nivel freático y de la posición de la interfaz en el piezómetro Pz11, con dos perfiles verticales de CE (las marcas muestran la posición de los sensores).

Como se ha comentado, el funcionamiento de la bomba tiene un impacto significativo en la posición de la interfaz en el interior del piezómetro, variando bruscamente. Parece poco probable que la posición de la interfaz en el piezómetro pueda

relacionarse directamente con la posición de la interfaz en el medio poroso, cuando el pozo está en funcionamiento. Dicho fenómeno ya ha sido identificado con anterioridad (Figura 4.10), siendo necesario el uso de piezómetros puntuales para caracterizar la interfaz en zonas influenciadas por captaciones (Rushton, 2003).

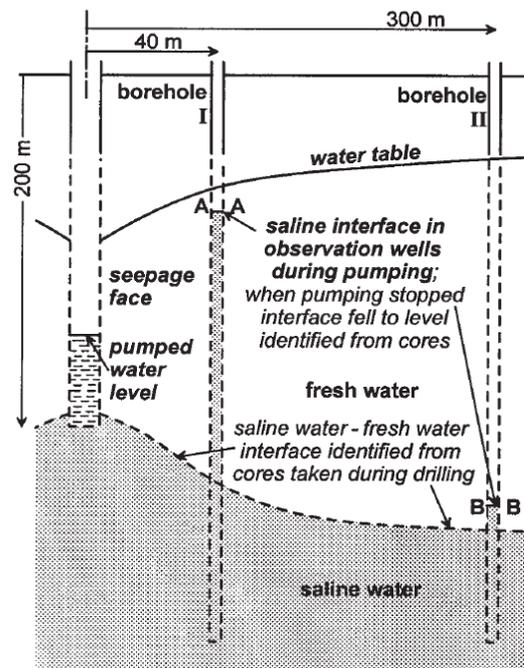


Figura 4.10. Posición de la interfaz en el medio poroso y en el interior de los piezómetros (Rushton, 1980).

En contraposición al piezómetro Pz11, el Pz9 (Figura 4.11) no presenta oscilaciones tan bruscas en tan poco tiempo, al estar más alejado de la captación. Obsérvese que no existe información de la posición de la interfaz a partir de abril, debido a que el sensor superior quedó por encima del nivel freático. La posición de la interfaz hasta marzo presenta un nivel constante alrededor de -4 msnm, coincidiendo buena parte del periodo en el cual el acuífero superficial no está influenciado ni por irrigación ni drenaje. Dicha posición se corresponde con la interfaz entre agua salobre y agua de mar. Así mismo, existe una interfaz entre el agua del mar y las salmueras que no ha sido monitorizada. El piezómetro Pz9 no presenta una interfaz marcada durante todo el periodo de medición, pudiendo causar oscilaciones debido a variaciones de densidad.

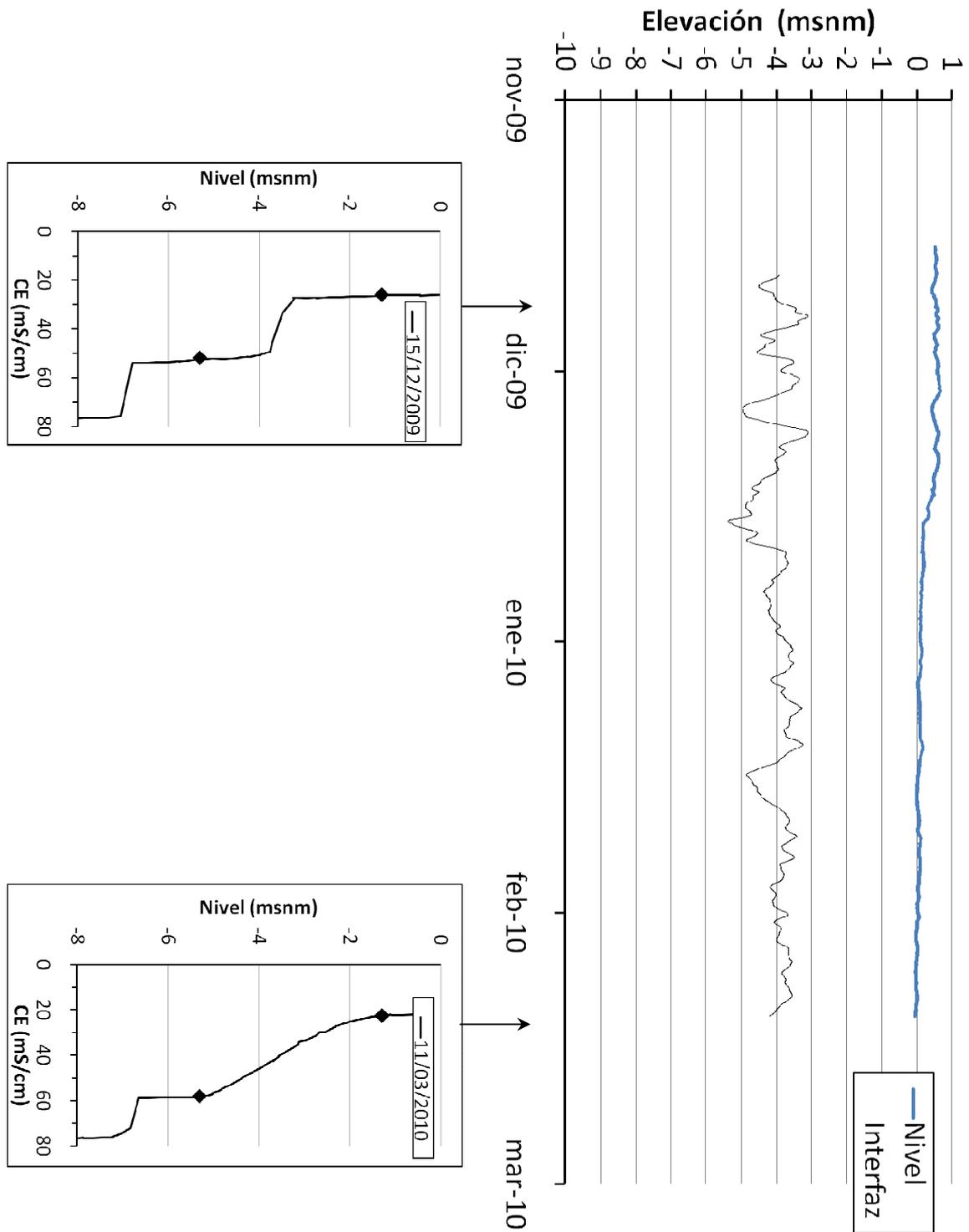


Figura 4.11. Posición de la interfaz en el piezómetro Pz9.

4.3.3 Interpretación de los datos de las mediciones en continuo

De los datos obtenidos de la medición en continuo (Figura 4.6) se observa una oscilación diaria en el río Ebro de aproximadamente 20 cm, correspondiente a las mareas (Figura 4.12), también observadas mediante mareógrafos en el puerto de Barcelona (Figura 4.13).

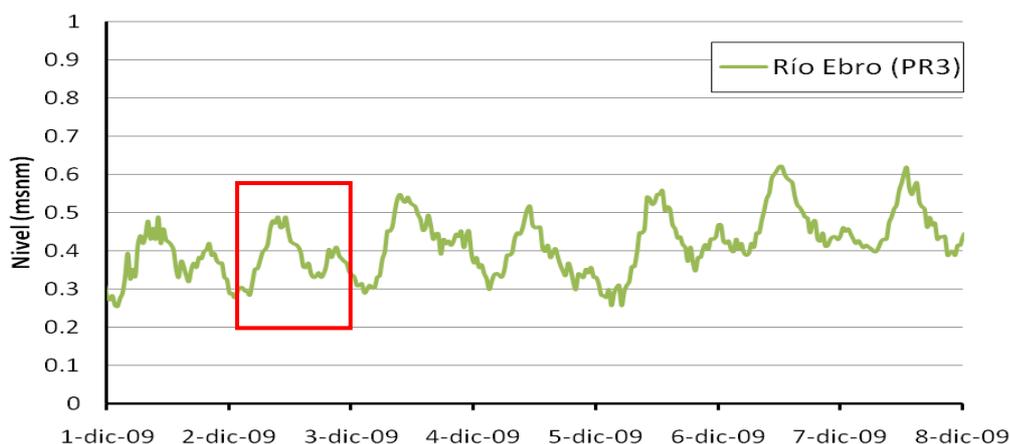


Figura 4.12. Oscilación diaria en el río Ebro como consecuencia del régimen mareal.

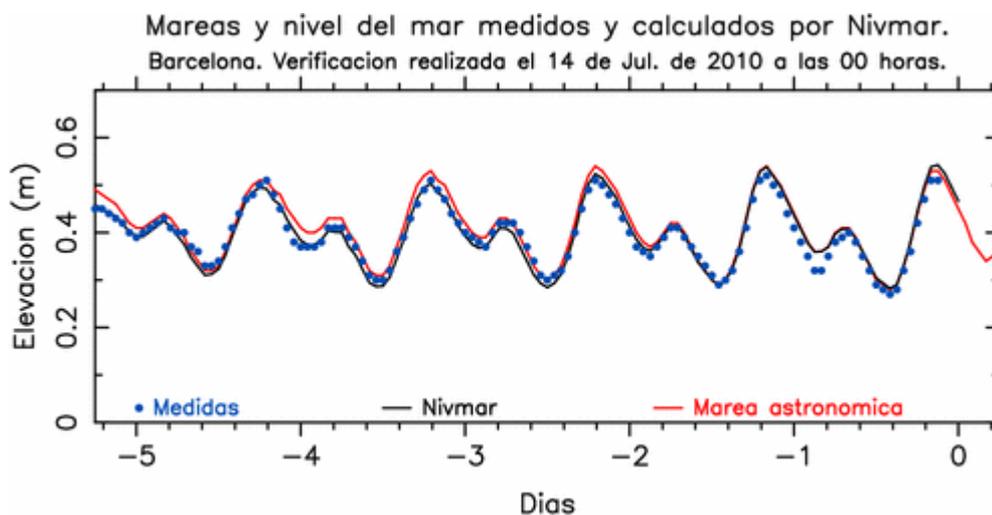


Figura 4.13. Régimen mareal registrado en Barcelona (Puertos del Estado).

Los niveles correspondientes a los piezómetros Pz9 y Pz11 muestran un descenso del nivel desde finales de Diciembre hasta mediados de Abril, coincidiendo con la etapa de drenaje de los campos (Figura 4.14.). El piezómetro Pz11 muestra un descenso mucho más acusado que el piezómetro Pz9, desde Diciembre a Marzo, debido a la

extracción de agua de un pozo de drenaje cercano. Así mismo, se pueden observar las paradas que realiza la bomba durante este periodo, recuperándose el nivel.

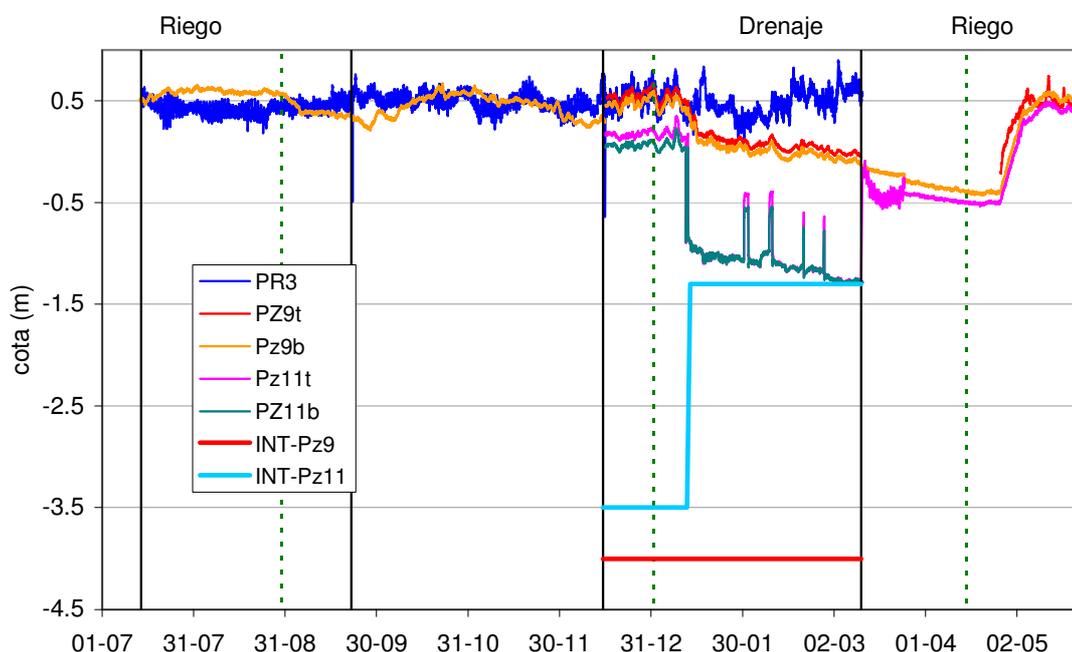


Figura 4.14. Resultados de las mediciones en continuo registradas en la línea 3 y posición estimada de la interfaz en el acuífero.

Al mismo gráfico se le puede superponer la posición de la interfaz calculada mediante el método explicado en la sección anterior.

En el caso de Pz9, la diferencia de nivel estimada con las dos sondas es siempre muy similar, esto indica que la distribución de la salinidad entre las dos sondas no varía casi nada y que por lo tanto la posición de la interfaz tampoco (ver detalle en la Figura 4.11).

En cambio, en el Pz10 se registran descensos importantes y la diferencia entre los niveles estimados con las dos sondas no es siempre el mismo. Cuando el nivel baja las dos curvas se juntan, ello implica que el perfil de agua se homogeneiza (la interfaz sube y todo el perfil se saliniza, como se puede observar en detalle en la Figura 4.9).

Durante todo este periodo, el nivel del acuífero se encuentra por debajo del nivel en el río Ebro, aunque no se puede identificar ninguna tendencia que indique que esté actuando como borde de recarga. En realidad, las medidas en continuo corroboran que las oscilaciones de la interfaz en el acuífero son exclusivamente debidas al grado de inundación del delta, es decir, al régimen de riego y drenaje de los campos.

5. Resultados de hidroquímica

5.1 Descripción de las campañas

Para la recogida de muestras de la 1ª campaña se realizó el purgado según se indica en la normativa ISO-5667-11. Para ello se utilizó una bomba GRUNFOS MP1. El purgado de todo el volumen del piezómetro provocaba la mezcla de las aguas, altamente estratificadas. Este hecho producía el muestreo de un agua intermedia, producto de la mezcla de todas las presentes en el punto de control, resultando en errores de balance iónicos inadmisibles.

A partir de la 4ª campaña se realizaron muestreos puntuales a determinada profundidad, en función de los perfiles verticales de CE, mediante los cuales se conoce la posición de la interfaz.

Durante la 4ª campaña y en las siguientes se utilizó la técnica del micro-purgado, tal como se especifica en la ISO-5667-11. Para ello se utilizó una bomba WHALE WP4012, de pequeñas dimensiones y caudal, con tal de alterar lo mínimo posible el medio. La Figura 5.1 muestra el procedimiento seguido.

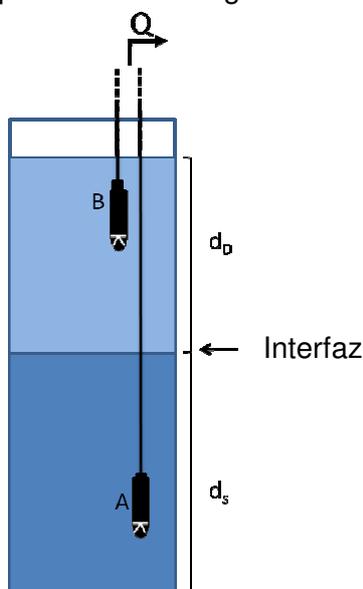


Figura 5.1. Muestreo mediante bomba a dos profundidades específicas.

Primero se realizó el muestreo del agua superior (B), para posteriormente muestrear la el agua inferior (A). Para las muestras del río Ebro se procedió de igual manera que en los piezómetros, después de la elaboración de los perfiles verticales de CE. El

muestreo de canal y mar se realizó para todas las campañas mediante un tomamuestras, sumergiéndolo varios metros, ya que dichos medios no presentan estratificación.

5.2 Descripción de los resultados

5.2.1 Valoración de los análisis

Para verificar la validez de las analíticas realizadas, sistemáticamente se elaboró el balance iónico de las muestras. Para ello la suma de cationes, en miliequivalentes, debe ser igual a la suma de aniones, igualmente en miliequivalentes (Escuder et al, 2009). El cálculo del error de balance se ha realizado con la siguiente expresión:

$$\text{Error (\%)} = 200 \cdot (\text{rCat} - \text{rAn}) / (\text{rCat} + \text{rAn})$$

La Tabla 5.1 presenta los errores de balance para las campañas 3ª y 4ª. Como ya se ha comentado en la descripción de las campañas, en la 1ª campaña se recogieron las muestras siguiendo el protocolo de muestreo citado. Para esa 3ª campaña se obtuvieron errores en el balance iónico de hasta el 126%. En la 4ª campaña se muestrearon diferenciadamente las aguas dispuestas tanto por encima como por debajo de la interfaz. Este muestreo doble en cada piezómetro permitió reducir drásticamente los errores en el balance iónico.

Tabla 5.1. Error de balance correspondiente a la 3ª y 4ª campañas.

