

# Cuantificación de la descarga subterránea al Mar Menor mediante modelización hidrogeológica del acuífero superficial Cuaternario

Sergio Contreras y Johannes Hunink (FutureWater),  
Andrés Alcolea (HydroGeoModels) y Joaquín Jiménez-  
Martínez (EAWAG y ETH Zúrich)



COMUNIDAD DE REGANTES

**ARCO SUR MAR MENOR**

# Cuantificación de la descarga subterránea al Mar Menor mediante modelización hidrogeológica del acuífero superficial Cuaternario



Comunidad de Regantes  
**ARCO SUR MAR MENOR**  
[www.cr-arcosur.com](http://www.cr-arcosur.com)  
[arcosurmm@arcosurmm.com](mailto:arcosurmm@arcosurmm.com)  
Tel. +34 968 981 548  
Paraje de los Chaparros, s/n  
30370 - Cabo de Palos - Cartagena - Murcia

## Prefacio

Las aguas subterráneas desempeñan un papel estratégico para la producción agrícola en la cuenca del Campo de Cartagena-Mar Menor, al amortiguar en un rango del 30-75% (especialmente en períodos de sequía) las variaciones de los recursos procedentes del Trasvase Tajo-Segura. El sistema hidrogeológico del Campo de Cartagena corresponde a un acuífero multicapa, cuya unidad superficial, de edad Cuaternario, está conectada a la laguna costera del Mar Menor. El estado ecológico de este ecosistema lagunar está fuertemente ligado a la dinámica de flujos de agua subterránea y su conexión con el acuífero Cuaternario. En este contexto, resulta prioritario mejorar el conocimiento de las interrelaciones entre el acuífero Cuaternario superficial y la laguna, así como los efectos ambientales (sobreexplotación, degradación de la calidad del agua, eutrofización de la laguna, etc.) que podrían derivarse del uso intensivo del recurso subterráneo. El diseño y la adopción efectiva de sistemas de gestión óptima de recursos hídricos precisa de Sistemas de Soporte a la Decisión que, apoyados en herramientas de modelación, son capaces de evaluar la efectividad de diferentes estrategias de explotación y gestión de los recursos hídricos.

Una de las alternativas para la explotación controlada de las aguas del acuífero Cuaternario superficial del Campo de Cartagena es la construcción de una red de drenajes superficiales y subsuperficiales capaces de recolectar las aguas que podrían usarse para riego agrícola tras un proceso de tratamiento de desalinización y desnitrificación. Esta opción de explotación permitiría además reducir la descarga de aguas con altos niveles de nitratos a la laguna del Mar Menor.

Esta Memoria, redactada por FutureWater, se enmarca dentro del proyecto *“Cuantificación de la descarga subterránea al Mar Menor mediante modelación hidrogeológica del acuífero superficial Cuaternario”* financiado en su totalidad por la Comunidad de Regantes Arco Sur Mar Menor, S.L. El equipo de trabajo está formado por Sergio Contreras y Johannes Hunink (FutureWater), Andrés Alcolea (HydroGeoModels) y Joaquín Jiménez-Martínez (EAWAG y ETH Zúrich). El objetivo del proyecto es cuantificar los patrones espaciales de comportamiento del flujo de agua subterránea en el acuífero Cuaternario superficial del Campo de Cartagena y sus aportaciones al Mar Menor teniendo en cuenta condiciones hidrológicas promedio y extremas. Para ello, se ha construido y calibrado un modelo numérico de flujo de aguas superficiales y subterráneas. Después de un informe intermedio presentado en Julio de 2017, esta Memoria presenta los resultados finales del trabajo.

# Resumen ejecutivo

Las aguas subterráneas desempeñan un papel estratégico para la producción agrícola en la cuenca del Campo de Cartagena-Mar Menor. La problemática medioambiental asociada a las mismas está íntimamente ligada al desarrollo sostenible de la región. Por tanto, resulta necesaria una gestión adecuada de los recursos hídricos basada en herramientas modernas y objetivas que integren todo el conocimiento disponible y permitan la simulación de acciones antrópicas o de cambio climático o usos del suelo.

En este contexto, y por encargo exclusivo de la Comunidad de Regantes Arco Sur S.L, se ha llevado a cabo el primer modelo hidrogeológico regional de la cuenca del Campo de Cartagena-Mar Menor. El objetivo principal de este modelo es cuantificar los patrones espaciales de comportamiento del flujo de agua subterránea en el acuífero superficial Cuaternario del Campo de Cartagena y las aportaciones al Mar Menor para condiciones hidrológicas promedio y extremas, mediante la calibración e implementación de un modelo numérico integrado de flujo de agua superficial y subterránea. Dicho modelo, tridimensional y que considera el transporte de sal en el acuífero, integra toda la información disponible sobre el acuífero superficial, generalmente dispersa, lo que permite conocer el estado actual de las aguas subterráneas y las aportaciones del acuífero al Mar Menor. El modelo calibrado reproduce fielmente las medidas disponibles, tanto de parámetros como de niveles piezométricos. Así, resulta una herramienta indispensable para la gestión futura del acuífero superficial Cuaternario.

Los resultados principales del modelo son:

1. la recarga anual del acuífero superficial Cuaternario se tasa en entre  $12 \text{ hm}^3/\text{año}$  en periodos muy secos, y  $200 \text{ hm}^3/\text{año}$  en periodos muy húmedos. El valor promedio anual es de  $74 \text{ hm}^3/\text{año}$ .
2. la descarga potencial al Mar Menor, sin contar las extracciones por bombeo en pozos y drenes, ni tampoco las transferencias de agua hacia acuíferos inferiores, se ha evaluado entre  $63$  y  $83 \text{ hm}^3/\text{año}$ , siendo el valor medio  $71 \text{ hm}^3/\text{año}$ .
3. la descarga real promedio al Mar Menor durante el periodo de simulación (16 años) se ha estima entre  $38 \text{ hm}^3/\text{año}$  y  $46 \text{ hm}^3/\text{año}$ . Estos valores oscilan  $\pm 10 \text{ hm}^3/\text{año}$ , según se consideren años húmedos o secos.
4. la mayor parte de la descarga se concentra en los sectores próximos a la Rambla del Albujón y al norte del Campo de Cartagena. La descarga en el ámbito de actuación de CCRR-Arco Sur es reducida y se estima en aproximadamente un 5% del volumen total descargado.

# Índice

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>10</b>
1.1	Problemática y antecedentes	10
1.1.1	Estudios previos de la CCRR Arco-Sur	10
1.1.2	Primer Informe de Diagnóstico y Propuestas del Comité de Asesoramiento Científico del Mar Menor. Balance hídrico e hidrogeología (García-Aróstegui et al., 2017). 11	
1.2	Objetivo y entregables	12
<b>2</b>	<b>Datos</b>	<b>14</b>
2.1	Introducción	14
2.2	Datos para el modelo de hidrología superficial	14
2.2.1	Datos meteorológicos	14
2.2.2	Uso de suelo y coeficientes de cultivo	15
2.2.3	Cartografía de suelos, propiedades edafohidráulicas y profundidad del suelo	17
2.3	Datos para el modelo de hidrología subterránea	18
2.3.1	Hidrogeología regional	18
2.3.2	Geología detallada y modelo geométrico del acuífero	20
2.3.3	Parámetros hidráulicos del acuífero Cuaternario	24
2.3.4	Inventario de pozos	26
2.3.5	Extracciones por bombeo	27
2.3.6	Comunicación entre acuíferos	28
2.3.7	Piezometría	28
<b>3</b>	<b>Métodos</b>	<b>31</b>
3.1	Introducción general. El proceso de modelación	31
3.2	Modelo de hidrología superficial	33
3.2.1	Modelo conceptual y código de simulación	33
3.2.2	Dominio de simulación	35
3.2.3	Resumen de parámetros en SPHY-CC	36
3.3	Modelo de hidrología subterránea	36
3.3.1	Software	36
3.3.2	Modelo conceptual	37
3.3.3	Dominio de simulación	38
3.3.4	Modelo numérico	39
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>47</b>
4.1	Modelo de hidrología superficial: balance y recarga	47
4.2	Calibración modelo de hidrología subterránea: ajuste de parámetros hidráulicos y niveles piezométricos	50
4.3	Ánálisis general de las descargas subterráneas al Mar Menor y dinámica de la cuña salina 60	
4.3.1	Agregación espacio-temporal	60
<b>5</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>70</b>
5.1	Principales resultados	70
5.2	Recomendaciones	71
<b>6</b>	<b>Referencias</b>	<b>72</b>
<b>7</b>	<b>Anejo I. Base de datos espacial</b>	<b>74</b>



7.1	Características principales y versiones	74
7.2	Estructura interna	74
<b>8</b>	<b>Anejo II. Niveles piezométricos calculados y medidos</b>	<b>77</b>
<b>9</b>	<b>Anejo III. Bases matemáticas de la simulación numérica</b>	<b>81</b>
9.1	Anejo III.1. Modelización hidrológica superficial: conceptualización de procesos y métodos de cálculo	81
9.1.1	Entradas por precipitación y aportes de riego.	81
9.1.2	Pérdidas por intercepción y escorrentía superficial	81
9.1.3	Cálculo de la evapotranspiración y aportes de riego	82
9.1.4	Pérdidas por percolación profunda (recarga en tránsito)	84
9.2	Modelización hidrológica subterránea: la ecuación de flujo con densidad variable	85
9.3	Anejo III.2 Calibración del modelo. El método de problema inverso	88
<b>10</b>	<b>Anejo IV. Análisis de geolocalización de pozos</b>	<b>91</b>

## Tablas

Tabla 1. Síntesis de balances hídricos disponibles del Campo de Cartagena (elaborado por García-Aróstegui) (García-Aróstegui et al., 2017). Cifras en $hm^3/año$ . El procedimiento de cálculo de la descarga se refiere a las salidas laterales al Mar Menor.....	12
Tabla 2. Listado de estaciones meteorológicas.....	15
Tabla 3. Parámetros para cálculo del coeficiente de evapotranspiración ( $k_c$ ). Valores de NDVI en escala de 0-1.....	16
Tabla 4. Valores de transmisividad (T), coeficiente de almacenamiento (S) y Difusividad (D) en sondeos y zanjas del acuífero Cuaternario (TRAGSATEC, 2013).....	25
Tabla 5. Propiedades del dominio de simulación del modelo hidrológico.....	35
Tabla 6. Resumen de parámetros de entrada a SPHY-CC.....	36
Tabla 7. Difusividad hidráulica estimada en drenes.....	51
Tabla 8. Zonas de captura del acuífero Cuaternario en el Campo de Cartagena (área de recarga y perímetro del frente de descarga).....	61
Tabla 9. Periodos de precipitación “tipo”.....	63
Tabla 10. Promedios anuales de recarga total (PER, $hm^3/año$ ) en el acuífero Cuaternario, y descarga potencial (DES <sub>pot</sub> , $hm^3/año$ ) por frente de descarga para diferentes períodos de simulación.....	65
Tabla 11. Versiones de la geodatabase y plazos de entrega.....	74
Tabla 12. Coordenadas de los pozos utilizados para la calibración del modelo.....	91

## Figuras

Figura 1. Localización de estaciones meteorológicas e isolíneas de precipitación media anual (línea azul continua), y evapotranspiración de referencia media anual (línea discontinua amarilla). La línea roja muestra el límite del acuífero superficial Cuaternario y el borde la laguna como referencia. Datos referidos al periodo 2001-2016.....	15
Figura 2. Valores medio interanual del Índice de Vegetación Normalizado para los meses febrero (superior izquierda), mayo (superior derecha), septiembre (inferior izquierda), y diciembre (inferior derecha).....	16
Figura 3. Distribución de clases texturales de suelo y porosidad efectiva (entre paréntesis) en el Campo de Cartagena.....	17
Figura 4. A) Límite de la Masa de Agua Subterránea del Campo de Cartagena; B) Límites de los acuíferos principales; C) Corte hidrogeológico. Tomado de García-Aróstegui et al. (2017). 19	19
Figura 5. Geología del área de estudio (tomado de Jiménez-Martínez et al., 2012).....	21
Figura 6. Modelo geológico tridimensional de la cuenca del Campo de Cartagena (factor de exageración vertical x10). Tomado de Jiménez-Martínez et al. (2012).....	22
Figura 7. Representación tridimensional de las superficies de muro de los materiales de edad Cuaternario, Plioceno y Mesiniense. El contorno de la laguna se representa mediante línea roja. Las líneas azul y negra en el gráfico del muro de los materiales de edad Cuaternario representan los perfiles de los cortes geológicos NNO-SSE y E-O mostrados en la Figura 8, respectivamente. Factor de exageración vertical x10.....	23
Figura 8. Cortes geológicos NNO-SSE y E-O en la zona de la Comunidad de Regantes Arco Sur.....	24

Figura 9. Inventario de pozos y fuentes de información. Los puntos con etiqueta corresponden a los pozos con series largas de medidas piezométricas (Confederación Hidrográfica del Segura).....	27
Figura 10. Situación y número de medidas de nivel piezométrico en pozos del Cuaternario. Sólo se muestran aquellos puntos con más de diez medidas de nivel piezométrico.....	29
Figura 11. Ejemplo de series largas de medidas de nivel piezométrico en pozos de la Confederación Hidrográfica del Segura.....	29
Figura 12. Mapas de isopiezas (García-Aróstegui et al. 2017) y dirección de flujo de agua subterránea en el acuífero Cuaternario en octubre de 2009 (izquierda) y octubre de 2016 (derecha). Cotas en metros sobre el nivel del mar. TTS denota Trasvase Tajo-Segura.....	30
Figura 13. Diagrama esquemático del modelo integrado del Campo de Cartagena y sus componentes.....	32
Figura 14. Modelo de balance tipo <i>bucket</i> usado en SPHY-Campo de Cartagena. Variables de entrada (puntos verdes, líneas continuas) y de salida (puntos rojos, líneas discontinuas) simulando los principales componentes del balance de agua en el suelo.....	34
Figura 15. Dominio de simulación (área con trazos diagonales en amarillo) y contornos de la cuenca hidrológica y del acuífero Cuaternario del Campo de Cartagena. ....	35
Figura 16. Esquema del modelo conceptual de un acuífero multicapa conectado a una masa de agua salada. Las flechas negras denotan direcciones de flujo.....	38
Figura 17. Evolución temporal de niveles piezométricos en pozos cercanos monitorizados en las distintas formaciones (tomado de García-Aróstegui et al., 2017). ....	38
Figura 18. Límites del modelo hidrogeológico del acuífero Cuaternario, que incluye la zona suprayacente al Mar Menor. El modelo queda limitado al este por la cara interior de las barras de la laguna. ....	39
Figura 19. Discretización del modelo en superficie. ....	40
Figura 20. Discretización del modelo en superficie en el ámbito de actuación de la CCRR- Arco Sur.....	41
Figura 21. Discretización del modelo en superficie (zum en Estrella de Mar y proximidades)....	41
Figura 22. Vista de la malla en 3D (factor de exageración vertical x10).....	42
Figura 23. Vista de la malla en 3D (factor de exageración vertical x30).....	42
Figura 24. Sección vertical oeste-este del modelo en 3D (factor de exageración vertical x30)....	43
Figura 25. Puntos de control para la estimación de la difusividad hidráulica. ....	46
Figura 26. Valores estimados de aportación de riego (promedio anual, mm/año) según modelización hidrológica e información de satélite. Sectores de riego delimitados por polígonos rojos.....	47
Figura 27. Índice de intensidad de uso de agua (irr + pre)/pre. ....	48
Figura 28. Distribución espacial de la recarga anual media (mm/año) estimada por el modelo de balance hidrológico superficial.....	48
Figura 29. Balance de agua anual en la zona regable de la CCRR Arco Sur para el periodo oct/2000-sep/2016. Datos acumulados por años hidrológicos.....	49
Figura 30. Sectores regables (Unidades de Demanda Agraria) de la CCRR-Arco Sur. ....	50
Figura 31. Puntos de control para estimación de la difusividad hidráulica y valores estimados (m <sup>2</sup> /día) (valores en escala logarítmica).....	51
Figura 32. Ajustes del modelo. Niveles piezométricos calculados en pozos con serie larga (eje vertical) contra niveles piezométricos medidos (eje horizontal). La línea roja marca la relación 1:1. ....	52
Figura 33. Histograma de calibración. Residuos de niveles (valor calculado menos valor medido).....	53
Figura 34. Ajuste de datos de nivel en el pozo Venta del Pino. ....	53

Figura 35. Ajustes del modelo. Niveles piezométricos calculados (eje vertical) contra niveles piezométricos medidos (eje horizontal) en pozos usados para la validación del modelo. La línea roja marca la relación 1:1.....	54
Figura 36. Piezometría calculada para condiciones de año seco (fecha representada 15/09/2015).....	55
Figura 37. Piezometría calculada para condiciones de año seco (fecha representada 15/09/2015). Zoom a la zona de estudio CCRRAS.....	56
Figura 38. Piezometría calculada para condiciones de año medio (fecha representada 15/03/2004).....	56
Figura 39. Piezometría calculada para condiciones de año medio (fecha representada 15/03/2004). Zoom a la zona de estudio CCRRAS.....	57
Figura 40. Piezometría calculada para condiciones de año húmedo (fecha representada 15/09/2010).....	57
Figura 41. Piezometría calculada para condiciones de año húmedo (fecha representada 15/09/2010). Zoom a la zona de estudio CCRRAS.....	58
Figura 42. Comparación entre isopiezas (10, 25 y 50 m s.n.m) bajo condiciones de año seco, promedio y húmedo.....	58
Figura 43. Comparación entre isopiezas (10, 25 y 50 m s.n.m) bajo condiciones de año seco, promedio y húmedo (detalle para ámbito de la CCRR-Arco Sur).....	59
Figura 44. Piezometría calculada para condiciones de año húmedo (fecha representada 15/09/2010) en la zona de drenes de CCRR Arco Sur.....	60
Figura 45. Distribución de las “zonas de captura” del acuífero Cuaternario en el Campo de Cartagena y frentes de descarga.....	62
Figura 46. Zonas de captura en el ámbito de actuación de la CCRR-Arco Sur.....	62
Figura 47. Precipitación inter-bianual acumulada en el Campo de Cartagena e identificación de periodos de precipitación característicos. El final y la duración de cada periodo se representa por los puntos y las líneas gruesas de la parte superior, respectivamente.....	63
Figura 48. Variación mensual de los valores de recarga en el Campo de Cartagena y de descarga potencial subterránea al Mar Menor en las secciones Sur y Norte en el periodo de estudio (octubre/2000 – diciembre/2016).....	64
Figura 49. Porcentaje de descarga subterránea por sector en un periodo característico de precipitación promedio.....	66
Figura 50. Balance del Acuífero Cuaternario del Campo de Cartagena. Volúmenes totales promedio para el periodo entre Ene-2001 y Dic-2016.....	67
Figura 51. Penetración máxima de la cuña de intrusión bajo condiciones de año seco (línea roja, representación en fecha 15/09/2015) y húmedo (línea azul, representación en fecha 15/09/2010).....	68
Figura 52. Penetración máxima de la cuña de intrusión bajo condiciones de año seco (línea roja, representación en fecha 15/09/2015) y húmedo (línea azul, representación en fecha 15/09/2010). Zoom en la zona de drenes (líneas verdes) de CCRRAS.....	69
Figura 53. Estructura de la geodatabase (organización de entidades espaciales por grupos).....	75
Figura 54. Tabla de información asociada a la geodatabase.....	75
Figura 55. Visor QGIS con la geodatabase Arco Sur-Campo de Cartagena.....	76
Figura 56. Niveles calculados (línea negra) y medidos (símbolos azules) en los pozos con serie larga de medidas utilizados para la calibración del modelo.....	80
Figura 57. Sensibilidad de la función de generación de percolación difusa ( $per_{diff}$ ) en función del parámetro $\beta$ para un suelo franco arenoso.....	84

# 1 Introducción

## 1.1 Problemática y antecedentes

Desde el 2006, se han llevado a cabo diversos estudios para describir la problemática medioambiental de la cuenca del Campo de Cartagena. Se destacan aquellos que han sido promovidos por la Comunidad de Regantes Arco Sur Mar Menor, S.L. (en lo sucesivo CCRR-Arco Sur), así como el “Primer Informe de Diagnóstico y Propuestas del Comité de Asesoramiento Científico del Mar Menor” (CARM, 2017) en su capítulo dedicado a las aguas subterráneas (García-Aróstegui et al., 2017). Los primeros son estudios técnicos encaminados a cuantificar los volúmenes de descarga subterránea en el ámbito de actuación de la CCRR-Arco Sur y evalúan la viabilidad de su captación y aprovechamiento para uso agrícola. El segundo es una buena síntesis del conocimiento actual existente y recoge ciertas recomendaciones de actuación para la protección ambiental de la laguna y una gestión más sostenible de los recursos hídricos superficial y subterráneo. Se proporciona aquí una breve descripción de cada uno de estos informes.

### 1.1.1 Estudios previos de la CCRR Arco-Sur

#### 1.1.1.1 Estudio geotécnico acuífero (zona de Los Nietos, Cartagena) (CCRR Arco Sur, 2006)

El objeto de este trabajo fue determinar la litología del terreno observada hasta una profundidad de 35 m mediante la realización de 8 sondeos a rotación y la testificación de las columnas obtenidas, y determinar la profundidad del nivel piezométrico en los sondeos.

El estudio fue ejecutado por la empresa Horysu.

#### 1.1.1.2 Estudio de los efluentes de aguas salobres en el acuífero costero del Mar Menor (CCRR Arco Sur, 2007)

El objetivo fue cuantificar el volumen aprovechable de la descarga subterránea al Mar Menor en el ámbito de actuación de la CCRR Arco Sur, y evaluar las posibilidades y las condiciones de captación y explotación sin generar afecciones a los aprovechamientos existentes. Se definieron y precisaron las zonas de actuación en base al estudio de la interfase agua dulce-agua salada (definida por el rango de conductividad superior a 12.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

Para la caracterización del acuífero en la zona de estudio se realizaron 31 sondeos geotécnicos con interpretación litoestratigráfica, una campaña hidroquímica y de medición de niveles piezométricos (noviembre/2006 – enero/2007), un inventario de pozos y puntos de extracción de agua, y dos ensayos de bombeo.

#### 1.1.1.3 Estudios previos TRAGSATEC

Se trata de un conjunto de 4 informes técnicos realizados por la empresa TRAGSATEC en el marco de la asistencia técnica de apoyo al proyecto *Red de Evacuación de Agua Salobre y Red de Drenaje para Captación de Aguas Subterráneas en el Área de influencia de la Comunidad de Regantes Arco Sur – Mar Menor en los T.M. Cartagena y La Unión (Murcia)* coordinado bajo la dirección de obra de la Sociedad Mercantil Estatal de Infraestructuras Agrarias (SEIASA).

- Informe Técnico 01, sobre el diseño de una red de vigilancia de la intrusión marina en la parte sur del Mar Menor (Los Urrutia – Mar de Cristal).
- Informe Técnico 02, de apoyo al diseño de tramos de zanjas drenantes: definición de espesores saturados, caudales de explotación y medidas de conductividad.
- Informe Técnico 03, de diseño de ensayos de bombeo de larga duración en zanjas drenantes para el cálculo de caudales máximos de explotación y control de intrusión salina en el Mar Menor.
- Informe Técnico 04, sobre la ubicación de sondeos hidrogeológicos de investigación y determinación de sus características y ensayos de bombeo.

#### 1.1.1.4 Estudio hidrogeológico previo para el apoyo al estudio de viabilidad para la ejecución de zanjas drenantes en el Mar Menor (*TRAGSATEC, 2008*).

En este estudio se sintetizan los resultados de la interpretación de dos ensayos de bombeo realizados para el dimensionamiento de las bombas de extracción necesarias para las zanjas drenantes.

#### 1.1.1.5 Campañas de piezometría en las proximidades de Carmolí

En los meses de septiembre de 2012 y octubre de 2013 se realizaron dos campañas de piezometría en las inmediaciones del cerro y marinas del Carmolí.

#### 1.1.1.6 Informe hidrogeológico de la red de drenaje de aguas salobres del Campo de Cartagena (*TRAGSATEC, 2013*)

Se trata de un informe de actualización y síntesis del conocimiento existente hasta la fecha, de la hidrogeología en el ámbito de actuación de la CCRR ArcoSur. Se redacta como documento anexo a la solicitud de captación y aprovechamiento de 2.72 hm<sup>3</sup>/año de aguas salobres procedentes de la red de drenaje. El informe recoge toda la información y datos generados y recopilados hasta la fecha, haciendo especial énfasis en:

- la descripción hidroquímica de las aguas subterráneas de drenaje.
- la viabilidad de la propuesta de captación de agua con la infraestructura existente.
- la evaluación de posibles impactos negativos en captaciones cercanas.
- la garantía de captación de retornos de riego y no de aguas subterráneas profundas.

#### 1.1.2 *Primer Informe de Diagnóstico y Propuestas del Comité de Asesoramiento Científico del Mar Menor. Balance hídrico e hidrogeología (García-Aróstegui et al., 2017)*

Este documento sintetiza las principales componentes del balance de agua en el Campo de Cartagena recogidas en diferentes estudios, observándose severas discrepancias. Esto pone de manifiesto la elevada incertidumbre inherente a la estimación de las componentes del balance hídrico. Se destaca, sin embargo, el importante consenso existente a la hora de identificar el acuífero Cuaternario como la única fuente de aportación de agua subterránea al Mar Menor.

La cifra de descarga total al Mar Menor se estimó en 5 hm<sup>3</sup>/año por ITGE (1991) siguiendo un método simplificado de cálculo, en 7.6 hm<sup>3</sup>/año por Senent et al.(2009) mediante modelización numérica, y del orden de 68 hm<sup>3</sup>/año por Jiménez-Martínez et al.(2016) mediante aplicación de



métodos de balance de agua en el suelo a nivel de cuenca y el empleo de datos auxiliares procedentes de otros estudios (Tabla 1).

La descarga de agua subterránea al Mar Menor tiene lugar a lo largo de todo el contorno de la laguna y depende de la piezometría local, la cual está fuertemente influenciada por la recarga (influenciada a su vez por el uso del suelo), los bombeos y el impacto de las zanjas drenantes existentes.

Conceptos		IGME 1991		PHCS 2015-2021		Jiménez et al (2016)	
		Cuaternario	Global (Cuaternario, Plioceno y Messiniense)	Global (Cuaternario Plioceno y Messiniense)	Cuaternario	Global (Cuaternario, Plioceno, Messiniense y Triásico Victorias)	
Entradas	Infiltración por lluvia útil	46	50	76,2	-	-	
	Retornos procedentes de riego	23	0	18,2	-	-	
	Total	<b>69</b>	<b>50</b>	<b>94,4</b>	<b>112</b>	<b>112</b>	
Salidas	Bombeos	2	21	88,2	?	104	
	Laterales al Mar (fundamentalmente Mar Menor)	5	5	6,19	68	68	
	A otros acuíferos	38	1	-	46	0	
	Pérdidas	-	-	-	2	2	
	Total	<b>45</b>	<b>27</b>	<b>94,4</b>	<b>116</b>	<b>174</b>	
Balance		24	24	0	-4	-62	
Observaciones		El balance positivo se traduce en importantes ascensos del nivel piezométrico en el Cuaternario que provocan problemas de drenaje en las zonas bajas		Equilibrado.	Equilibrado en valor medio	Sobreexplotación de acuífero Triásico-Victoriano y determinadas partes del Messiniense. En períodos de sequía debe incrementarse el bombeo en el acuífero Cuaternario, ligado a desaloración	
PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE DESCARGA		Sobre una piezometría del año 2008 con gradiente del 3 por mil, una transmisividad de 48 m <sup>2</sup> /día y 29 km de frente costero		Acepta el valor de IGME (1991)	Distribución de la recarga (obtenida por modelo hidrológico) entre descarga al Mar Menor (60%) y transferencia a acuíferos inferiores (40%), según artículos previos		

**Tabla 1.** Síntesis de balances hídricos disponibles del Campo de Cartagena (elaborado por García-Aróstegui)(García-Aróstegui et al., 2017). Cifras en hm<sup>3</sup>/año. El procedimiento de cálculo de la descarga se refiere a las salidas laterales al Mar Menor.

## 1.2 Objetivo y entregables

Este estudio tiene como principal objetivo:

**Cuantificar los patrones espaciales de comportamiento del flujo de agua subterránea en el acuífero superficial Cuaternario del Campo de Cartagena y las aportaciones al Mar Menor para condiciones hidrológicas promedio y extremas, mediante la calibración e implementación de un modelo numérico integrado de flujo de agua superficial y subterránea.**

La documentación entregada consta de:

- Memoria final, donde se describe la metodología empleada y se analizan los resultados del análisis.
- Geodatabase -en formato proyecto QGIS-, con toda la información utilizada para la construcción del modelo y las salidas espaciales del mismo, incluyendo cartografía temática relevante del área de estudio, y los mapas de recarga en el Campo de Cartagena y de

descarga mensual al Mar Menor, estimados por los modelos de balance de agua en superficie e hidrogeológico, en el periodo comprendido entre octubre del 2000 y diciembre del 2016.

Hasta donde los autores conocen, este trabajo es el primer estudio que cuantifica y regionaliza el volumen de descarga de agua subterránea a lo largo de todo el contorno de la laguna. Para su ejecución se realizó un proceso de recopilación de datos e información sin precedentes que ha resultado en mapas de detalle sobre los procesos físicos que controlan la descarga de agua subterránea a la laguna del Mar Menor a lo largo de un periodo de simulación de más de 15 años.<sup>13</sup>

## 2 Datos

### 2.1 Introducción

Para la ejecución del presente estudio se ha recopilado y procesado un gran volumen de datos que han sido integrados en dos modelos numéricos:

- Modelo de hidrología superficial, utilizado para el cálculo de la recarga (es decir, la fracción de agua procedente de precipitación y riego que se infiltra al acuífero superficial). Los tipos de datos empleados son:
  - o meteorológicos (precipitación y evapotranspiración de referencia),
  - o usos del suelo y coeficientes de cultivo (obtenidos a partir de información de satélite), y
  - o cartografía de suelos y propiedades edafohidráulicas.
- Modelo de hidrología subterránea, utilizado para la modelización del flujo de agua subterránea. Los tipos de datos empleados son:
  - o modelo tridimensional de la geometría del acuífero (límites y profundidades del acuífero superficial),
  - o parámetros hidráulicos del acuífero (transmisividad y coeficientes de almacenamiento obtenidos por interpretación de ensayos hidráulicos),
  - o inventario de pozos y bombeos, y
  - o datos de piezometría.

Todos los datos relevantes y recopilados para el estudio se han integrado en una base de datos georeferenciada que se entrega en formato de proyecto QGIS (Anejo I).

### 2.2 Datos para el modelo de hidrología superficial

#### 2.2.1 Datos meteorológicos

Se recopilaron los datos diarios de precipitación y de evapotranspiración de referencia, estimados por el método de FAO-Penman-Monteith, pertenecientes a la red agrometeorológica de la Región de Murcia (Red SIAM) (Tabla 2, Figura 1).