3ª campaña		4ª campaña		4ª campaña	
Punto de control	Error (%)	Punto de control	Error (%)	Punto de control	Error (%)
Pz1	34	Canal	-2	6b	-4
Pz2	126	Mar	-2	7t	0
Pz3	28	1t	-4	7b	-5
Pz4	-1	1b	-5	8t	-3
Pz5	58	2t	1	8b	0
Pz6	4	2b	-3	9t	-2
Pz7	-5	3t	-5	9b	-5
Pz8	-1	3b	-6	10t	-2
Pz9	-6	4t	-7	10b	-2
Pz10	-6	4b	-7	11t	-2
Pz10_2	-7	5t	-3	11b	-3
Pz11	-5	5b	-2	PR3t	4
PR1	-4	6t	-2	PR3b	-3

Los errores de balance admisibles para aguas con una elevada CE (> 2000 µS/cm) son del 4% (Escuder et al, 2009). Por lo tanto, algunos de los puntos muestreados en

la 3ª campaña no pueden utilizarse para realizar la posterior caracterización hidroquímica.

En los errores observados para la 3ª campaña existen valores tanto negativos como positivos, mientras que en la 4ª campaña, son mayoritarios los errores negativos y de valor muy inferior (Tabla 5.1 y Figura 5.2).

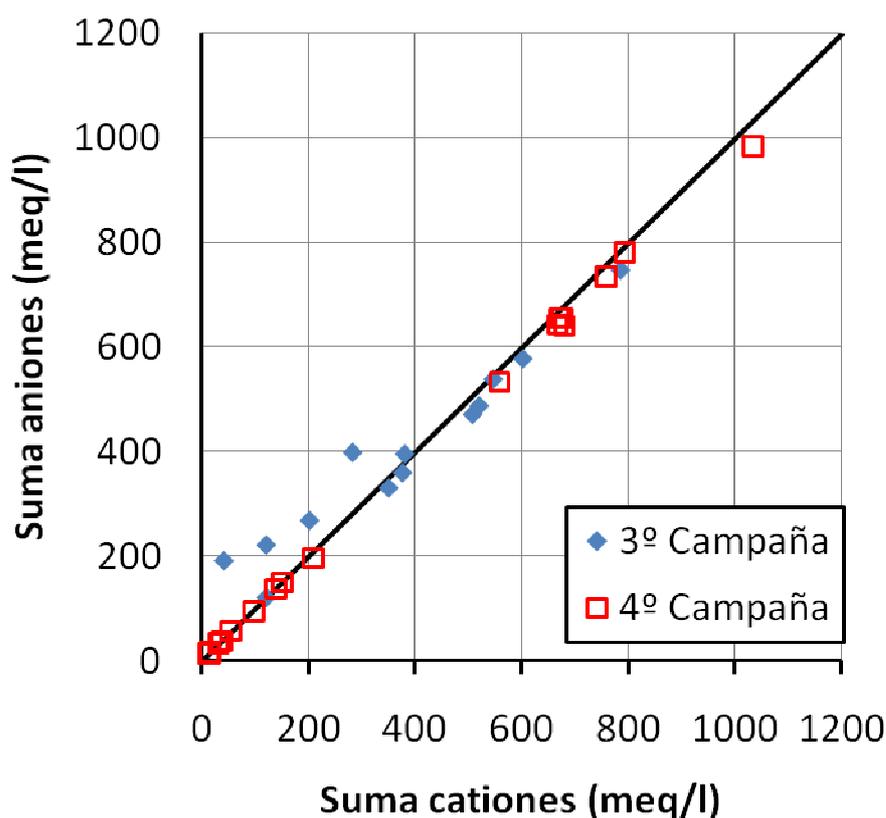


Figura 5.2. Errores en el balance iónico para las campañas 3ª y 4ª.

Cabe destacar que tras conversaciones con el laboratorio no ha sido posible esclarecer el origen de los errores en las campañas iniciales.

5.2.2 Caracterización hidroquímica

Con los datos obtenidos del muestreo se han elaborado las principales gráficas de caracterización, las cuales se muestran a continuación. Se presentan los datos obtenidos las diferentes campañas de muestreo, poniendo especial énfasis en la 4ª campaña, ya que es en la que se muestrearon mayor número de puntos, siendo la campaña más representativa.

Mediante el diagrama de Piper se puede determinar qué grupo de facies se encuentran en el acuífero. La Figura 5.3 muestra como la facies predominante es la clorurada sódica en la práctica totalidad de las muestras. Con todo ello, algunas de las muestras difieren sensiblemente, desplazándose hacia el tipo de agua bicarbonatada.

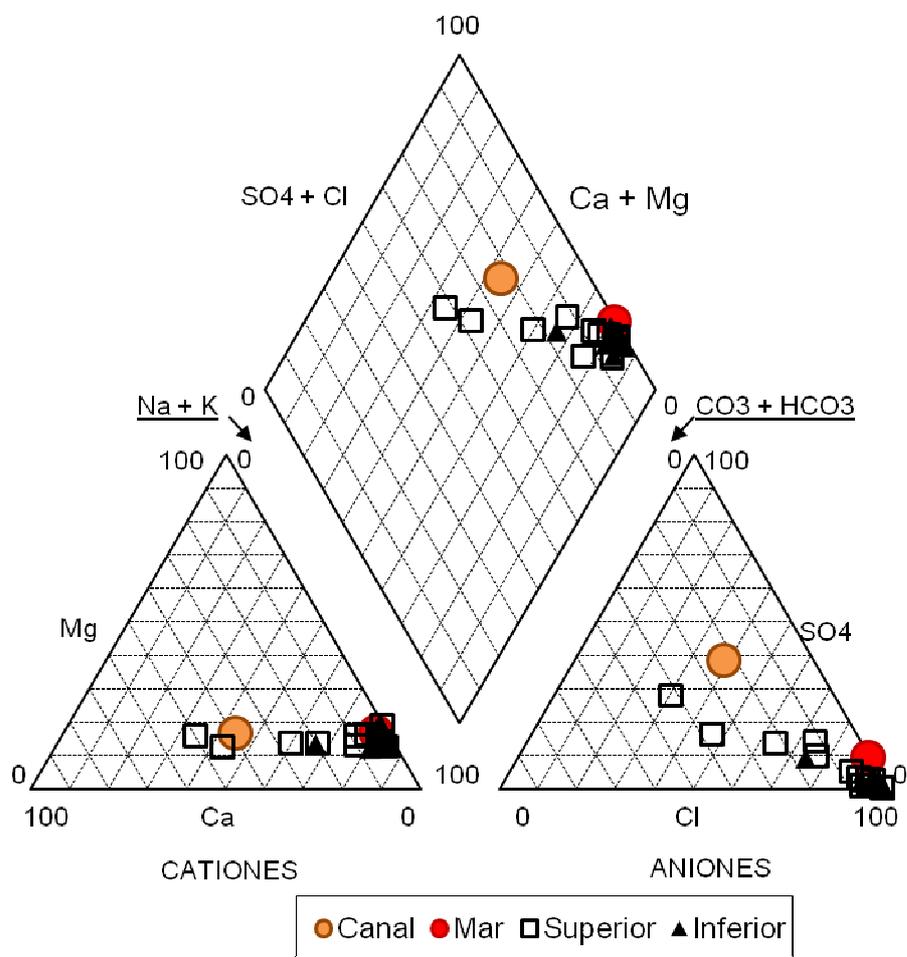


Figura 5.3. Diagrama de Piper (4ª campaña).

El diagrama de Schöeller-Berkaloff permite diferenciar fácilmente mezclas (Escuder et al, 2009), especialmente útil en el contexto de este estudio. Las muestras recogidas durante la 4ª campaña en el canal “de la Dreta” y el mar, se representan como líneas más gruesas, para dar más énfasis a los posibles términos extremos. Así mismo, en la 6ª campaña se muestreó el agua del campo de cultivo adyacente al piezómetro Pz9, la cual se superpone al agua del canal. La Figura 5.4 muestra el acuífero durante el mes de diciembre, tres meses después de finalizar la irrigación de los campos. No obstante se observa una clara diferenciación entre las muestras superiores e inferiores, de composición claramente diferentes.

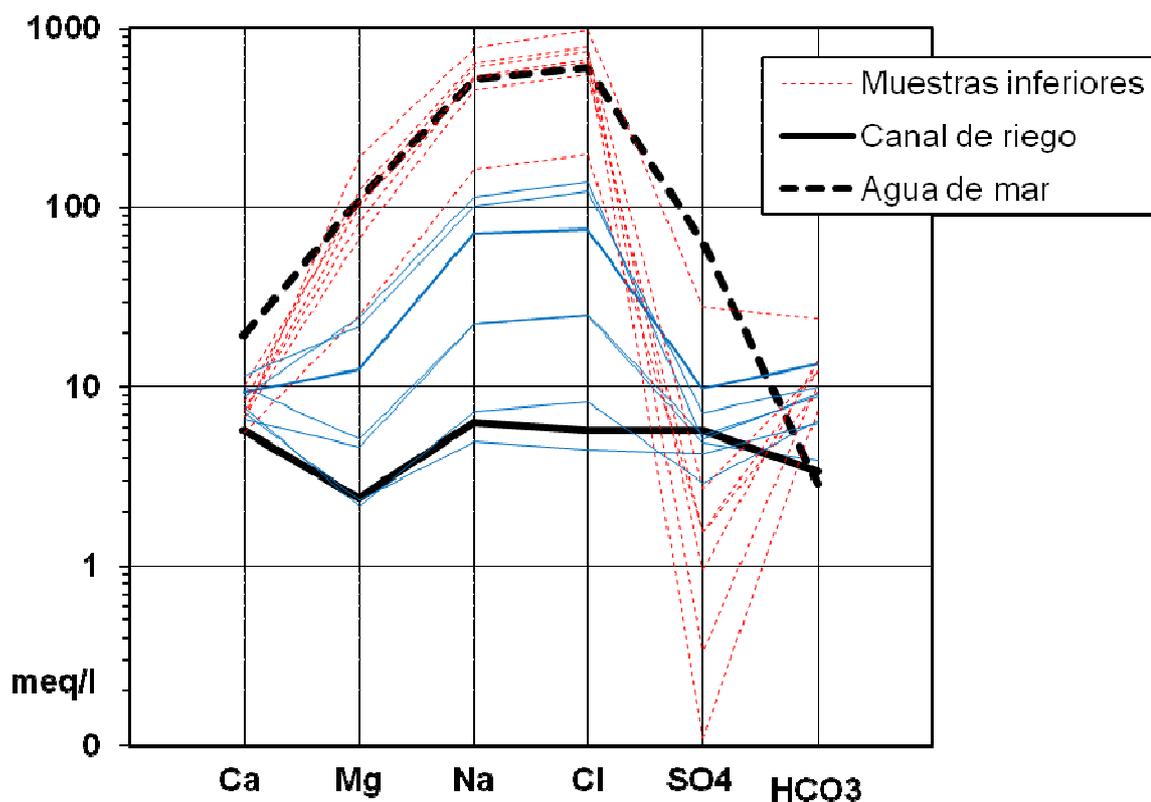


Figura 5.4. Diagrama de Schöeller-Berkaloff (4ª campaña).

La posterior campaña se llevó a cabo en Marzo (5ª campaña), cuando los trabajos de drenaje llevaban en curso aproximadamente dos meses, faltando un mes para el inicio de la irrigación. Por ello, esta campaña se realizó en el momento de menor presencia de agua dulce en el acuífero superficial, siendo en algunos casos los niveles piezométricos inferiores a los del mar. En la Figura 5.5 se observan el muestreo de tres de los piezómetros, en los cuales la composición química para los elementos mayoritarios es muy similar.

Durante la realización de la 6ª campaña, el delta se encontraba sometido a irrigación desde hacía aproximadamente un mes y medio. Durante esta campaña también se muestreó el agua de riego directamente en la superficie del campo de cultivo próximo al piezómetro Pz9 (Figura 5.6), resultando en una composición igual a la del agua del canal de irrigación.

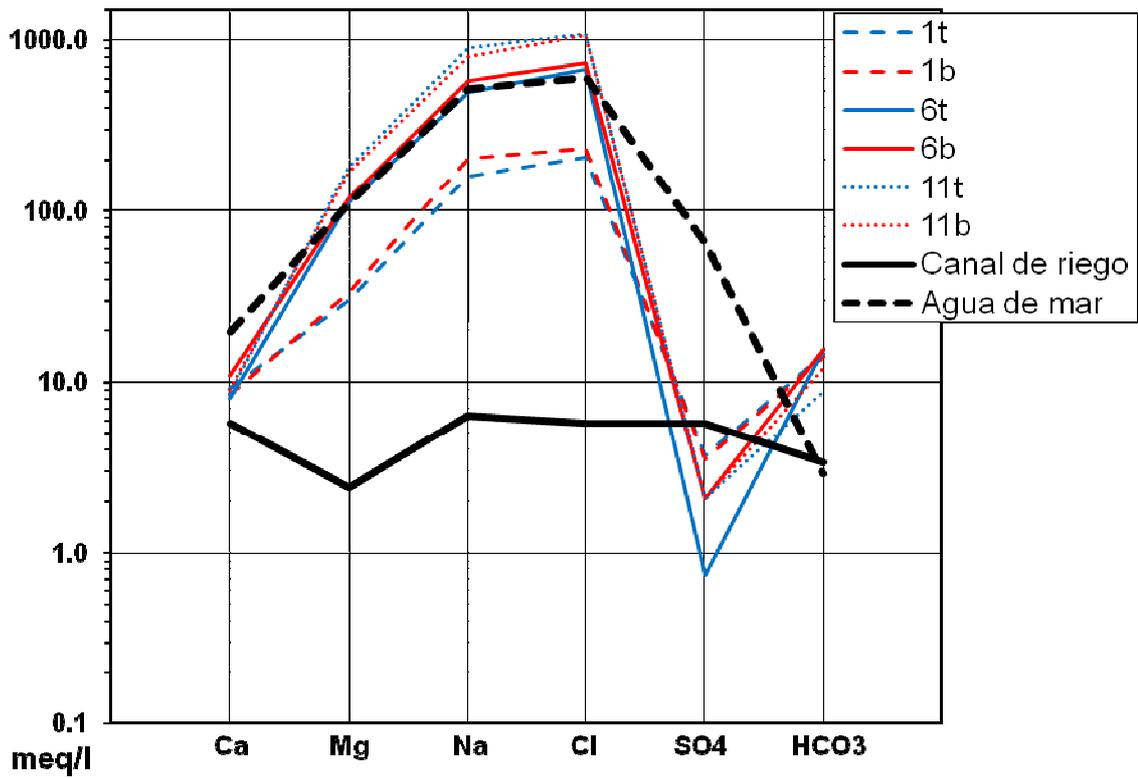


Figura 5.5. Diagrama de Schöeller-Berkaloff (5ª campaña).

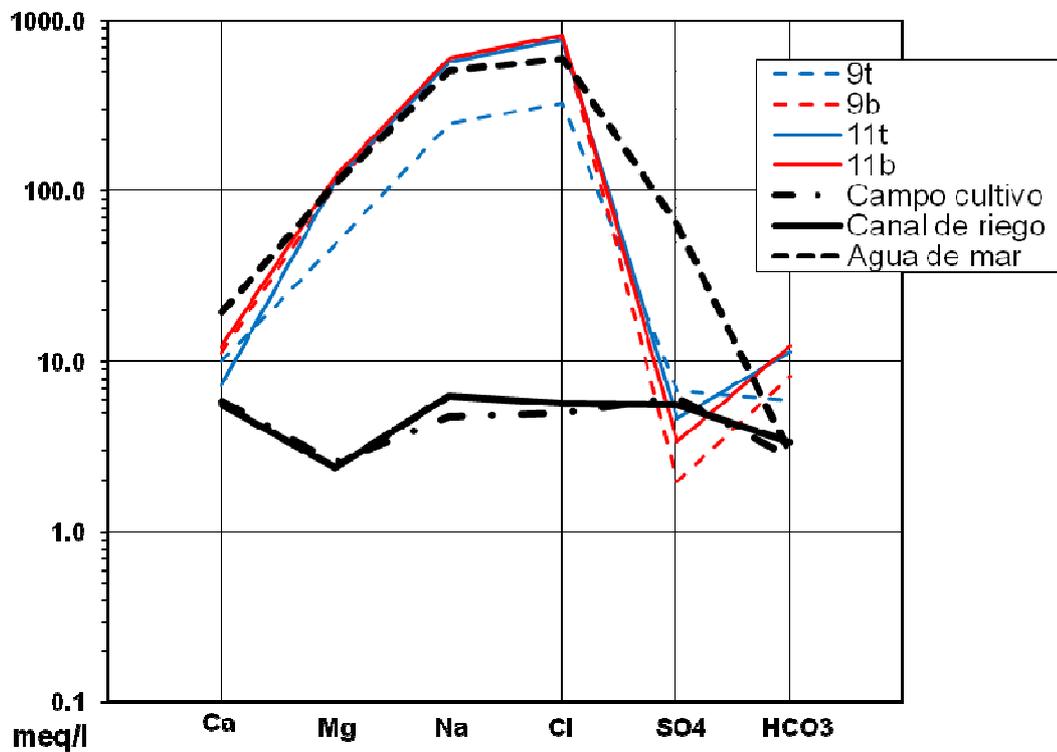


Figura 5.6. Diagrama de Schöeller-Berkaloff (6ª campaña).

El diagrama de Stiff es un buen método para estudiar la variación espacial de la composición del agua del acuífero (Escuder et al, 2009). Existe una variación espacial de la composición, tanto en la capa superior de agua (Figura 5.7) como en la inferior (Figura 5.8).

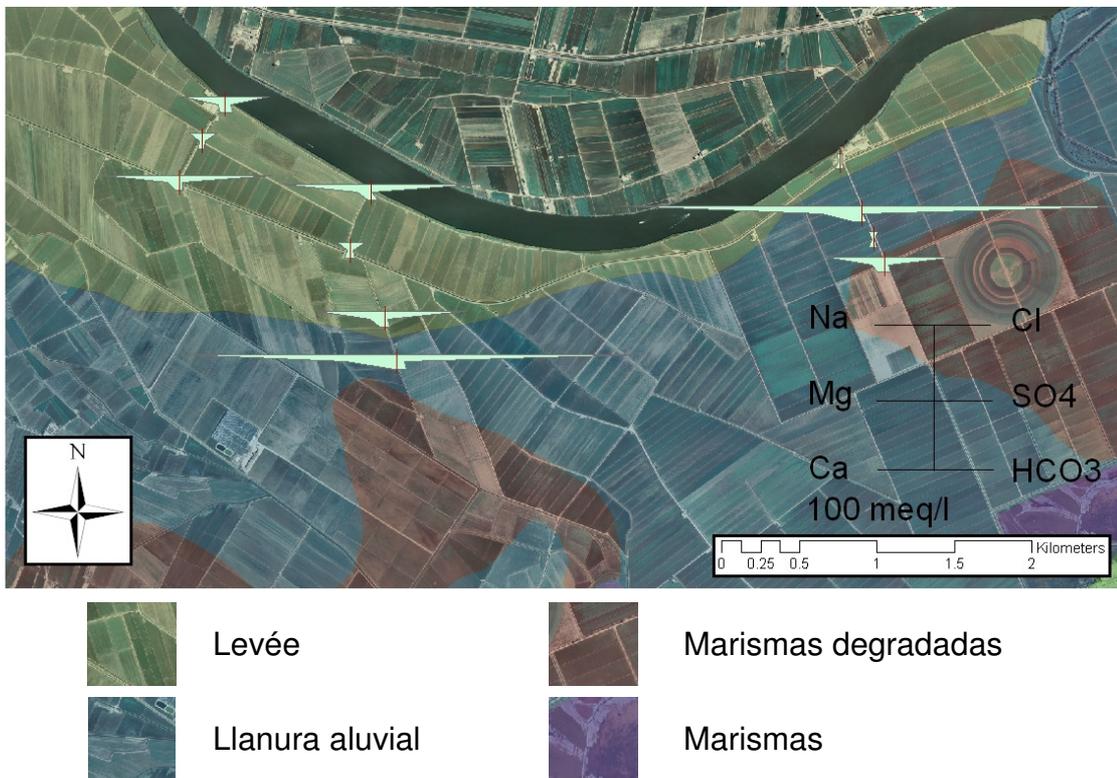


Figura 5.7. Diagrama de Stiff para las aguas superiores (4ª campaña).

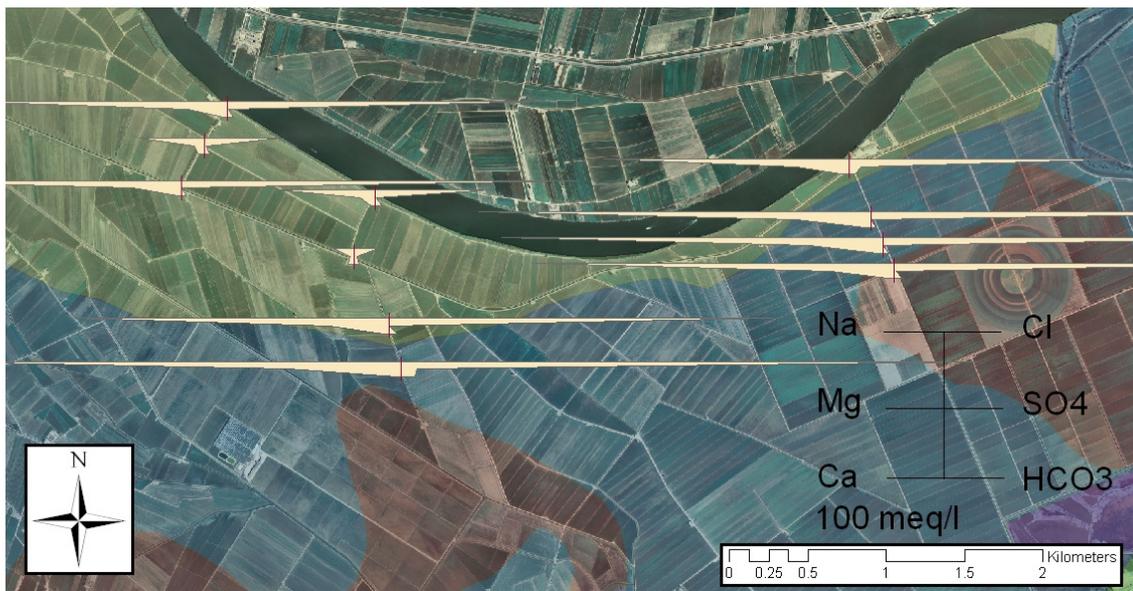


Figura 5.8. Diagrama de Stiff para las aguas inferiores (4ª campaña).

Cabe destacar la marcada diferencia entre las concentraciones de Cl y Na, siendo muy superiores en la capa inferior.

Los diagramas de Stiff corroboran los perfiles verticales de CE, asociando el aumento de CE al de concentración de los iones mayoritarios (Cl^- y Na^+), siendo el comportamiento de la mayoría de piezómetros muy homogéneo. No obstante, tanto en la capa superior como en la inferior se observan puntos singulares (Pz5 y Pz8), con concentraciones muy inferiores, siendo su composición cercana a la facies bicarbonatada cálcica. Dichos puntos se encuentran muy próximos al canal de riego de "la Dreta". Los perfiles verticales, especialmente el correspondiente al piezómetro Pz8, muestran la influencia del agua dulce hasta los -6 msnm, con una marcada interfaz. Todo ello parece indicar que el canal de riego se comporta de forma influente respecto al acuífero superficial.

5.2.3 Relaciones iónicas

5.2.3.1 $r\text{Na}/r\text{Cl}$

La relación $r\text{Na}/r\text{Cl}$ es útil para identificar procesos de intercambio iónico, precipitaciones, diluciones, aporte litológico y posibles orígenes del agua (Escuder et al, 2009).

Las concentraciones de cloruro y sodio, además de la relación $r\text{Na}/r\text{Cl}$ para cada una de las muestras recogidas durante la 4ª campaña se han agrupado en tres sub tablas, correspondientes, de arriba abajo, a los posibles términos extremo, muestras superiores a la interfaz y muestras inferiores a la interfaz (Tabla 5.2).

La Figura 5.9 muestra el diagrama de correlación $r\text{Na}/r\text{Cl}$, donde se representan las gráficamente la anterior tabla diferenciando muestras superiores, inferiores, canal y mar. Así mismo, se muestra la línea para valores de $r\text{Na}/r\text{Cl} = 1$, así como la línea de tendencia para las muestras inferiores y superiores.

Tabla 5.2. Concentraciones de cloruros y sodio (meq/l) y relación rNa/rCl.

Punto	Cloruro (meq/l)	Sodio (meq/l)	rNa/rCl
Canal	6	6	1.11
Mar	603	515	0.85
1t	76	73	0.96
2t	25	22	0.9
3t	159	131	0.82
4t	180	151	0.84
5t	25	23	0.89
6t	139	116	0.83
7t	425	363	0.85
8t	4	5	1.09
9t	499	409	0.82
10t	8	7	0.89
11t	123	103	0.84
PR3t	46	40	0.86
1b	549	453	0.82
2b	131	110	0.84
3b	673	542	0.81
4b	197	165	0.84
5b	40	35	0.86
6b	654	527	0.81
7b	983	775	0.79
8b	487	412	0.85
9b	842	659	0.78
10b	783	640	0.82
11b	744	609	0.82
PR3b	608	512	0.84

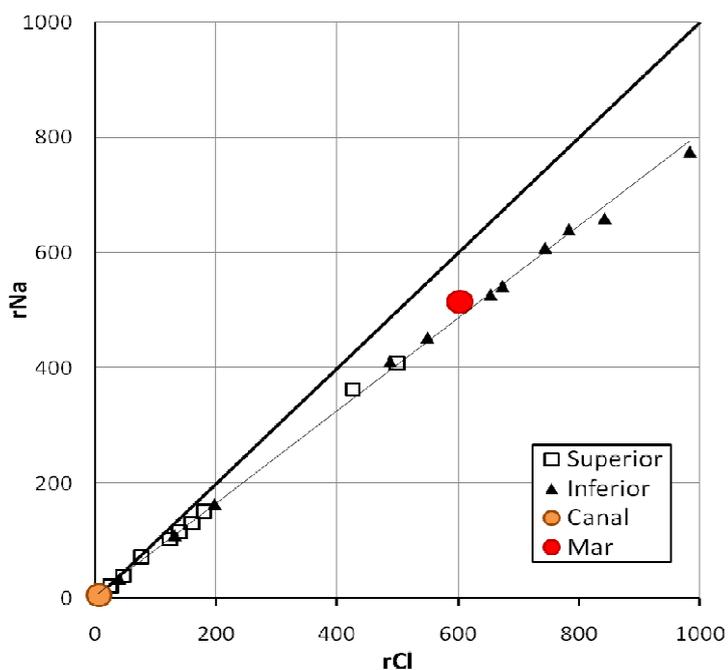


Figura 5.9. Diagrama de correlación rNa/rCl.

5.2.3.2 rSO_4/rCl

La relación iónica rSO_4/rCl es útil en cuanto al contraste de comportamientos del ion cloruro (Cl^-), cercano al trazador ideal y el ion sulfato (SO_4^{2-}), contrario a las características de un trazador. Todo ello, hace especialmente interesante la relación rSO_4/rCl para el estudio de contaminaciones antrópicas (agrícolas o industriales), procesos de sulfato reducción o intrusión marina (Escuder et al, 2009), todos ellos procesos de gran relevancia en el ámbito del acuífero superficial del delta (Custodio et al., 1997). Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3. Valores para la relación iónica rSO_4/rCl .

Punto	Cloruro (meq/l)	Sulfatos (meq/l)	rSO_4/rCl
Canal	6	6	1
Mar	603	65	0.11
1t	76	10	0.13
2t	25	5	0.2
3t	159	4	0.03
4t	180	2	0.01
5t	25	5	0.21
6t	139	5	0.04
7t	425	14	0.03
8t	4	4	0.95
9t	499	1	0
10t	8	3	0.35
11t	123	7	0.06
PR3t	46	6	0.13
1b	549	2	0
2b	131	3	0.02
3b	673	0	0
4b	197	2	0.01
5b	40	5	0.13
6b	654	1	0
7b	983	28	0.03
8b	487	21	0.04
9b	842	0	0
10b	783	0	0
11b	744	3	0
PR3b	608	65	0.11

El diagrama de correlación (Figura 5.10) presenta la disposición de las muestras de superior e inferior, así como las muestras del canal y del mar. En las muestras superiores se observa una relación rSO_4/rCl mayor que en las inferiores y al agua del canal.

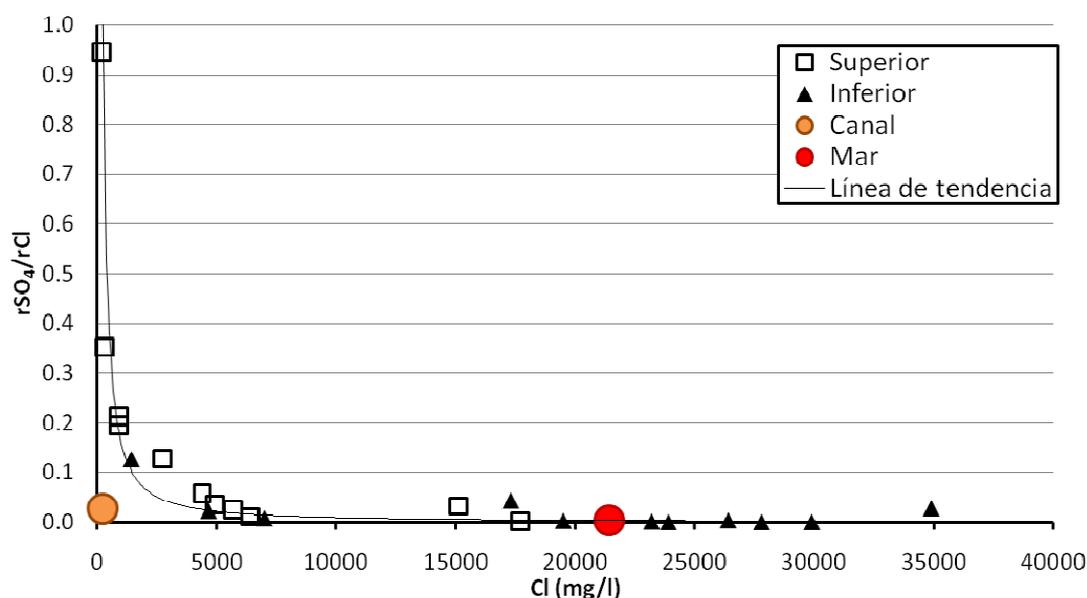


Figura 5.10. Diagrama de correlación rSO_4/rCl vs. $Cl(mg/l)$ (4ª campaña).

5.2.3.3 $rHCO_3/rCl$

La relación $rHCO_3/rCl$ permite diferenciar procesos de mineralización o intrusión marina, entre otros (Tabla 5.4).

Tabla 5.4. Valores de $rCl/rHCO_3$ y Cl (mg/l) para las muestras de la 4ª campaña.

Punto	$rCl/rHCO_3$	Cl (mg/l)
1b	58.48	19500
2b	15.02	4650
3b	89.47	23900
6b	46.03	23200
7b	41.05	34900
8b	43.84	17300
9b	99.38	29900
10b	74.87	27800
11b	59.77	26400
Promedio	58.66	23061
1t	5.68	2700
2t	6.33	881
3t	34.37	5660
6t	15.29	4920
7t	24.83	15100
8t	0.71	158
9t	61.2	17700
10t	1.26	292
11t	12.36	4380
Promedio	18	5754
Canal	1.68	202
Mar	207.75	21400

Al igual que en la relación rSO_4/rCl , las muestras superiores muestran una gran variación para la relación $rHCO_3/rCl$ en comparación a la inferiores (Figura 5.11).

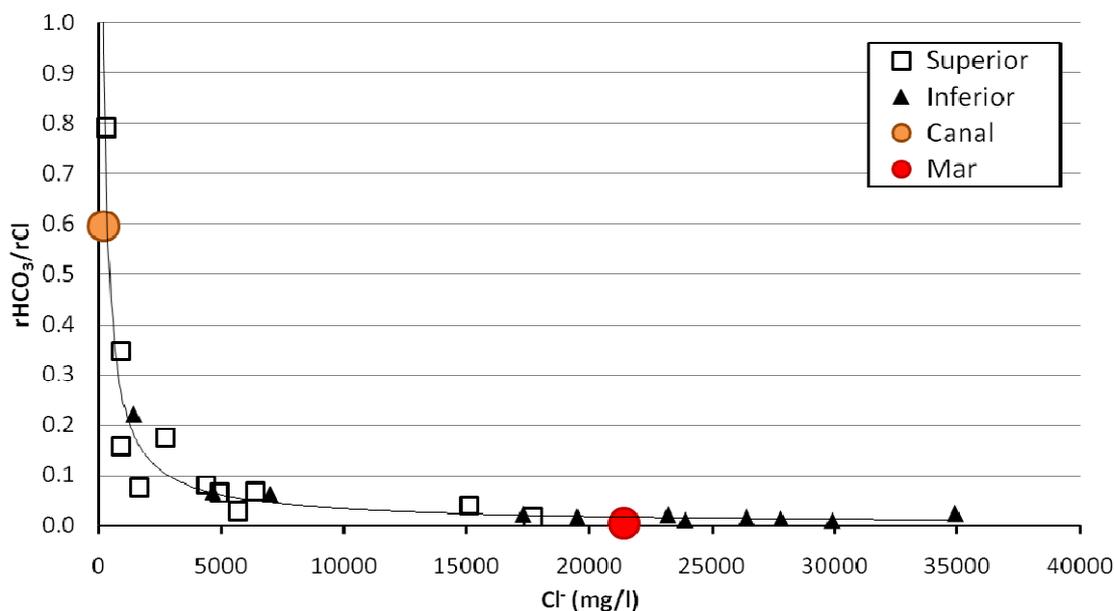


Figura 5.11. Diagrama de correlación $rHCO_3/rCl$ vs. Cl (mg/l) (4ª campaña).

5.2.3.4 rCl/rBr

La relación rCl/rBr ha sido usada con anterioridad en diferentes zonas deltaicas y lagunares para la determinación del origen de las aguas subterráneas (Custodio y Alcalá, 2003), debido a las propiedades que le confiere su pequeño radio iónico y su carácter hidrófilo. La relación rCl/rBr no se ve afectada por procesos de evaporación (si no precipita NaCl) (Custodio y Alcalá, 2008), lo cual es relevante en la zona de estudio, debido a la existencia de procesos de evapotranspiración significativos (Custodio et al, 1997).