Los datos brutos fueron empleados para la obtención de mapas diarios de precipitación y evapotranspiración de referencia utilizando el método de *spline* con tensión. Este método de interpolación espacial estima valores de la variable usando una función matemática que minimiza la curvatura general de la superficie, lo que resulta en una superficie suave que pasa exactamente por los puntos de entrada(Naoum and Tsanis, 2003).El grado de curvatura viene determinado por dos parámetros: el número de puntos de control o estaciones utilizadas para la interpolación, y un parámetro de tensión que regula la pendiente de ajuste que habitualmente se encuentra en un rango entre 0 y 10. Para el presente estudio se adoptaron los valores de 12 (número de estaciones) y 5 (tensión), respectivamente. En la Figura 1, se representan las isoyetas correspondientes a los valores medios anuales de precipitación y evapotranspiración de referencia en la región de estudio.

Tabla 2. Listado de estaciones meteorológicas.

ID Estación	Red	Paraje	Altitud (m s.n.m)	XETRS89	YETRS89	Periodo con datos
CA12	SIAM	La Palma	29	680675.5	4173282.0	
CA21	SIAM	Corvera	227	665196	4188762	
CA42	SIAM	Balsapintada	135	664806	4179522	
CA52	SIAM	La Aljorra	81	670116	4171692	
CA72	SIAM	Roche	64	683616	4166592	
TP22	SIAM	Santiago de la Ribera	12	691986	4184952	
TP42	SIAM	Torre Blanca	33	685086	4182792	Oct/00 - Dic/16
TP52	SIAM	El Mirador	88	686196	4191072	
TP73	SIAM	Los Infiernos	90	682056	4188282	
AL51	SIAM	La Egesa	31	646094	4195960	
CA91	SIAM	Campillo Abajo	175	655331	4173880	
MU31	SIAM	La Vereda	140	652257	4195940	
MU62	SIAM	La Alberca	56	663907	4200810	
TP91	SIAM	Torre Pacheco	54	677376	4179732	Jul/05 - Sep/12

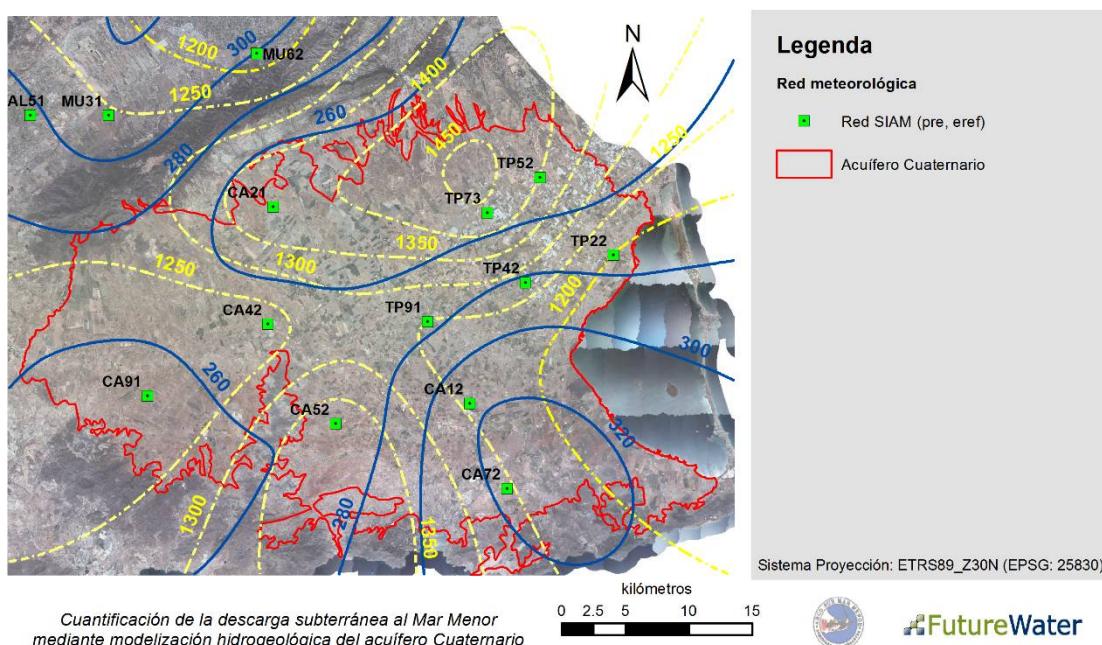
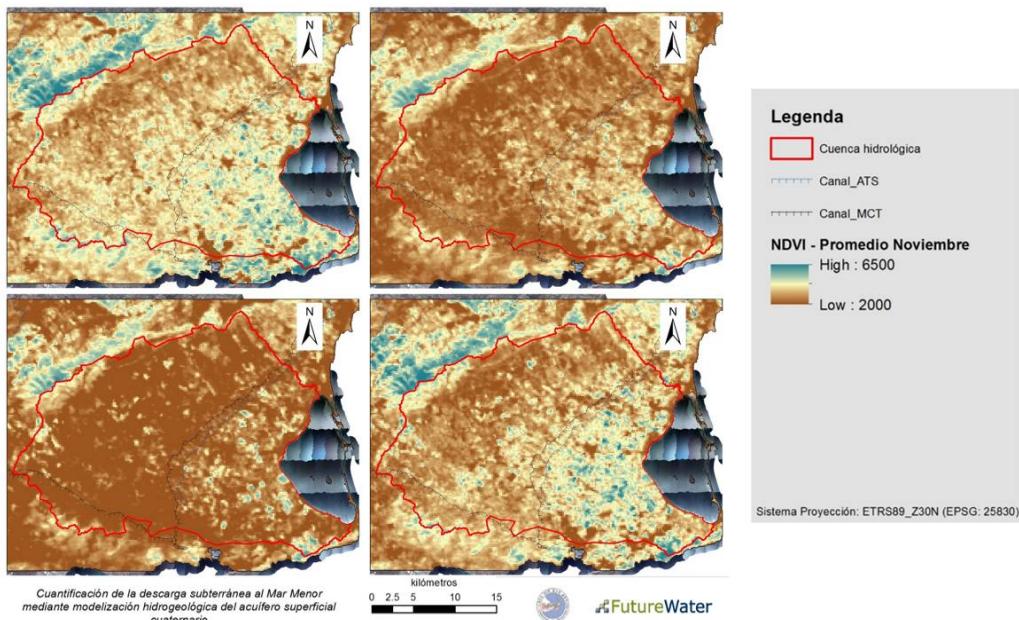


Figura 1. Localización de estaciones meteorológicas e isolíneas de precipitación media anual (línea azul continua), y evapotranspiración de referencia media anual (línea discontinua amarilla). La línea roja muestra el límite del acuífero superficial Cuaternario y el borde la laguna como referencia. Datos referidos al periodo 2001-2016.

### 2.2.2 Uso de suelo y coeficientes de cultivo

El coeficiente de cultivo es una variable clave para la modelización del balance de agua en superficie, pues determina las pérdidas de agua por evapotranspiración de los cultivos y la vegetación. El modelo de hidrología superficial empleado y adaptado para este estudio (SPHY-

Campo de Cartagena, sección 3.2 y Anejo III) calcula el coeficiente de cultivo en función del índice de verde de satélite. Este último se ha evaluado mediante el uso del Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) obtenido a partir del producto MOD13Q1 - colección 6, *tile h17v05* – y para el periodo de simulación (octubre/2000 – diciembre/2016). El producto MOD13Q1 ofrece los valores máximos del NDVI observados a lo largo de periodos de 16 días de duración (23 valores por año) con una resolución espacial de 250 m (Figura 2).



**Figura 2. Valores medio interanual del Índice de Vegetación Normalizado para los meses febrero (superior izquierda), mayo (superior derecha), septiembre (inferior izquierda), y diciembre (inferior derecha).**

La definición de la función NDVI- $k_c$  resulta un paso crítico en la implementación del modelo en SPHY y el cálculo de las pérdidas por evapotranspiración. En la Tabla 3 se muestran los valores umbrales de NDVI y  $k_c$  adoptados para el Campo de Cartagena. Estos valores umbrales se han obtenido del análisis de las trayectorias de NDVI observadas en celdas “puras” (no mezcladas) con elevada dominancia de cítricos o cultivos hortícolas (Contreras et al., 2014), y de los valores máximos tabulados del coeficiente de cultivo observados para ambos tipos de cultivo en el área de estudio por Villalobos et al. (2006).

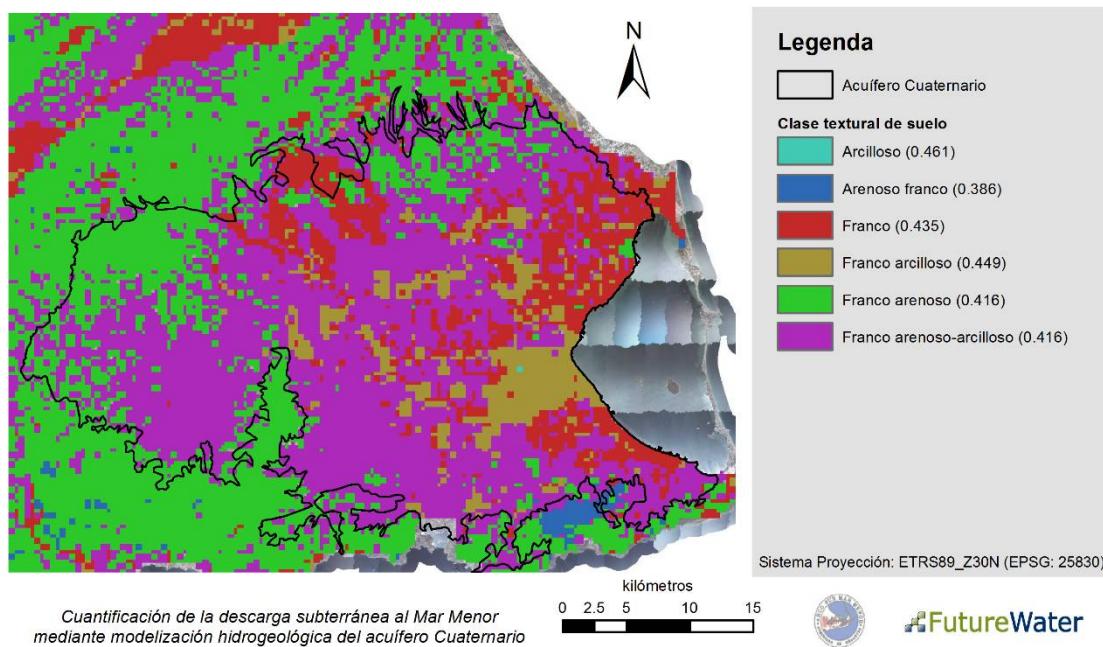
**Tabla 3. Parámetros para cálculo del coeficiente de evapotranspiración ( $k_c$ ). Valores de NDVI en escala de 0-1.**

Parámetros	Área no regable	Área regable	
		Cítricos (dominancia)	Hortícolas (dominancia)
$[\text{NDVI}_{\min} / k_{c,\min}]$	0.10 / 0.05	0.10 / 0.05	0.10 / 0.05
$[\text{NDVI}_{\max} / k_{c,\max}]$	0.70 / 0.80	0.65 / 0.68	0.85 / 1.00
<b>Valores de <math>k_c</math> para NDVI entre</b>			
$[-1, \text{NDVI}_{\min}]$	0.05	0.05	0.05
$(\text{NDVI}_{\min}, \text{NDVI}_{\max}]$	$-0.0591+1.091 \cdot x$ (Ec. ZNR)	$-0.0645+1.145 \cdot x$ (Ec. ZRC)	$-0.0767+1.457 \cdot x$ (Ec. ZRH)
$(\text{NDVI}_{\max}, 1]$	0.65	0.68	1.00

La ecuación para la estimación de  $k_c$  en la zona regable (Ecuación ZRC vs Ecuación ZRH en la Tabla 3) se escoge en función del sistema de cultivo dominante (cítrico vs hortícola) de acuerdo con la cartografía de usos de suelo publicada para la región por el proyecto SIOSE2005 (<http://www.siose.es>). Este proyecto proporciona una cartografía digital con coberturas de uso homogéneas, lo que resulta de gran interés para determinar la dominancia de cada sistema de cultivo con la misma resolución espacial definida para el modelo de balance de agua. En el caso de mosaicos (mezcla de usos), se adopta la función tipo para cítricos cuando la cobertura es superior al 50%. En caso, contrario se asume la función tipo para cultivos hortícolas.

### 2.2.3 Cartografía de suelos, propiedades edafohidráulicas y profundidad del suelo

Para la caracterización de los suelos y sus propiedades edafohidráulicas, se dispuso de la cartografía de clases texturales de suelo (Figura 3), de contenido de material orgánica, y de contenido gravimétrico de agua a 15 atm (punto de marchitez) y 3 atm (capacidad de campo) en la capa superficial del suelo (hasta 30-40 cm de profundidad), elaborada por el Grupo de Investigación de Conservación Agua y Suelos del CEBAS-CSIC a partir de los datos del proyecto LUCDEME, atributos auxiliares de paisaje y la adopción de funciones de pedotransferencia (Pérez-Cutillas, 2013). Los datos del Grupo CEBAS-CSIC fueron posteriormente procesados por FutureWater en el marco de un estudio previo acometido en el área de estudio (Contreras et al., 2014).



**Figura 3. Distribución de clases texturales de suelo y porosidad efectiva (entre paréntesis) en el Campo de Cartagena.**

Un parámetro clave en la regulación del almacenamiento de agua en el suelo (en su capa más superficial) y en la dinámica de los procesos hidrológicos en superficie, es la profundidad del suelo “activo” sujeta a perdidas por evapotranspiración. Dicha profundidad se ha estimado según,

$$Z = Z_{\max} \cdot (100 - s_{dem}) \quad \text{Ec. (1)}$$

donde  $Z_{\max}$  es el valor de profundidad del suelo “activo” del suelo esperable en una zona con pendiente nula, y  $s_{\text{dem}}$  es el valor de la pendiente en %, obtenido a partir de un Modelo Digital del Terreno (MDT) disponible para la zona (Centro Nacional de Información Geográfica - Instituto Geográfico Nacional, <http://centrodedescargas.cnig.es/>).

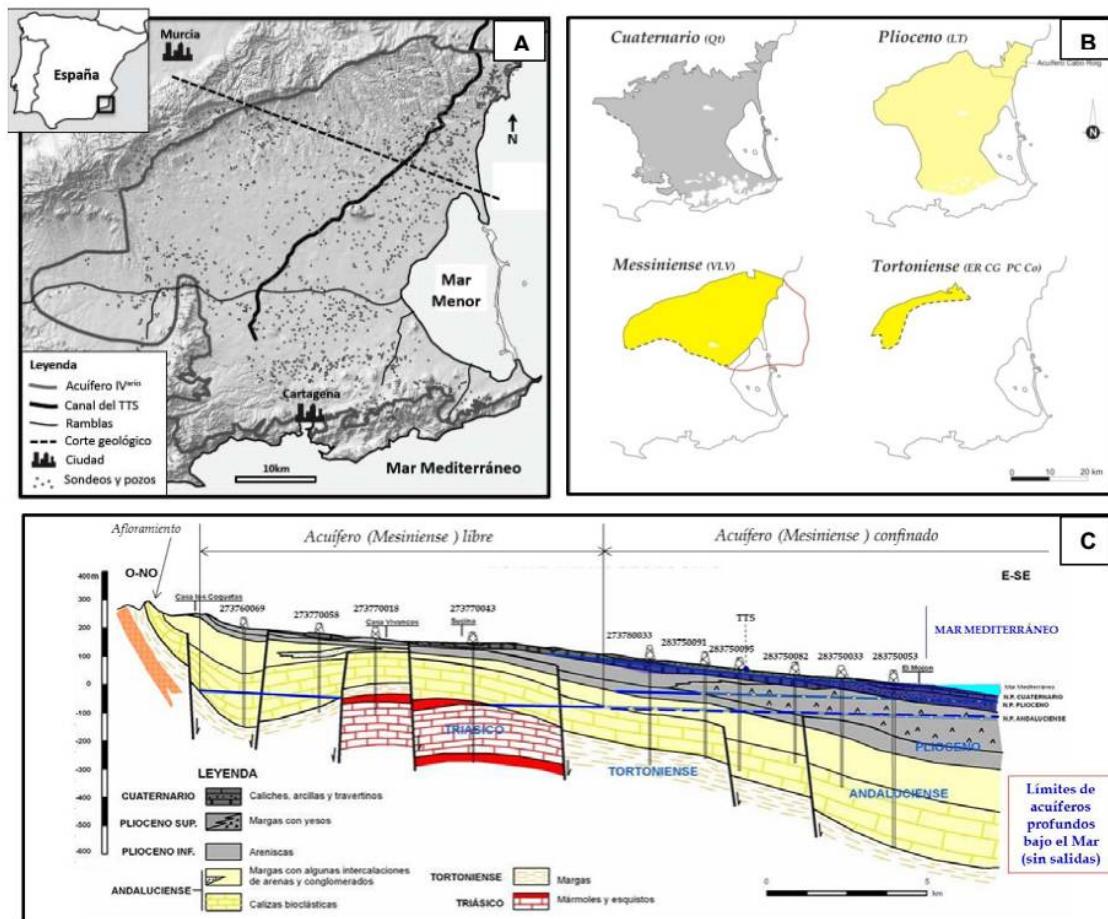
## 2.3 Datos para el modelo de hidrología subterránea

### 2.3.1 Hidrogeología regional

El funcionamiento hidrogeológico de los acuíferos que conforman la cuenca del Campo de Cartagena es complejo debido a su geometría y alto grado de antropización. El relleno sedimentario de la cuenca está compuesto principalmente por sedimentos detríticos (margas) con intercalaciones de material muy conductor (calizas, areniscas y conglomerados), que fueron depositados en el periodo transcurrido entre el Tortoniano y el Cuaternario. Las arenas y conglomerados del Tortoniano, las calizas del Mesiniense y las areniscas del Plioceno conforman los acuíferos profundos, mientras que los sedimentos detríticos del Cuaternario constituyen el acuífero superficial. El sistema hidrogeológico regional es un sistema multicapa compuesto por (Aragón et al., 2009; ITGE, 1993, 1991; Rodríguez Estrella, 1995):

- el acuífero superficial o libre de edad Cuaternario, compuesto principalmente por arenas, conglomerados y arenisca con intercalaciones de limos y arcillas,
- el acuífero confinado intermedio de edad Plioceno, llamado Loma Tercia, compuesto principalmente por areniscas,
- el acuífero confinado profundo de edad Mesiniense, llamado Venta la Virgen, también compuesto por areniscas, y
- el acuífero confinado profundo de edad Tortoniano, compuesto por arenas y conglomerados.

García-Aróstegui et al. (2017) definen un quinto acuífero formado por rocas carbonatadas del Pérmico-Triásico que afloran en el Cabezo Gordo, con un eje elevado hacia Sucina, y que en determinadas zonas estaría conectado con el acuífero Mesiniense. Estos mismos materiales constituyen el acuífero independiente del Triásico de Los Victorias, que apenas tiene relación hidrogeológica con los acuíferos principales del Campo de Cartagena. En la Figura 4 se representa la extensión de las unidades acuíferas más importantes y la litoestratigrafía para un corte vertical representativo.



**Figura 4. A) Límite de la Masa de Agua Subterránea del Campo de Cartagena; B) Límites de los acuíferos principales; C) Corte hidrogeológico. Tomado de García-Aróstegui et al. (2017).**

Los acuíferos principales antes mencionados se encuentran separados por acuitardos de baja o muy baja conductividad: los acuíferos del Cuaternario y del Plioceno se encuentran separados por margas y evaporitas; la formación El Espartal, compuesta básicamente por arcillas, separa los acuíferos del Plioceno y del Mesiniense. Como se observa en la Figura 4, el acuífero Cuaternario se encuentra separado del acuífero Plioceno por un acuitardo de baja conductividad de más de 40 m de espesor. El espesor del acuitardo disminuye hacia los bordes de la cuenca, especialmente hacia su borde sur (materiales metamórficos de basamento, Sierra de Cartagena-La Unión), lo que podría dar lugar a la comunicación hidráulica entre el acuífero libre Cuaternario y el confinado Plioceno. Sin embargo, esa conexión hidráulica es de carácter muy local por lo que, a escala regional, cada acuífero conserva su nivel piezométrico correspondiente. No obstante, hacia el borde sur, se han identificado horizontes permeables embebidos en materiales poco permeables a profundidades no superiores a los 30 m. Su carácter marcadamente local da lugar a los llamados acuíferos “colgados” (informe geotécnico de Horysu de 2006, CCRR Arco Sur, 2006).

De especial relevancia para este trabajo es el acuífero superficial de edad Cuaternario, que ocupa la mayor parte de la extensión de la cuenca del Campo de Cartagena y cuenta con un espesor saturado medio de unos 50 m. Además, es el sustrato de la laguna costera del Mar Menor. El acuífero Plioceno ocupa una menor extensión y su espesor (siempre saturado al ser confinado) es de unos 30 m en media. El espesor del acuífero Mesiniense es de unos 125 m en

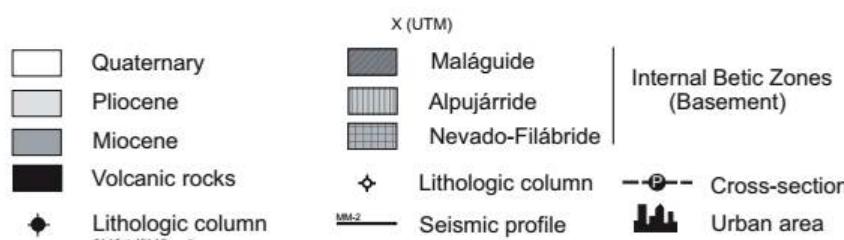
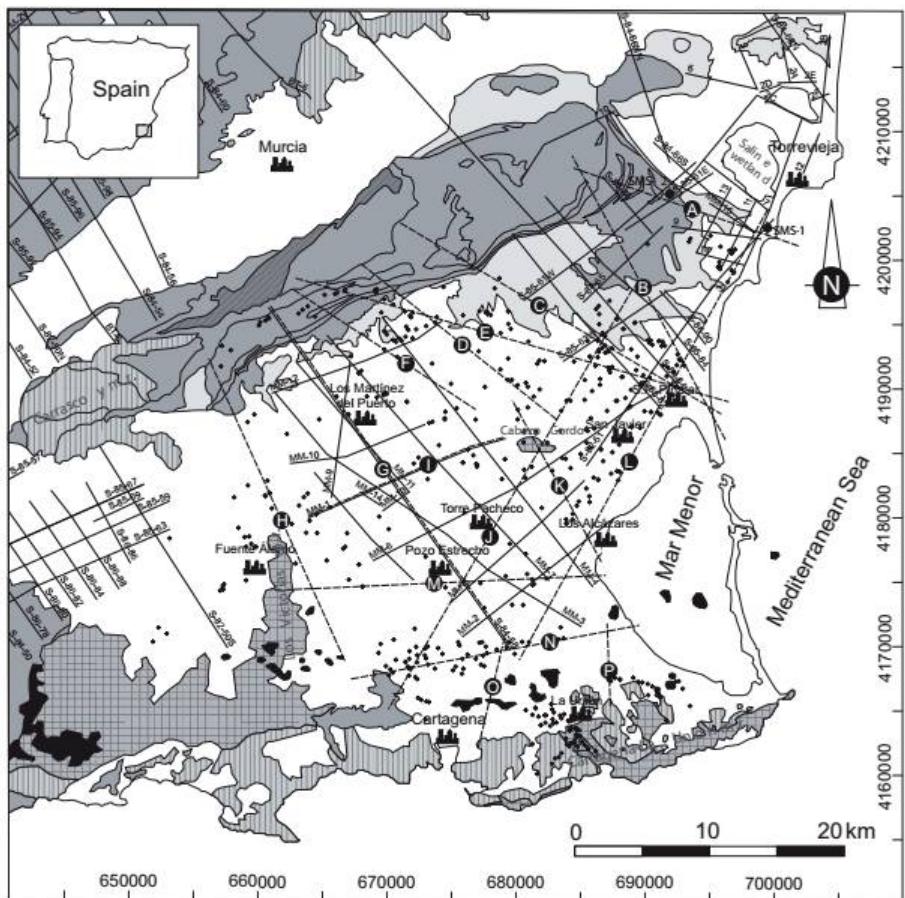
la parte norte. La parte sur está conformada por sedimentos de baja conductividad que, por tanto, no tienen interés hidrogeológico. Finalmente, la extensión y espesor del acuífero Tortoniense (estimado en unos 90 m) es difícil de cuantificar en base a la información existente.

### 2.3.2 *Geología detallada y modelo geométrico del acuífero*

La geología del área de estudio se describe en detalle en Jiménez-Martínez et al. (2012). En esta sección se resumen sólo los datos relevantes para este estudio. La cuenca Neógeno-Cuaternaria del Campo de Cartagena ocupa una extensión de aproximadamente 1500 km<sup>2</sup> y cuenta con espesores de hasta 1500 m (García-Aróstegui et al. 2017). Los materiales metamórficos, que actúan como basamento de la cuenca, son:

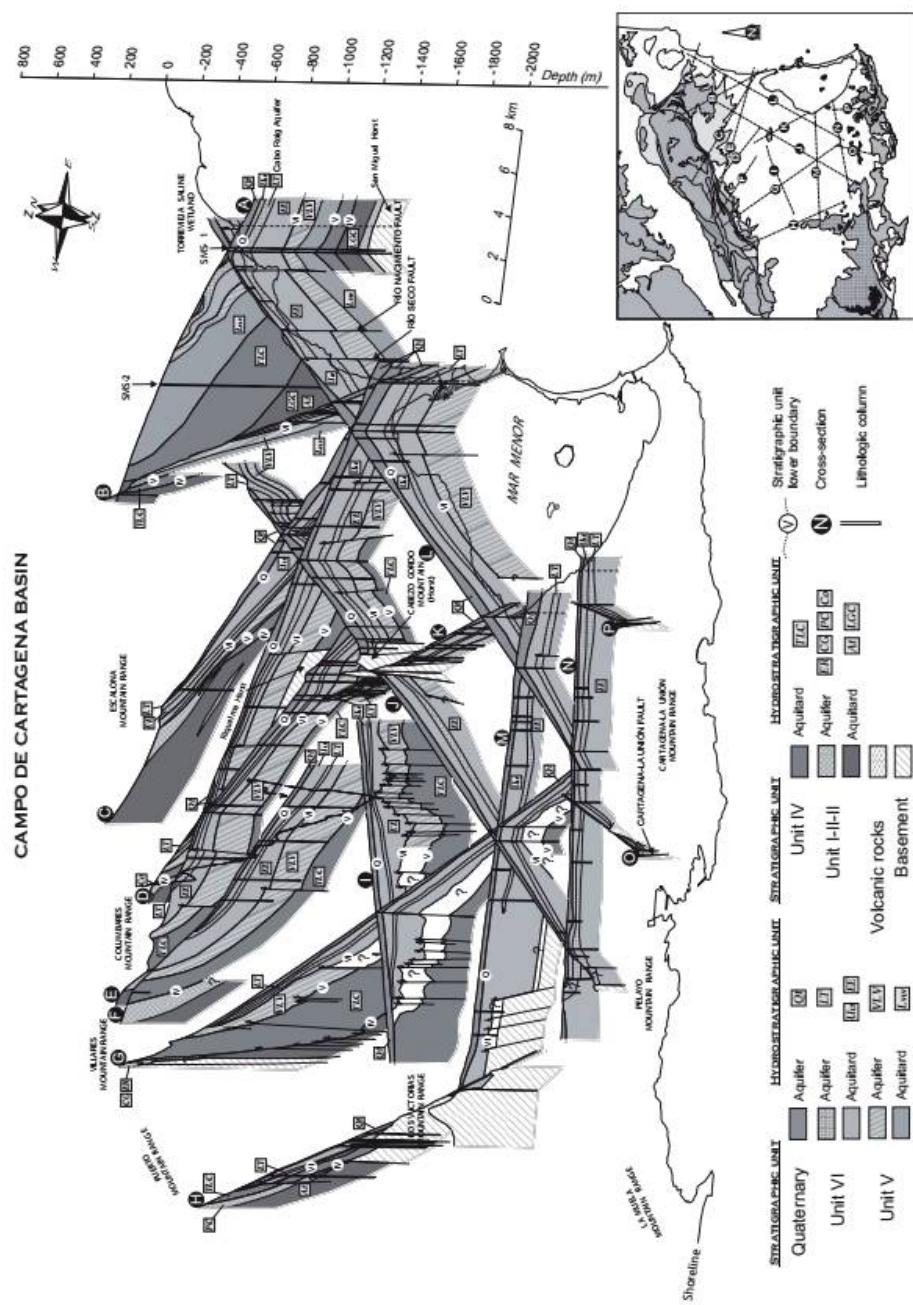
- Nevado-Filábride: mica-esquistos de edad Paleozoico, Pérmico y Triásico
- Alpujárride: esquistos, filitas y cuarcitas de edad Pérmico y Triásico.
- Maláguide: cuarcitas y calizas de edad Pérmico y Triásico.

Sobre el basamento descansan los materiales sedimentarios de edad Neógeno. Sobre estos se encuentran los sedimentos de edad Cuaternario, que cubren la mayor parte de la superficie de la cuenca del Campo de Cartagena (Figura 5).