Los datos obtenidos durante la 4ª campaña (15/12/2009), se muestran de forma resumida en la Tabla 5.5. El canal y el mar se suponen como términos fuente.

La representación de la relación rCl/rBr vs. Cl (mg/l) (Figura 5.12) muestra los grupos de aguas superiores e inferiores a la interfaz, así como los posibles términos extremo de canal (agua continental) y mar. La existencia de muestras más salinas que el mar demuestra que debe de existir un tercer término fuente, constituido por salmuera, pero de la que no se tiene la composición precisa (Panno, et al., 2006).

Tabla 5.5. Valores utilizados para la realización de la relación iónica rCl/rBr.

Pz	Cloruro (mg/l)	Cloruro (meq/l)	Bromuro (meq/l)	rCl/rBr
Canal	202	6	0.03	227
Mar	21400	603	0.76	790
1b	19500	549	0.74	744
2b	4650	131	0.13	1047
3b	23900	673	0.94	717
4b	6990	197	0.23	874
5b	1420	40	0.03	1598
6b	23200	654	0.85	768
7b	34900	983	1.25	785
8b	17300	487	0.61	795
9b	29900	842	1.11	756
10b	27800	783	1.06	736
11b	26400	744	1.01	734
PR3b	21600	608	0.79	772
1t	2700	76	0.08	1013
2t	881	25	0.03	991
3t	5660	159	0.18	910
4t	6380	180	0.20	897
5t	894	25	0.03	1006
6t	4920	139	0.14	1007
7t	15100	425	0.51	829
8t	158	4	0.03	178
9t	17700	499	0.63	797
10t	292	8	0.03	329
11t	4380	123	0.13	986
PR3t	1650	46	0.03	1857

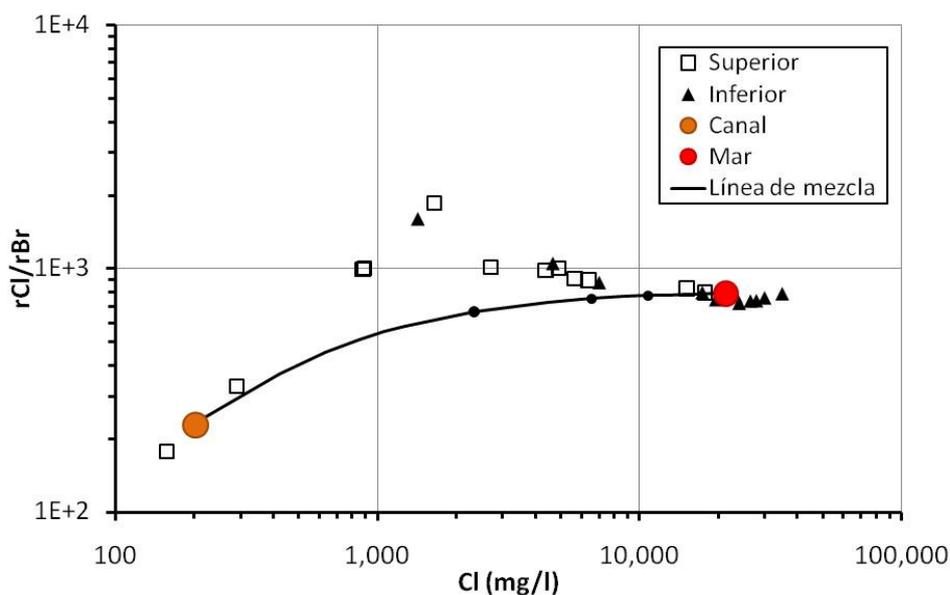


Figura 5.12. Representación de la relación rCl/rBr vs. Cl (mg/l) para la 4ª campaña (14/12/2009).

5.3 Interpretación de los resultados

5.3.1 Caracterización hidroquímica

Como ya se ha dicho en la descripción de resultados, las aguas muestreadas pertenecen a la facies clorurada sódica. Se ha establecido una línea de mezcla teórica entre los dos términos extremos (línea 1), canal y mar, como se muestra en la Figura 5.13. Los puntos muestreados no se disponen sobre esta línea en el diagrama triangular de aniones, así como tampoco en el romboidal central.

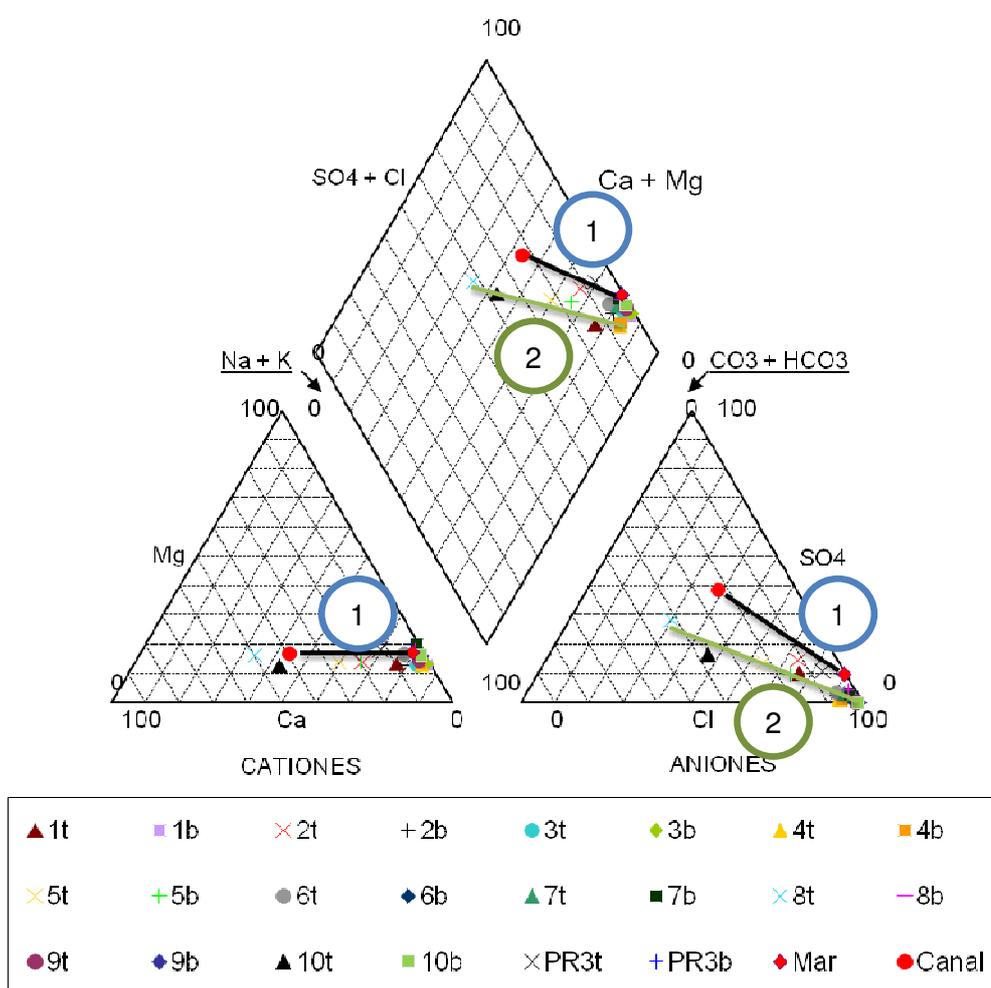


Figura 5.13. Diagrama de Piper mostrando líneas de mezcla (4ª campaña).

El diagrama de aniones muestra un déficit para el sulfato junto a un exceso de cloruro, desplazando la línea de mezcla hacia abajo. Más adelante se tratarán los posibles procesos modificadores que causan este efecto.

En el diagrama de Schöeller-Berkaloff (Figura 5.14) se observa como todas las muestras superiores se encuentran entre el agua del canal y el agua marina.

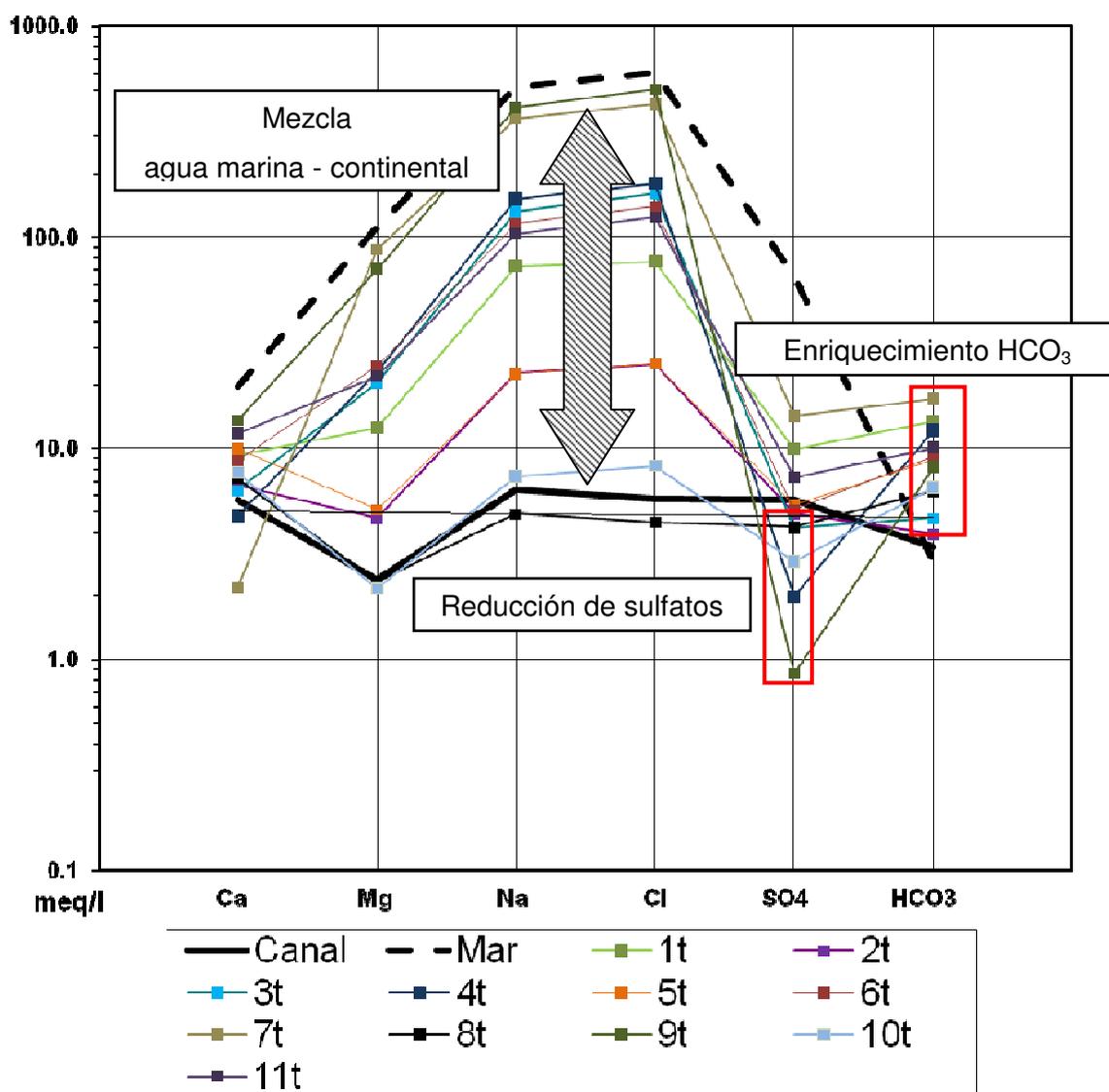


Figura 5.14. Diagrama de Schöeller-Berkaloff para las muestras superiores, identificando posibles procesos (4ª campaña).

Con ello, se pone en evidencia que las aguas muestreadas son producto de la mezcla de estas dos aguas como mínimo, pudiendo existir otros aportes minoritarios. Las muestras superiores tienen como origen el canal de riego, y presentan un claro grado de mezcla con agua marina, observándose una elevada concentración de sodio y cloruro, respecto al agua de riego. Los tres meses transcurridos desde la finalización de la irrigación no parecen suficientes para que el acuífero superficial muestre una composición homogénea, cabe resaltar que durante dicho periodo se produce ocasionalmente la inundación de los campos, con fines diferentes a la agricultura y

que no se produce drenaje. Todo ello propicia que el tiempo de residencia de algunas de las muestras superiores posiblemente sea inferior a tres meses, lo cual explica la gran similitud con el agua de riego.

La Figura 5.15 muestra como las muestra de la capa inferior muestran cierto grado de mezcla con el agua continental, aunque en general la composición es muy próxima al agua de mar.

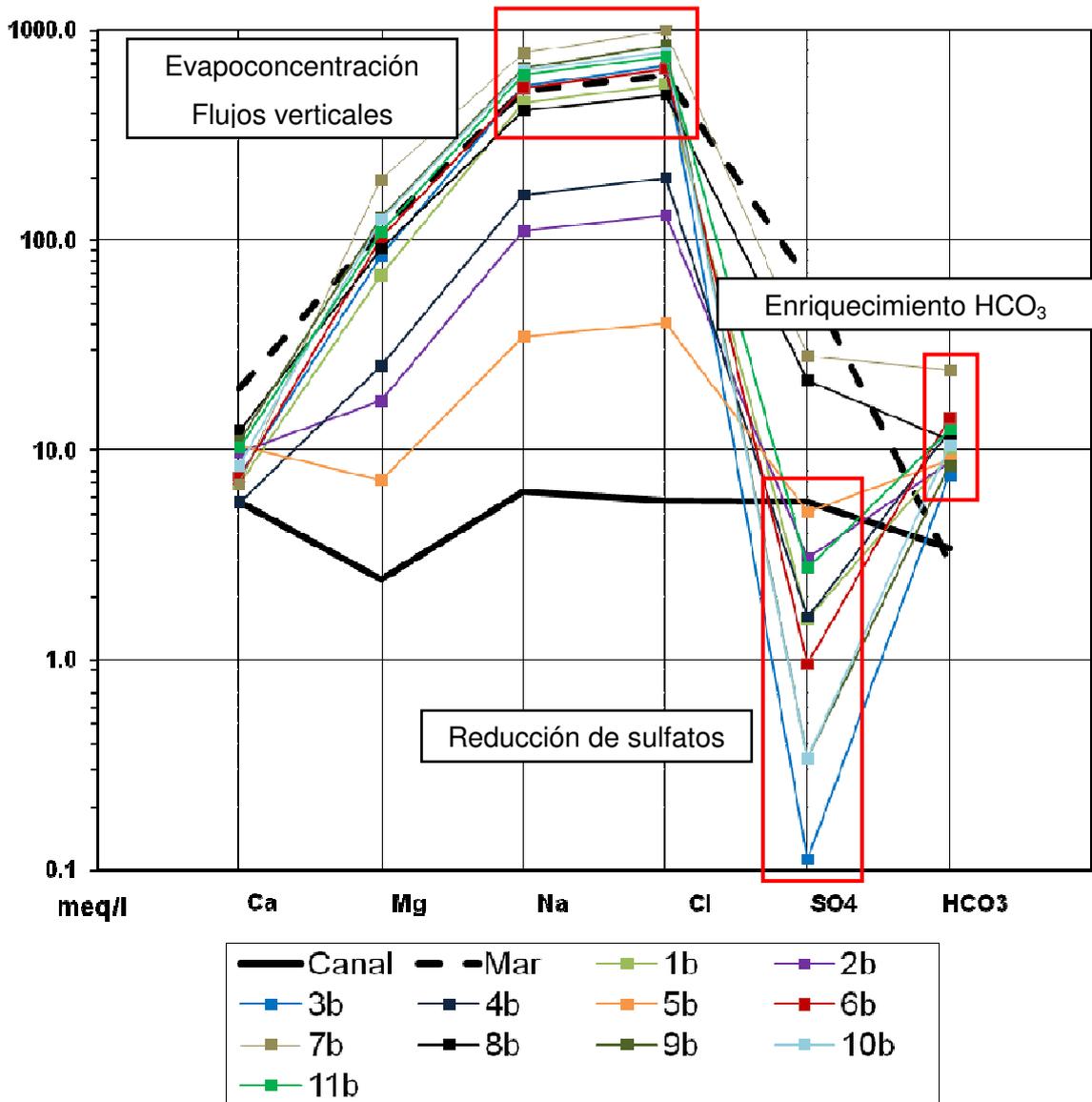


Figura 5.15. Diagrama de Schöeller-Berkaloff para las muestras inferiores, identificando posibles procesos (4ª campaña).

A diferencia de las muestras superiores, la capa inferior (Figura 5.15) tiene un tiempo de residencia elevado, pudiendo establecerse diferentes procesos que dan lugar a esta composición característica. Se observa un exceso de sodio y cloruro, superando

los valores de la muestra de mar, para muchas de las muestras inferiores, posible producto de un proceso de evapoconcentración o de flujos ascendentes más salinos provenientes de niveles inferiores, dichos procesos se discutirán posteriormente mediante el estudio de niveles y perfiles verticales.

La concentración de sulfatos sufre un descenso significativo en comparación a la muestra de mar y canal, así como a la mayoría de muestras superiores. Concretamente los valores de sulfato pasan de 3110 mg/l para la muestra de mar, a una concentración promedio para todas las muestras inferiores de 280 mg/l. Los valores de Eh registrados (Tabla 2.2), son demasiado altos para poder establecer que no se trata de un medio claramente reductor. Esto puede estar provocado por imprecisiones en las mediciones, ya que no se independizó la muestra de la atmósfera, aumentando significativamente los valores de Eh. Con todo ello existen diferentes indicios típicos de un medio reductor, como el burbujeo en los piezómetros y un olor característico, corroborado por la prácticamente inexistencia de nitratos (desnitrificación). La Figura 5.16 muestra el diagrama de predominancia para el sulfato, reproduciendo un aporte desde el mar hacia el acuífero. Todo ello hace desplazar el área de predominancia desde el SO_4^{2-} hacia el HS^- . Se ha comprobado la existencia en campo de HS^- mediante un burbujeo en los piezómetros y un olor característico, en cantidades significativas en superficie.

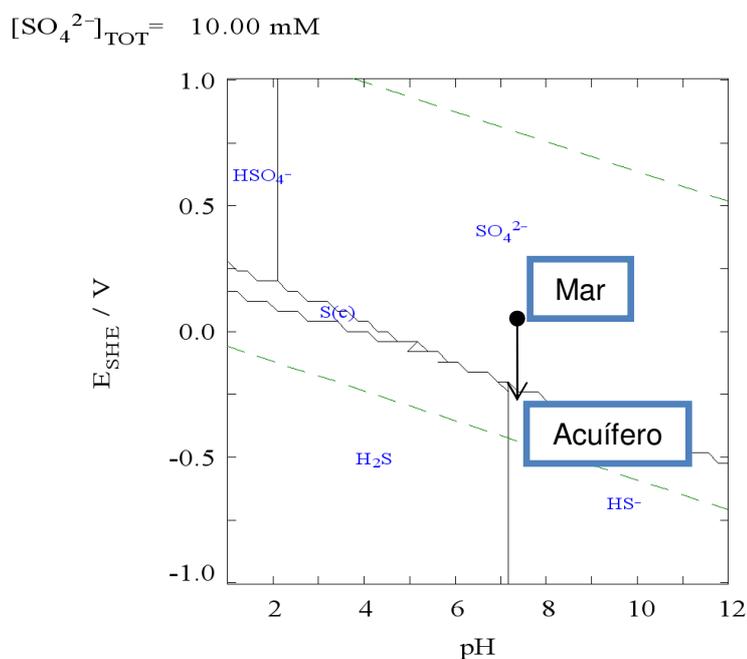
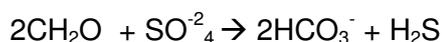


Figura 5.16. Diagrama de predominancia para el sulfato (T: 25 °C).

El proceso de reducción viene controlado por la reacción siguiente (Appelo y Postma, 2007):



De dicha reacción se desprende que la sulfato reducción, mediante materia orgánica, da como producto bicarbonato, produciéndose un enriquecimiento significativo respecto tanto al agua de mar como de riego, el cual se puede apreciar en la Figura 5.14. El aumento de bicarbonato puede provocar la sobresaturación de la calcita y su precipitación, lo que originaría una disminución sensible en el calcio.

En la Figura 5.5 se observa un solapamiento de las composiciones de las muestras, pertenecientes a la capa superior e inferior, durante la 5ª campaña de muestreo. Esta homogeneización se produce tanto por la retirada de la lámina de agua dulce mediante drenaje, como por el tiempo de residencia de ambas aguas, ya que se observa un progresivo aumento de la CE y un ascenso progresivo de la interfaz, que va siendo cada vez más difusa con el cese de la irrigación. Nótese que se alcanzan los valores máximos de salinidad durante esta 5ª campaña (11/03/2010), produciéndose un incremento significativo de Cl y Na, llegando a valores superiores al agua de mar.

En la posterior campaña de muestreo, se observa un descenso de la concentración para el Cl y Na (Figura 5.6), no pudiendo observarse todavía una clara distinción entre ambas capas. Igualmente las concentraciones en Cl y Na son próximas a las del agua de mar, no pudiendo observarse una clara influencia de la irrigación mes y medio después de su inicio.

Mediante la observación de los perfiles y los diagramas de Schöeller-Berkaloff, se observa que existe un retardo o tiempo de respuesta de al menos dos meses a la irrigación, aun existiendo una lámina de agua dulce en superficie. Ello puede deberse a la existencia de materiales deltaicos de granulometría fina o muy fina, para los cuales se determinó una conductividad hidráulica baja. Por otro lado, se llega a alcanzar una diferenciación marcada de ambas aguas, registrada en los perfiles verticales de CE, mostrando una interfaz clara. Durante el periodo posterior a la irrigación, no se produce una mezcla de ambas capas, permaneciendo ambas aguas inmiscibles debido a los efectos de densidad. Ello facilita el aislamiento de la capa inferior, facilitando la creación de una zona anóxica a escasos metros de la superficie. Debido a este comportamiento, en la 4ª campaña de muestreo se observa claramente los procesos modificadores de un ambiente reductor con un alto contenido en materia

orgánica. En contraposición, la 5ª campaña muestra el agua del acuífero superficial totalmente homogénea, mostrando una respuesta al drenaje. El ascenso generalizado de la CE en los perfiles y el aumento de la concentración de Cl y Na, evidencia un aporte simultáneo en el área de estudio, difícilmente atribuible a la intrusión marina directa o a una conexión río-acuífero.

Los diagramas de Stiff corroboran los perfiles verticales de CE, asociando el aumento de CE al de concentración de los iones mayoritarios (Cl y Na), siendo el comportamiento de la mayoría de piezómetros muy homogéneo. No obstante, tanto en la capa de agua más superficial (mapa de la Figura 5.7) como en la inferior (Figura 5.8) se observan puntos singulares (Pz5 y Pz8), con concentraciones muy inferiores, siendo su composición cercana a la facies bicarbonatada cálcica (Figura 5.13). Dichos puntos se encuentran muy próximos al canal de riego de la Dreta. Los perfiles verticales, especialmente el correspondiente al piezómetro Pz8, muestran la influencia del agua dulce hasta los -6 msnm, con una marcada interfaz. Todo ello parece indicar que el canal de riego influye en el acuífero superficial.

5.3.2 Relaciones iónicas

5.3.2.1 rNa/rCl

La Figura 5.9 muestra el diagrama de correlación rNa/rCl , estableciendo algunos de los procesos, ya descritos anteriormente mediante los diagramas de Schöeller-Berkaloff. Dichos procesos son la mezcla entre agua de mar y agua del canal, además de otra agua más salina, probablemente una salmuera local formada por evapoconcentración de agua de mar, como se observa en algunas de las muestras inferiores que superan ampliamente la concentración del mar en Cl (meq/l).

5.3.2.2 rSO_4/rCl

El diagrama de correlación rSO_4/rCl vs. Cl (mg/l) (Figura 5.10) muestra la gran variabilidad del conjunto inferior respecto al cloruro, así como una relación rSO_4/rCl muy cercana a cero. Todo ello obedece a procesos de sulfato reducción, ya descritos anteriormente. El superior se dispone por debajo de los 20,000 mg Cl/l y tiene gran variación en la relación aniónica, llegando a valores de 0.95. Dichos valores son muy superiores a los del agua del canal y parecen obedecer a un aporte antrópico debido los trabajos de sulfatación durante el cultivo del arroz. Todas las muestras se agrupan

sobre una línea de tendencia potencial con exponente negativo, mostrando la evolución desde muestras enriquecidas en SO_4^{2-} respecto al canal, hacia muestras situadas por debajo de la interfaz afectadas por procesos de sulfato reducción.

5.3.2.3 $r\text{HCO}_3/r\text{Cl}$

Anteriormente se ha descrito el proceso de sulfato reducción, generando como producto bicarbonato. Debido a este proceso se pueden observar valores superiores al que presenta el canal (Figura 5.11). La mayoría de muestras superiores tienen concentraciones inferiores a los 7 g Cl/l y una relación $r\text{HCO}_3/r\text{Cl}$ continental. Por otro lado, las aguas inferiores, muestran una relación $r\text{HCO}_3/r\text{Cl}$ muy baja, correspondiendo a aguas marinas.

5.3.2.4 $r\text{Cl}/r\text{Br}$

A partir de la representación de la relación $r\text{Cl}/r\text{Br}$ vs. Cl (mg/l) (Figura 5.12), se han determinado una serie de conjuntos según su disposición en dicha gráfica. Se identifican dos principales conjuntos, correspondientes a las muestras recogidas en la parte superior e inferior de la interfaz, en este último conjunto también se incluye la muestra recogida en el mar. Dentro del conjunto de las muestras inferiores, se encuentra un subconjunto el cual presenta concentraciones superiores al agua de mar, correspondiente a salmueras. Dichas salmueras presentan valores de $r\text{Cl}/r\text{Br}$ superiores a las muestreadas con anterioridad en el Delta (Custodio et al., 1997), siendo más próximos a los valores obtenidos en otras zonas costeras (Manzano et al., 2001; Custodio y Herrera, 2000; Cabrera et al., 2000).

Para el cálculo de la línea de mezcla (Figura 5.12) se ha utilizado la siguiente expresión (Custodio y Alcalá, 2008). Así mismo, la línea de mezcla muestra el contenido de agua marina.

$$R_F = \frac{\text{Cl}_F}{\text{Br}_F} = \frac{\text{Cl}_F}{\text{Br}_I(1 - X) + \text{Br}_A \cdot X}$$

Donde;

R_F : relación $r\text{Cl}/r\text{Br}$ final
 Br_F : bromuro final (meq/l)
 Cl_F : cloruro final (meq/l)
 Br_I : bromuro inicial (meq/l)
 Br_A : bromuro añadido (meq/l)
 X : fracción de agua añadida

Los puntos muestreados no se disponen sobre la línea de mezcla teórica, evidenciando la existencia de algún proceso modificador. Existen diferentes procesos que pueden modificar la relación rCl/rBr en una zona costera. El acuífero superficial es susceptible de recibir el aporte sales directamente de la atmósfera, en la mayoría de los casos se puede descartar este proceso debido a que este tipo de aporte está enriquecido en bromo, disminuyendo el valor de la relación rCl/rBr hasta 300, tierra adentro (Butler et al., 2007; Solomon et al., 2005). Aun así, se han registrado valores de hasta 1000 en zonas costeras áridas y con predominio del viento (Herrera y Custodio, 2003).

La zona de estudio presenta vientos desde mar a tierra de manera sostenida durante todo el año (Figura 5.17), capaces de transportar el aerosol marino, compuesto por pequeños cristales de halita. Por ello, es posible que un pequeño aporte atmosférico modifique significativamente el valor de la relación rCl/rBr para valores inferiores al 10% en contenido en agua marina. Una vez rebasado el valor de 10%, el aporte atmosférico y del aerosol marino puede quedar enmascarado por los altos valores de cloruro y bromuro del agua de mar, desplazándose las muestras otra vez hacia la línea teórica de mezcla.

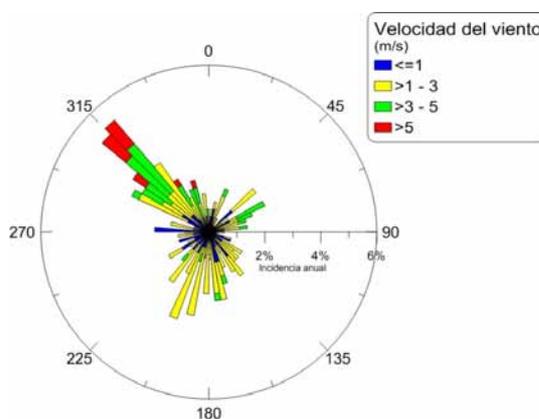


Figura 5.17. Intensidad y dirección del viento (Agosto 2009/Agosto 2010) para la isla de Buda (Ruralcat, 2010).

6. Resultados de la caracterización isotópica ambiental

6.1 Isótopos estables

6.1.1 Descripción de las campañas

La principal motivación para el uso de isótopos estables es la información que pueden aportar sobre el origen del agua y de los solutos presentes en ésta, así como determinar los procesos que se han producido durante su historia, como por ejemplo la sulfato-reducción entre otros (Panno et al., 2006). Los isótopos de la molécula del agua, en condiciones de temperatura y presión habituales, se comportan como conservativos (Escuder et al, 2009) incluso para periodos de tiempo muy largos (>10000 años), superiores a la formación del acuífero superficial del Delta.

El muestreo de los isótopos estables del agua se realizó durante la 2ª y 4ª campañas de campo (14/07/2009 y 14/12/2009 respectivamente). Durante la 2ª campaña se muestrearon 14 puntos, incluyendo la totalidad de los puntos de control, el agua del río Ebro (PR1), el agua del canal a la altura de Amposta y del mar al norte de la población de l'Ampolla. Durante la 4ª campaña se realizó el muestreo de 3 puntos, para cada punto se recogieron muestras tanto en las aguas superiores a la interfaz como inferiores (siglas t y b respectivamente) (Tabla 6.1).

Tabla 6.1. Puntos de muestreo para los isótopos estables del agua.

2ª Campaña	4ª Campaña
Pz 1	Pz 1 b
Pz 2	Pz 1 t
Pz 3	Pz 6 t
Pz 4	Pz 6 b
Pz 5	Pz 11 b
Pz 6	Pz 11 t
Pz 7	
Pz 8	
Pz 9	
Pz 10	
Pz 11	
RP 1	
Canal	
Mar	

Las muestras de agua (frascos de polietileno de 500 ml) se analizaron en el laboratorio de radiología ambiental, del Departamento de Química Analítica de la Universidad Autónoma de Madrid, Servicio Interdepartamental de Investigación.

6.1.2 Resultados

Los resultados obtenidos para ambas campañas se presentan en la Tabla 6.2. Todos los puntos de control presentan valores intermedios a los observados para el agua de mar y agua del río Ebro.

Tabla 6.2. Valores de $\delta^{18}\text{O}$ y δD obtenidos.

2º Campaña			4º Campaña		
Punto de muestreo	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$	$\delta\text{D}_{\text{VSMOW}}$	Punto de muestreo	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$	$\delta\text{D}_{\text{VSMOW}}$
Pz 1	-4.24	-32.9	Pz 1 b	-4.37	-29.8
Pz 2	-7.11	-50.0	Pz 1 t	-4.53	-32.6
Pz 3	-6.73	-48.0	Pz 6 t	-6.98	-47.0
Pz 4	-5.44	-40.8	Pz 6 b	-5.73	-38.1
Pz 5	-6.66	-48.8	Pz 11 b	-1.73	-12.6
Pz 6	-6.03	-42.9	Pz 11 t	-4.63	-32.3
Pz 7	-3.81	-31.0			
Pz 8	-8.10	-57.5			
Pz 9	-3.96	-31.4			
Pz 10	-3.94	-32.0			
Pz 11	-3.31	-26.6			
RP 1	-7.85	-56.5			
Canal	-8.33	-60.1			
Mar	1.13	4.6			

La distribución espacial de los valores de δD y $\delta^{18}\text{O}$ de los puntos muestreados se puede observar en la Figura 6.1. Cabe destacar que la muestra de agua de mar se recogió al norte de l'Ampolla, pero se ha situado como el punto más aguas abajo ($\delta\text{D} = 5$ y $\delta^{18}\text{O} = 1$) para poder representar todos los datos en un único mapa. Igualmente el agua de canal ($\delta\text{D} = -60$ y $\delta^{18}\text{O} = -8$) no se recogió en ese punto, sino en las proximidades de Amposta.

La relación de la composición isotópica de ambas campañas (Figura 6.2), muestra como todos los puntos muestreados presentan valores intermedios al agua de mar y canal. Las Figura 6.3 y Figura 6.4 muestran la relación entre los isótopos estables del agua y la concentración de cloruros. Así mismo, se ha calculado la línea de mezcla teórica, no observándose un ajuste generalizado de las muestras.

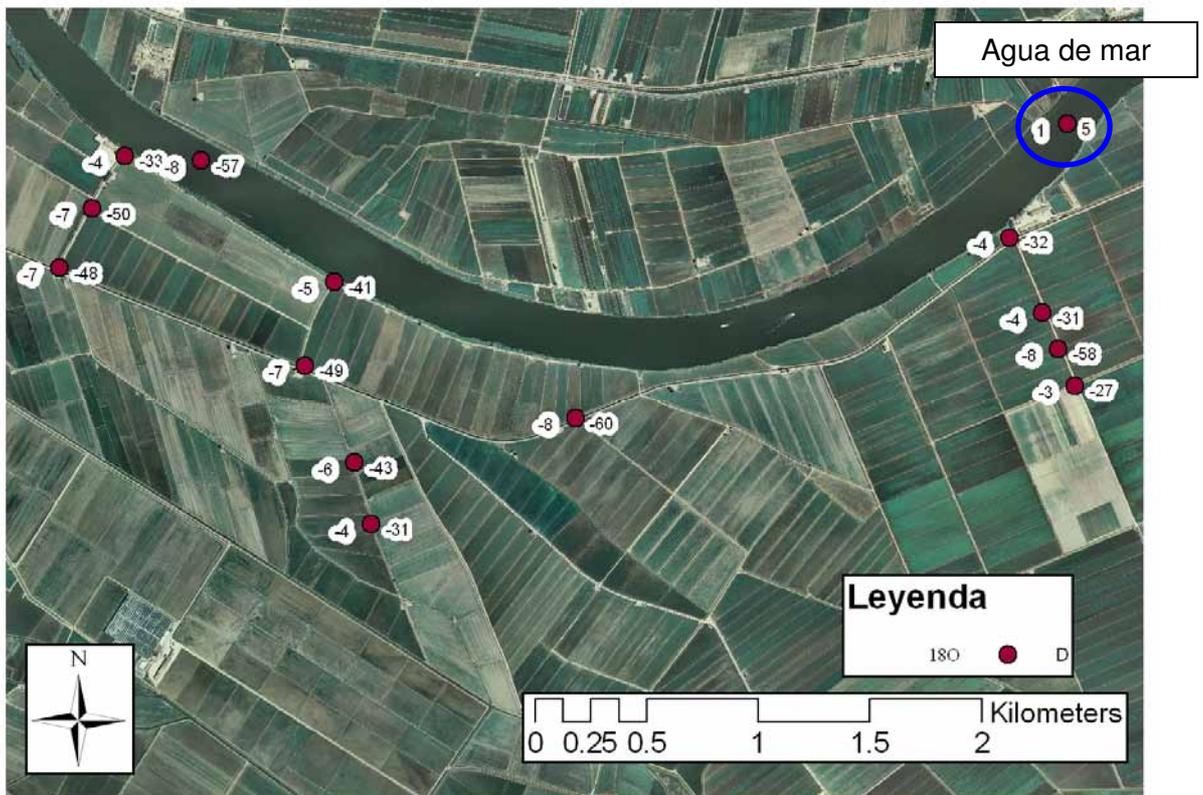


Figura 6.1. Distribución espacial de δD y $\delta^{18}O$ (2ª campaña).