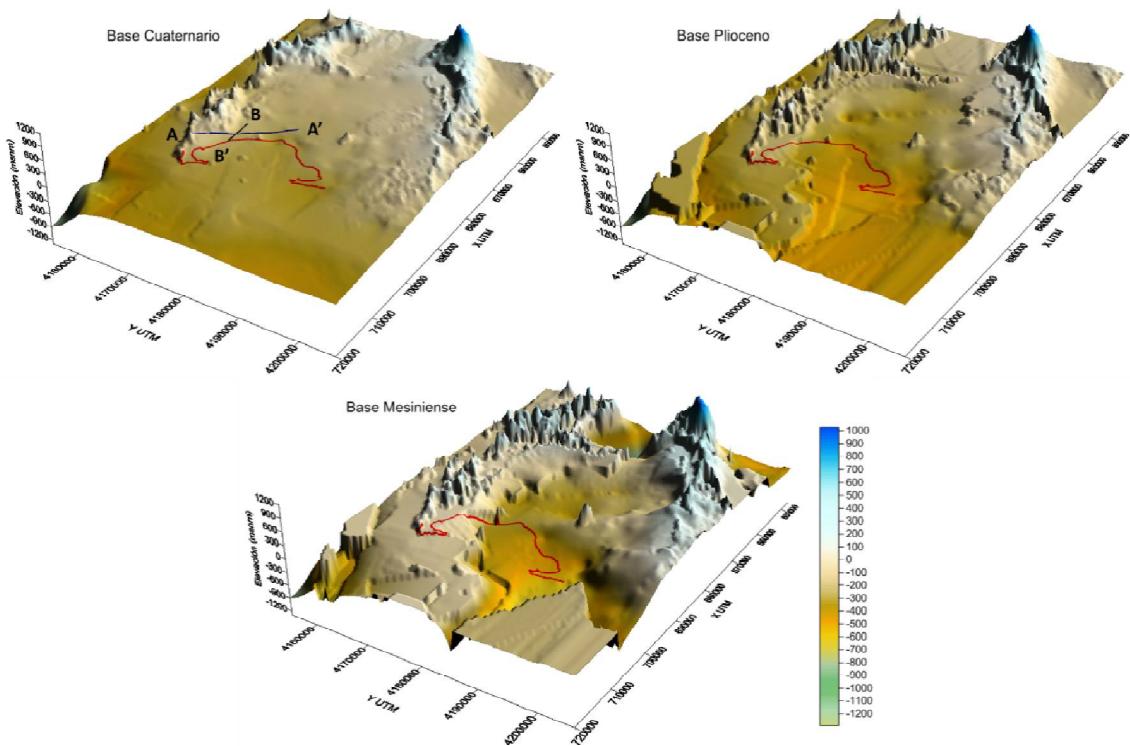


**Figura 5. Geología del área de estudio (tomado de Jiménez-Martínez et al., 2012).**

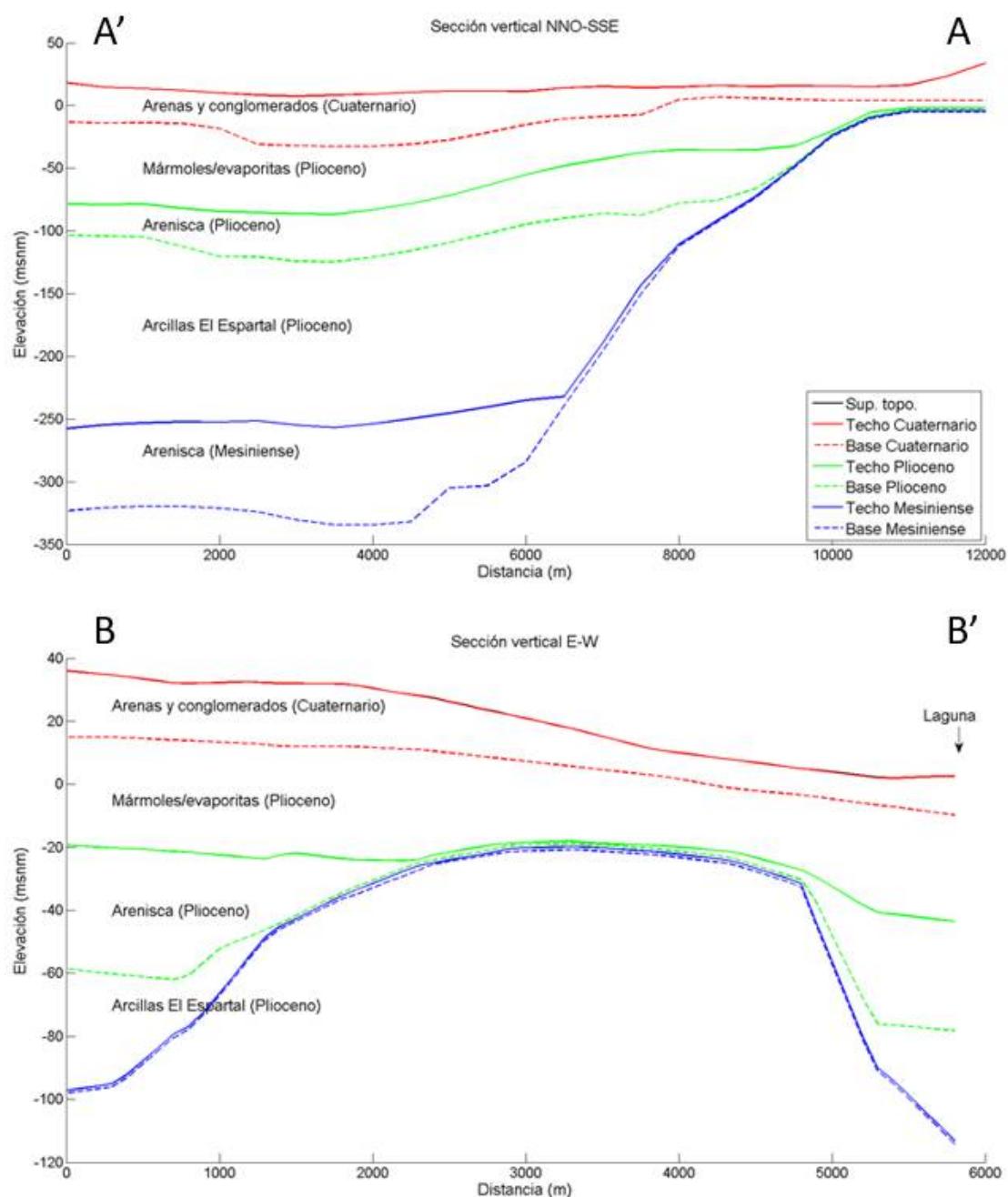
En Jiménez-Martínez et al. (2012) se propone un modelo geológico tridimensional (Figura 6) en base al análisis de diversas fuentes de datos, entre ellos: perfiles sísmicos, gravimetría, resistividad eléctrica y 491 perfiles en pozos y sondeos. La interpretación de dicha información litológica y geofísica permitió asimismo la interpolación de superficies de techo y muro de las tres formaciones principales (Figura 7). Jiménez-Martínez y García-Aróstegui (comunicación personal) adoptan una resolución uniforme de 500x500 m, coherente con la densidad de datos disponible para aquel estudio. La calidad de definición de dichas superficies está sobradamente contrastada. Por ejemplo, la base o muro del acuífero superficial Cuaternario intersecta las superficies en algunas zonas, lo que permite cotejar las líneas de intersección derivadas de las superficies interpoladas con aquellas extraídas directamente de la cartografía geológica de superficie. La Figura 7 muestra una representación tridimensional de los muros de los materiales de edad Cuaternario, Plioceno y Mesiniense. En la figura se observa la suavidad en la topografía de los sedimentos de edad Cuaternario. Dicha suavidad se pierde en profundidad, siendo las superficies de muro de los materiales de edad Plioceno y Mesiniense cada vez más abruptas. La Figura 8 muestra dos cortes geológicos en la zona de estudio, en paralelo y perpendicular a la laguna aproximadamente.



**Figura 6. Modelo geológico tridimensional de la cuenca del Campo de Cartagena (factor de exageración vertical x10). Tomado de Jiménez-Martínez et al. (2012).**



**Figura 7. Representación tridimensional de las superficies de muro de los materiales de edad Cuaternario, Plioceno y Mesiniense. El contorno de la laguna se representa mediante línea roja. Las líneas azul y negra en el gráfico del muro de los materiales de edad Cuaternario representan los perfiles de los cortes geológicos NNO-SSE y E-O mostrados en la Figura 8, respectivamente. Factor de exageración vertical x10.**



**Figura 8. Cortes geológicos NNO-SSE y E-O en la zona de la Comunidad de Regantes Arco Sur.**

### 2.3.3 Parámetros hidráulicos del acuífero Cuaternario

Los valores de los parámetros hidráulicos (transmisividad  $T$ , y coeficiente de almacenamiento  $S$ ) suelen derivarse de la interpretación de ensayos hidráulicos, por ejemplo, de bombeo. Generalmente, este tipo de ensayos tiene un carácter local y un alcance de unas pocas decenas de metros, por lo que los valores de los parámetros obtenidos a partir de ellos proporcionan información muy puntual del entorno del pozo. Además, una interpretación fiable del valor del coeficiente de almacenamiento requiere la medición de la dinámica temporal del nivel piezométrico en varios pozos cercanos al del de bombeo, lo que no es práctica habitual. Existen muy pocas interpretaciones de ensayos de bombeo, todas ellas en el acuífero de edad

Cuaternario (Tabla 4; TRAGSATEC,(2013)). Como es habitual en acuíferos cuaternarios, la heterogeneidad en los parámetros hidráulicos es muy marcada en términos de T y S dado que estos parámetros tienen en cuenta el espesor saturado del acuífero. La transmisividad,  $T$ , se calcula tradicionalmente (aunque sea del todo incorrecto desde un punto de vista físico y matemático) como el producto de conductividad hidráulica ( $K$ ) y espesor saturado ( $B$ ) del acuífero. Respectivamente, el coeficiente de almacenamiento,  $S$ , se calcula como el producto entre el almacenamiento específico ( $S_s$ ) y el espesor saturado del acuífero. Así, en zonas donde el espesor saturado del acuífero es pequeño (por ejemplo, cerca de sus bordes),  $T$  y  $S$  serán también pequeños. En cambio, la heterogeneidad a escala global de cuenca, y siempre en términos de conductividad hidráulica y almacenamiento específico, es pequeña, dado que estos parámetros dependen sólo del material y del fluido que circula por ellos. Los materiales del acuífero Cuaternario son relativamente homogéneos a escala global, si bien a escala local pueden existir cambios bruscos debidos, por ejemplo, a paleocauces de alta conductividad hidráulica correspondientes a la topología de la red hidrológica superficial en el pasado (ahora en profundidad).

El funcionamiento de los acuíferos costeros está íntimamente ligado a su difusividad hidráulica, definida como el cociente entre transmisividad y coeficiente de almacenamiento (o equivalentemente, entre conductividad hidráulica y almacenamiento específico). De esta forma, se elimina la incertidumbre ligada a la estimación inicial del espesor saturado del acuífero. Esto, junto a la escasez y poca fiabilidad de valores de parámetros disponibles para estudio, motiva que los resultados del modelo se presenten en adelante en términos de difusividad  $D=T/S=K/S_s$ .

**Tabla 4. Valores de transmisividad (T), coeficiente de almacenamiento (S) y Difusividad (D) en sondeos y zanjas del acuífero Cuaternario (TRAGSATEC, 2013).**

ID	Tipo	Código	$T_{\min}$ ( $m^2/d$ )	$T_{\max}$ ( $m^2/d$ )	$S_{\min}$ (-)	$S_{\max}$ (-)	$D_{\min}$ ( $m^2/d$ )	$D_{\max}$ ( $m^2/d$ )
101	Sondeo	Sondeo 1	15	20.4	7.40E-03		2030	2760
120	Sondeo	Sondeo 21	15.3	16.6	4.60E-05	5.50E-03	3000	330000
168	Zanja Piloto	Zanja1	71.5	97.2	0.056		1300	1700
169	Zanja Piloto	Zanja2	117.5	153.8	0.103	0.118	1100	1300
251	Zanja Piloto	Dren Existente	213.1					
252	Sondeo	SHI-01	7.2	13.7	1.20E-03		6000	11500
253	Sondeo	SHI-02	780	836	7.00E-03		110000	120000
254	Sondeo	SHI-03	1185	1352	7.40E-03		160000	185000
255	Sondeo	SHI-04	500	690	3.35E-03		150000	205000
256	Sondeo	SHI-05	1570	1600	2.70E-03		580000	590000

Como se observa en la Tabla 4, las estimaciones de la cota mínima y máxima del coeficiente de almacenamiento (por ejemplo, en el sondeo 21) son muy dispares y dependen del punto de observación tenido en cuenta para la interpretación. Esto es debido a la propia definición del coeficiente de almacenamiento. Contrario a la definición tradicional (variación del volumen de agua almacenado en el acuífero por unidad de superficie y por unidad de tiempo, al variar el nivel piezométrico en un metro), estudios recientes (e.g. Meier, 1999) revelan el significado real del coeficiente de almacenamiento como una medida del grado de conectividad entre el punto

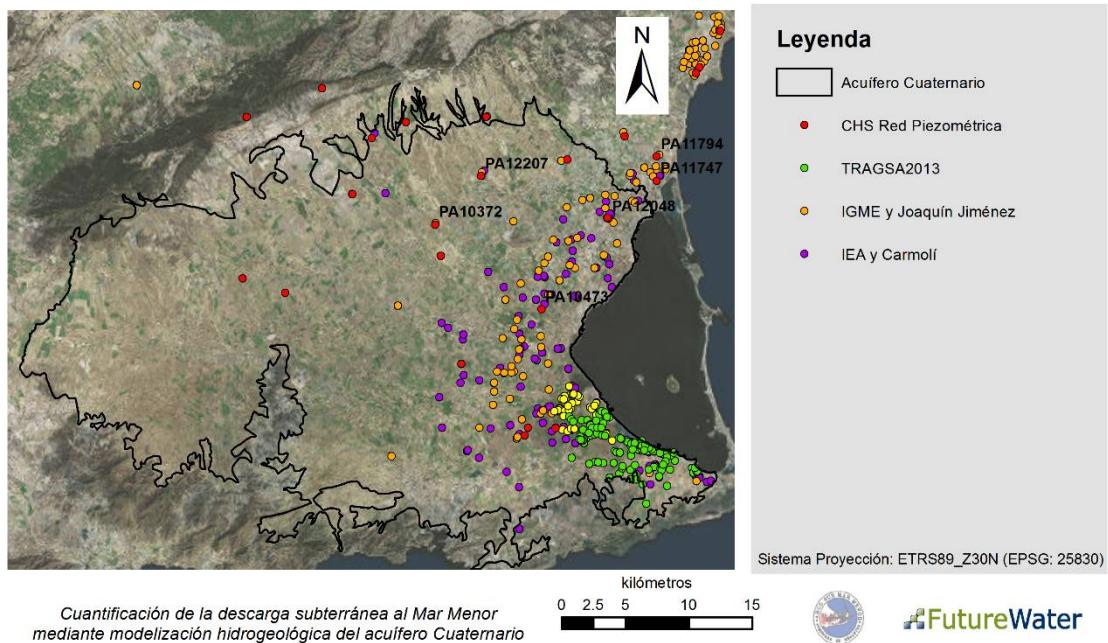
donde se bombea y el punto donde se mide el nivel. Cuando el punto de medida de nivel piezométrico y el de bombeo coinciden, como suele ser habitual, suelen obtenerse valores muy altos del coeficiente almacenamiento (incluso muy superiores a la unidad, lo cual de acuerdo con la definición tradicional o física es imposible por estar su valor acotado por la porosidad eficaz, con valor máximo 1). En cambio, los valores altos de difusividad estimados en la Tabla 4 son relativamente estables y dentro del rango de valores típicos en acuíferos costeros. Se observan valores de difusividad anómalamente bajos (por ejemplo, en las zanjas o en el Sondeo 1). Resulta imposible discernir si esos valores son producto de una heterogeneidad “real” del acuífero o de una ejecución defectuosa del sondeo (por ejemplo, por colmatación del sondeo o por la presencia del llamado “mud-cake” alrededor del pozo).

#### 2.3.4 *Inventario de pozos*

Se ha llevado a cabo una profunda revisión del inventario de pozos existentes y abandonados. Los puntos de control disponibles proceden de diversas fuentes (IGME, IEA, comunicaciones personales de Joaquín Jiménez, J.L. García-Aróstegui y CCRRArco Sur, entre otras). Un primer filtrado de pozos consistió en (1) georreferenciar todos los puntos inventariados bajo un sistema de proyección común (ETRS89 – Zona 30N) y (2) cotejar, homogeneizar y unificar las distintas bases de datos, eliminando repeticiones de pozos con códigos identificativos distintos, pero idénticas coordenadas, entre otros casos.

Otro problema que se ha encontrado es la falta de información sobre la ejecución del pozo, en particular, de la profundidad de la zona ranurada y, por tanto, del acuífero del que bombean (o miden). Una vez filtrados y correctamente georreferenciados los pozos, se procedió a examinar su profundidad total. Dicho valor se comparó con las cotas de los techos del Plioceno y Mesiniense en la localización del pozo (interpolada a partir de las superficies de la Figura 7). En aquellos casos en los que la cota inferior del pozo fue mayor que la cota del techo del Plioceno, puede asegurarse que la formación de la que bombean (o la que miden) es el Cuaternario. En caso contrario, se asume que el pozo está ranurado prácticamente en su totalidad y por tanto bombea del Cuaternario y del Plioceno si la cota inferior del pozo es mayor que el techo del Mesiniense o de los tres en caso contrario.

Dada la disparidad de códigos para un mismo pozo (dependiendo de la fuente de información), se ha optado por renombrar los pozos de acuerdo con la formación geológica de la que bombean o miden. Así, en adelante, Fx denota que el pozo x bombea de la formación F, donde F puede ser: C para Cuaternario, P para Plioceno, M para Mesiniense, CP para Cuaternario y Plioceno, etc. Finalmente, la red de control disponible consta de un total de 475 pozos y sondeos, de los cuales: 225 se encuentran ranurados a profundidades compatibles con el acuífero Cuaternario superficial (Figura 9); 14 están ranurados en Cuaternario y Plioceno; 8 en Cuaternario, Plioceno y Mesiniense; y, el resto se desconoce.



**Figura 9. Inventario de pozos y fuentes de información. Los puntos con etiqueta corresponden a los pozos con series largas de medidas piezométricas (Confederación Hidrográfica del Segura).**

En ocasiones, las coordenadas geográficas registradas para algunos pozos inventariados en este estudio fueron consideradas muy inciertas, debido principalmente a dos motivos: 1) el sistema de proyección utilizado no pudo definirse con exactitud, y por tanto no pudieron georreferenciarse en el sistema de proyección de referencia (ETRS89 - Zona 30N), y 2) la nivelación de algunos pozos es muy incierta, existiendo discrepancias entre la cota nivelada sobre el terreno y la cota correspondiente en el Modelo Digital del Terreno disponible para la zona (resolución espacial de 25 m.) que se considera aquí como el dato más fiable. Se ha llevado a cabo un estudio intensivo de ambos condicionantes, un resumen del cual se presenta en el anexo IV de la presente Memoria.

#### 2.3.5 Extracciones por bombeo

Los caudales de bombeo que se han logrado recopilar son, como suele suceder, muy inciertos. Según ITGE (1991) la cifra total de explotación por bombeos ronda los 21 hm<sup>3</sup>/año, de los cuales 2 serían debidos a la explotación del acuífero superficial Cuaternario, 6.3 del acuífero Plioceno y 12.3 del acuífero Mesiniense. Según García-Aróstegui et al. (2017), estas cifras corresponderían al año húmedo de 1990 y se han modificado sustancialmente a fecha presente. Jiménez-Martínez et al. (2016) cifran las extracciones en el acuífero Cuaternario, Plioceno y Mesiniense en 104 hm<sup>3</sup>/año, incluyendo los bombeos en el Triásico de Los Victoria. En cambio, el PHCS 2015-2021 reconoce una cifra de bombeo total en el Campo de Cartagena de 88.2 hm<sup>3</sup>/año (Tabla 1).

Debido a la necesidad de asegurar el volumen de agua de riego y su calidad, en los últimos años se ha incrementado la construcción de pequeñas plantas desaladoras de uso privado. El subproducto de la desalación (aproximadamente un 25% de salmuera) se vierte a cauces existentes desde donde se infiltra al acuífero Cuaternario, o se inyecta directamente en pozos

abandonados del mismo. La infiltración natural o reinyección de estas salmueras al acuífero Cuaternario están contribuyendo a su paulatina degradación.

Otro mecanismo de explotación de aguas subterráneas consiste en la construcción de zanjas drenantes del acuífero superficial en las proximidades de la laguna. Una parte de los recursos gestionados por la CCRR-Arco Sur proceden de esta fuente a través de una red de drenaje que viene siendo explotada desde unos años atrás. La CCRR-Arco Sur hace un seguimiento exhaustivo de los volúmenes bombeados en su red de drenaje si bien estos valores no se presentan en esta Memoria por motivos de confidencialidad.

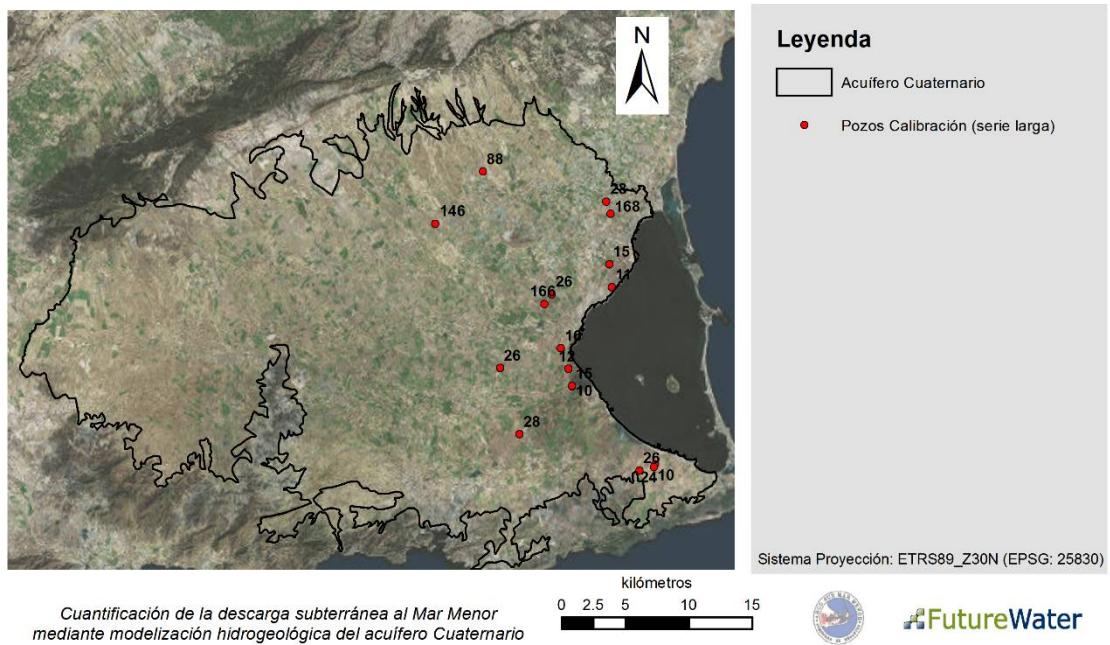
A nivel cualitativo, los acuíferos profundos son los más explotados, mientras que el nivel de explotación del acuífero superficial Cuaternario es pequeño debido a su alto nivel de contaminación por retornos de riego.

### 2.3.6 *Comunicación entre acuíferos*

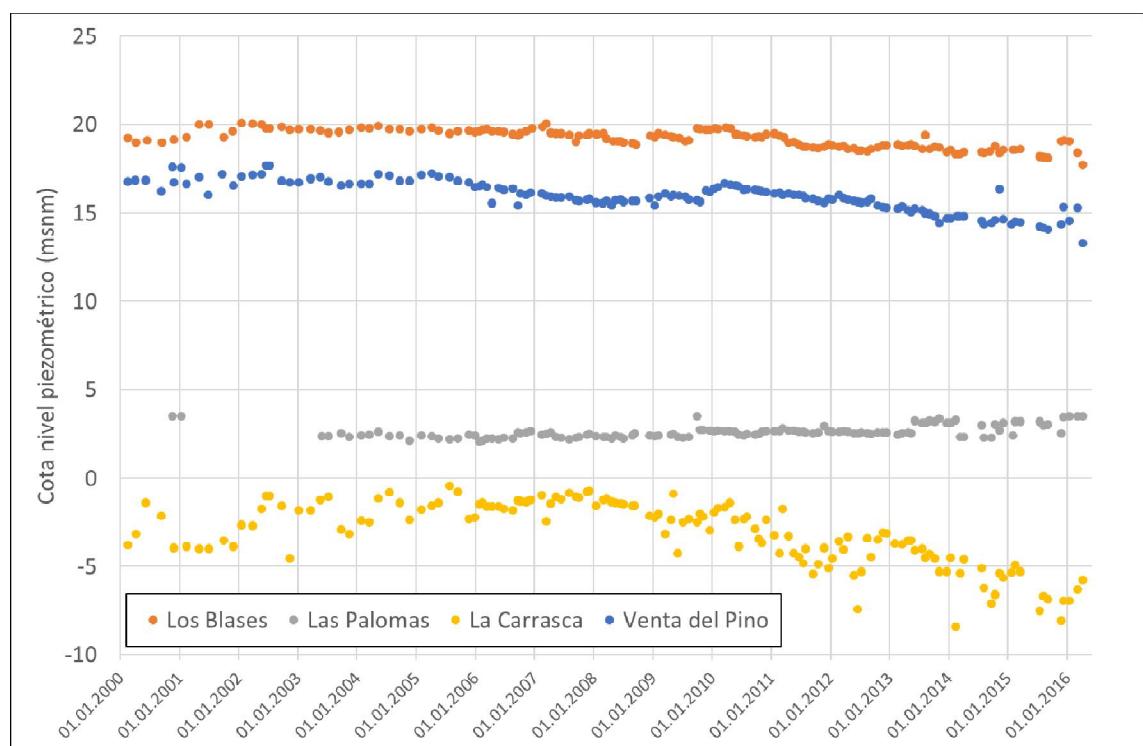
Un problema que se presume grave en la cuenca del Campo de Cartagena es la comunicación vertical entre acuíferos causada por pozos mal ejecutados. Los aportes de nitratos por flujos verticales en pozos a los acuíferos confinados inferiores son mucho mayores que aquellos a través de los acuitardos por ser estos últimos muy lentos. IGME (1991) cifra una transferencia de 23.7  $hm^3/año$  entre los acuíferos Cuaternario y Plioceno y de 14.2  $hm^3/año$  entre Cuaternario y Mesiniense. Así, la pérdida total del acuífero Cuaternario es de 37.9  $hm^3/año$  (unos 46  $hm^3/año$  según Jiménez-Martínez et al. 2016, cifra en la que se engloban también los bombeos; Tabla 1).

### 2.3.7 *Piezometría*

De los 225 pozos y sondeos inventariados en el acuífero Cuaternario (con al menos una medida de nivel piezométrico), únicamente 27 de ellos tienen más de una medida, y sólo 19 tienen más de 10 (Figura 10). La Figura 11 muestra un ejemplo de series temporales de nivel piezométrico medidas en algunos pozos de la Confederación Hidrográfica del Segura. Como puede observarse, la gran mayoría de pozos con serie larga de medidas se encuentran en una franja de 6km de anchura en paralelo a la laguna.



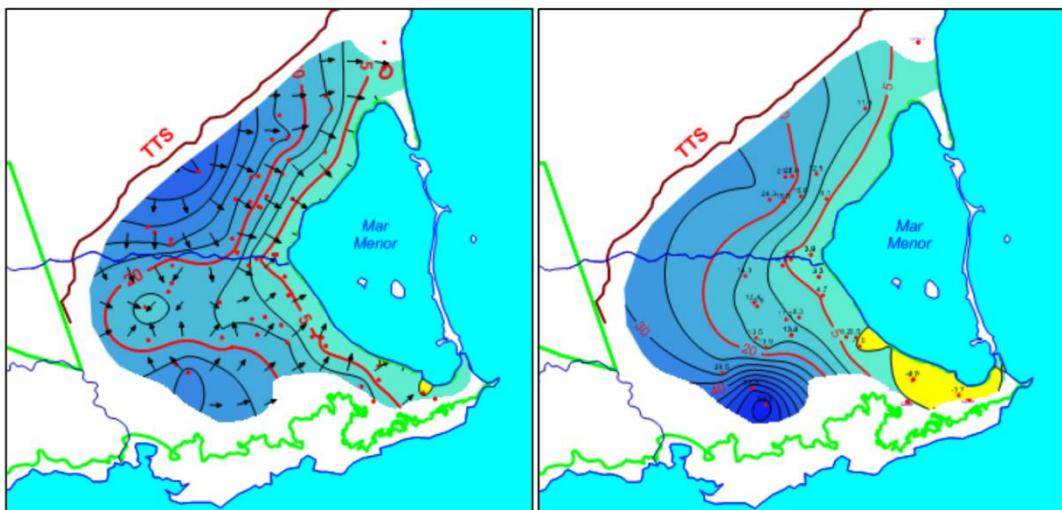
**Figura 10. Situación y número de medidas de nivel piezométrico en pozos del Cuaternario. Sólo se muestran aquellos puntos con más de diez medidas de nivel piezométrico.**



**Figura 11. Ejemplo de series largas de medidas de nivel piezométrico en pozos de la Confederación Hidrográfica del Segura.**

García-Aróstegui et al. (2017) ofrecen un mapa piezométrico para el acuífero Cuaternario en la zona cercana a la laguna (Figura 12). Se observa un comportamiento global típico de acuífero

Cuaternario conectado a una masa de agua salada, con isopiezas paralelas a la línea de costa, lo que revela un flujo de descarga del acuífero a la laguna. Se observa una cierta influencia de la Rambla del Albujón cerca de su desembocadura (la isopieza de nivel 5m se curva hacia el interior, lo que indica que el acuífero cede agua a la Rambla). En 2016 se observan niveles negativos en la zona de costa (en amarillo en la Figura 12) y en su parte sur, provocados por el impacto de las zanjas drenantes existentes.



**Figura 12. Mapas de isopiezas (García-Aróstegui et al. 2017) y dirección de flujo de agua subterránea en el acuífero Cuaternario en octubre de 2009 (izquierda) y octubre de 2016 (derecha). Cotas en metros sobre el nivel del mar. TTS denota Trasvase Tajo-Segura.**

Las piezometrías propuestas por TRAGSATEC (2013) y Jiménez-Martínez (para el año 2005; comunicación personal) corresponden a grandes rasgos con las de la Figura 12. Conviene destacar que la piezometría en dicha figura se llevó a cabo solamente mediante interpolación de los datos de nivel piezométrico existentes, es decir, no se basan en ningún modelo que represente los procesos físicos suprayacentes, con lo que el trazado de las líneas de isopiezas debe interpretarse con precaución y de manera cualitativa.

### 3 Métodos

#### 3.1 Introducción general. El proceso de modelación

Cuantificar los flujos de agua subterránea en un acuífero (especialmente sus descargas en otras masas de agua) es una tarea complicada. En general, la medición directa de estos flujos en pozos mediante técnicas de *flowmeter* resulta extremadamente costosa, complicada y poco fiable si el pozo no está perfectamente ejecutado, mientras que la estimación indirecta de los mismos mediante técnicas isotópicas o ensayos hidráulicos y/o de trazadores suele ser muy larga y tediosa. En ambos casos, la interpretación de los datos y resultados aporta información sobre el acuífero a escala muy local, tanto en el espacio como en el tiempo.

El uso de modelos para la simulación numérica y la cuantificación de los flujos de agua subterránea es una muy buena alternativa frente a los métodos directos e indirectos, dado que un modelo integra toda la información disponible y permite la cuantificación objetiva y espacio-temporal de los flujos de agua subterránea a escala local y regional.

Los modelos son herramientas esenciales para: (1) la realización de análisis objetivos y predicciones cuantitativas en sistemas complejos, (2) proporcionar un marco efectivo para la conceptualización del sistema y su funcionamiento, y (3) la recolección, integración y síntesis de los datos disponibles (Samper, 1997). Un modelo numérico sólo puede aspirar a ser una buena representación del sistema real si está basado en un modelo conceptual sólido y soportado por una base de datos fiable. La información que el modelo conceptual debe aportar al modelo numérico es, por ejemplo, toda la referente a la geometría del acuífero y de la cuenca hidrográfica, las características físicas del medio, las acciones a las que está sometido el acuífero y los procesos físicos y químicos que tienen lugar en él.

Una vez conocidos los límites del sistema a modelar, se discretiza su extensión mediante celdas o elementos que recubren toda la superficie sin solaparse. Las ecuaciones que representan los procesos físicos se resolverán en las celdas o elementos, o en los vértices que las definen, dependiendo del software adoptado. La discretización se refina en zonas próximas a elementos de interés hidrológico o hidrogeológico con impacto en el modelo, tales como pozos, ríos, zonas de recarga y descarga, etc., y en general en cualquier área donde se prevea un alto gradiente hidráulico.

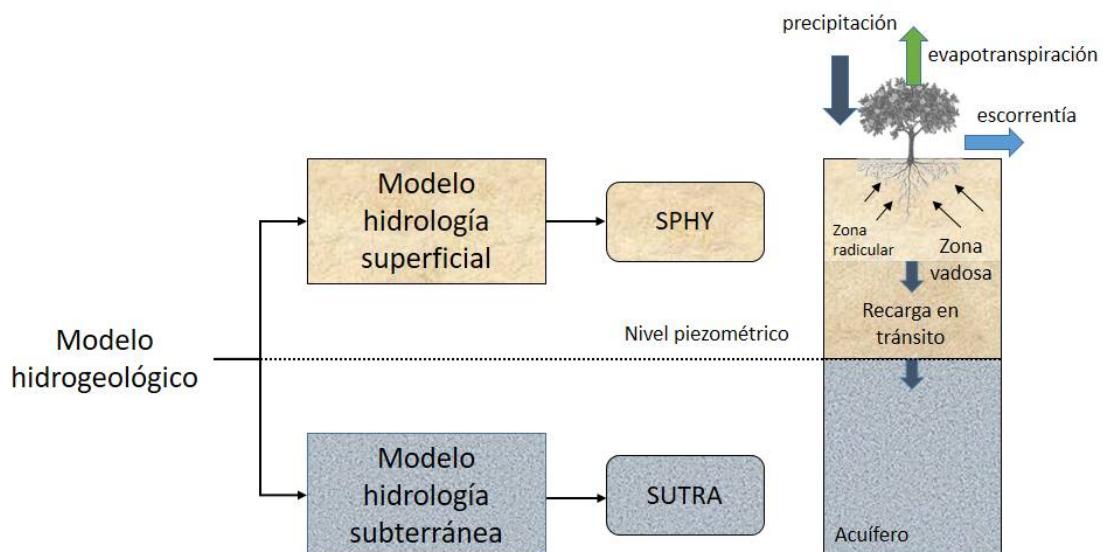
Una vez discretizado el modelo, y en la medida en que los datos disponibles lo permiten, se calibran sus parámetros (generalmente, muy poco conocidos). El proceso de calibración consiste en calcular los parámetros del modelo que, siendo plausibles, ofrecen un buen ajuste de las medidas disponibles (esto es, pequeñas discrepancias entre valores calculados y medidos). La calibración de parámetros se puede llevar a cabo por prueba y error, es decir, modificando paulatinamente los parámetros y observando su impacto en el ajuste de las medidas de, por ejemplo, nivel piezométrico. En general, el proceso de calibración suele ser una tarea tediosa que comporta el ajuste de un elevado número de parámetros mediante el uso de algoritmos automáticos que ajustan según criterios de mínimo cuadrados o de máxima verosimilitud.

En ocasiones los modelos pueden contener importantes errores cuando se calibran con datos erróneos o insuficientes, o no se tiene un buen conocimiento del sistema que se pretende modelizar (medidas en unos pocos pozos en un acuífero a escala regional, interpretaciones

subjetivas de sus parámetros hidráulicos, errores en la toma de medidas de nivel piezométrico, etc.). Para el caso particular del acuífero superficial Cuaternario del Campo de Cartagena, se dispone de conocimiento detallado a nivel geológico, hidrológico y, en menor medida, hidrogeológico. Toda esa información, procedente de distintas fuentes y a veces inconexa y poco aprovechada, se va a integrar por primera vez en un modelo numérico de caracterización y gestión de acuíferos. La gran cantidad de información espacial recopilada y analizada, una vez propiamente integrada en el modelo, permite alcanzar un nivel de precisión y detalle sin precedentes en la zona de estudio.

La modelación del flujo de agua subterránea requiere en primer lugar la modelación de la recarga de agua procedente de precipitación al acuífero. Para ello, en este estudio se acoplan dos modelos bien diferenciados: a) el modelo de balance de agua en el suelo, que simula los procesos hidrológicos en superficie y la generación de la recarga en tránsito, y b) el modelo de aguas subterráneas, que simula el flujo de agua subterránea y de sólidos disueltos en ella. Los códigos de simulación que se han acoplado son:

- SPHY (Contreras et al., 2014; Terink et al., 2015), para la simulación del balance de agua en superficie, y
- SUTRA(<https://water.usgs.gov/nrp/gwsoftware/sutra.html>) para la simulación del flujo de agua y sólidos disueltos en el acuífero Cuaternario a partir de las entradas de recarga en tránsito derivadas del modelo SPHY. El resultado principal de este modelo es el balance hidrogeológico en la zona de estudio, una de cuyas componentes es la distribución espacio-temporal de la descarga del acuífero Cuaternario a la laguna del Mar Menor, principal objetivo de este estudio.



**Figura 13. Diagrama esquemático del modelo integrado del Campo de Cartagena y sus componentes.**

En general, los modelos hidrogeológicos son herramientas extremadamente útiles para (1) entender el pasado mediante reproducción de medidas históricas, (2) conocer el presente, el estado actual del sistema y (3) predecir el futuro, mediante la evaluación del impacto de diferentes escenarios, entre otros:

- cambios de clima (reducción de precipitaciones y aumento de temperaturas, aumento de frecuencia de aguaceros y períodos de sequía),

- cambios de cobertura y usos de suelo (conversión de cultivos y patrones de riego), y
- cambios en las estrategias de explotación y gestión del recurso hídrico (ej. nuevas captaciones de agua subterránea, intensificación de los regímenes de bombeo existentes, ampliación de zanjas y redes de drenaje, reducción de transferencia de recursos externos como trasvases, etc.).

El presente estudio constituye una primera fase de aproximación al problema y ha tenido como objetivo la creación de un modelo hidrogeológico integrado para el acuífero Cuaternario superficial del Campo de Cartagena, y la simulación y análisis de los flujos de agua subterránea, integrando la información disponible en el periodo octubre/2000 – diciembre/2016. Este periodo de estudio se ha considerado lo suficientemente largo y representativo de las condiciones (promedio y extremas) que controlan la hidrología superficial y subterránea de la región. Las siguientes secciones explican en detalle las dos componentes del modelo hidrogeológico, esto es, el modelo de hidrología superficial para el cálculo de la percolación profunda o recarga en tránsito, y el modelo de hidrología subterránea para la cuantificación de los flujos de agua subterránea.

## 3.2 Modelo de hidrología superficial

### 3.2.1 *Modelo conceptual y código de simulación*

Para cuantificar la recarga en tránsito (o simplemente recarga) se ha aplicado un modelo de balance de agua en el suelo mediante el uso del código SPHY (*Spatial Processes in Hydrology*). SPHY es un modelo hidrológico de libre acceso desarrollado por FutureWater usando lenguajes de código abierto (PCRaster, QGIS) (Terink et al., 2015). Una breve descripción en español del modelo puede encontrarse en <http://www.futurewater.es/metodos/sphy/>. El código y toda la documentación referida a SPHY, incluyendo manuales y ejercicios, puede descargarse desde la página [www.sphy-model.org](http://www.sphy-model.org).

Para el presente estudio, SPHY ha sido convenientemente adaptado para la zona de Campo de Cartagena y su entorno (de aquí en adelante referido como SPHY-CC). A continuación se reseñan las principales características del modelo SPHY-CC(Contreras et al., 2014).

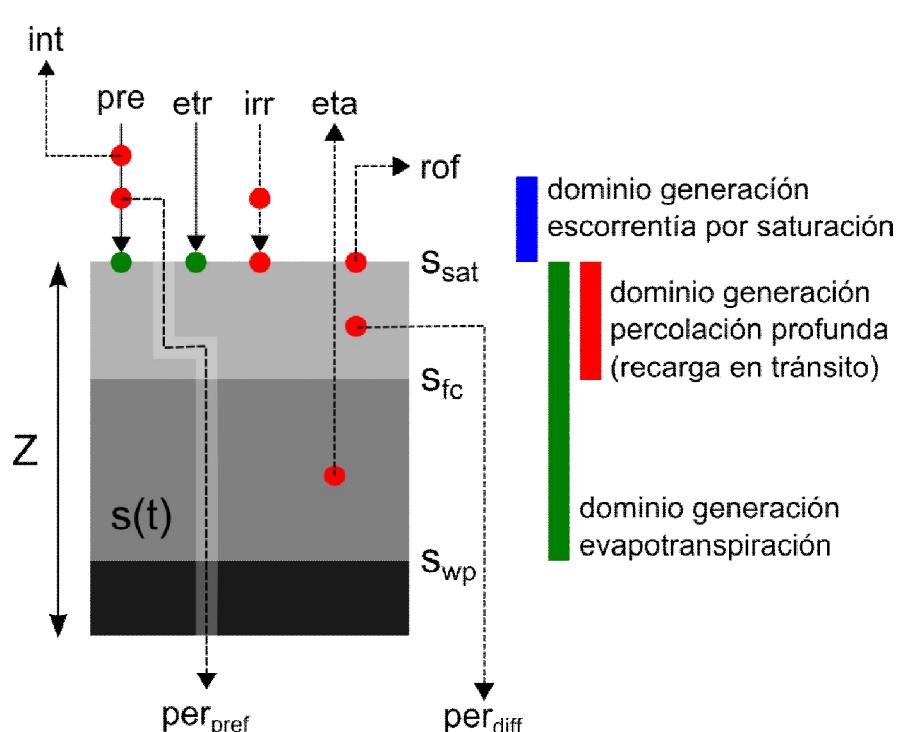
SPHY-CC adopta un esquema tipo *bucket* que simula el balance de agua en la zona radicular. El modelo se aplica de manera espacialmente distribuida (para celdas con dimensión previamente definida) y para un paso de tiempo diario. SPHY-CC resuelve el balance de agua mediante la ecuación de conservación de masa (Ec. ( 2 ))

$$Z \frac{d s(t)}{dt} = I[t, s(t)] - O[s(t), NDVI(t)] \quad \text{Ec. ( 2 )}$$

Donde,  $t$  representa el periodo de tiempo,  $Z$  es la profundidad de la zona radicular o suelo “activo” afectado por los procesos de evapotranspiración [mm],  $s$  es el contenido de humedad del suelo.  $I[t, s(t)]$  denota el flujo total de agua que entra en el suelo por precipitación (*pre*) y aportes de riego (*irr*), y  $O[s(t), NDVI(t)]$ , denota el flujo total de salida que incluye las pérdidas por intercepción de la lluvia (*int*), evapotranspiración (*eta*), escorrentía superficial (*rof*), y

percolación profunda o recarga (*per*). En SPHY-CC, los procesos que condicionan la dinámica de agua en el suelo están principalmente controlados por:

- el coeficiente de cultivo [adimensional], variable que se estima a partir del Indice Verde Normalizado (NDVI), que se obtiene a partir de datos de satélite y que informa sobre el verdor de la vegetación y su capacidad para evapotranspirar (*eta*), y
  - tres parámetros que determinan la capacidad de retención y almacenamiento de agua del suelo, y la transmisión de agua hacia la zona no saturada. Estos parámetros son:  $Z$ , profundidad de la zona radicular [L]; *por*, porosidad efectiva del suelo que determina la capacidad total de almacenamiento de agua en el suelo,  $s_{fc}$  y  $s_{wp}$  referidos a contenido relativo de agua a capacidad de campo y punto de marchitez, respectivamente [L/L].
- Estos tres parámetros definen tres “dominios hidráulicos” (Figura 14) donde tienen lugar los mecanismos de generación escorrentía superficial (*rof*), evapotranspiración (*eta*) o percolación profunda o recarga en tránsito(*per*).



**Figura 14. Modelo de balance tipo *bucket* usado en SPHY-Campo de Cartagena.**  
**Variables de entrada (puntos verdes, líneas continuas) y de salida (puntos rojos, líneas discontinuas) simulando los principales componentes del balance de agua en el suelo.**

La capacidad de almacenamiento total del suelo ( $S_{sat} = Z * por$ ) determina su punto de saturación: cualquier aporte adicional de agua sobre este umbral, generaría escorrentía superficial (escorrentía por saturación o escorrentía de Dunne). La percolación (o recarga en tránsito hacia la zona no saturada) tiene lugar a través de un mecanismo de flujo preferencial ( $per_{pref}$ , percolación rápida), o difuso ( $per_{diff}$ , percolación lenta) cuando el contenido de agua en el suelo se encuentra entre el punto de saturación y la capacidad de campo. La generación de percolación lenta está exponencialmente controlada por la conductividad hidráulica del suelo ( $K_{sat}$ ) y el contenido de agua en el suelo. Finalmente, las perdidas por evapotranspiración (*eta*) tienen lugar en función de la evapotranspiración de referencia (*etr*), el índice de verdor de la vegetación (NDVI), y un factor de estrés hídrico que depende del contenido de humedad del suelo en función de valores del punto de marchitez y de la capacidad de campo. Los

parámetros del suelo que controlan la dinámica del agua del suelo en SPHY-CC,  $s_{sat}$ ,  $s_{fc}$ ,  $s_{wp}$  y  $K_{sat}$ , han sido estimados a partir de la cartografía de textura de suelo y materia orgánica, y funciones de pedotransferencia (Wosten et al.(2001) presentan una excelente revisión sobre el uso de funciones de pedotransferencia).

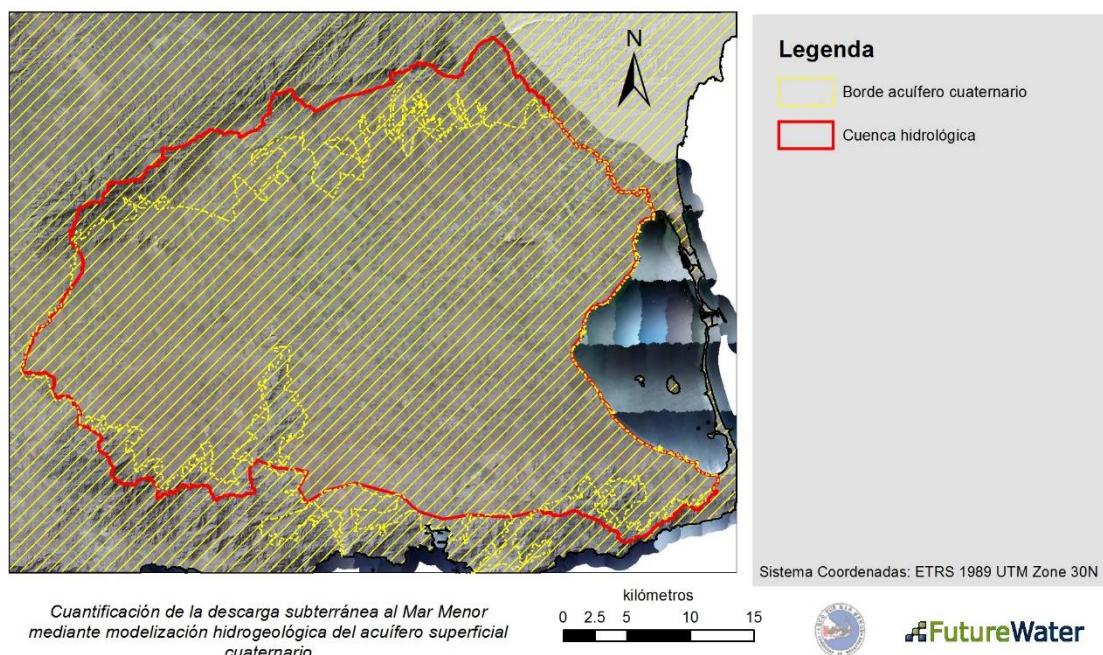
En el Anejo III (sección 9.1 del documento) se hace una descripción detallada del modelo SPHY-CC y de la aproximación adoptada para simular los diferentes procesos del balance de agua.

### 3.2.2 Dominio de simulación

En la Tabla 5 se describen las principales características del área seleccionada para la simulación del balance de agua en superficie. La modelización se ha ejecutado sobre una malla regular con celdas de 250m de lado, y una superficie terrestre total de 2235 km<sup>2</sup> (35760 celdas). El área de simulación incluye la totalidad de la cuenca hidrológica del Campo de Cartagena (1316 km<sup>2</sup>), más una superficie terrestre aledaña de 920 km<sup>2</sup>. El periodo de simulación comprende desde octubre de 2000 hasta diciembre de 2016.

**Tabla 5. Propiedades del dominio de simulación del modelo hidrológico.**

Característica	Valor
Área de simulación	2235 km <sup>2</sup> (superficie terrestre)
Tipo de malla	Regular, 250m*250m
Nº de celdas	35760
Periodo de simulación	octubre 2000 – diciembre 2016
Resolución temporal	Diaria



**Figura 15. Dominio de simulación (área con trazos diagonales en amarillo) y contornos de la cuenca hidrológica y del acuífero Cuaternario del Campo de Cartagena.**

### 3.2.3 Resumen de parámetros en SPHY-CC

**Tabla 6. Resumen de parámetros de entrada a SPHY-CC.**

Parámetros de suelo			Parámetros de vegetación		Otros parámetros	
MDT	Modelo Espacial Digital del Terreno	NDVI <sub>min</sub>	Índice de Vegetación mínimo (observado para un suelo desnudo)	0.10 (Tabla 3)	$\epsilon_{inf}$	Factor de escala generación flujo preferencial 0
por	Porosidad efectiva del suelo	NDVI <sub>max</sub>	Índice de Vegetación máximo (máximo valor alcanzable con máxima cobertura y condiciones óptimas de crecimiento)	(Tabla 3)	CP <sub>irr</sub>	Coeficiente de pérdidas de riego 0.10
S <sub>fc</sub>	Humedad volumétrica a capacidad de campo (3 atm)	K <sub>c,min</sub>	Coeficiente de evapotranspiración (mínimo bajo condiciones subóptimas de desarrollo de la vegetación)	(Tabla 3)		
S <sub>wp</sub>	Humedad volumétrica a punto de marchitez (15 atm)	K <sub>c,max</sub>	Coeficiente de evapotranspiración (máximo alcanzable sin condiciones de estrés)	(Tabla 3)		
Z <sub>max</sub>	Prof. suelo en zona con pendiente nula	0.5 m	p	Factor de tolerancia para NDVI <sub>max</sub> en la función FVC	1.0	
$\beta$	Factor exponencial de percolación	5	$\gamma$	Factor de forma para la función de FVC.	1.0	
			$\alpha$	Coeficiente de intercepción de lluvia	0.05	

## 3.3 Modelo de hidrología subterránea

### 3.3.1 Software

El cálculo de flujos de agua subterránea y de las correspondientes descargas a la laguna se ha llevado a cabo mediante el software libre SUTRA (<https://water.usgs.gov/nrp/gwsoftware/sutra.html>), desarrollado por el servicio geológico de Estados Unidos (Voss y Provost, 2002). SUTRA (Saturated-Unsaturated Transport) simula además el transporte de solutos o sólidos disueltos arrastrados por el agua subterránea. El software está referenciado y verificado en infinidad de artículos y estudios. SUTRA solamente resuelve ecuaciones, pero no es válido para la construir del modelo o la representación gráfica de los resultados. Para la discretización del modelo se ha utilizado el software *triangle*

(<https://www.cs.cmu.edu/~quake/triangle.html>), mientras que QGIS se ha empleado para la representación gráfica

### 3.3.2 *Modelo conceptual*

Se ha diseñado un modelo conceptual de flujo de agua subterránea a través de un acuífero multicapa conectado a una masa de agua salada (Figura 16). En la parte terrestre del modelo, representada mediante trama azul, el flujo subterráneo de agua dulce es el normal, condicionado por la topografía, los parámetros hidráulicos del acuífero, la recarga (per) debida a precipitación (pre), las extracciones de agua en pozos de bombeo ( $V_b$ ), y drenes ( $V_d$ ), la transferencia de agua a acuíferos inferiores a través de pozos mal ejecutados (T), y las propiedades del acuífero. Todas las variables referidas condicionan la descarga de agua a la laguna (des). El agua salada que es más pesada que el agua dulce -densidades de 1020-1040 frente a 1000 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente-, tiende a penetrar desde el mar hacia tierra de forma natural, hasta que el efecto de la diferencia de densidades se compensa por el efecto de la diferencia de presiones. La zona del acuífero penetrada por el agua salada se conoce como cuña de intrusión. La interfaz entre agua dulce y agua salada no es abrupta, sino que el cambio de densidades se produce de forma paulatina en la llamada zona de mezcla (en rojo). Las extensiones de la cuña y de la zona de mezcla son variables en el tiempo dependiendo de los procesos físicos en las partes marina y terrestre del sistema.

En la parte terrestre, los procesos que controlan el funcionamiento hidráulico del sistema son:

- la recarga de agua dulce por infiltración de agua de lluvia al acuífero superficial,
- los aportes laterales de otros acuíferos al sistema,
- el régimen de bombeos, y
- la interacción entre los cauces de agua superficial y el acuífero superficial.

En la parte marina, los procesos físicos relevantes son las corrientes de convección marinas, el efecto del oleaje en la parte más somera del sistema, y de la fluctuación de la marea (mayor penetración cuanto más alta es la marea, y regresión de la zona de interfaz cuando la marea baja). Finalmente, la variación de volumen de agua en el modelo, o variación de almacenamiento  $\Delta S$ , se calcula como la diferencia entre entradas y salidas de agua.

En las siguientes secciones se presentan los distintos componentes del modelo conceptual, a saber, los límites del modelo, sus condiciones iniciales y de contorno y algunas cifras aproximadas que cuantifican los procesos principales que controlan el funcionamiento hidráulico del sistema.

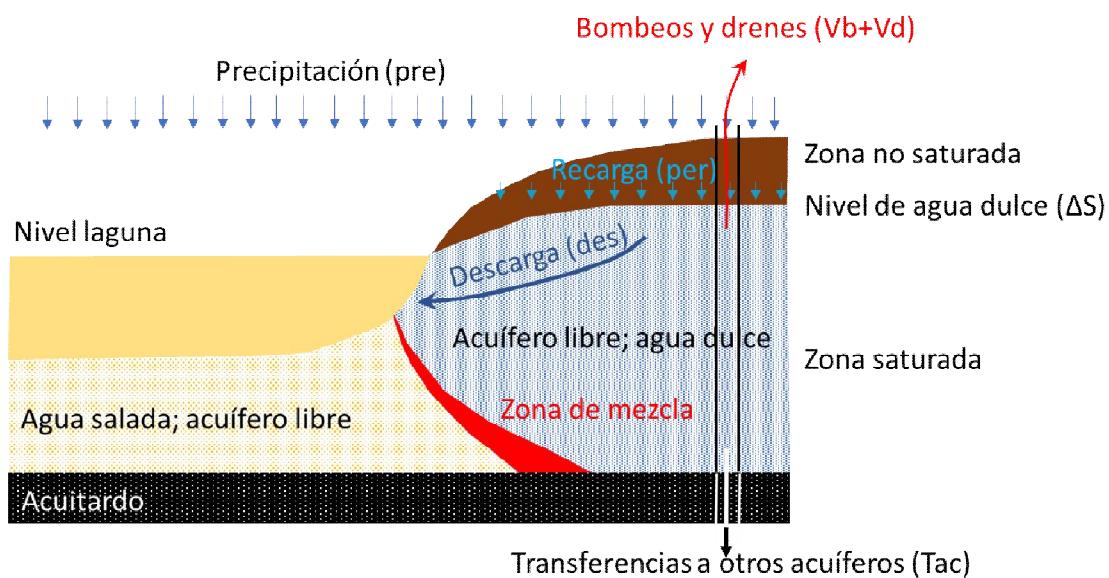


Figura 16. Esquema del modelo conceptual de un acuífero multicapa conectado a una masa de agua salada. Las flechas negras denotan direcciones de flujo.

### 3.3.3 Dominio de simulación

En este trabajo, se modela sólo el acuífero Cuaternario superficial al asumirse desconectado de los acuíferos inferiores. Esta hipótesis se fundamenta en la presencia de una capa de margas y evaporitas del Plioceno de muy baja conductividad, cuyo espesor aumenta en dirección a la costa (Figura 8) y alcanza valores de hasta 40-50 m. Esta capa muy poco conductiva y que actúa como acuitardo, provoca que a nivel regional los niveles piezométricos en los acuíferos superior e inferiores sean independientes (Figura 17), con la salvedad de pequeñas conexiones de carácter local debidas a pozos mal ejecutados.

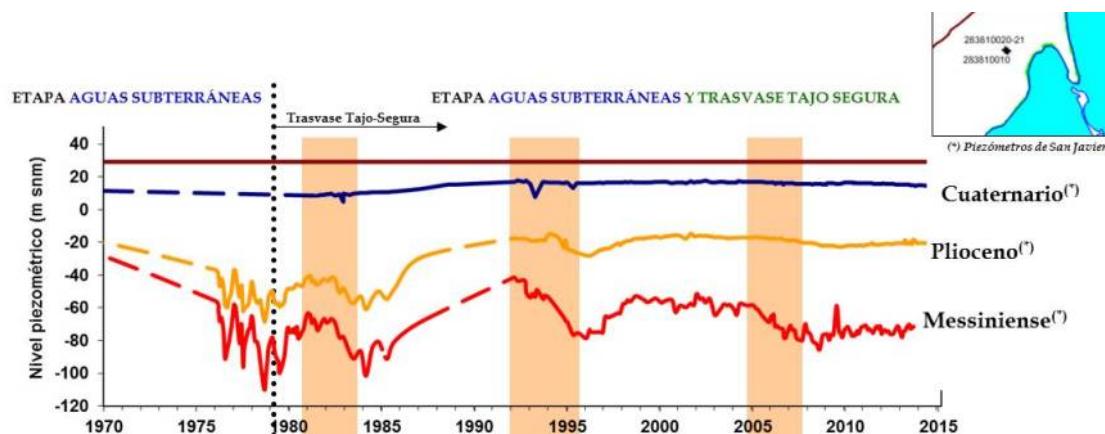


Figura 17. Evolución temporal de niveles piezométricos en pozos cercanos monitorizados en las distintas formaciones (tomado de García-Aróstegui et al., 2017).

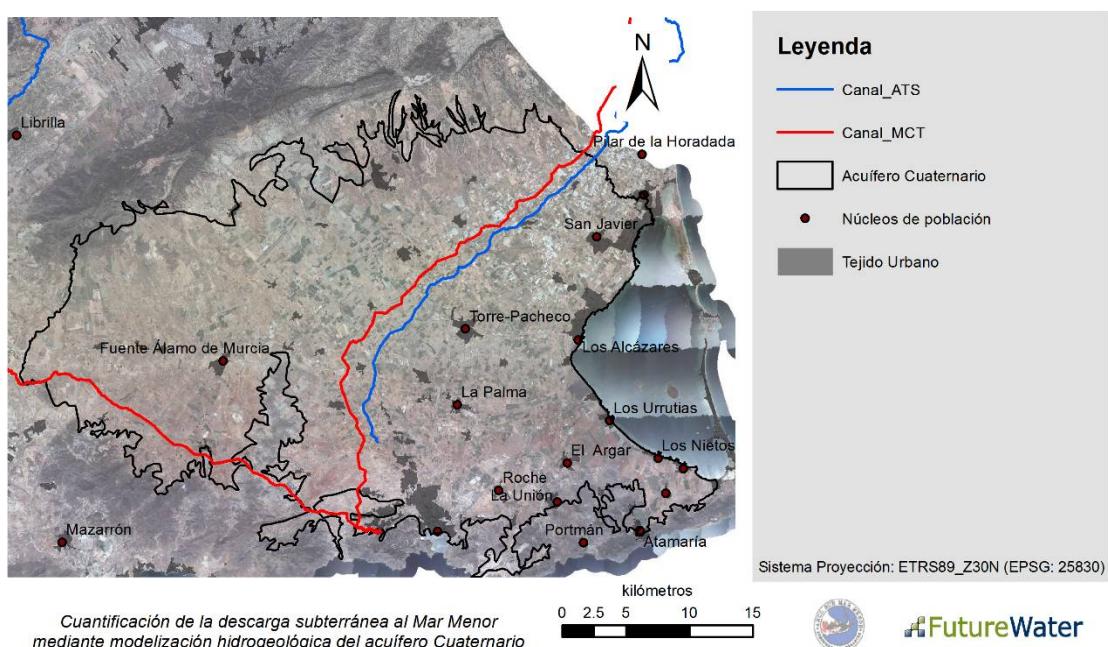
El contorno del acuífero Cuaternario se ha extraído de la cartografía geológica y se ha unido al límite de la cuenca hidrográfica y al contorno interno del Mar Menor. Así, los contornos del modelo son:

- al oeste: el límite de la cuenca hidrográfica,
- al este: el contorno interior de las barras de La Manga del Mar Menor, y

- al norte y al sur: el contorno del acuífero superficial Cuaternario.

El hecho de considerar el límite de la cuenca hidrográfica como parte del contorno del modelo simplifica considerablemente la definición de sus condiciones de contorno, como se verá más adelante. Con el fin de considerar la descarga subterránea hacia la laguna por su base (si la hubiera), y siguiendo las pautas de García-Aróstegui et al. (2017), se modela también la laguna, cuya extensión se limita a la marcada por la barra de arena de La Manga. La Figura 18 muestra el contorno en superficie del modelo hidrogeológico.

La capa superior queda definida por la superficie topográfica tierra adentro y por la batimetría de la laguna (el techo del acuífero Cuaternario) en el resto. De esta forma, y dado que se trabaja en términos de nivel piezométrico, no es necesario modelar la lámina de agua en la laguna, lo que implica un considerable ahorro en la discretización del modelo que permite mantener el esfuerzo computacional bajo límites razonables. La capa inferior queda definida por el muro del acuífero Cuaternario en su totalidad.