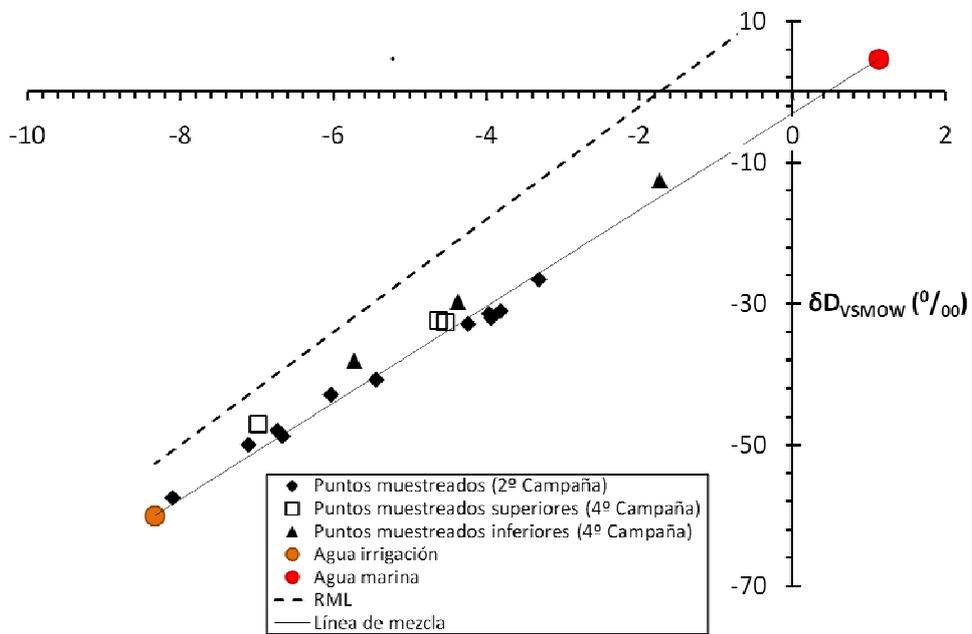


Figura 6.2. Composición isotópica de las muestras y la línea de mezcla río-mar.

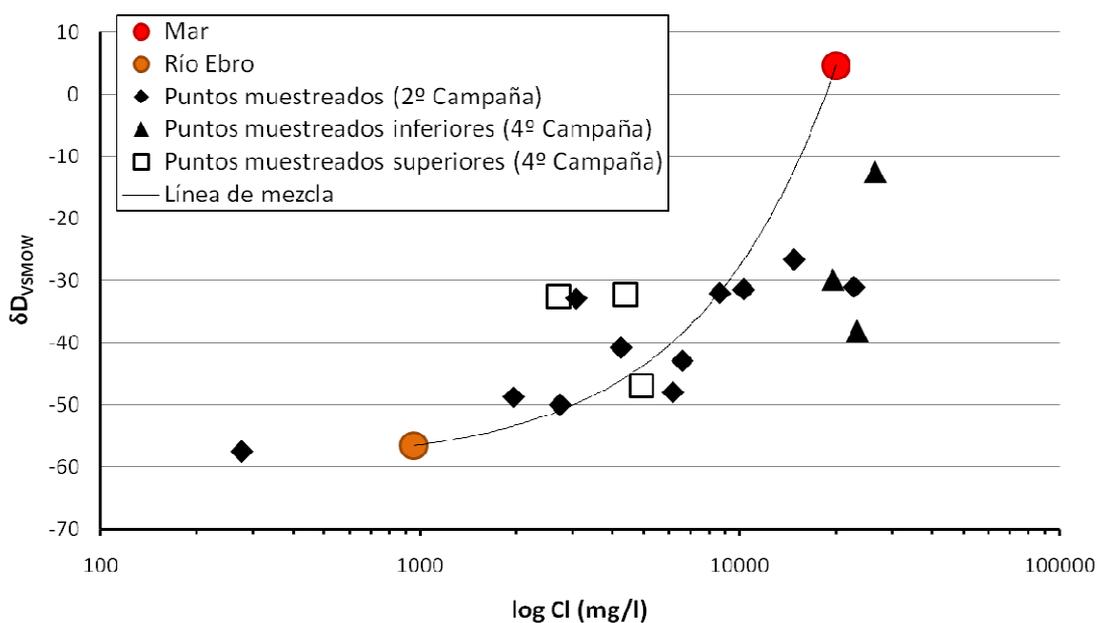


Figura 6.3. Relación δD vs concentración de cloruro (mg/l) (2ª y 4ª campañas).

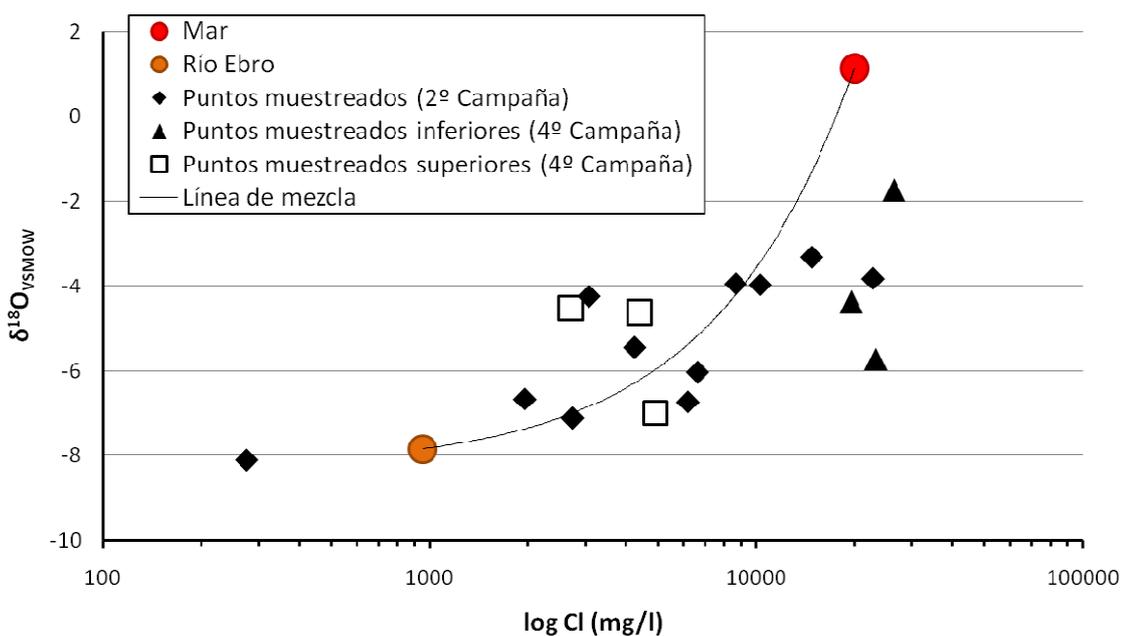


Figura 6.4. Relación $\delta^{18}O$ vs concentración de cloruro (mg/l) (2ª y 4ª campañas).

6.1.3 Conclusiones

Los resultados presentados en la Figura 6.1 y Figura 6.2, muestran la distribución espacial de los valores obtenidos durante la 2ª campaña. Todos los puntos presentan valores muy similares, no apreciándose la influencia del canal de la Dreta o el río Ebro. En general se trata de valores cercanos al agua del canal.

Durante la 4ª campaña se muestrearon puntos correspondientes a diferentes líneas de control, situados a diferentes distancias del río Ebro y dispuestos en materiales diferentes (Tabla 6.3). Esta campaña permite diferenciar las capas del acuífero superficial, mostrando diferentes tendencias. Las muestras superiores son más ligeras que sus respectivas muestras inferiores (Figura 6.5), evidenciando que las muestras inferiores están compuestas en cierta medida por agua de origen fluvial.

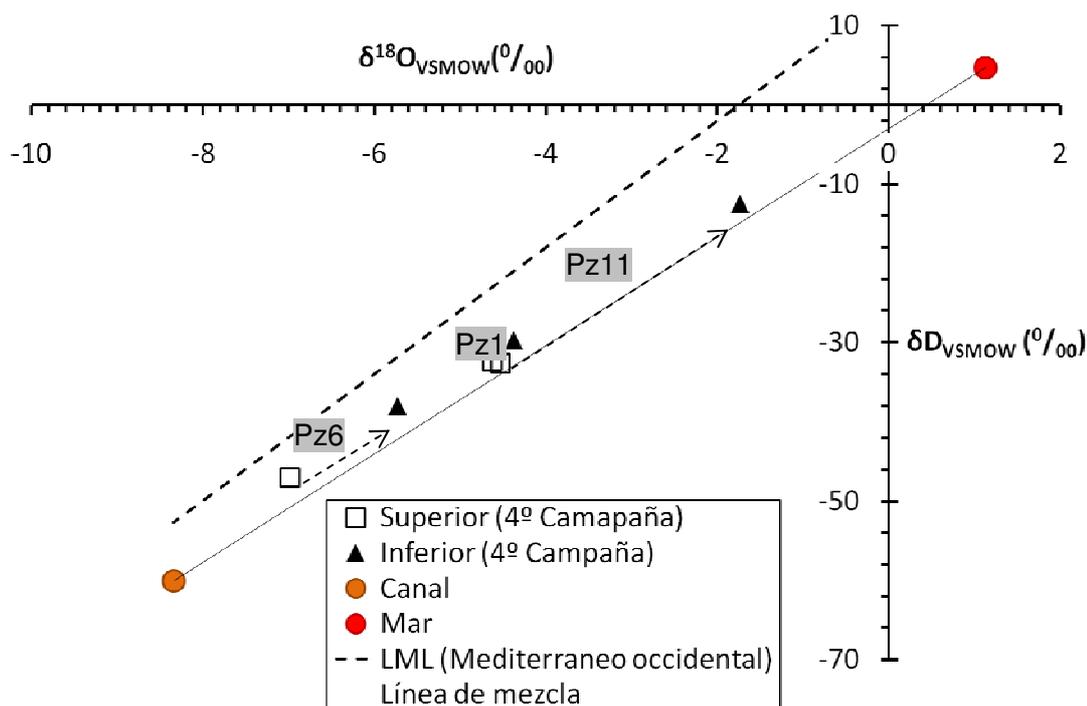


Figura 6.5. Representación de la composición isotópica de las muestras recogidas correspondientes a la 4ª campaña.

La Tabla 6.3 muestra las diferencias existentes entre ambas capas del acuífero superficial, en relación a la distancia a la que se encuentran del río Ebro. Las dos muestras del Pz1 son muy similares isotópicamente, a pesar de tener una salinidad muy distinta. Esto indica que las dos tipologías de agua proceden, en gran parte, del río (a través de pérdidas en los canales de irrigación).

Tabla 6.3. Diferencia de la composición isotópica y distancia al río Ebro.

Punto	(Inferior - Superior)		Distancia al río (m)	Situación
	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$	$\delta\text{D}_{\text{VSMOW}}$		
Pz 1	0,16	2,8	20	Levé
Pz 6	1,25	9,0	710	Llanura deltaica
Pz 11	2,90	19,8	785	Marismas degradadas

En cambio, en el Pz11 el comportamiento es distinto. Mientras que el agua superior es la misma que en Pz1, la inferior tienen un carácter mucho más marino. Esto puede ser debido a que en las proximidades del piezómetro Pz11 hay un pozo de drenaje que, en época de drenaje, rebaja mucho los niveles en un ámbito local y facilita el ascenso de agua salada de origen marino presente en las capas más profundas, a través del acuitardo, obteniéndose valores isotópicamente cercanos al mar, en comparación a las demás muestras. En contraste, el piezómetro Pz6 muestra una clara afección del agua del canal, siendo la presencia de agua del canal el componente mayoritario en ambas capas, y muy superior a las demás muestras.

6.2 Isótopos radioactivos, tritio

6.2.1 Descripción de las campañas

Se ha utilizado el isótopo de tritio para intentar obtener información complementaria sobre el origen y comportamiento de las aguas estratificadas del acuífero superior.

El tritio es el isótopo radiactivo del hidrógeno, el cual tiene una vida media de 12,6 años. Su formación se da de forma natural por la emisión del sol y la producción en la estratosfera. Así mismo, debido a las pruebas termonucleares llevadas a cabo a partir de 1952 se produjo un aporte importante de tritio a la atmósfera, llegando a concentraciones máximas en 1962 (Clark y Fritz, 1997).

La recogida de muestras de tritio se llevó a cabo durante la 4ª campaña de campo (14/12/2009). Se muestreó el agua de 10 puntos (Tabla 6.4), coincidiendo con el muestreo para análisis de componentes mayoritarios.

Tabla 6.4. Puntos de muestreo para análisis de tritio (4ª campaña).

Punto de muestreo	Descripción
Canal	Agua del canal de la Dreta
Mar	Agua marina, Ampolla
Pz1-t	Pz1, agua superior
Pz1-b	Pz1, agua inferior
PR3-t	Río Ebro, agua superior
PR3-b	Río Ebro, agua inferior
Pz6-t	Pz6, agua superior
Pz6-b	Pz6, agua inferior
Pz11-t	Pz11, agua superior
Pz11-b	Pz11, agua inferior

Para el transporte de las muestras se utilizaron frascos de polietileno de 300 ml. Las analíticas se realizaron en el Laboratorio de Radiología Ambiental, del Departamento de Química Analítica de la Universidad de Barcelona (<http://www.ub.edu/quimica/>), utilizando la técnica del centelleo líquido.

6.2.2 Descripción de los resultados

Cinco de las muestras presentan contenidos en tritio por debajo de la actividad mínima detectable (Tabla 6.5), por lo que no se conoce su valor exacto. Para el cálculo de las unidades de tritio (UT) se consideró que 1 UT es equivalente a una actividad específica de 0,118 Bq/l.

Tabla 6.5. Resultados de las analíticas de tritio (4ª campaña).

	Actividad Específica ^(1, 2) (Bq/l)	AMD ⁽³⁾ (Bq/l)	UT
CANAL	13,0 ± 0,9	2,7	1,53
MAR	< 2,1	2,1	0,25
RÍO-PR3-t	4,4 ± 0,8	2,7	0,52
RÍO-PR3-b	< 2,1	2,1	0,25
Pz1-t	< 2,7	2,7	0,32
Pz1-b	< 2,8	2,8	0,33
Pz6-t	6,8 ± 0,9	2,7	0,80
Pz6-b	3,3 ± 0,8	2,7	0,39
Pz11-t	4,8 ± 0,7	2,1	0,57
Pz11-b	< 2,7	2,7	0,32

- (1) Actividad específica referida a la fecha de análisis de la muestra con la incertidumbre expandida (k=1)
 (2) La actividad mínima cuantificable es tres veces la actividad mínima detectable
 (3) Actividad mínima detectable para un nivel de confianza del 95%.

La distribución espacial de los valores de tritio refleja como las muestras correspondientes a la capa superior (Figura 6.6) presentan valores mayores que las de la capa inferior (Figura 6.7). Lo mismo ocurre con las dos muestras del río Ebro. La excepción es el piezómetro Pz1, donde en ninguna de las dos muestras se detecta actividad. El agua del canal, utilizada para riego, es la que presenta mayor actividad. En el otro extremo está el agua del mar, sin actividad, como la mayoría de las muestras inferiores.