**Figura 18. Límites del modelo hidrogeológico del acuífero Cuaternario, que incluye la zona suprayacente al Mar Menor. El modelo queda limitado al este por la cara interior de las barras de la laguna.**

### 3.3.4 Modelo numérico

#### 3.3.4.1 Discretización espacial

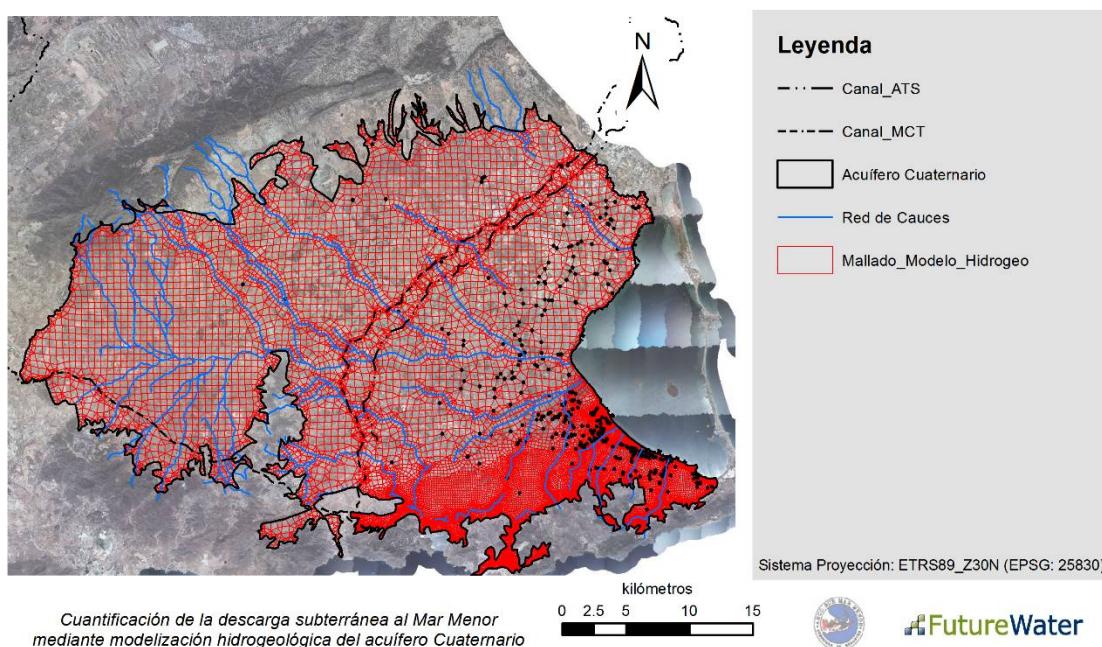
Tras procesar toda la información relativa al modelo conceptual, se ha discretizado el modelo en superficie. La Figura 19 muestra la discretización espacial utilizada para todo el ámbito de estudio, mientras que la Figura 20y Figura 21 muestran un zoom de detalle al ámbito de actuación de la CCRRArco Sur y a una parte de la red de drenaje actual. La malla de elementos finitos está condicionada por:

- la geografía local: por ejemplo, se respeta el límite terrestre de la laguna y la disposición de la barra de arena de La Manga,

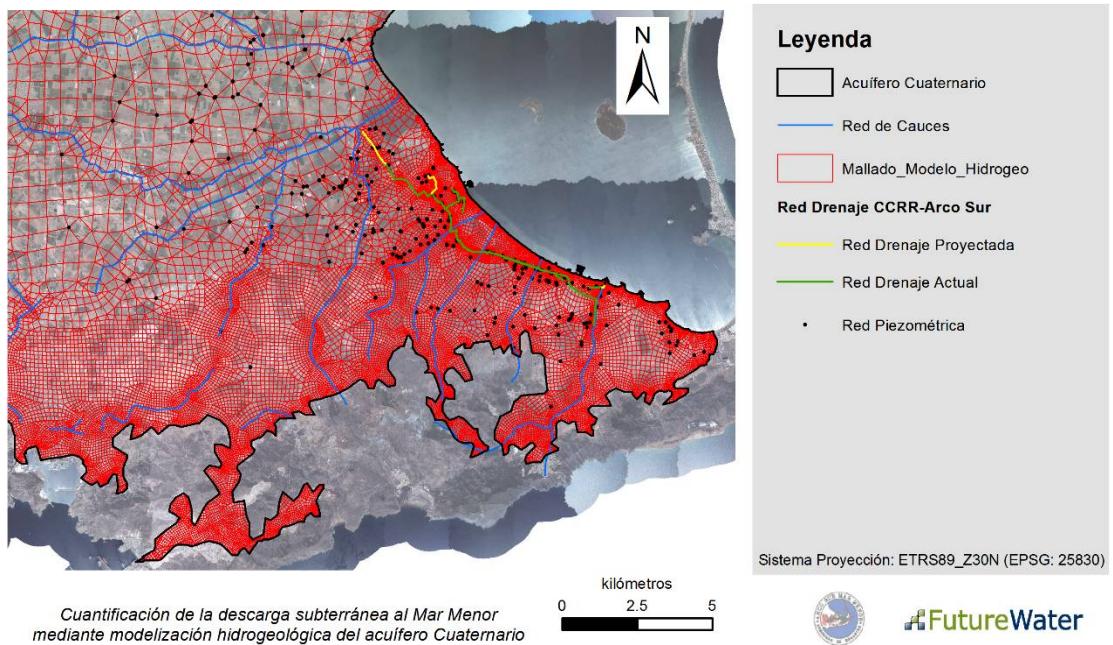
- la red de drenaje superficial,
- los pozos abandonados y existentes, así como los drenes de captación,
- la topografía: se han refinado las zonas de mayor gradiente topográfico (tanto del techo del acuífero Cuaternario como de su muro), y
- la zona de estudio: se ha adoptado una discretización más fina en el ámbito de la CCRR-Arco Sur.

La malla en superficie (2D) se extruye en dirección vertical, quedando la malla tridimensional definida en profundidad por 10 capas de elementos y limitada en su base por el muro del acuífero superficial Cuaternario. El número de capas de elementos en la vertical se ha considerado constante ( $n=10$ ), por lo que el espesor de las capas varía en el espacio dependiendo del espesor del acuífero Cuaternario (Figura 24).

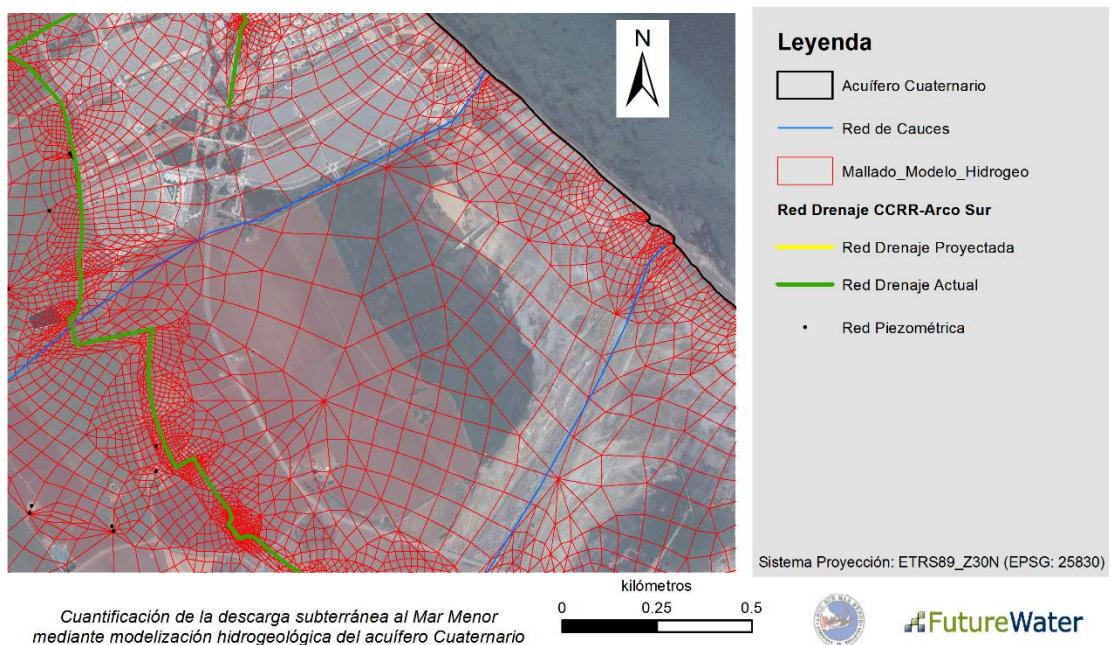
La Figura 22y Figura 23muestran la malla en formato tridimensional y con factores de exageración vertical x10 y x30, respectivamente. La Figura 24 muestra una sección vertical oeste-este de la malla. La malla tridimensional se compone de unos 8 millones de elementos finitos, con una mayor densidad de elementos en la zona de la CCRRArco Sur.



**Figura 19. Discretización del modelo en superficie.**



**Figura 20. Discretización del modelo en superficie en el ámbito de actuación de la CCRR-Arco Sur.**



**Figura 21. Discretización del modelo en superficie (zum en Estrella de Mar y proximidades).**

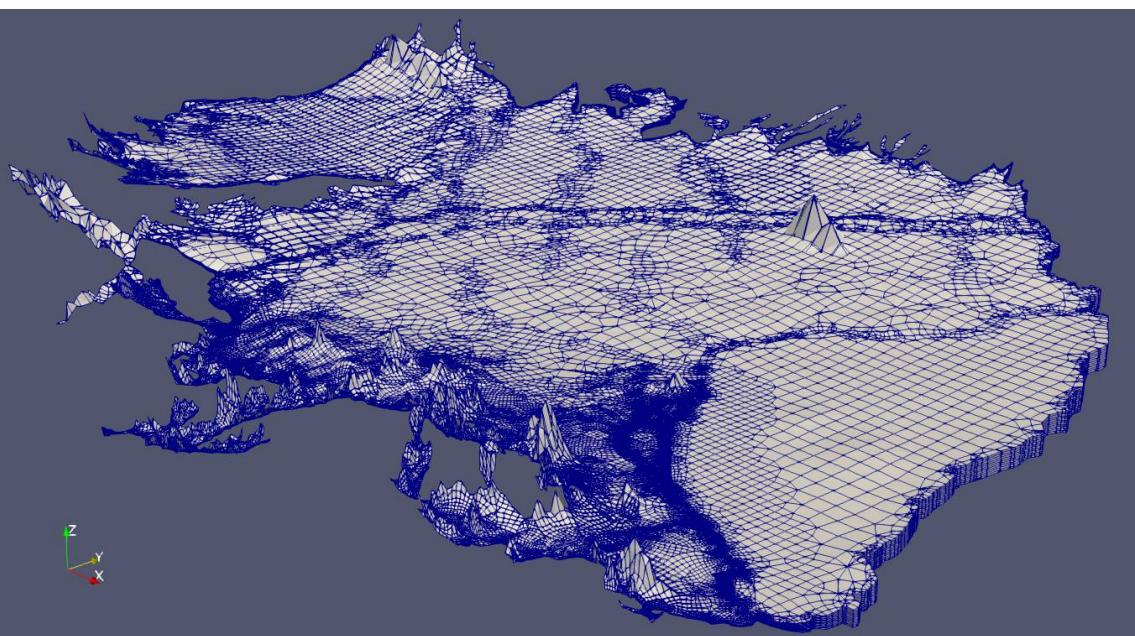


Figura 22. Vista de la malla en 3D (factor de exageración vertical x10).

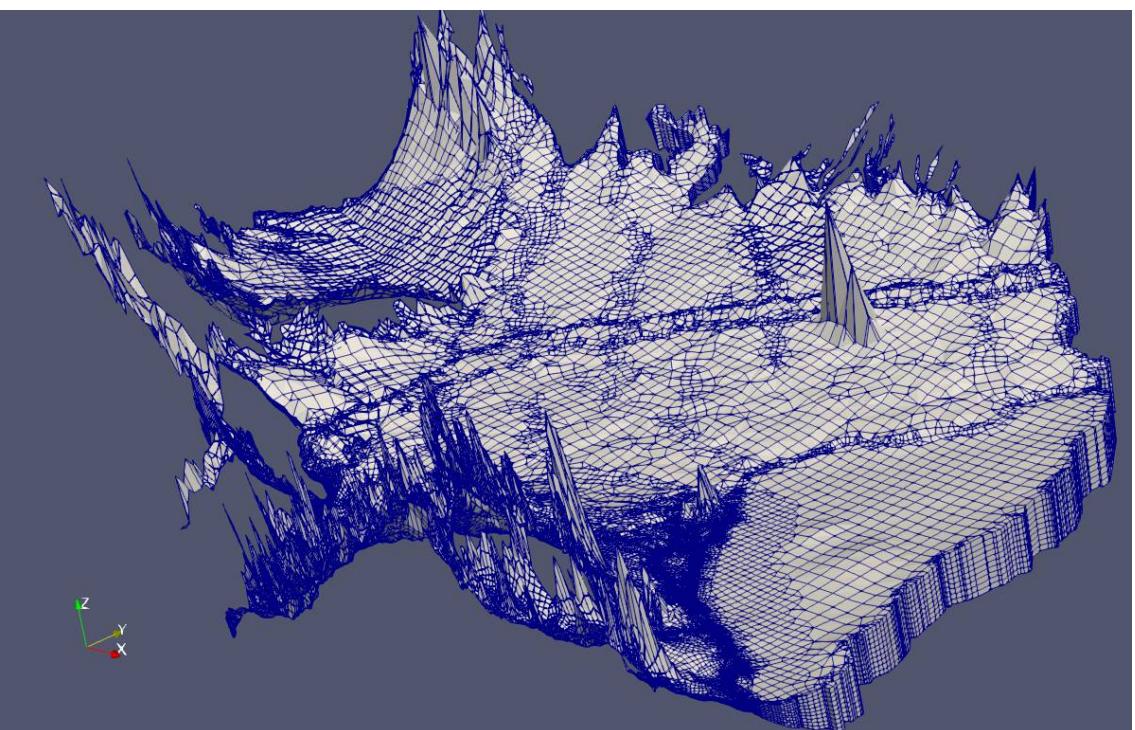
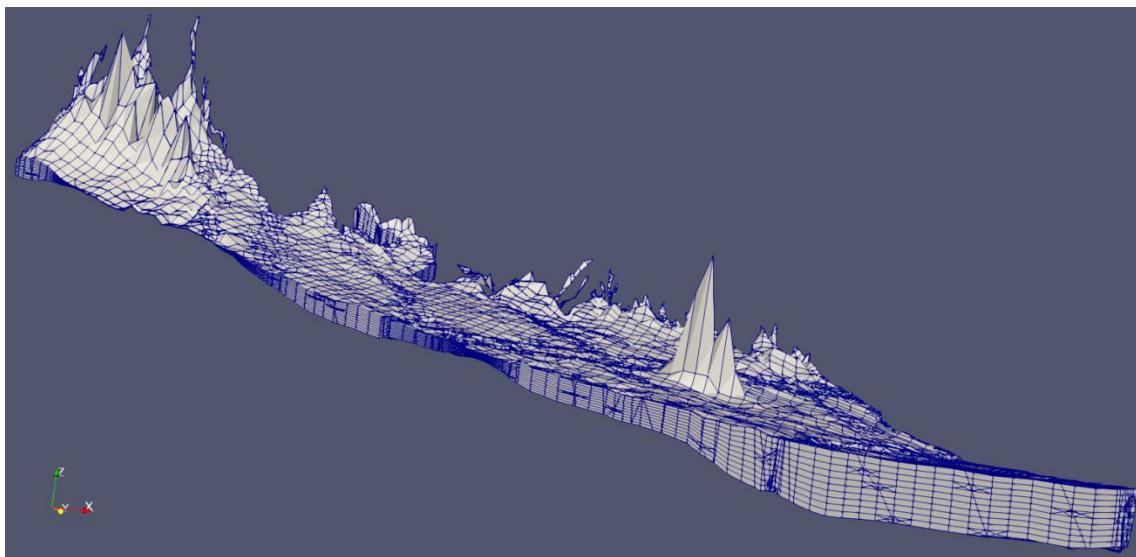


Figura 23. Vista de la malla en 3D (factor de exageración vertical x30).



**Figura 24. Sección vertical oeste-este del modelo en 3D (factor de exageración vertical x30).**

#### 3.3.4.2 *Discretización temporal*

A diferencia de los sistemas superficiales, en los que la respuesta del sistema a eventos de precipitación es prácticamente inmediata, los acuíferos presentan una gran inercia. Es decir, la respuesta del acuífero es amortiguada en el espacio y además retrasada en el tiempo. El decalaje entre la perturbación en superficie y la respuesta subterránea puede ser de días, incluso semanas o meses, dependiendo de la difusividad hidráulica del acuífero. La respuesta a la recarga suele ser rápida, del orden de días, pero una recarga importante en una zona a pocos kilómetros de la laguna puede tardar semanas o incluso meses en transformarse en descarga, dada la baja velocidad del agua subterránea.

Así, una discretización con paso de tiempo mensual o semanal no es útil para el objetivo que se persigue. Se ha optado por una discretización temporal diaria, dado que los impactos de fenómenos de periodo horario (por ejemplo, las mareas) se suponen despreciables comparados con aquellos de amplitud amortiguada (respuesta a la recarga).

Al igual que el modelo de hidrología superficial, el dominio de simulación temporal comprende el periodo de octubre de 2000 a diciembre del 2016. Los resultados del modelo se analizan con mayor detalle para tres periodos de precipitación tipo (ver sección 4.3.1 y Tabla 9 / Figura 47):

- Periodo seco, comprendido entre septiembre 2013 y agosto 2015.
- Periodo promedio, comprendido entre abril 2002 y marzo 2004.
- Periodo húmedo, comprendido entre septiembre 2008 y agosto 2010.

#### 3.3.4.3 *Condiciones de contorno e inicial*

La condición de contorno en el límite exterior viene definida por la yuxtaposición del límite del acuífero Cuaternario y el de la cuenca hidrográfica. Se asume que la divisoria de aguas superficiales que marca el límite de la cuenca hidrográfica es también una divisoria de aguas subterráneas. Así, se asignará a todos los nudos del contorno exterior (norte, sur y oeste) una condición de contorno de flujo nulo (o aporte nulo). Si bien existen pequeñas discrepancias

entre la posición de las divisorias de aguas superficiales y subterráneas, estas son generalmente de unos pocos metros y no tienen influencia alguna en los resultados del modelo, dado que el límite de la cuenca hidrográfica (al oeste) se encuentra a muchos kilómetros de la zona de interés. En los contornos norte y sur, donde el contorno del modelo coincide con el límite del acuífero superficial Cuaternario, la condición de contorno también es de flujo o aporte nulo, dado que las aportaciones laterales de los acuíferos colindantes son muy pequeñas en comparación con la recarga de agua dulce e incluso con la de retorno de riego.

A los nudos que representan el fondo y el contorno de la laguna (al este del modelo) se les asignará una condición de contorno de nivel nulo (equivalente a presión hidrostática). Se recuerda que se trabaja en términos de niveles equivalentes de agua dulce y no de presiones: esto es, el nivel piezométrico en la base de laguna y en su contorno es siempre 0, a diferencia de la presión hidrostática, que varía con la profundidad. En el caso de estudio, al ser la laguna un mar en calma, pueden despreciarse los efectos del oleaje, de las corrientes de convección y de las mareas. De hecho, la amplitud de la marea en el mar Mediterráneo es de unos 40 cm en promedio en Alicante y crece ligeramente hacia el Estrecho de Gibraltar por el efecto de la corriente Atlántica, por lo que el impacto de ésta en la intrusión marina es muy pequeño comparado con el de la diferencia de densidades entre agua dulce y agua salada. Además, la barra de arena de La Manga del Mar Menor amortigua aún más el efecto de las mareas.

La interacción entre aguas superficiales y subterráneas no se ha tenido en cuenta en este estudio por ser muy limitados los aforos en canales, ríos y ramblas. En el caso del trasvase, se desconocen las pérdidas de los canales, que actuarían como entradas de agua en el modelo. Dada su relativamente moderna construcción, se considera que las pérdidas son de escasa entidad. En el caso de las ramblas, y dado el carácter estacional y prácticamente seco de las mismas, el impacto de esta transferencia en el régimen regional del acuífero es muy limitado. Una excepción es el tramo final de la Rambla del Albujón, que recoge el retorno de diversas desaladoras privadas y cuyo aporte a la laguna es más o menos permanente. La importancia de este aporte superficial, de carácter local, es relativamente pequeño en comparación con la descarga subterránea por lo que su contribución se ha considerado despreciable. En cualquier caso, el impacto que tendría en el balance de agua de la laguna sería nulo, ya que la descarga subterránea se vería reducida en la misma proporción que la descarga superficial por la rambla.

La transferencia del acuífero Cuaternario hacia acuíferos inferiores a través de pozos no se ha tenido en cuenta en el modelo al no existir un inventario de pozos mal ejecutados. Según estudios previos, se considera que esta transferencia se situaría en el rango del 30-40% de la recarga al acuífero (Jiménez-Martínez et al., 2011). Estos valores se han empleado para hacer estimaciones de descarga subterránea total a la laguna (ver capítulo 4.3.2).

Aunque se dispone de datos de caudal de bombeo concesionado para algunos pozos, estos bombeos no se han incluido en el modelo debido a la escasa fiabilidad de los mismos. Además, los datos de caudal concesionado se alejan mucho de los volúmenes realmente bombeados los cuales tampoco son constantes en el tiempo. A pesar de la falta de datos y la elevada incertidumbre asociada al régimen de bombeos, las extracciones de agua subterránea del acuífero superficial representan sólo una muy pequeña fracción del balance de agua en el acuífero (sección 2.3.5). Además, la perturbación de niveles en el acuífero causada por el bombeo es relativamente pequeña, de apenas unos pocos centímetros, y de carácter marcadamente local, con un alcance de unos pocos metros, dada la elevada difusividad hidráulica del acuífero Cuaternario.

El efecto de las zanjas de drenaje en el ámbito de la CCRR ArcoSur se han introducido en el modelo como condiciones de caudal prescrito en los nudos correspondientes a las casetas donde están instaladas las bombas (un total de 8). El balance a nivel del acuífero (Ec. ( 3 )), puede expresarse como:

$$Entradas - Salidas = \Delta S \quad \text{Ec. ( 3 )}$$

Dado que, por su pequeña magnitud, se desprecian los aportes laterales de otros acuíferos, la entrada de agua corresponde a la recarga (PER) cuantificada mediante el modelo de hidrología superficial. Las salidas totales de agua del acuífero o “descarga potencial” ( $DES_{pot}$ ) es la suma de la descarga al Mar Menor (DES), las extracciones debido a bombeos en pozos ( $V_b$ ) y drenes ( $V_d$ ), y las pérdidas de agua hacia acuíferos inferiores (T) (Ec. ( 4 )). Finalmente,  $\Delta S$  es la variación de volumen de agua almacenada en el acuífero:

$$DES_{pot} = PER + \Delta S = DES + V_d + (V_b + T) \quad \text{Ec. ( 4 )}$$

Nótese que el último sumando Ec. ( 4 ) se ignora en el modelo por falta de información. Para el cierre de balance a nivel de todo el acuífero, ( $V_b+T$ ) se estima a partir la recarga (PER) utilizando un factor 0.3-0.4 (ver capítulo 4.3.2).

La simulación de flujo con densidad variable requiere la simulación del transporte de sal, dado que la densidad del agua depende de su cantidad de solutos disueltos y ésta varía espacialmente (considérese por ejemplo la zona de mezcla que separa el agua dulce del agua salada). Las condiciones de contorno para la ecuación de transporte de sal son asignadas como sigue: (1) una concentración de 0 kilos de sal por metro cúbico de agua a las entradas de agua por recargay, (2) una concentración de 37kilos de sal por metro cúbico de agua (máxima diferencia relativa entre las densidades de agua salada y dulce) a los nudos que representan la base de la laguna y el contorno este del modelo.

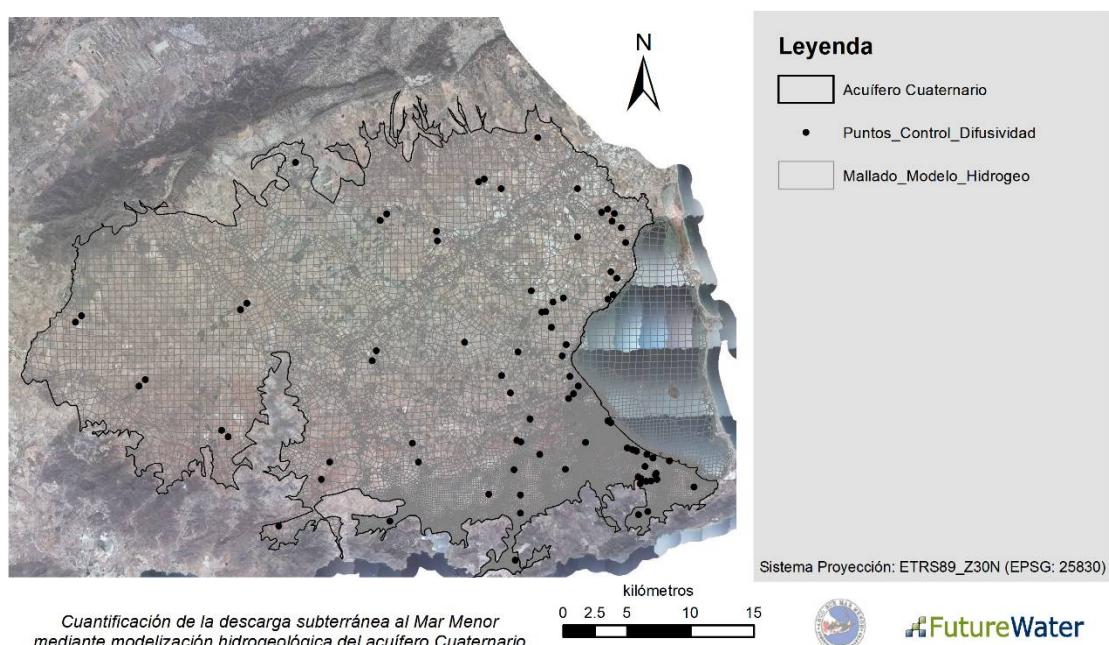
La condición inicial de flujo será la del estado estacionario del acuífero, cuyo único aporte será el de la recarga media. Es decir, no se consideran, por ejemplo, los bombeos en el pasado y dicha condición inicial representa un estado potencialmente “virgen” para el acuífero. Pese a que esta hipótesis dista mucho de ser realista, sólo tiene un leve impacto en los resultados para tiempos tempranos del modelo (unas pocas semanas), hasta que el sistema se estabiliza. Esto es, al principio de la simulación, los niveles iniciales no se corresponden con los inducidos por los bombeos en los drenes, ni por la recarga inicial (que no tiene que ser necesariamente la media), ni con los otros términos que condicionan el funcionamiento hidráulico del acuífero. El modelo reacciona entonces subiendo o bajando los niveles en las zonas de desajuste, de forma que se obtiene un estado estable del nivel piezométrico coherente con los términos que fuerzan el régimen hidrogeológico.

La condición inicial de transporte también representa el estado “virgen” del acuífero. Para ello se calcula la interfaz (asumida como abrupta) mediante la ecuación de Ghyben-Herzberg (profundidad de la interfaz=40 x nivel piezométrico). Se atribuye a todos los nudos cercanos alalaguna por debajo y al este de dicha interfaz una densidad similar al del agua de la laguna ( $1037\text{kg/m}^3$ ).Al resto de nudos, que representan el flujo agua dulce en el acuífero, se le asigna una densidad de referencia de  $1000 \text{ kg/m}^3$ . En base a esta condición inicial simplificada, el

modelo se autoajusta hasta obtener gradientes de flujo de sal realistas y coherentes con el resto de la información aportada.

#### 3.3.4.4 Parámetros del modelo

La difusividad hidráulica controla la respuesta del acuífero a las perturbaciones externas (recarga y bombeos en drenes) y la descarga del mismo al Mar Menor. Resulta imposible estimar la difusividad hidráulica en todos los puntos del espacio, incluso en los nudos o elementos de la malla (Figura 23). En su lugar, se estima la difusividad hidráulica en un total de 93 puntos de control (Figura 25). A partir de los valores estimados en los puntos de control, se lleva a cabo una interpolación espacial gaussiana para la obtención de un mapa continuo para el ámbito del acuífero Cuaternario.



**Figura 25. Puntos de control para la estimación de la difusividad hidráulica.**

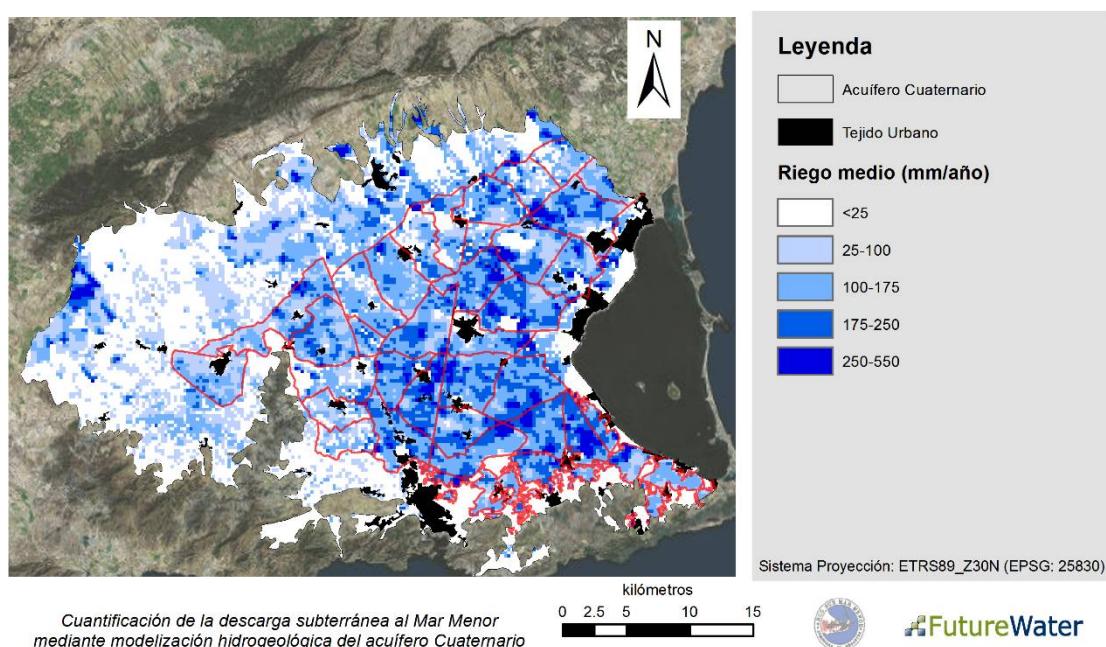
Mención aparte merecen las captaciones en drenajes. Estas obras hidráulicas presentan una gran homogeneidad en términos de parámetros hidráulicos y se caracterizan por su alta transmisividad y su bajo coeficiente de almacenamiento (es decir, por su elevada difusividad hidráulica, como cociente entre ambos). Se ha asignado un valor constante (aunque desconocido) a cada dren. Sin embargo, estos valores de difusividad en los drenes no se han considerado durante el proceso de interpolación espacial a escala regional, pero sí en una fase posterior para la modelización del flujo. Los valores de difusividad en los drenes se presentan en tablas separadas.