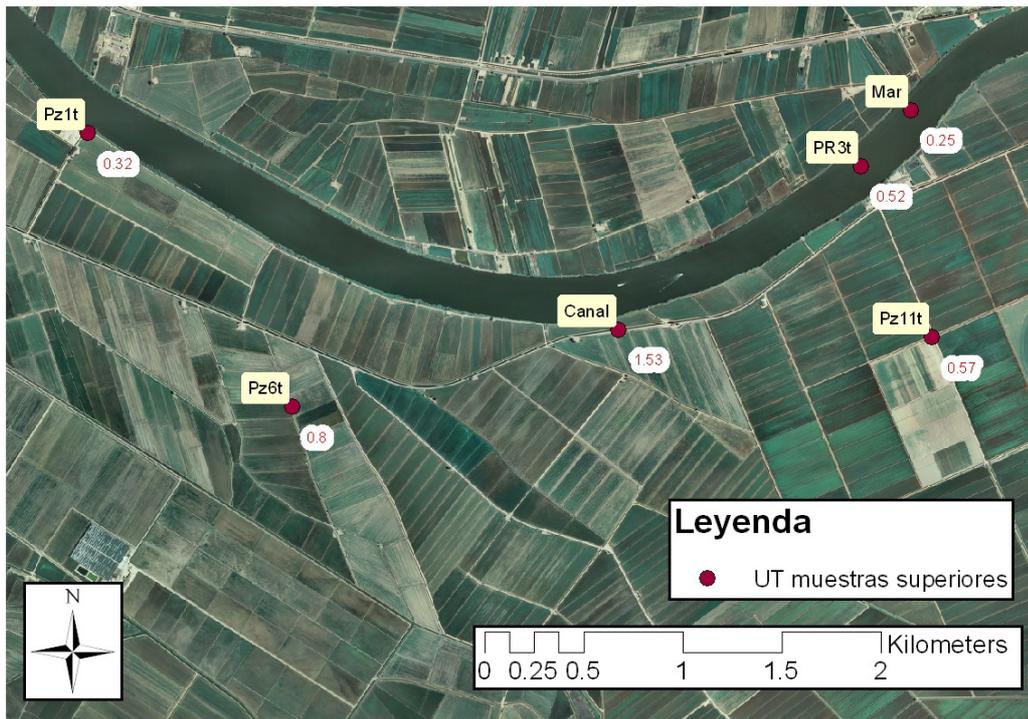


Figura 6.6. Valores de tritio (UT) para las muestras superiores (4ª campaña).

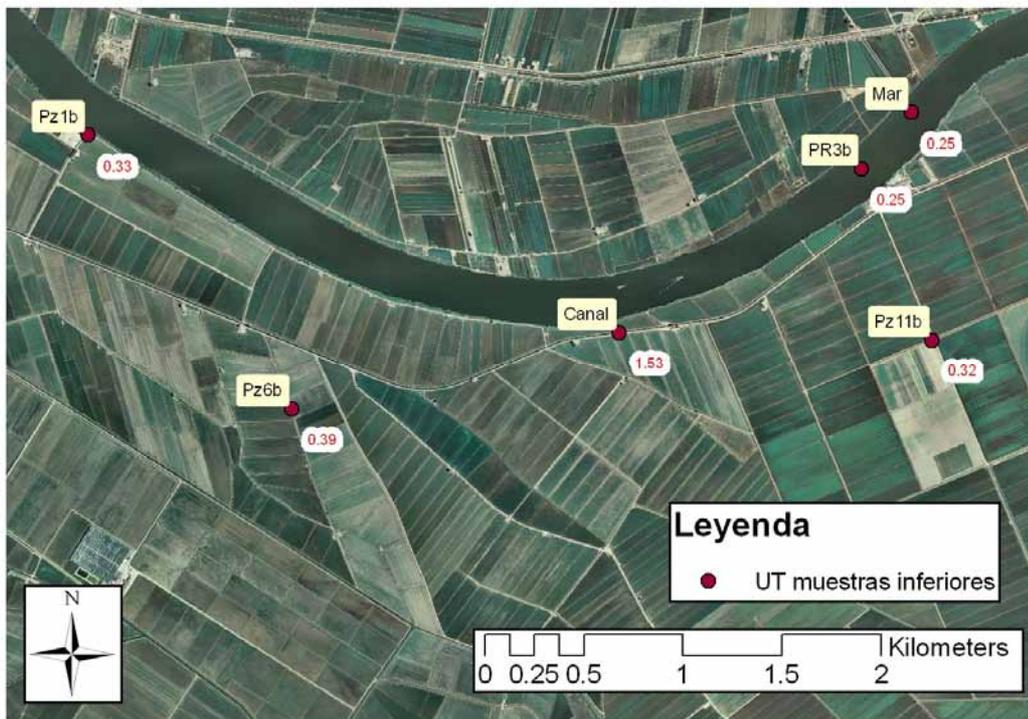


Figura 6.7. Valores de tritio (UT) para las muestras inferiores (4ª campaña).

6.2.3 Conclusiones

Los valores de tritio registrados en todos los puntos de control son bajos, en comparación al agua de riego actual o al agua de lluvia. El valor de la precipitación (5 UT) se ha determinado mediante datos bibliográficos (Escuder et al, 2009), realizando una media de los valores observados sin tener en cuenta más condicionantes como continentalidad o latitud.

La Figura 6.8 refleja una mezcla entre agua de mar y agua de riego, siendo el agua de mar el componente con más peso en la mezcla.

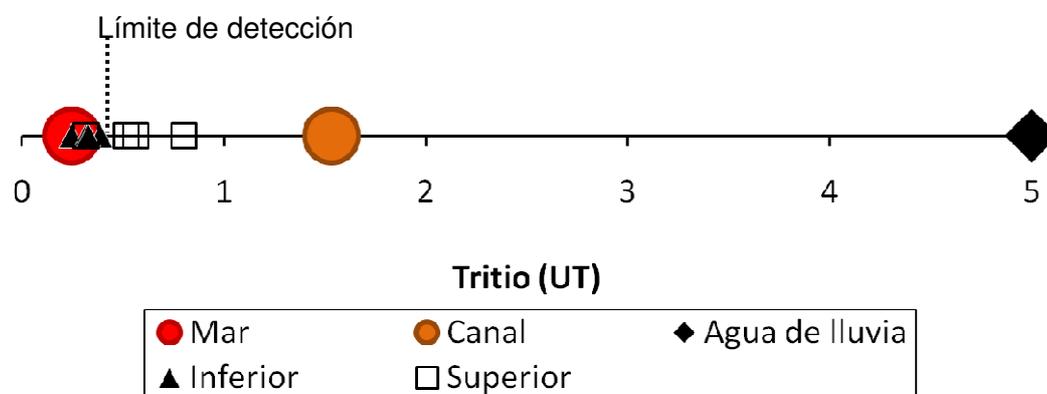


Figura 6.8. Valores de tritio registrado en los piezómetros, canal, río Ebro y mar.

Con todo lo expuesto, pueden establecerse dos vías de entrada del agua de mar hacia el acuífero superficial. Una sería la que ya se ha mencionado, a través del acuífero inferior, a modo de flujo pistón, en el que el frente no sufre interacción con otras aguas. Por otro lado, el agua de mar puede penetrar en el acuífero superficial directamente, desde la línea de costa. Para este caso, se puede atribuir un modelo de mezcla total, en el cual el frente interacciona con diferentes aguas, recargadas en diferentes épocas y con distintos contenidos en tritio.

Como se visualiza en la Figura 6.9, el modelo de mezcla total originariamente contiene 0,25 UT (origen marino), la línea de flujo penetra directamente en el acuífero superficial, recibiendo un aporte importante de agua de riego y más limitada de precipitación. Por ello, parece difícil poder obtener aguas con concentraciones inferiores a 0,3 UT, como las registradas en la capa inferior en el centro del hemidelta. Por otro lado, el modelo de pistón se inicia igualmente en el mar, pero penetrando en el acuífero profundo. Mediante flujos verticales ascendentes la línea pasa a través del acuitardo, hasta llegar a la base del acuífero superficial, generando un término fuente

con 0 UT. Dicho termino fuente pasará a mezclarse con las aguas de irrigación, dando lugar a aguas con valores de 0 a 1 UT, como las registradas.

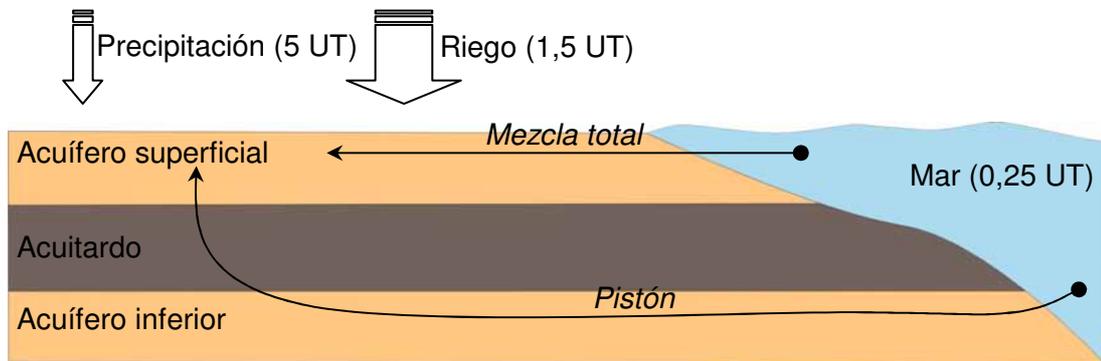


Figura 6.9. Posibles modelos de flujo para el Tritio.

7. Discusión

Introducción

El Área de Calidad de la Confederación Hidrográfica del Ebro aborda un trabajo detallado en el delta del Ebro para estudiar la dinámica del acuífero superficial del delta y la posible relación de la salinidad de dicho acuífero con la lengua salina de agua de mar que entra por el cauce del río.

A raíz de los cultivos de arroz presentes en la mayor parte del delta, durante los últimos años se ha señalado un posible aumento en la salinidad del acuífero superficial. Este hecho conlleva, para poder seguir con la práctica agrícola, un incremento del uso de agua dulce aportada durante la época de riego, a través de los canales de riego, y, a su vez, un incremento de la necesidad de drenar agua hacia el mar, durante la época de drenaje.

El incremento de salinidad parece estar relacionado con la evolución geográfica del propio delta, pues, además de encontrarse en retroceso, el conjunto del delta está sufriendo una subsidencia respecto al nivel del mar. A su vez, esta evolución está relacionada con el cese de aportes de sedimentos desde la construcción de los embalses en la cuenca del Ebro.

Por otro lado, también las grandes presas existentes a lo largo de toda la cuenca, son las que se utilizan para regular el caudal del río aguas abajo, y, en particular, para laminar las crecidas y para mantener caudales en épocas de sequía. Además, el incremento de captaciones para abastecimientos y para regadíos en toda la cuenca ha provocado que el volumen total anual de agua del Ebro vertido al mar por el delta sea menor que antes, aun considerando una misma pluviometría. Antes de la regulación del caudal, en épocas de sequía, el agua del mar entraba hacia el delta a través del cauce del río, algunas decenas de kilómetros aguas arriba de la desembocadura. Esta lengua o cuña de agua marina subía por el fondo del cauce, por debajo del agua dulce del río, que fluía en dirección al mar. En épocas de crecida, empujada por el fuerte caudal de agua dulce, la lengua salina retrocedía rápidamente hacia el mar pudiendo llegar a desaparecer, para volver a formarse en la sequía siguiente.

La disminución del caudal anual, y sobre todo la laminación de las crecidas han propiciado que la lengua salina del río esté siempre presente en gran parte del tramo del cauce que circula por el delta. Durante los últimos años se constata que la cuña

siempre está más aguas arriba que las poblaciones de San Jaume d'Enveja y Deltebre. Efectivamente, el extremo de la cuña puede desplazarse algún kilómetro y el espesor de agua dulce sobre agua salada (o profundidad de la interfaz en el río) puede oscilar algún metro, dependiendo de la ubicación y de la época del año, pero la lengua salina en el río nunca deja de tener una entidad importante.

Técnicas de estudio

Los trabajos realizados en este estudio han sido diseñados, planificados y ejecutados con el fin de confirmar o descartar alguna posible relación del tipo causa efecto entre la persistencia de la lengua salina en el río y el incremento de la salinidad en el acuífero superficial del delta. El estudio se ha focalizado en el hemidelta derecho, al lado del río, aguas debajo de Sant Jaume d'Enveja.

Se han implementado distintas técnicas de estudio con el fin de obtener resultados complementarios. En el río se han realizado medidas de nivel manuales y seguimiento en continuo mediante un sensor de presión. También se han realizado perfiles verticales de Conductividad Eléctrica en distintos puntos del río en distintas épocas del año. Mediante la construcción de 11 piezómetros ambientales se han realizado medidas manuales de nivel y registros verticales de CE en distintas épocas del año.

Se ha tomado muestra de agua de los piezómetros a distintas profundidades en distintas épocas del año para realizar análisis fisicoquímicos y de isótopos. También se ha analizado agua del canal de la Dreta, del río y del mar.

Toda la información nueva obtenida se ha revisado y validado, descartando los datos no aceptables. Los resultados han sido interpretados de forma individual y también conjunta, además se han relacionado con la dinámica del río y la práctica agrícola del arroz.

Niveles e interfaz

El nivel del río varía muy poco a lo largo del año, únicamente se registra oscilaciones de algún decímetro que corresponden a las mareas, a las tempestades y al caudal del río. La posición de la interfaz agua dulce-agua salada en el río siempre está algo más elevada aguas abajo y puede oscilar más de 1 metro. La posición de la interfaz y, en definitiva el avance de la cuña aguas arriba depende exclusivamente de la dinámica del río, la dinámica del mar (mareas, temporales,..) y su interacción mutua. Es decir, básicamente del caudal del río.

Por otro lado, el nivel freático en el acuífero responde al régimen de inundación y drenaje de los campos de arroz. Este comportamiento marcadamente estacional se registra casi en la totalidad de los piezómetros, con alguna excepción, que responde a la influencia del río o del canal de la Dreta, por estar ubicados a pocos metros de distancia. En general el nivel freático del acuífero es cercano al del río, estando por encima en épocas de riego y por debajo en épocas de drenaje.

El gradiente piezométrico longitudinal a lo largo del delta es mayor que el gradiente hidráulico del río en el delta. Por este motivo, en el delta proximal, el nivel freático está casi siempre por encima del nivel del río mientras que en el delta distal, durante varios meses, el nivel freático está por debajo del nivel del río (y del mar). En la zona donde se han realizado los estudios de detalle, en la parte central del delta, la situación es intermedia.

El agua del acuífero está estratificada debido a la diferencia de densidad que le produce la salinidad. En épocas de inundación y riego hay una capa superior de agua dulce de algún metro de espesor, por encima de varios metros de agua salada como el agua de mar o, incluso más salada en la base, a unos 9 metros de profundidad. En épocas de drenaje, hacia finales del invierno, el nivel freático baja, la capa de agua dulce puede llegar a desaparecer y todo el acuífero está muy salinizado. De este modo, la interfaz agua dulce-agua salada en el acuífero oscila mucho estacionalmente, y puede desaparecer. En principio, la dinámica del agua del acuífero responde claramente a las etapas del cultivo del arroz.

El posible flujo de agua entre el acuífero y el río viene controlado por un gradiente horizontal muy bajo (difícil de establecer con precisión puesto que tanto el río como el acuífero tienen dos fases líquidas superpuestas), que cambia de sentido en función de la época del año y de la zona del delta. Este flujo debería cruzar los materiales del levée del río, que son muy finos y que tienen una conductividad hidráulica más baja que la del acuífero.

Hidroquímica

En las primeras campañas el muestreo se realizó purgando los piezómetros, esto provocaba una mezcla de las facies de agua muy distintas. Los resultados analíticos fueron muy dispersos, poco coherentes y erróneos desde el punto de vista de balance de cargas. En las campañas siguientes, el muestreo se realizó mediante una pequeña bomba sumergida a la profundidad deseada (escogida en base al perfil vertical previo

de CE), únicamente se realizaba un micropurgado para que la muestra fuera representativa de la facies deseada.

Los resultados analíticos permiten identificar tres facies, que actuando como términos extremo de una mezcla variable, dan lugar al conjunto de las composiciones detectadas. Las tres facies extremas son el agua dulce de riego, procedente del río a través del canal de la Dreta, que empieza en el azud de Xerta. El agua salada tipo agua de mar y agua más salada que la del mar, existente en la base del acuífero. En base a muchos parámetros e índices, prácticamente todas las muestras analizadas están en la línea de mezcla entre la salmuera y el agua dulce, pasando por el agua de mar.

Se han detectado otros procesos modificadores menores. Se trata de la reducción de los sulfatos en la base del acuífero y los aportes de airesol marino. En la base del acuífero se han detectado condiciones muy reductoras mediante las medidas de campo del potencial redox del agua y, sobre todo, las observaciones directas de la emanación de metano desde los piezómetros y los bajos contenidos en nitratos y sulfatos en el agua, además del incremento de bicarbonatos.

En base únicamente al contenido en sales, no se puede distinguir si la salinidad proviene del agua del mar o de la salmuera. Aunque parece claro que la evaporación y la evapotranspiración actuales, aunque sea importante, juegan un papel menor en el incremento de sales y no pueden contribuir en la generación de salmueras actualmente.

Así pues, la salinidad presente en el acuífero superior, según los indicadores geoquímicos e incluso, isotópicos, puede tener su origen en la mezcla de salmuera antigua con agua dulce, o de agua de mar con agua dulce, o de una combinación de los tres términos.

La omnipresencia de agua de mar en el delta y sus alrededores podría inducir a pensar que actualmente tenga un papel importante en generar salinidad al acuífero. La salmuera existente en el interior del delta, obviamente es de origen marino, es decir, se generó hace algún centenar de años cuando agua de mar se quedó estancada en el delta y se siguió evaporando en unas laguna naturales. Así pues, al tener el mismo origen que el agua de mar actual, los indicadores geoquímicos e isotópicos no permiten distinguir la fracción de mezcla de cada uno de los términos.