## 4 Resultados

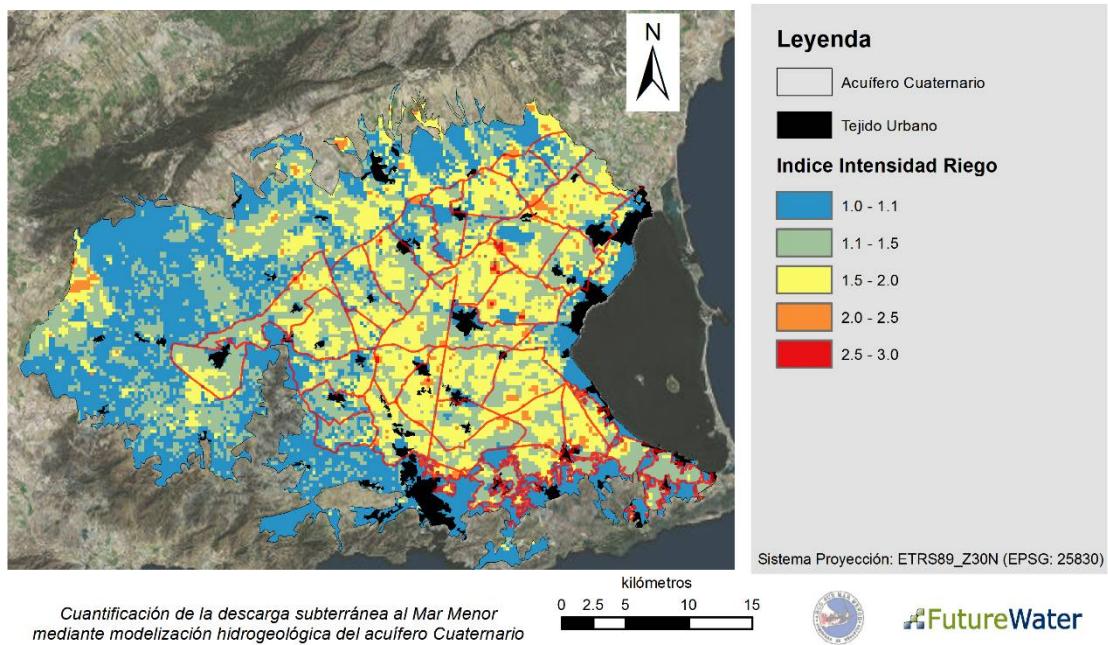
### 4.1 Modelo de hidrología superficial: balance y recarga

En la Figura 26 y

Figura 27 se muestran los valores promedio anual estimados de aportes de riego y el índice de uso del recurso definido como el cociente entre el total de entradas por precipitación y riego, respecto de la precipitación. En general, los mayores consumos de agua se concentran en el sector central de la cuenca coincidiendo, como es de esperar, con unas mayores posibilidades de captación de recursos subterráneos. Se observa una buena aproximación entre el mapa de aportaciones de riego estimado por modelización hidrológica y teledetección, y los mapas de espesor del acuífero, y de difusividad hidráulica estimado por el modelo hidrogeológico.

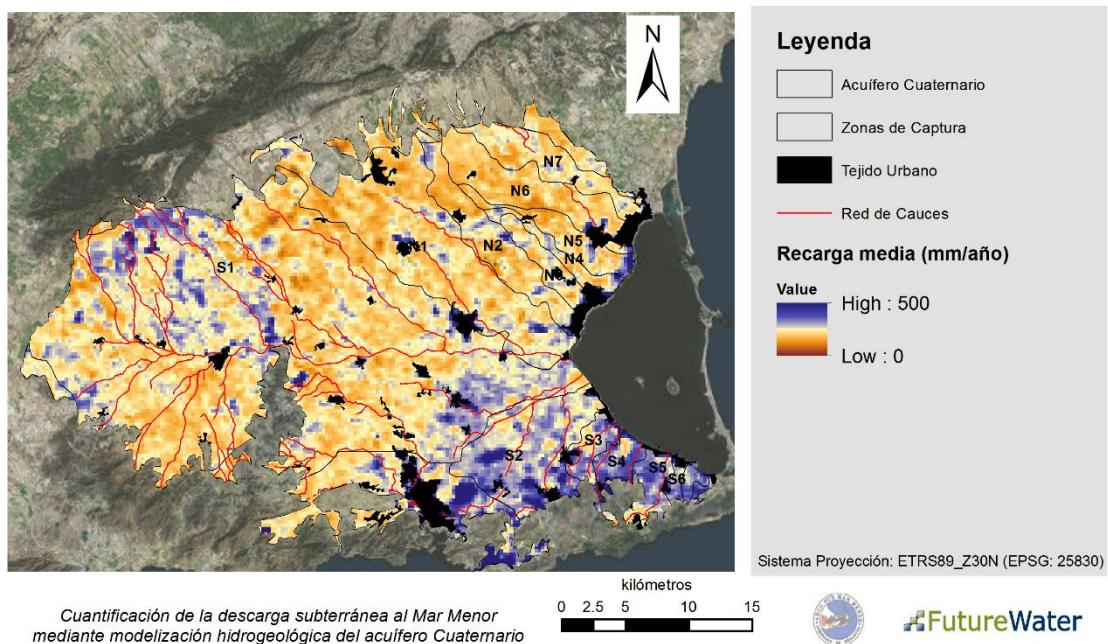


**Figura 26. Valores estimados de aportación de riego (promedio anual, mm/año) según modelización hidrológica e información de satélite. Sectores de riego delimitados por polígonos rojos.**



**Figura 27. Índice de intensidad de uso de agua (IRR + PRE)/PRE.**

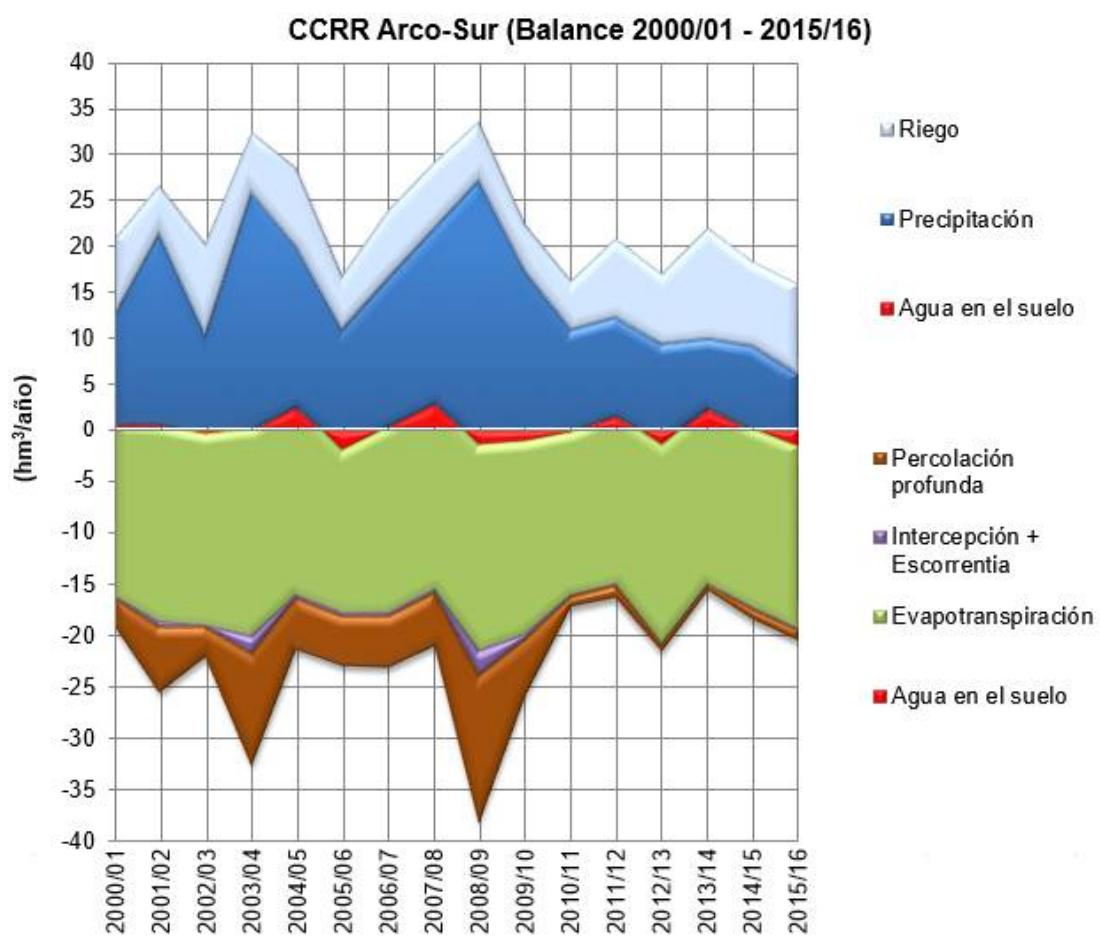
En la Figura 28, se representa la distribución espacial de la recarga anual promedio estimada para el periodo de estudio. Se observa que las mayores tasas de recarga se contabilizan en el sector más meridional de la cuenca, y especialmente en el área que comprende los sectores S2-S8.



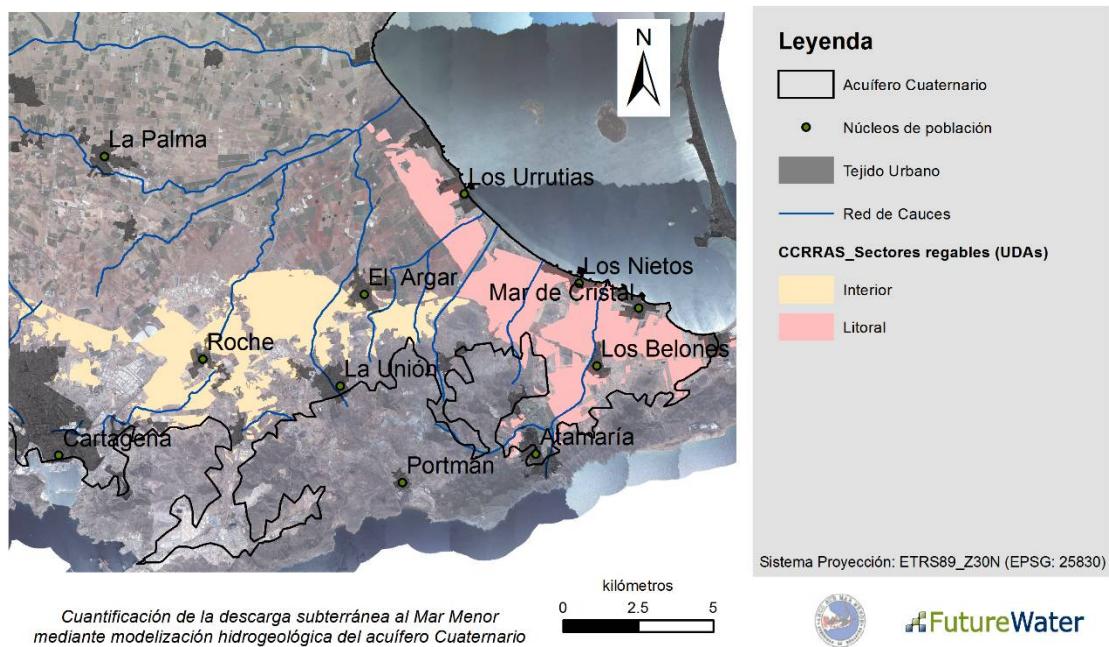
**Figura 28. Distribución espacial de la recarga anual media (mm/año) estimada por el modelo de balance hidrológico superficial.**

En la Figura 29 se muestran los volúmenes de agua de los principales componentes de balance acumulados por años hidrológicos en  $hm^3/año$  en el sector regable de la CCRR Arco Sur, incluyendo el sector “litoral” e “interior” (Figura 30). El periodo de análisis comprende entre

Octubre-2000 y Septiembre-2016. En el eje positivo, se muestran las componentes que representan una entrada de agua a la zona regable (precipitación y riego), y en el eje negativo las salidas (evapotranspiración, intercepción+escorrentía superficial, y percolación profunda o recarga). Los cambios de volumen de agua en el suelo (cierre de balance) se representan como “agua en el suelo”. El volumen total de agua de riego aportado al sistema fue de 7.83  $\text{hm}^3/\text{año}$ , lo que supone un poco más de la mitad de la precipitación estimada en la zona. Las pérdidas por evapotranspiración (consumos de agua por vegetación y cultivos) se estimaron en 18  $\text{hm}^3/\text{año}$ , lo que representa casi un 80% respecto del total de entradas de agua por precipitación y riego. La recarga en el área de sector regable de la CCRR-Arco Sur se ha estimado aproximadamente en 4.3  $\text{hm}^3/\text{año}$ .



**Figura 29. Balance de agua anual en la zona regable de la CCRRArco Sur para el periodo oct/2000-sep/2016. Datos acumulados por años hidrológicos.**



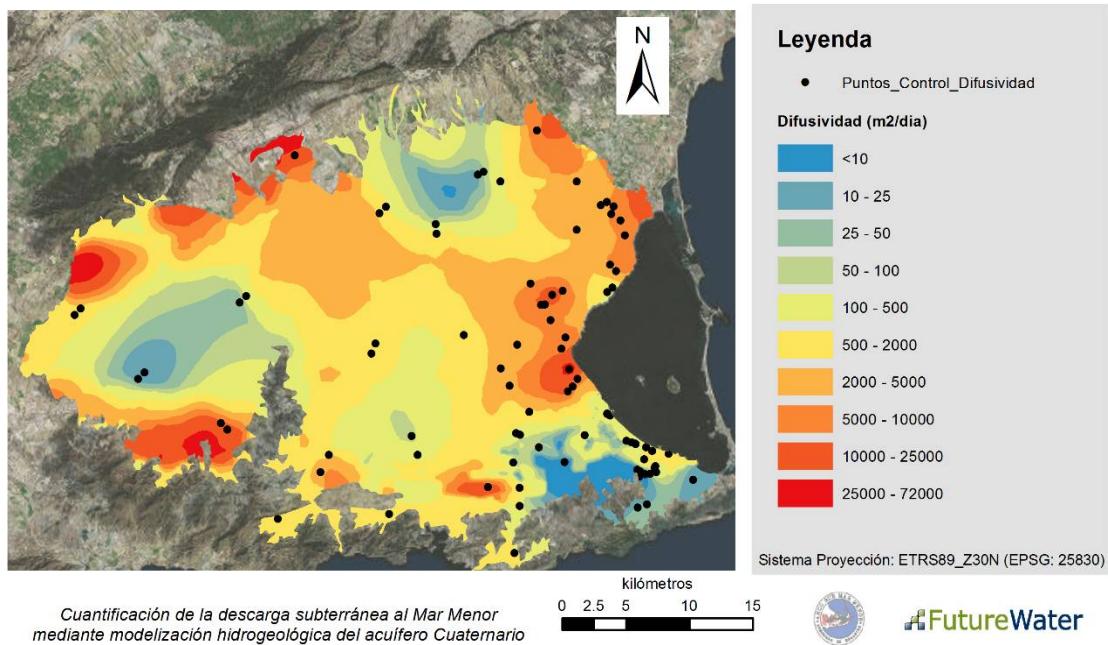
**Figura 30. Sectores regables (Unidades de Demanda Agraria) de la CCRR-ArcoSur.**

## 4.2 Calibración modelo de hidrología subterránea: ajuste de parámetros hidráulicos y niveles piezométricos

### 4.2.1 Parametrización. Análisis de plausibilidad.

La Figura 31 presenta la distribución espacial de difusividad hidráulica. Como se observa, las transiciones son suaves y no se observan inestabilidades en el mapa (cambios bruscos de difusividad en pequeñas distancias). Los valores mínimos, de alrededor de  $1-2 \text{ m}^2/\text{d}$ , se encuentran hacia el sur y el oeste del modelo coincidiendo con las zonas donde el acuífero presenta menores espesores.

El modelo asocia zonas de espesor muy grande con valores altos de difusividad. Los valores máximos de difusividad son coherentes con valores estándar en acuíferos costeros con alto grado de antropización. Aunque los valores de difusividad hidráulica recopilados en la Tabla 4 no se usaron como datos de entrada en la calibración del modelo, los valores estimados son del mismo orden de magnitud que los allí mostrados lo que confirma la alta plausibilidad del proceso parametrización.



**Figura 31. Puntos de control para estimación de la difusividad hidráulica y valores estimados (m<sup>2</sup>/día) (valores en escala logarítmica).**

Los valores de difusividad hidráulica estimada en los drenes (Tabla 7) son relativamente bajos debido al ajuste de la correlación entre los caudales de bombeo y el nivel piezométrico medido en las arquetas de drenaje. Debido a que estos valores de nivel no son representativos de la dinámica del acuífero, la relación física entre el término de fuerza (el bombeo) y su impacto (la reacción en términos de fluctuación de nivel) se pierde, ya que el agua bombeada ha pasado en primer lugar por la tubería del dren (acelerando) y después por la arqueta (presurizándose). Como consecuencia, las fluctuaciones de nivel medidas en las arquetas son mucho más pronunciadas que aquellas que tienen lugar en zanjas de drenaje. Este punto volverá discutirse en la sección 4.2.2.

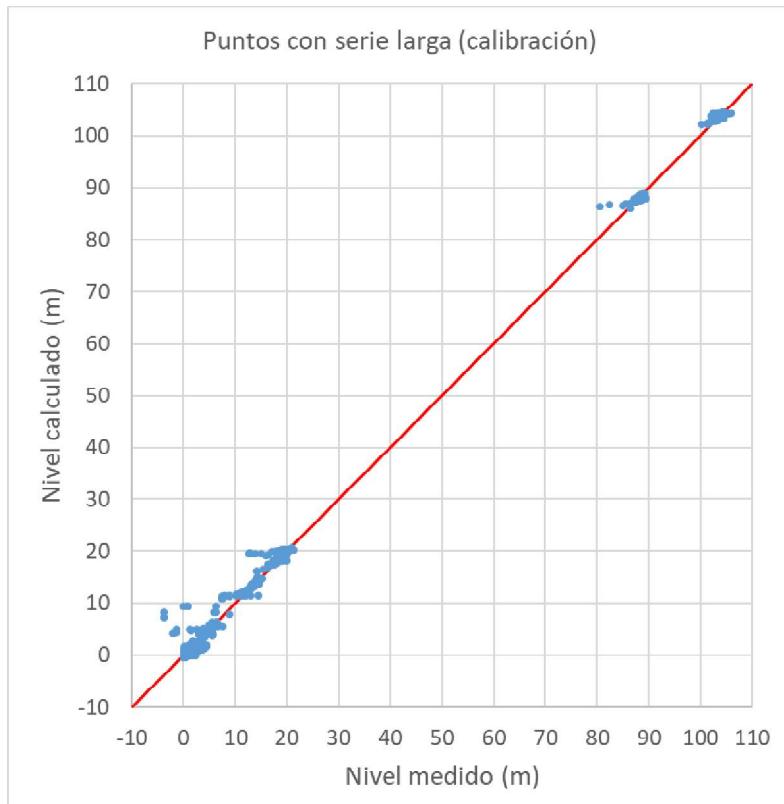
**Tabla 7. Difusividad hidráulica estimada en drenes.**

Dren	Difusividad (m <sup>2</sup> /d)	Dren	Difusividad (m <sup>2</sup> /d)
Dren_00	150	Dren_03	0.3
Dren_01	0.20	Dren_04	20
Dren_2A	115	Dren_05	0.1
Dren_2B	250	Dren_06	15

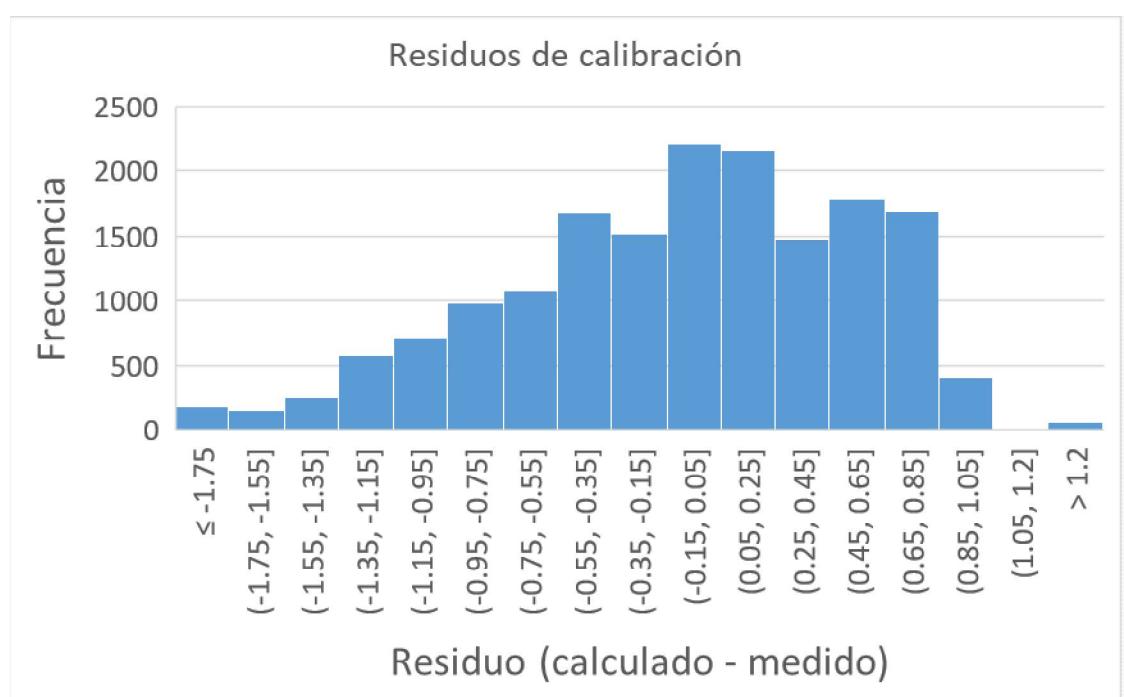
#### 4.2.2 Ajustes de medidas disponibles

Para la calibración del modelo se han utilizado aquellos pozos y sondeos en los que se dispone de medidas de nivel con relativa frecuencia. En todos los casos, se han excluido del análisis aquellas medidas en las que se ha detectado el impacto de un bombeo cercano. Los pozos y sondeos con una única medida de nivel piezométrico se han utilizado como puntos de validación. La Figura 32 muestra una comparación entre niveles calculados y medidos considerando sólo las medidas utilizadas para la calibración. La Figura 33 muestra los mismos resultados, pero en términos de histograma de residuos (la distancia entre los puntos de la Figura 32 y la línea roja de ajuste perfecto). El ajuste global es muy elevado, siendo el valor

medio del residuo aproximadamente cero. Los puntos que presentan mayores residuos son aquellos en presencia de bombeos, que no se utilizaron para la calibración del modelo y que se presentan sólo como referencia, o aquellos que representan medidas tomadas en las cassetas de los drenes. Este último punto se discute más adelante.

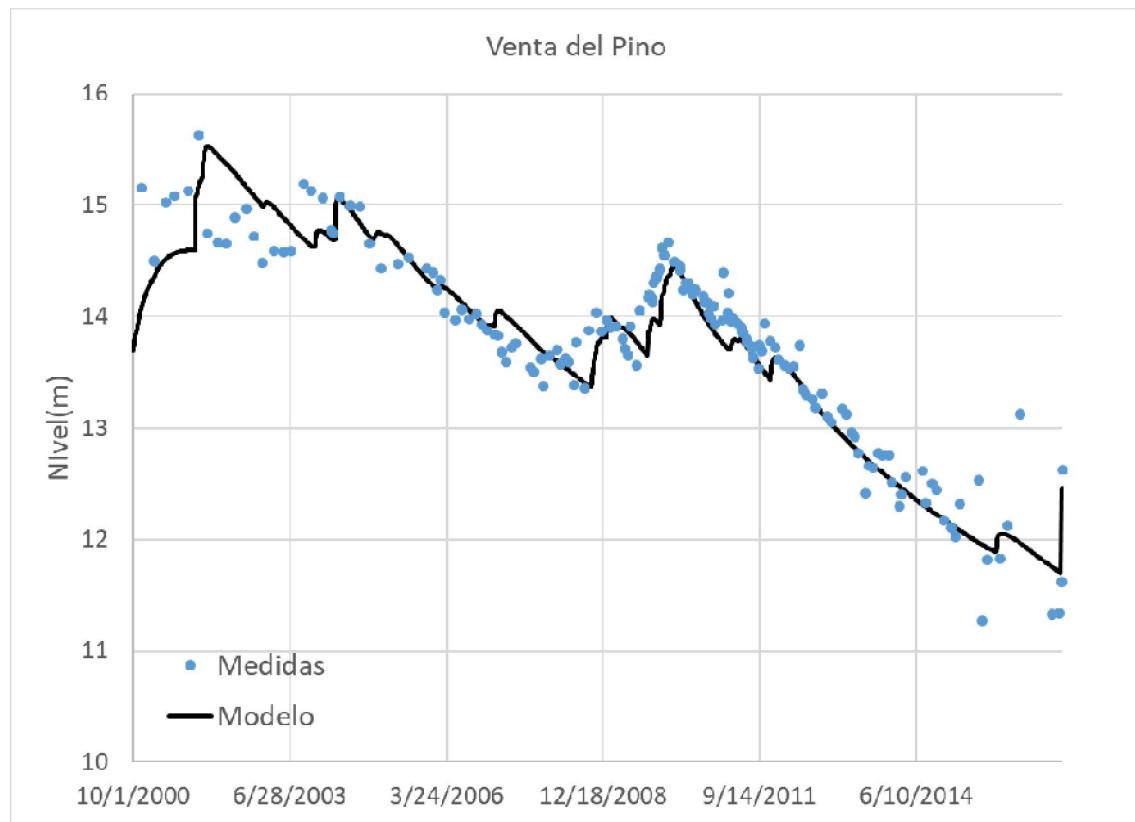


**Figura 32. Ajustes del modelo. Niveles piezométricos calculados en pozos con serie larga (eje vertical) contra niveles piezométricos medidos (eje horizontal). La línea roja marca la relación 1:1.**



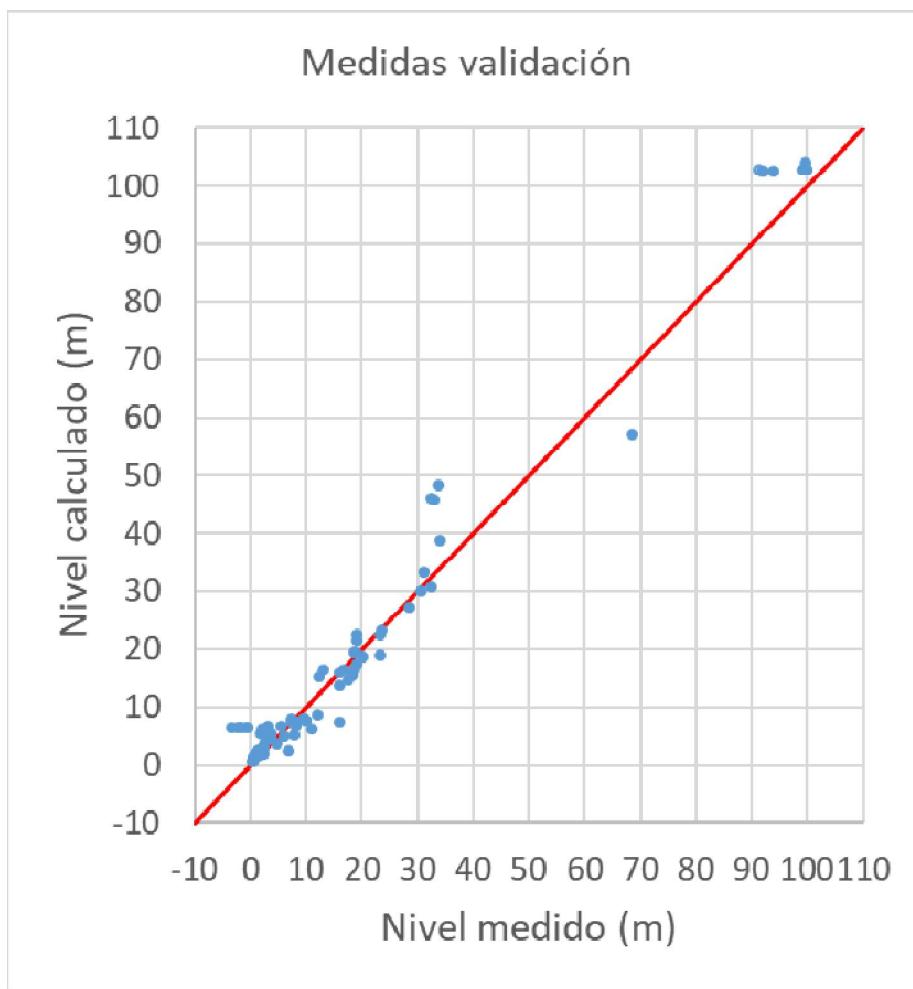
**Figura 33. Histograma de calibración. Residuos de niveles (valor calculado menos valor medido).**

La Figura 34 muestra un ejemplo de ajuste en el pozo Venta del Pino. El Anejo II de esta Memoria muestra figuras análogas para los demás pozos con serie larga de medidas de nivel utilizados en la calibración del modelo.



**Figura 34. Ajuste de datos de nivel en el pozo Venta del Pino.**

La Figura 35 muestra la validación del modelo. Como se observa, los residuos en los pozos de validación son sensiblemente mayores que en aquellos usados para la calibración. En este caso, el residuo medio de calibración es de 1.4m, lo que representa un valor muy pequeño si se tiene en cuenta que, en este caso, la predicción es ciega y que los valores medidos de nivel alcanzan los 105m. Por tanto, el residuo medio representa aproximadamente un 1% del máximo nivel medido y la calibración del modelo puede considerarse más que satisfactoria a escala global.



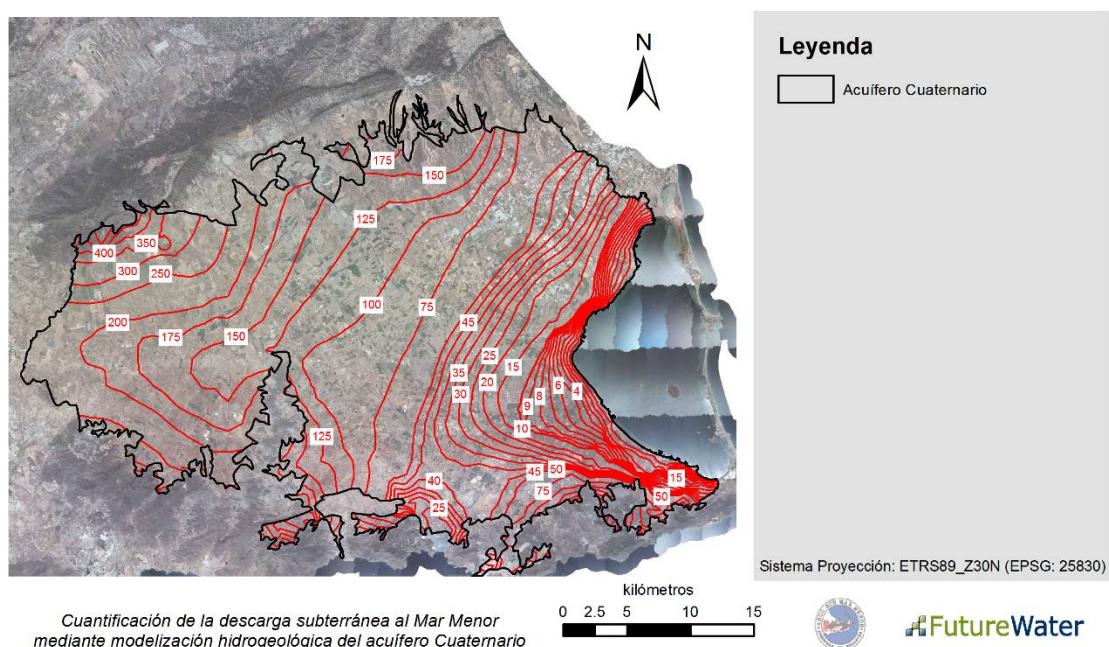
**Figura 35. Ajustes del modelo. Niveles piezométricos calculados (eje vertical) contra niveles piezométricos medidos (eje horizontal) en pozos usados para la validación del modelo. La línea roja marca la relación 1:1.**

El ajuste de las medidas tomadas en las arquetas de los drenes merece una mención especial. En el “Anejoll. Niveles piezométricos calculados y medidos”, se muestran los ajustes de medidas de nivel en los drenes. En la figura del Dren\_05 (entre otras) se pueden apreciar claramente dos períodos en la serie medida, pre y post 2012, en los que las medidas presentan tendencias y oscilaciones similares, pero con medias en el periodo muy distintas (mucho más alta en el periodo pre-2012). Se sospecha que el sensor de medida se movió en algún instante intermedio y no se niveló correctamente. Además, se observa que las oscilaciones de nivel medidas son mucho más abruptas que las calculadas (la evolución de niveles calculados es mucho más suave). Esto puede deberse al hecho de que las medidas se han tomado en las arquetas de drenaje, tras haberse presurizado el agua al discurrir a través de una superficie menor (y cerrada), y no en piezómetros instalados en el propio dren. En estos casos, la

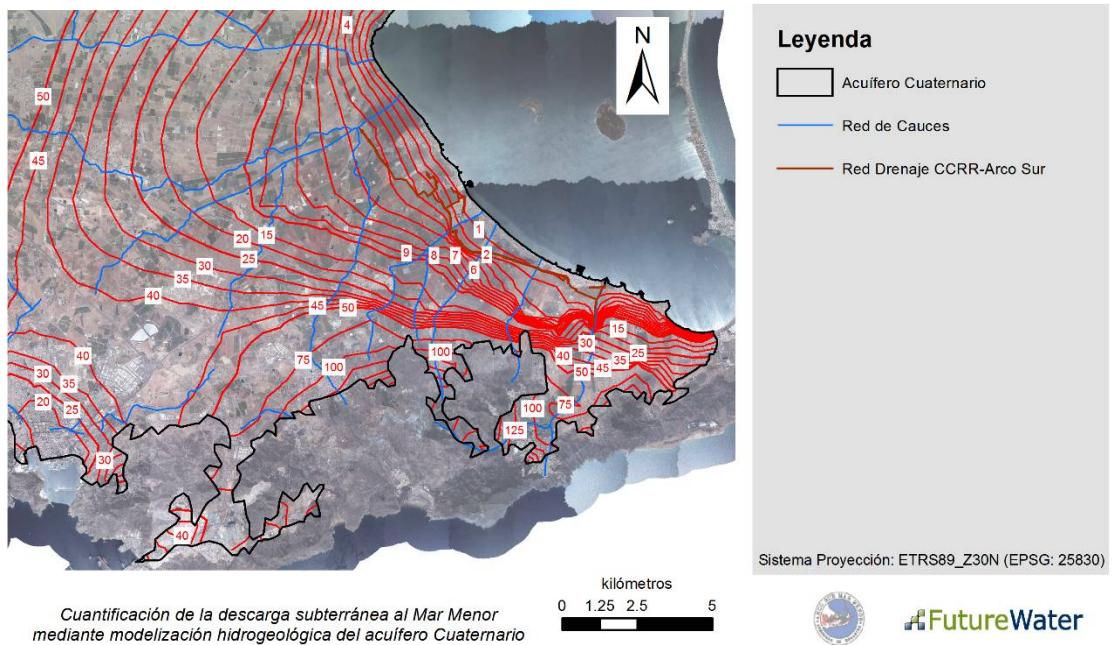
estimación de los parámetros llevada a cabo en los drenes no resulta representativa del comportamiento del dren *sensu stricto* de la arqueta, provocando que los valores estimados de difusividad sean representativos de la combinación del dren y la arqueta, y no únicamente del dren.

#### 4.2.3 Piezometría

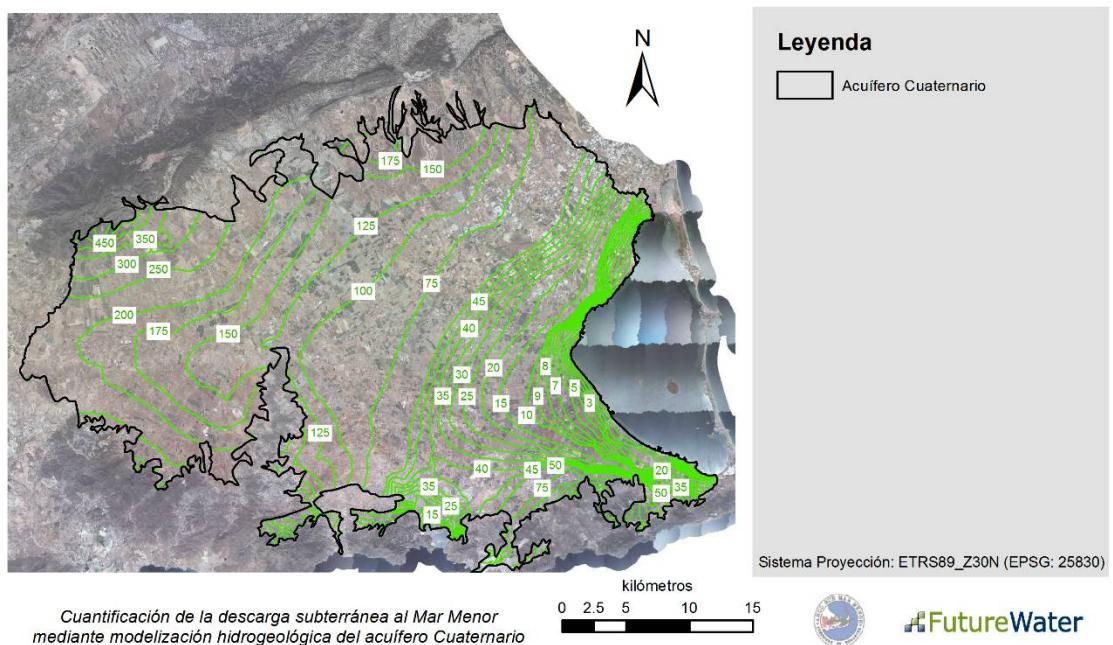
La Figura 36 representa la piezometría calculada por el modelo bajo condiciones de año seco (sección 3.3.4.2). Como puede observarse, la distancia entre isopiezas de nivel piezométrico es mayor cuanto mayor es la distancia a la laguna, debido (entre otros factores) a que las velocidades de flujo de agua subterránea son menores por ser el acuífero menos difusivo. En cambio, en la franja paralela más cercana a la laguna, donde tiene lugar la descarga, la velocidad de flujo es mayor. La Figura 37 muestra un zoom de la piezometría correspondiente a año seco en la zona de CCRRAS. La Figura 38 y Figura 39 muestran la piezometría calculada en condiciones de año medio, mientras que la Figura 40 y Figura 41 muestran la correspondiente a año húmedo.



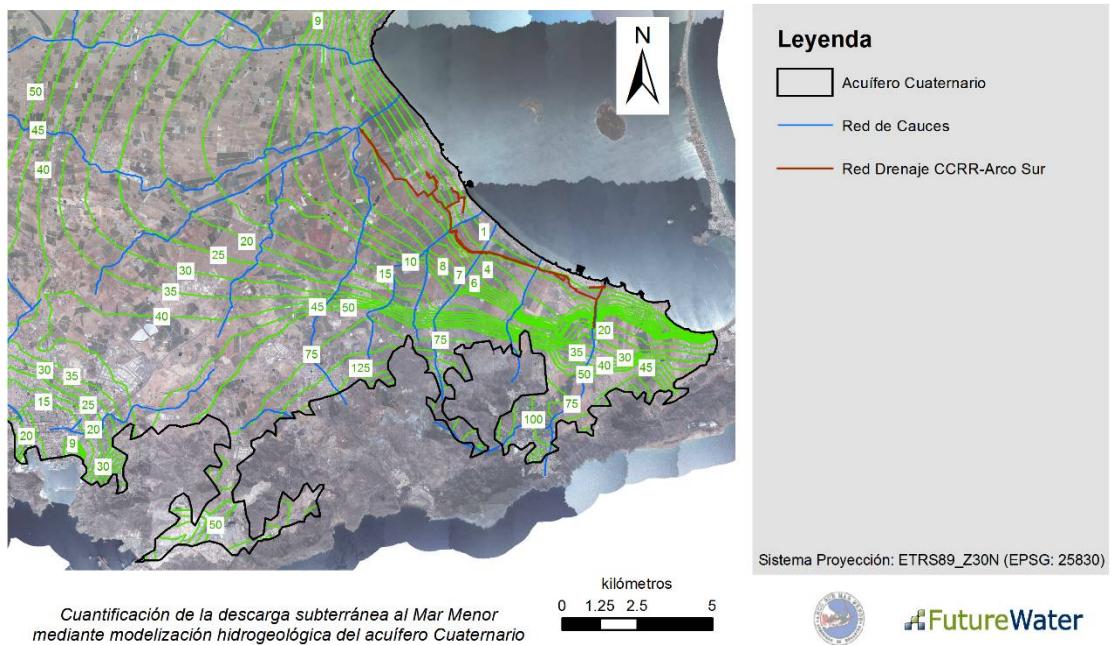
**Figura 36. Piezometría calculada para condiciones de año seco (fecha representada 15/09/2015).**



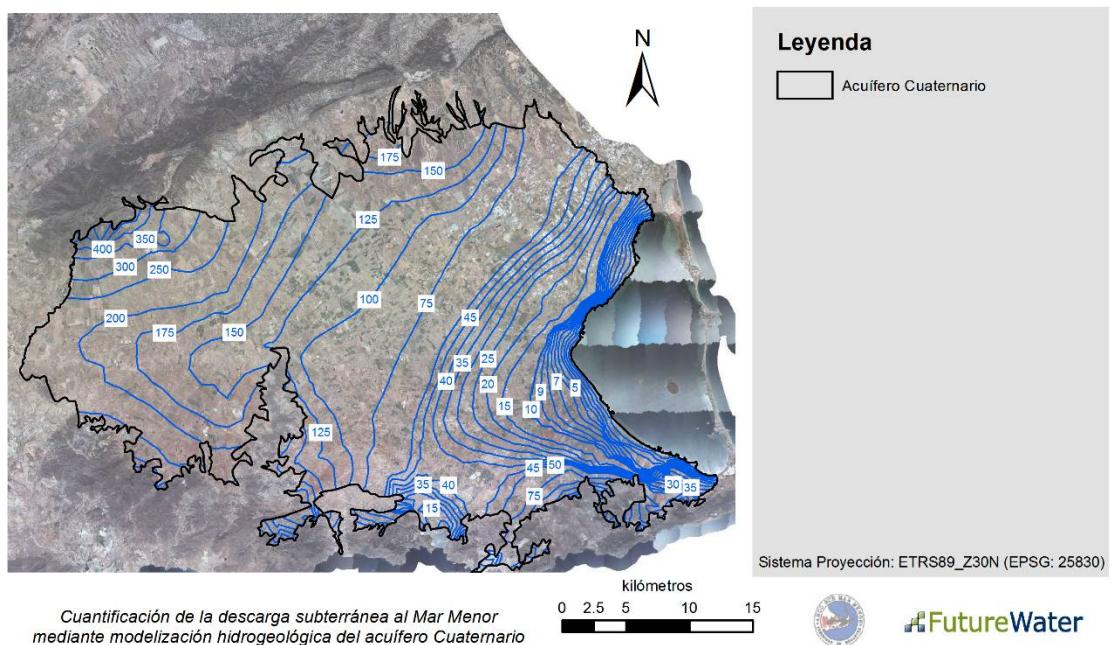
**Figura 37. Piezometría calculada para condiciones de año seco (fecha representada 15/09/2015). Zoom a la zona de estudio CCRRAS.**



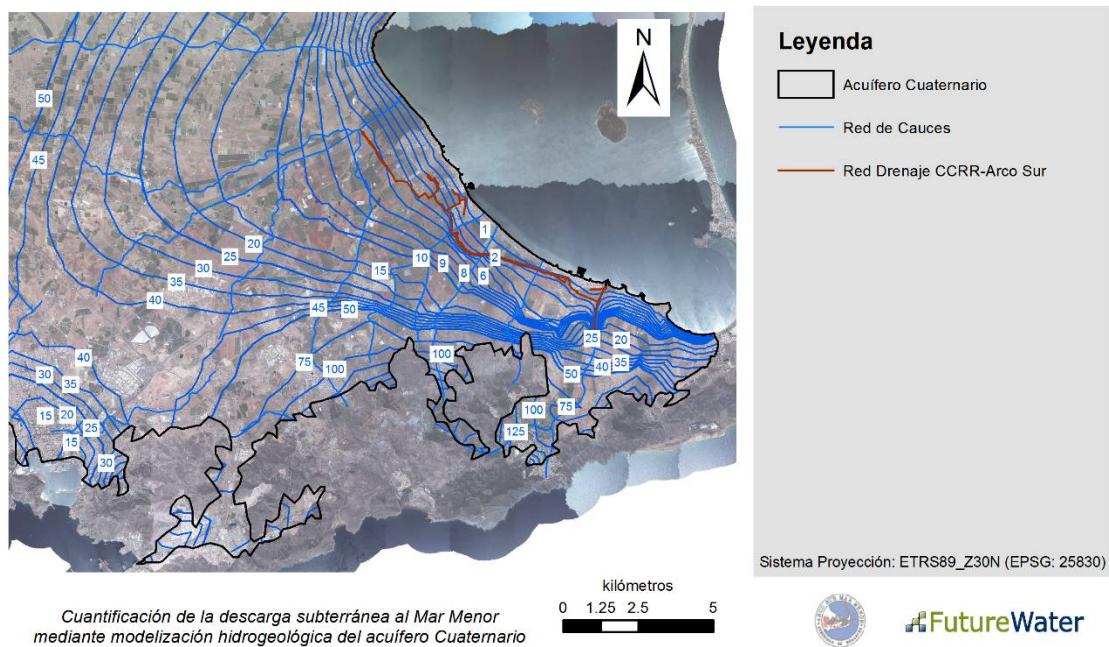
**Figura 38. Piezometría calculada para condiciones de año medio (fecha representada 15/03/2004).**



**Figura 39. Piezometría calculada para condiciones de año medio (fecha representada 15/03/2004). Zoom a la zona de estudio CCRRAS.**

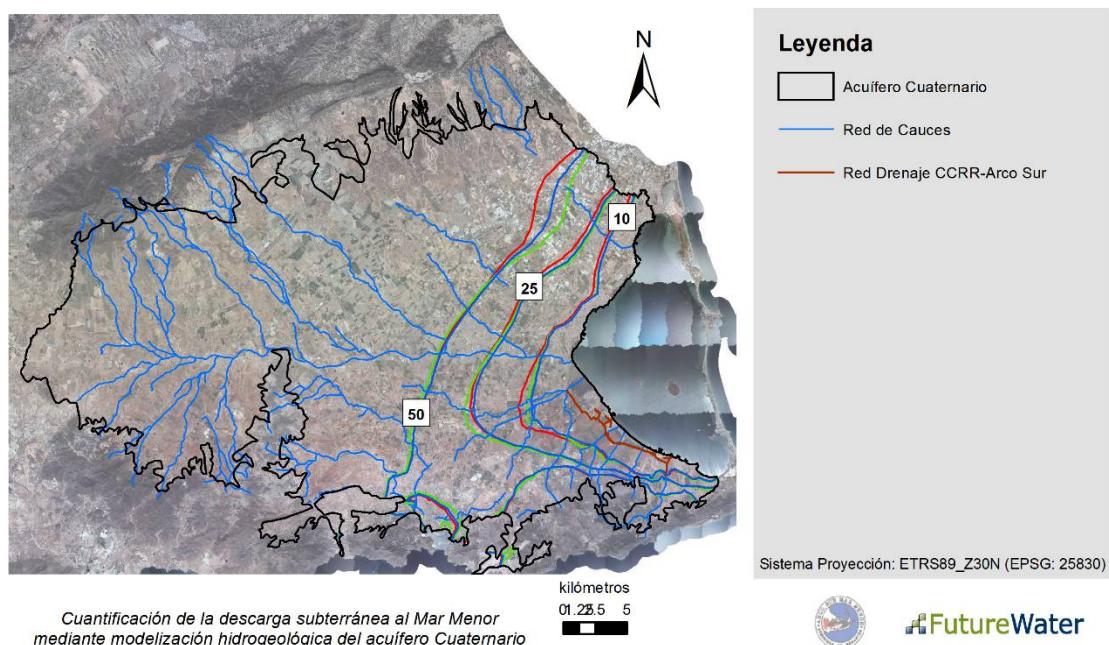


**Figura 40. Piezometría calculada para condiciones de año húmedo (fecha representada 15/09/2010).**

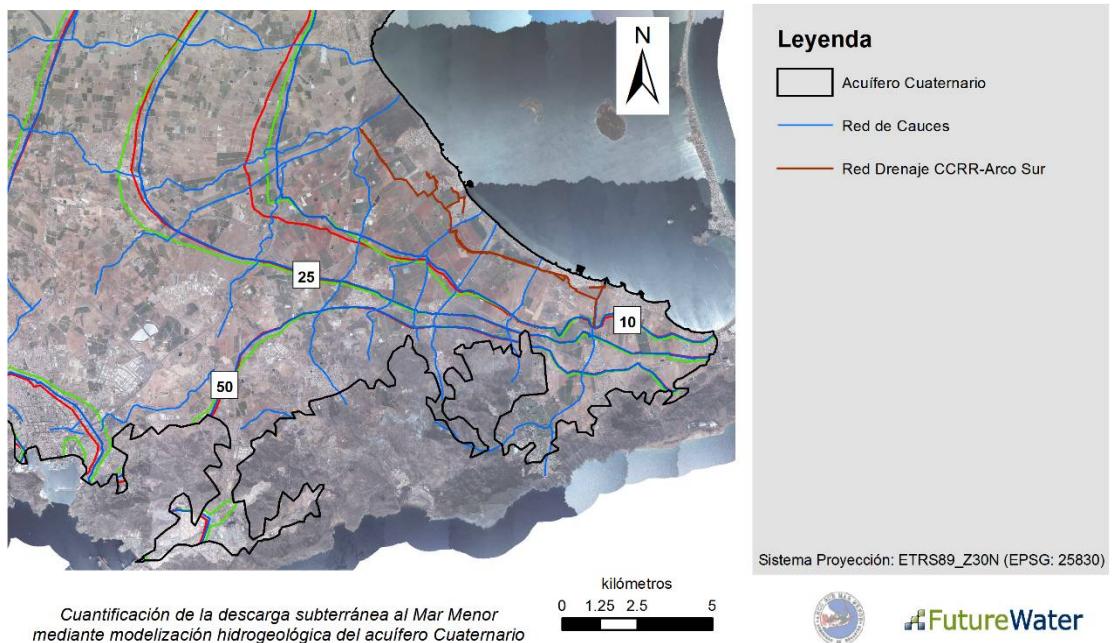


**Figura 41. Piezometría calculada para condiciones de año húmedo (fecha representada 15/09/2010). Zoom a la zona de estudio CCRRAS.**

Las Figura 42 y Figura 43 muestran una comparación entre las piezometrías a cota 10, 25 y 50 m s.n.m. correspondientes a condiciones extremas de clima seco y húmedo. Como puede observarse, los niveles piezométricos son muy sensibles a la recarga debida a precipitación. En la zona de CCRR-Arco Sur se observan niveles piezométricos entre 0.5 y 2m más altos bajo condiciones de año húmedo.

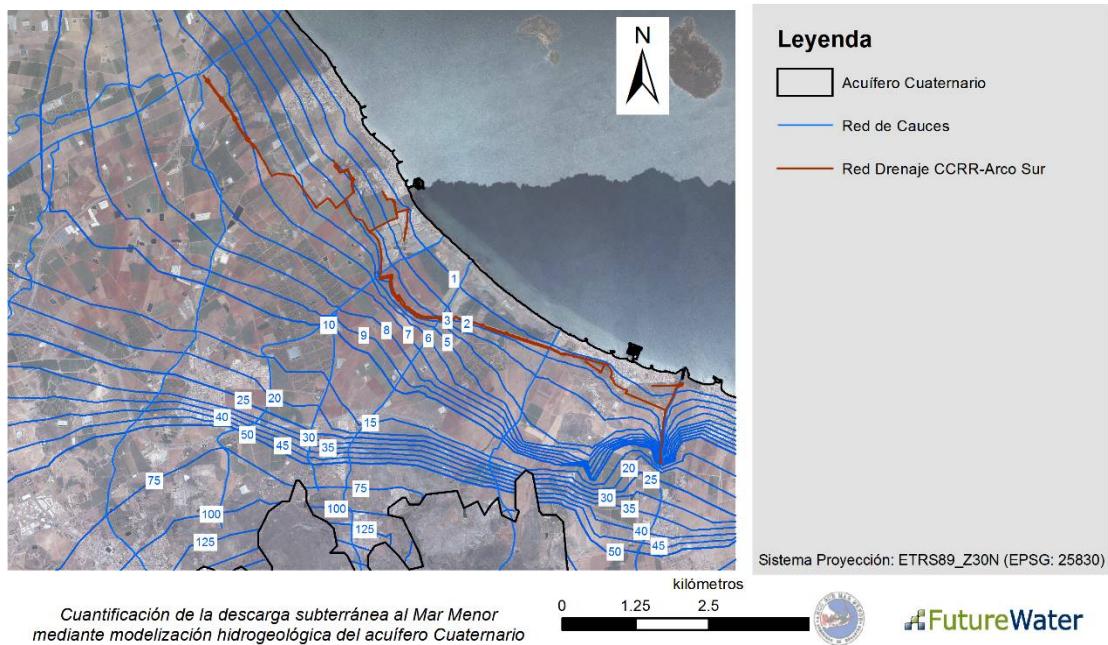


**Figura 42. Comparación entre isopiezas (10, 25 y 50 m s.n.m) bajo condiciones de año seco, promedio y húmedo.**



**Figura 43. Comparación entre isopiezas (10, 25 y 50 m s.n.m) bajo condiciones de año seco, promedio y húmedo (detalle para ámbito de la CCRR-Arco Sur).**

Finalmente, la Figura 44 muestra el impacto de los drenes en la piezometría local. Como se puede apreciar, las isopiezas de nivel piezométrico discurren paralelas a los drenes o coinciden con ellos. Este efecto es debido a la relativamente alta difusividad de algunos drenes (Tabla 7), que actúan como zanjas de nivel piezométrico constante. No obstante, el nivel piezométrico varía en distintos tramos de los drenes. Esto se debe a (1) pequeñas diferencias en las geometrías y profundidades de los drenes y (2) a discontinuidades entre tramos de dren, las cuales también se manifiestan por las diferentes tendencias en las series de medidas de nivel piezométrico (y caudal bombeado) tomadas en las arquetas (Anejo II).



**Figura 44. Piezometría calculada para condiciones de año húmedo (fecha representada 15/09/2010) en la zona de drenes de CCRR Arco Sur.**

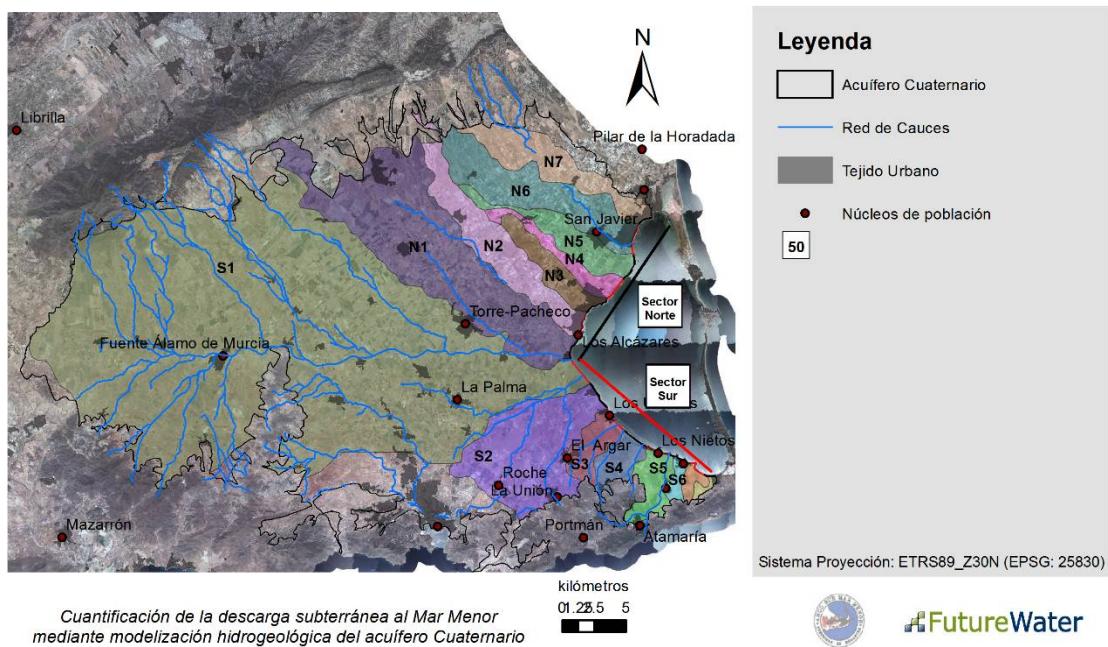
#### 4.3 Análisis general de las descargas subterráneas al Mar Menor y dinámica de la cuña salina

##### 4.3.1 Agregación espacio-temporal

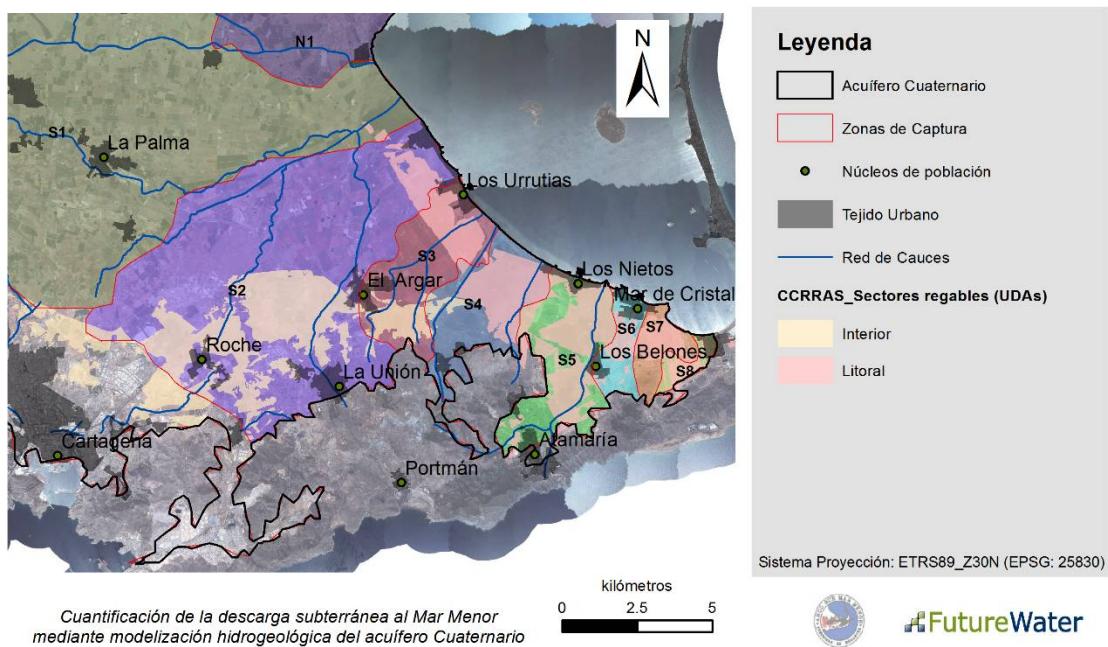
A título de presentación de resultados y discusión, los valores de recarga y descarga se agregan a nivel mensual, y espacialmente según las “zonas de captura” definidas por el modelo de flujo subterráneo. Se define una “zona de captura” como la superficie que recarga y drena a una sección/frente de descarga subterránea. A lo largo del frente de descarga del acuífero cuaternario al Mar Menor (esto es, el límite terrestre de la laguna) se han establecido 15 secciones de aproximadamente 2 kilómetros de longitud, las cuales se han codificado según su lejanía a la desembocadura de la Rambla del Albujón (Tabla 8, Figura 45, Figura 46).

**Tabla 8. Zonas de captura del acuífero Cuaternario en el Campo de Cartagena (área de recarga y perímetro del frente de descarga).**

Zona Captura	Área (km <sup>2</sup> )	Frente descarga (km)
<b>S1</b>	586.80	2.46
<b>S2</b>	68.75	2.41
<b>S3</b>	13.38	2.21
<b>S4</b>	11.87	2.20
<b>S5</b>	13.78	2.40
<b>S6</b>	3.83	1.66
<b>S7</b>	3.65	2.06
<b>S8</b>	1.68	0.74
<b>N1</b>	131.41	1.83
<b>N2</b>	42.44	2.24
<b>N3</b>	16.14	2.07
<b>N4</b>	12.35	2.12
<b>N5</b>	21.54	2.30
<b>N6</b>	49.42	2.44
<b>N7</b>	32.95	1.13
<b>Total Sector Sur</b>	703.74	16.13
<b>Total Sector Norte</b>	306.25	14.13
<b>Total Arco Sur</b>	116.94	13.67
<b>Total</b>	1009.98	30.27



**Figura 45. Distribución de las “zonas de captura” del acuífero Cuaternario en el Campo de Cartagena y frentes de descarga.**



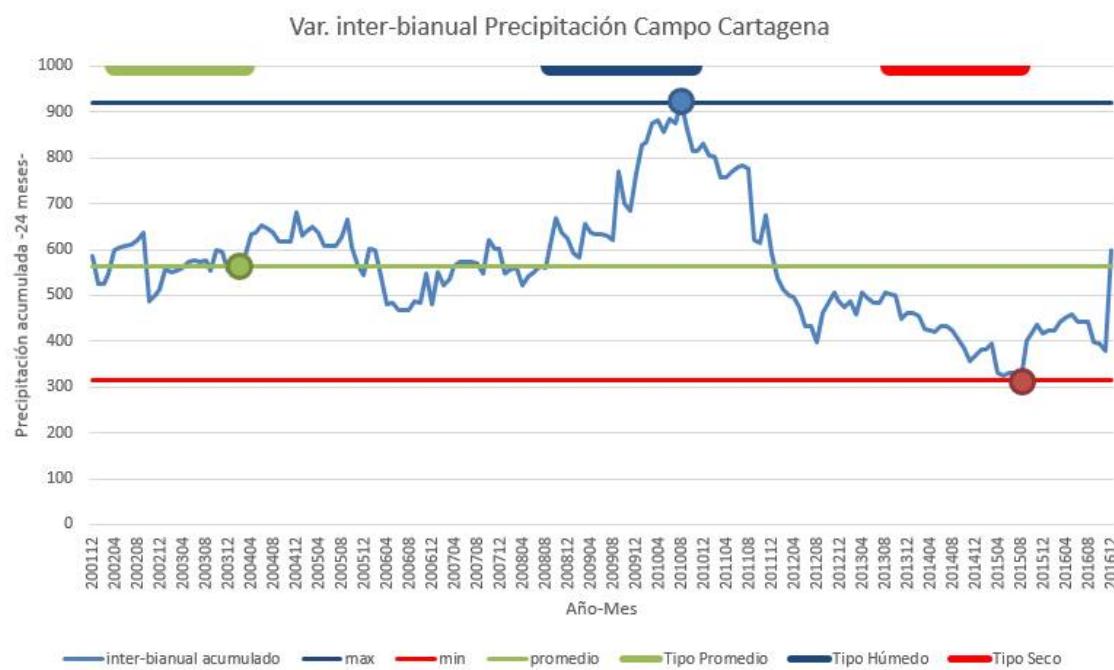
**Figura 46. Zonas de captura en el ámbito de actuación de la CCRR-Arco Sur.**

Igualmente se identificaron tres períodos característicos de precipitación (períodos “promedio”, “húmedo” y “seco”) para analizar el efecto de la alternancia entre ciclos secos y húmedos en la generación de recarga y descarga al Mar Menor. La identificación de cada período -de 24 meses de duración- se estableció a partir de la curva de precipitación mensual acumulada en ventanas móviles de dos años de duración desde el inicio del período de estudio (octubre de 2000). A partir de dicha curva se identificaron los valores máximo y mínimo de precipitación y el

valor promedio de toda la serie, y por tanto los períodos más seco y húmedo de la serie, y un tercer período próximo a los valores de precipitación promedio (Tabla 9, Figura 47).