8. Conclusiones

En el transcurso de los diferentes apartados de este estudio se han adelantado los resultados correspondientes a cada tipo de caracterización. Dichos resultados se complementan y permiten elaborar unas conclusiones generales sobre la dinámica del acuífero superficial del delta del Ebro.

El acuífero superficial del delta del Ebro está formado por tres facies diferenciadas, conformando un acuífero altamente estratificado. La distribución de las facies responde a las diferentes situaciones hidrodinámicas que se dan en el delta del Ebro, siendo las interfaces altamente móviles durante el año, como se observa en los perfiles verticales de CE.

Mediante la interpolación de los perfiles de CE y los niveles obtenidos en la línea 3 de piezómetros durante todas las campañas, se ha realizado un modelo conceptual para establecer la distribución de las diferentes facies (Tabla 8.1) a lo largo del año. Las dos situaciones extremas se observan al final del periodo de drenaje, antes de la inundación de los campos (inicio de Abril) y al final del periodo de cultivo (Septiembre). La facies de agua dulce, tipo continental, llega a desaparecer en épocas de drenaje, salinizándose todo el acuífero (Figura 8.1), a excepción de las zonas de influencia del canal de riego de la Dreta.

Tabla 8.1. Facies identificadas en el acuífero superficial.

Nombre en la figura	Facies	CE (mS/cm)
F-CaHCO ₃	Agua continental -salobre	< 20
B-NaCl	Agua marina	45 - 60
Bn-NaCl	Salmuera	> 60

El grado de salinización es severo en dichas épocas, llegando a superar los valores del agua de mar. La rápida respuesta de la salinización en la zona de estudio, junto con los débiles gradientes horizontales y la baja permeabilidad del levée, hace pensar en un aporte de solutos desde el mismo acuífero y no en un aporte de solutos desde el río Ebro. Sólo se ha observado una correlación entre el río y el acuífero en las zonas más próximas a este, estableciendo su posible zona de influencia a pocas decenas de metros, siendo limitado por el canal de la Dreta. Dicho canal actúa como barrera hidráulica, impidiendo el paso de líneas de flujo desde el río Ebro hacia el interior del delta. El ámbito de influencia del canal de la Dreta es restringido, tal como se observa en los cortes, formando un cuerpo lenticular de algunas decenas de

metros de agua dulce, ya que no se observa ninguna alteración en los piezómetros un poco más alejados.

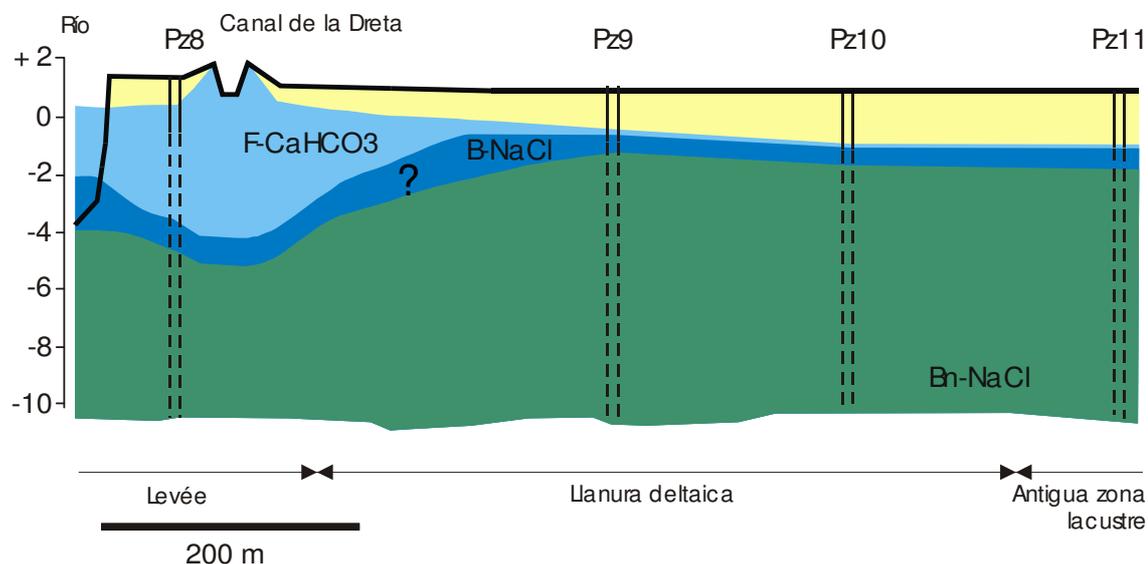


Figura 8.1. Distribución de las facies durante el periodo de drenaje.

En base a las medidas de nivel, la tendencia general muestra que el nivel del río es muy constante a lo largo del año. El nivel en el acuífero puede oscilar más de 1 m debido al régimen de riego y drenaje, situándose por encima o por debajo del nivel del río, dependiendo del punto y de la época. Aguas arriba, en la línea 1 de piezómetros, el acuífero está generalmente por encima del nivel del río. Aguas abajo, en la línea 3, el acuífero está como el río o ligeramente más deprimido. Esta distribución es consistente con los mapas piezométricos generales del delta elaborados con anterioridad.

En base al nivel freático y al del río, en épocas de drenaje, el río podría estar influyendo hacia el acuífero, aunque la magnitud de dicho flujo sería muy baja debido al bajo gradiente y a la baja conductividad hidráulica del levée.

Durante el periodo de irrigación, se produce el aporte de un gran volumen de agua al acuífero superficial, el nivel freático sube considerablemente desplazando la interfaz hacia abajo (Figura 8.2). En dicho periodo la estratificación en el río Ebro no cambia significativamente. El acuífero tiene agua dulce en toda la zona de contacto entre el río y el acuífero.

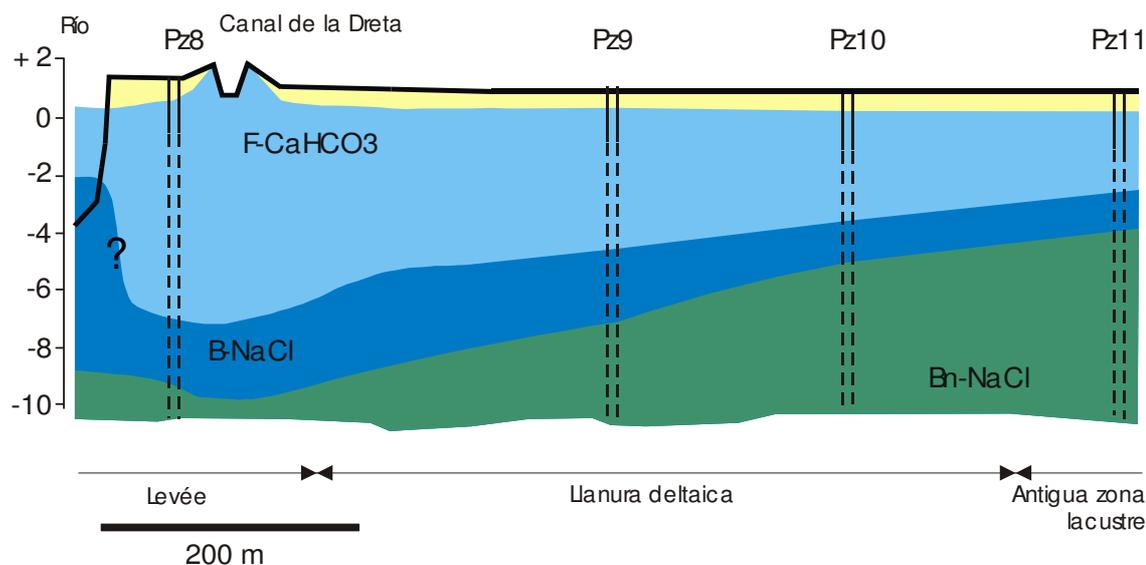


Figura 8.2. Distribución de las facies durante el periodo de irrigación.

En estas circunstancias, de haber flujo entre el acuífero y el río, éste sería efluente.

Tanto la composición química como isotópica evidencia que todas las aguas presentes en las diferentes capas del acuífero superior son mayoritariamente producto de una mezcla, siendo los dos principales términos fuente identificados el agua marina y el agua continental. A dichos términos extremos hay que añadir algún proceso modificador como el aporte de solutos por parte de la salmuera infrayacente.

Los resultados de los análisis de isótopos apuntan hacia un aporte de agua con bajo contenido en tritio. Por ello, el principal aporte actual de solutos al acuífero superficial parece provenir de las capas inferiores, y en menor medida, quizás también de los flancos del delta. Como se ha observado, la interfaz sube de cota durante el periodo de drenaje al mismo tiempo que el nivel freático se encuentra deprimido. Todo ello favorece la existencia de flujos verticales ascendentes aportando un gran volumen de solutos. Además, existen otros procesos menores que aportan solutos al acuífero superficial, como el aerosol marino.

La combinación de los indicadores hidrodinámicos (bajos gradientes horizontales, gradientes que se invierten, bajas conductividades hidráulicas) con los hidroquímicos, (presencia de muestras con mayor salinidad que el agua de mar, relaciones iónicas...) conducen a pensar que el principal origen de salinidad es el agua presente en las formaciones subyacentes a la capa más superficial del acuífero.

Los aportes de sal al acuífero superior del delta son a través del agua de riego, de los fertilizantes y de las entradas posibles de agua de mar quizás desde el cauce del río o directamente desde el mar. Pero, sin lugar a dudas, el mayor aporte procede de las capas infrayacentes, con salinidad congénita.

La presencia de agua de mar actual, aunque en poca cantidad, vendría corroborada por el desequilibrio entre el cloro y el bromo observado en algunas muestras.

Los drenajes artificiales desde el acuífero hacia el mar son la principal salida de sales del acuífero. En menor medida también salen sales por la cosecha y por los posibles flujos subterráneos hacia el río o hacia el mar.

La actividad agrícola que se viene desarrollando en el delta desde hace más de un siglo, está aportando sales directamente mediante los fertilizantes e indirectamente por la evapotranspiración. Pero, mediante el drenaje anual generalizado, en realidad se está eliminando sales presentes inicialmente en el acuífero, mediante los procesos de inundación y drenaje. Por lo tanto se estima que el balance de sales en el delta actualmente es negativo, es decir, sale mayor cantidad de la que entra.

La infiltración directa de agua marina desde la lengua salina del río Ebro hacia el acuífero superficial no parece ser de entidad suficiente para controlar el balance de solutos, ni para provocar la salinización progresiva del acuífero.

9. Recomendaciones

Con el fin de corroborar o descartar hipótesis, cuantificar flujos,... sobre la dinámica del acuífero superficial del delta del Ebro y el origen de su salinidad se considera que la implementación de los siguientes trabajos y tecnologías podrían contribuir para acotar el modelo conceptual:

- Para un mayor seguimiento de la interfaz habría que realizar más a menudo perfiles verticales de CE y mejorar la instrumentación de los piezómetros de la línea 3. Poniendo especial énfasis en el seguimiento de la interfaz entre la salmuera y el agua marina. Con ello se podrían identificar flujos verticales ascendentes y descendentes.
- Este estudio revela la gran importancia existente entre el acuífero superficial y el acuitardo. Por ello se considera que la instalación dos piezómetros de investigación, uno ranurado puntualmente en el acuitardo y otro en el acuífero inferior permitiría cuantificar los flujos ascendentes (Figura 9.1).

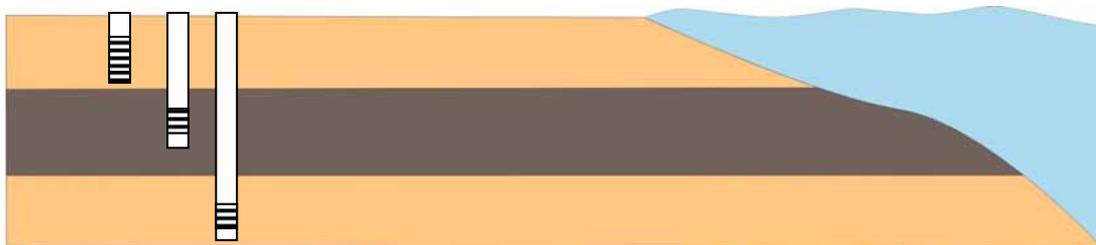


Figura 9.1. Instalación de piezómetros puntuales a distintas profundidades.

- Para determinar el grado de conexión entre el río y el acuífero superficial se propone la instalación de nuevos piezómetros puntuales en el lecho del río en diferentes profundidades. También, el estudio más detallado de los flujos horizontales se acotaría con nuevos piezómetros a distintas profundidades al margen del río y al margen del canal.
- La prospección geofísica mediante sísmica podría ayudar a determinar la potencia y profundidad del acuífero superficial y el acuitardo. La prospección geoelectrica no es adecuada para un medio tan conductivo y heterogéneo, dificultando en gran medida la interpretación e identificación de los diferentes estratos.

- Con el fin de estudiar la importancia de los canales principales en el efecto barrera entre el río y el acuífero, se podría realizar un ensayo de trazadores con colorantes orgánicos (eosina, fluoresceína o rodamina). La zona de estudio presenta elevadas concentraciones de Cl y otras sustancias iónicas, por lo que el uso de colorantes puede ser la solución más efectiva y económica. El ensayo se realizaría mediante un dipolo, inyectando en el margen izquierdo del canal, y recuperando en el derecho.
- Se podría llegar a estimar el carácter influente o efluente del río mediante medidas de infiltración en el fondo del lecho mediante infiltrómetros.
- Los sensores automáticos de presión se han mostrado muy útiles para el seguimiento en continuo de los niveles, pero dada la gran variabilidad de la densidad, en la vertical y en el tiempo, su uso debe ir acompañado de perfiles verticales de CE realizados con frecuencia, así como de medidas de densidad.
- De forma complementaria para seguimiento en continuo de niveles debería contemplarse sistemas que no dependan de la densidad, como medidores por ultrasonidos o simplemente de flotador.
- Debe contemplarse la posibilidad de realizar nuevas analíticas de muestras de agua de las distintas facies. En los análisis debe incluirse la determinación de yodo. La relación iónica I/Na con el Br puede dar una indicación sobre el origen de la salinidad.
- Sería muy interesante poder caracterizar la salmuera existente, que supuestamente actúa como término fuente de salinidad al acuífero superior. Esta determinación permitiría cuantificar mejor los grados de mezcla y el balance de sales.

10. Bibliografía

- APPELO, C. A. J. y POSTMA, D. (2007). *Geochemistry, groundwater and pollution*. 2ª Edición. Balkema Publishers.
- CABRERA, M. C., DELGADO, F., MUÑOZ, J., PEREZ TORRADO, F. J., y LA MONEDA, E., (2000). Caracterización de las familias hidrogeoquímicas en el acuífero de La Aldea (Gran Canaria). *Geotemas* 1 (2), 47–50.
- CLARK, I. D., y FRITZ, P. (1997). *Environmental isotopes in hydrogeology*. New York, Lewis Publishers, 328 p.
- CUSTODIO, E. y ALCALA, F. J. (2003). El potencial de la relación Cl/Br como indicador del origen de la salinidad de los acuíferos costeros españoles. IGME.
- CUSTODIO, E. y ALCALA, F. J. (2008). Using the Cl/Br ratio as a tracer to identify the origin of salinity in aquifers in Spain and Portugal. *Journal of Hydrology* 359, p 189-207.
- CUSTODIO, E., BAYÓ, A. y LOASO, C. (1997). Las aguas subterráneas en el delta del Ebro. *Revista obras públicas*, septiembre nº3368.
- CUSTODIO, E., y HERRERA, C., (2000). Utilización de la relación Cl/Br como trazador hidrogeoquímico en hidrología subterránea. *Boletín Geológico y Minero* 111 (4), 49–67.
- ESCUDE, R., J. FRAILE, S. JORDANA, F. RIBERA, X. SÁNCHEZ-VILA y E. VÁZQUEZ-SUÑÉ (Eds.) (2009). *Hidrogeología. Conceptos básicos de hidrología subterránea*. 768 pp. FCIHS, Barcelona 2009.
- GARRELS, R. M. y CHRIST, C. L (1965). *Solutions, minerals and equilibria*. Harper and Row, New York, 450 pp.
- MANZANO, M., SOLER, A., CARRERA, J., y CUSTODIO, J., (2001). Composición isotópica (^{18}O , ^2H , ^{34}S) de las aguas del área afectada por el vertido minero de Aznalcóllar (SO España). In: Medina, A., Carrera, J., Vives, L. (Eds.), *Las Caras del Agua subterránea. Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas*, vol. 1. IGME, Madrid, pp. 477–487.
- MOVELLÁN, E. (2003); *Modelado de la cuña salina y del flujo de nutrientes en el tramo estuarino del río Ebro*. Tesis doctoral.

- PANNO, S. V., HACKLEY, K. C., HWANG, H. H., GREENBERG, S. E., KRAPAC, I. G., LANDSBERGER, S. and O'KELLEY, D. J. (2006). Characterization and Identification of Na-Cl Sources in Ground Water. *Ground Water* 44 (2), 176-187.
- RUSHTON, K. R. (1980). *Differing positions of saline interfaces in aquifers and observation boreholes*. *Journal of Hydrology*. Volume 48, Issues 1-2, August 1980, Pages 185-189.
- RUSHTON, K. R. (2003). *Groundwater hidrology, Conceptual and Computational Models*. ISBN 0-470-85004-3.
- VENGOSH, A. y PANKRATOV, I. (1998). Chloride/bromide and chloride/fluoride ratios of domestic sewage effluents and associated contaminated groundwater. *Ground Water* 36 (5), 815–824.