**Tabla 9. Períodos de precipitación “tipo”**

Período de precipitación “tipo”	Inicio del período	Final del período	Precipitación acumulada (2 años)
<b>Promedio</b>	Abr/2002	Mar/2004	590 mm
<b>Húmedo</b>	Sep/2008	Ago/2010	922 mm
<b>Seco</b>	Sep/2013	Ago/2015	313 mm



**Figura 47. Precipitación inter-bianual acumulada en el Campo de Cartagena e identificación de períodos de precipitación característicos. El final y la duración de cada período se representa por los puntos y las líneas gruesas de la parte superior, respectivamente.**

#### 4.3.2 Recarga y descarga subterránea al Mar Menor

Como se puntuó en los capítulos 3.3.2 y 3.3.4.3, la descarga estimada por el modelo de hidrología subterránea hace referencia a valores calculados sin considerar los bombeos y la transferencia de agua del acuífero Cuaternario hacia los acuíferos inferiores (a través de pozos mal ejecutados). Así pues, el valor de descarga del modelo representa la descarga potencial esperable.

En la Figura 48 se representa la variación mensual (obtenida por agregación de valores diarios) de la recarga en el Campo de Cartagena y el volumen máximo descargado al Mar Menor a través de los sectores definidos al sur y norte de la Rambla del Albujón. La recarga media anual se ha estimado en  $73.7 \text{ hm}^3/\text{año}$  para el período Ene/2001 - Dic/2016, si bien se han detectado eventos de recarga mensual superiores a  $125 \text{ hm}^3$  (Figura 48).

El valor de descarga potencial( $DES_{pot}$  en Ec.4) se ha estimado en  $70,9 \text{ hm}^3/\text{año}$  (Tabla 10, Figura 50). Estos valores oscilan según el régimen de precipitaciones considerado entre  $63.6 \text{ hm}^3/\text{año}$  en el periodo más seco de la serie y los  $83.1 \text{ hm}^3/\text{año}$  del más húmedo (Tabla 10). La descarga potencial en un año húmedo es en torno a  $20 \text{ hm}^3$  superior al valor correspondiente en un año seco.

El 80% de la descarga se concentra en los sectores S1-S2, N1-N2 y N6-N7 (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).



**Figura 48. Variación mensual de los valores de recarga en el Campo de Cartagena y de descarga potencial subterránea al Mar Menor en las secciones Sur y Norte en el periodo de estudio (octubre/2000 – diciembre/2016).**

**Tabla 10. Promedios anuales de recarga total (PER,  $\text{hm}^3/\text{año}$ ) en el acuífero Cuaternario, y descarga potencial (DES<sub>pot</sub>,  $\text{hm}^3/\text{año}$ ) por frente de descarga para diferentes períodos de simulación.**

Volumen ( $\text{hm}^3/\text{año}$ )	Promedio (Ene/2001- Dic/2016)	Promedio (Abr/2002 - Mar/2004)	Húmedo (Sep/2008 - Ago/2010)	Seco (Sep/2003 - Ago/2005)
<b>PER</b>	73.7	56.7	201.4	11.7
<b>DES<sub>pot</sub>_S1</b>	13.3	13.5	15.4	12.2
<b>DES<sub>pot</sub>_S2</b>	3.9	3.9	4.8	3.4
<b>DES<sub>pot</sub>_S3</b>	1.6	1.6	2.1	1.2
<b>DES<sub>pot</sub>_S4</b>	1.2	1.2	1.6	0.8
<b>DES<sub>pot</sub>_S5</b>	0.4	0.4	0.6	0.2
<b>DES<sub>pot</sub>_S6</b>	0.0	0.0	0.1	0.0
<b>DES<sub>pot</sub>_S7</b>	0.1	0.1	0.2	0.0
<b>DES<sub>pot</sub>_S8</b>	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>DES<sub>pot</sub>_N1</b>	19.7	19.8	22.5	18.6
<b>DES<sub>pot</sub>_N2</b>	9.2	9.3	10.5	8.6
<b>DES<sub>pot</sub>_N3</b>	2.7	2.7	3.2	2.3
<b>DES<sub>pot</sub>_N4</b>	1.8	1.8	2.2	1.5
<b>DES<sub>pot</sub>_N5</b>	2.6	2.6	3.2	2.2
<b>DES<sub>pot</sub>_N6</b>	7.7	8.2	8.9	6.6
<b>DES<sub>pot</sub>_N7</b>	6.9	7.5	7.8	6.0
<b>Total DES<sub>pot</sub> Sector Sur</b>	20.4	20.7	24.8	17.8
<b>Total DES<sub>pot</sub> Sector Norte</b>	50.5	51.9	58.3	45.8
<b>Total DES<sub>pot</sub> Arco Sur (S2-S8)</b>	7.1	7.2	9.3	5.6
<b>Total DES<sub>pot</sub></b>	70.9	72.6	83.1	63.6

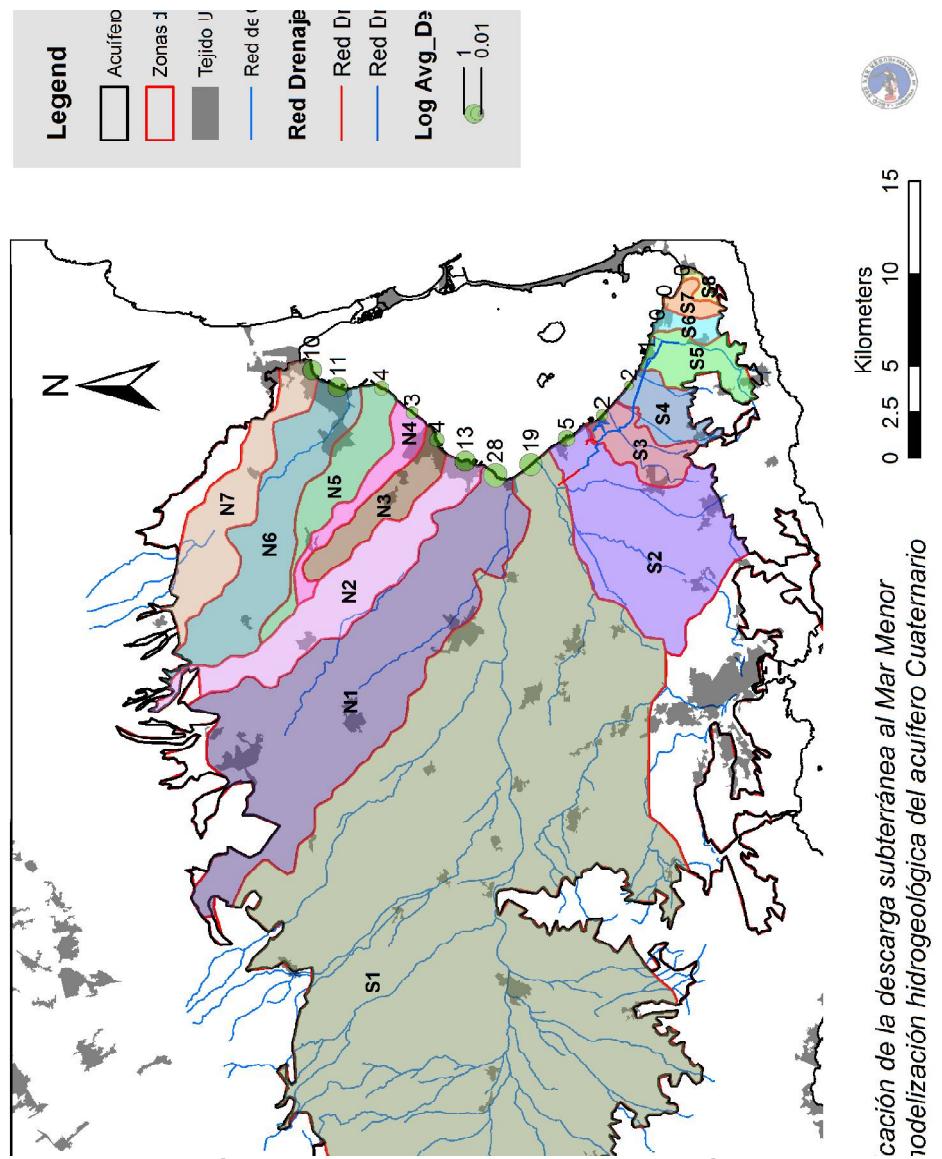
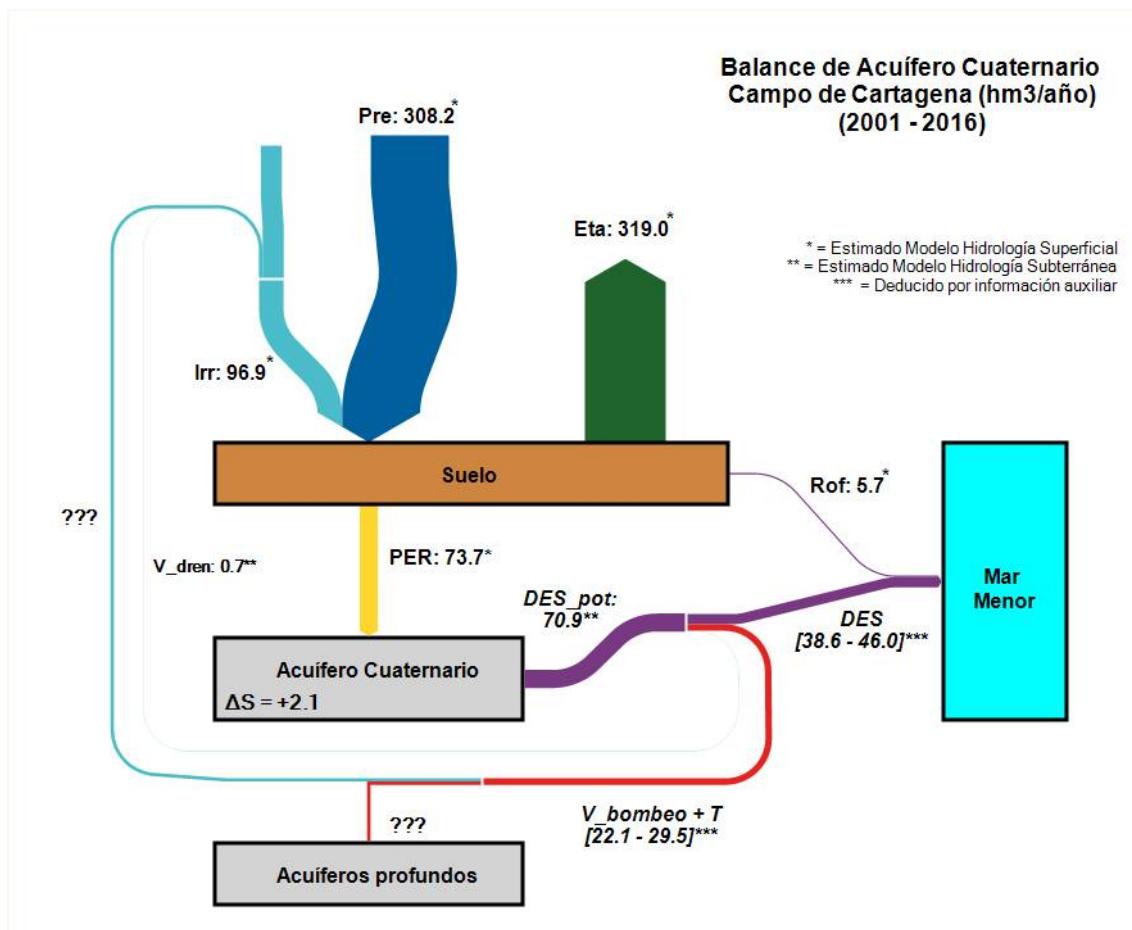


Figura 49. Porcentaje de descarga subterránea por sector en un periodo característico de precipitación promedio.

En la Figura 50 se representa el diagrama de balance del acuífero Cuaternario del Campo de Cartagena para el periodo de simulación Ene/2001 – Dic/2016. Los volúmenes de descarga al Mar Menor, y los correspondientes a extracción a través de sistemas de drenaje, o las pérdidas debido a bombeo o hacia acuíferos inferiores se han estimado según la ecuación Ec. (4) (sección 3.3.4.3). Las salidas de agua del acuífero por bombeos y transferencia hacia acuíferos inferiores ( $V_b+T$ ) se ha estimado a partir de la recarga entrante al acuífero (PER) asumiendo un factor de goteo de 0.3-0.4 (Jiménez-Martínez et al., 2016, 2011).

En base a lo anterior, la descarga subterránea al Mar Menor oscila, en términos promedio, entre 38 y 46 hm<sup>3</sup>/año. La distribución espacial de esta descarga seguiría un patrón similar al definido en la Figura 49, siendo los sectores S1-S2, N1-N2 y N6-N7 los que más contribuirían a la descarga al Mar Menor (80% en términos relativos).

Teniendo en cuenta una variación de +/- 10 hm<sup>3</sup>/año entre año húmedo y seco, se puede concluir que la descarga real al Mar Menor oscilaría entre 28 y 48 hm<sup>3</sup>/año asumiendo la misma intensidad de bombeo del acuífero Cuaternario y de explotación de volúmenes de drenaje.



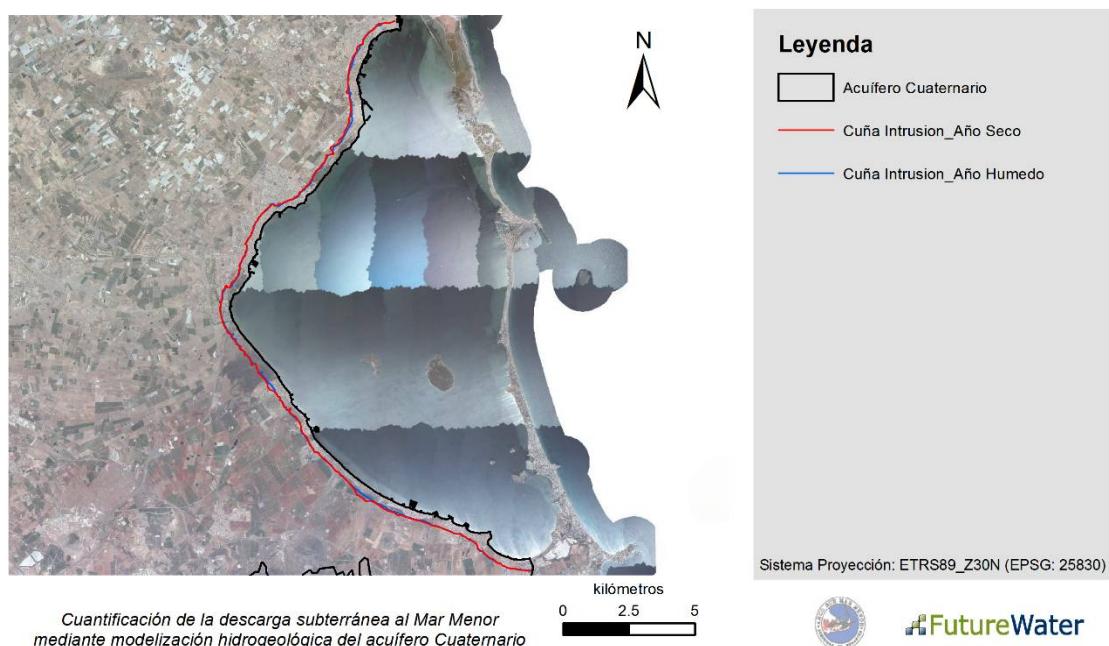
**Figura 50. Balance del Acuífero Cuaternario del Campo de Cartagena. Volúmenes totales promedio para el periodo entre Ene-2001 y Dic-2016.**

En el ámbito de la CCRR-Arco Sur, la descarga potencial promedio se ha estimado en 7.1 hm<sup>3</sup>/año. Este valor incluye la descarga del sector S2 que no está completamente captado

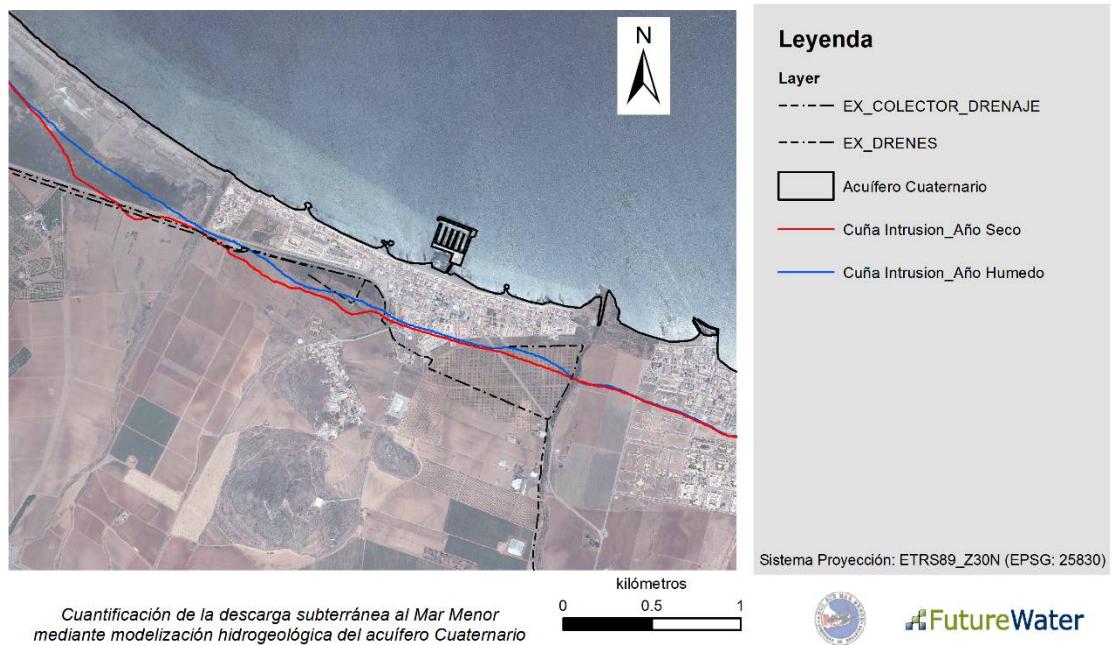
por el actual sistema de drenaje de la CCRR Arco-Sur, aunque existe una propuesta para su extensión. La contribución relativa a la descarga en esta zona sería incluso menor si tomamos en consideración el actual régimen de explotación de los drenes de la CCRR-Arco Sur (aprox. 0.7 hm<sup>3</sup>/año en valor promedio). Además, tomando en consideración que los sectores S2 y S3 están compartidos con zonas regables no gestionadas por la CCRR Arco Sur, se estima que la contribución relativa de la zona regable Arco Sur se reduciría a una cifra próxima al 5%.

#### 4.3.3 Análisis del estado actual de la cuña de intrusión marina

La Figura 51 muestra la máxima penetración de la cuña de intrusión salina (en el fondo del acuífero) bajo condiciones de año seco y año húmedo. Se ha omitido en la figura la penetración bajo condiciones de año promedio por su similitud con la simulada bajo condiciones húmedas. Durante el periodo húmedo, la penetración es algo menor (sólo una decena de metros) debido al exceso de agua dulce que “empuja” la masa de agua salada hacia la laguna. Sin embargo, en la zona de drenes (Figura 52), las diferencias son algo mayores. Esto es lógico porque el impacto, en términos de descenso del nivel piezométrico, causado por los drenes bajo condiciones de año seco es mucho mayor que el causado bajo condiciones de año húmedo.



**Figura 51. Penetración máxima de la cuña de intrusión bajo condiciones de año seco (línea roja, representación en fecha 15/09/2015) y húmedo (línea azul, representación en fecha 15/09/2010).**



**Figura 52. Penetración máxima de la cuña de intrusión bajo condiciones de año seco (línea roja, representación en fecha 15/09/2015) y húmedo (línea azul, representación en fecha 15/09/2010). Zoom en la zona de drenes (líneas verdes) de CCRRAS.**

En promedio, la cuña de intrusión marina penetra unos 330m tierra adentro. Estos valores son coherentes con los calculados mediante soluciones analíticas como las de Ghyben-Herzberg o Hubbert (Fetter, 1994).

## 5 Conclusiones

### 5.1 Principales resultados

Este trabajo cuantifica y regionaliza el volumen de la descarga de agua subterránea procedente del acuífero superficial Cuaternario, a lo largo de todo el contorno del Mar Menor y con especial énfasis en el ámbito de actuación de la CCRRArco Sur. Para su ejecución se realizó un proceso de recopilación de datos e información sin precedentes y de modelación hidrológica e hidrogeológica, que ha resultado en mapas de detalle sobre los procesos de balance de agua en el acuífero y de descarga subterránea a la laguna del Mar Menor a lo largo de un periodo de simulación representativo de más de 15 años.

Se resumen aquí los principales resultados y conclusiones:

1. Gracias al uso de imágenes satelitales y modelización diaria se ha podido captar la variabilidad de los volúmenes de agua utilizados para riego, pérdidas por evapotranspiración y percolación o recarga.
2. Los modelos utilizados fueron calibrados y validados para un periodo largo representativo que incluye diferentes condiciones climáticas. La plausibilidad de los parámetros estimados y la bondad de ajuste del modelo lo convierten en una herramienta óptima para la simulación de escenarios futuros.
3. Se ha cuantificado la recarga anual del acuífero superficial Cuaternario entre 12 y 200  $\text{hm}^3/\text{año}$  en el periodo más seco y húmedo de la serie, respectivamente. El valor de recarga promedio es de 74  $\text{hm}^3/\text{año}$ .
4. La descarga potencial al Mar Menor, sin contar las extracciones por bombeo en pozos y drenes, y transferencias de agua hacia acuíferos inferiores, oscila entre 63 y 83  $\text{hm}^3/\text{año}$ , siendo el valor medio 71  $\text{hm}^3/\text{año}$ .
5. La descarga real promedio al Mar Menor durante el periodo de simulación se ha estimado entre 38  $\text{hm}^3/\text{año}$  y 46  $\text{hm}^3/\text{año}$ . Estos valores oscilan entre  $\pm 10 \text{ hm}^3/\text{año}$ , según se consideren años húmedos o secos.
6. La mayor parte de la descarga se concentra en los sectores próximos a la Rambla del Albujón y al norte del Campo de Cartagena. La descarga en el ámbito de actuación de CCRR-Arco Sur se estima en aproximadamente un 5% del volumen total descargado, cifra relativamente reducida entre otras por la intercepción del flujo a través de la red de drenaje operativa en el ámbito de la CCRR-Arco Sur.
7. Debido a alta capacidad reguladora del acuífero, no existe una relación sencilla entre los valores de precipitación-recarga y descarga al Mar Menor: tras picos intensos de lluvia se generan picos casi instantáneos de recarga, si bien los niveles piezométricos, y por tanto la descarga resultante, tardan mucho en reaccionar a dichos eventos debido a la alta capacidad disipativa del acuífero.

Por último, se resalta la importancia que el acuífero Cuaternario tiene a la hora de amortiguar la extremada variabilidad climática en superficie y eventos de recarga, así como su capacidad para regular la disponibilidad del recurso hídrico. Resulta por tanto clave incluir la dinámica de la recarga y descarga del acuífero y su comportamiento en los planes de gestión integral del Campo de Cartagena y en las estrategias para la mitigación de la contaminación del Mar Menor.

## 5.2 Recomendaciones

El presente estudio se limita a cuantificar los patrones de comportamiento actuales de la cuenca del Campo de Cartagena. El modelo validado se puede utilizar para dos propósitos bien diferenciados:

1. Implementación de un Sistema de Monitoreo y Vigilancia del Acuífero Cuaternario y su impacto en el Mar Menor:
  - a. el sistema se alimentaría en tiempo (cuasi-)real de datos meteorológicos y datos de explotación de drenes y bombeos para calcular en tiempo real la dinámica del acuífero y la descarga al Mar Menor,
  - b. el sistema permitiría cuantificar los volúmenes extraíbles de la red de drenes en cada momento,
  - c. el sistema podría implementarse a nivel del ámbito de actuación de CCRRArco Sur o a nivel de toda la cuenca. Se podría plantear una primera implementación piloto del sistema para una zona de interés especial,
  - d. el sistema se presentaría al usuario (ej. CCRRArco Sur) por medio de una aplicación online accesible mediante autenticación.
2. Evaluación estratégica de escenarios de cambio climático y regímenes de explotación.
  - a. análisis de escenarios de explotación e impactos relativos a una futura ampliación de la red de drenaje actual,
  - b. análisis de impactos de nuevas captaciones o de intensificación del régimen de extracciones actual,
  - c. análisis de impactos derivados de cambio climático o por cambios de usos del suelo,
  - d. análisis de escenarios por reducción de aportaciones procedentes del trasvase,
  - e. análisis detallado de la interacción entre el acuífero y el estado ecológico de los humedales costeros,
  - f. análisis de calidad del agua subterránea en zonas vulnerables a la contaminación (por ejemplo, la Rambla del Albujón)

## 6 Referencias

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Rome.
- Aragón, R., Jiménez-Martínez, J., García-Aróstegui, J.L., Hornero, J., 2009. Hidrogeología y recursos hídricos subterráneos en el área Campo de Cartagena - Mar Menor, in: El Mar Menor. Estado Actual Del Conocimiento Científico. Fundación Instituto Euromediterráneo del Agua, Murcia, pp. 84–108.
- Carlson, T.N., Riziley, D.A., 1997. On the relation between NDVI , Fractional Vegetation Cover, and Leaf Area Index. *Remote Sens. Environ.* 62, 241–252.  
doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00104-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00104-1)
- CARM, 2017. Informe integral sobre el estado ecológico del Mar Menor. Murcia.
- CCRR Arco Sur, 2006. Estudio geotécnico. Concesión de agua y diferenciación de acuífero (Los Nietos, Cartagena). Cartagena.
- CCRR Arco Sur, 2007. Estudio de los efluentes de aguas salobres en el acuífero costero del Mar Menor. Cartagena.
- Contreras, S., Hunink, J.E., Baille, A., 2014. Building a Watershed Information System for the Campo de Cartagena basin (Spain) integrating hydrological modeling and remote sensing.
- Contreras, S., Jobbágy, E.G., Villagra, P.E., Nosetto, M.D., Puigdefábregas, J., 2011. Remote sensing estimates of supplementary water consumption by arid ecosystems of central Argentina. *J. Hydrol.* 397, 10–22. doi:[10.1016/j.jhydrol.2010.11.014](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.11.014)
- García-Aróstegui, J.L., Marín Arnaldos, F., Martínez Vicente, D., 2017. Informe integral sobre el estado ecológico del Mar Menor, 1. Hidrogeología. Murcia.
- Glenn, E.P., Nagler, P.L., Huete, A.R., 2010. Vegetation Index Methods for Estimating Evapotranspiration by Remote Sensing. *Surv. Geophys.* 31, 531–555.  
doi:[10.1007/s10712-010-9102-2](https://doi.org/10.1007/s10712-010-9102-2)
- Glenn, E.P., Neale, C.M.U., Hunsaker, D.J., Nagler, P.L., 2011. Vegetation index-based crop coefficients to estimate evapotranspiration by remote sensing in agricultural and natural ecosystems. *Hydrol. Process.* 25, 4050–4062. doi:[10.1002/hyp.8392](https://doi.org/10.1002/hyp.8392)
- Groeneveld, D.P., Baugh, W.M., Sanderson, J.S., Cooper, D.J., 2007. Annual groundwater evapotranspiration mapped from single satellite scenes. *J. Hydrol.* 344, 146–156.  
doi:[10.1016/j.jhydrol.2007.07.002](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.07.002)
- ITGE, 1991. Estudio hidrogeológico del Campo de Cartagena (2<sup>a</sup> fase).
- ITGE, 1993. Las aguas subterráneas del Campo de Cartagena (Murcia). Madrid.
- Jiménez-Martínez, J., Aravena, R., Candela, L., 2011. The role of leaky boreholes in the contamination of a regional confined aquifer. A case study: The Campo de Cartagena region, Spain. *Water, Air, Soil Pollut.* 215, 311–327. doi:[10.1007/s11270-010-0480-3](https://doi.org/10.1007/s11270-010-0480-3)
- Jiménez-Martínez, J., García-Aróstegui, J.L., Hunink, J.E., Contreras, S., Baudron, P., Candela, L., 2016. The role of groundwater in highly human-modified hydrosystems: a review of impacts and mitigation options in the Campo de Cartagena-Mar Menor coastal plain (SE Spain). *Environ. Rev.* 24, 377–392. doi:[10.1139/er-2015-0089](https://doi.org/10.1139/er-2015-0089)
- Kamble, B., Irmak, A., Hubbard, K., 2013. Estimating Crop Coefficients Using Remote Sensing-Based Vegetation Index. *Remote Sens.* 5, 1588–1602. doi:[10.3390/rs5041588](https://doi.org/10.3390/rs5041588)
- Mutiibwa, D., Irmak, S., 2013. AVHRR-NDVI-based crop coefficients for analyzing long-term trends in evapotranspiration in relation to changing climate in the U.S. High Plains. *Water Resour. Res.* 49, 231–244. doi:[10.1029/2012WR012591](https://doi.org/10.1029/2012WR012591)
- Naoum, S., Tsanis, I.K., 2003. Temporal and spatial variation of annual rainfall on the island of Crete, Greece. *Hydrol. Process.* 17, 1899–1922. doi:[10.1002/hyp.1217](https://doi.org/10.1002/hyp.1217)
- Pérez-Cutillas, P., 2013. Modelización de propiedades físicas del suelo a escala regional. Casos de estudio en el Sureste Ibérico. Universidad de Murcia.
- Rodríguez Estrella, T., 1995. Funcionamiento hidrogeológico del Campo de Cartagena. *Hidrogeología* 11, 21–38.
- Samper, F.J., 1997. Evaluación de la recarga a partir de modelos numéricos de flujo en acuíferos, in: Custodio, E., Llamas, M.R., Samper, J. (Eds.), *La Evaluación de La Recarga a Los Acuíferos En La Planificación Hidrológica*. Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE), Madrid, pp. 153–180.
- Senent, M., Martínez Vicente, D., Cabezas, F., García-Aróstegui, J.L., Baudrón, P., 2009.

- Aproximación mediante modelización matemática a la evaluación de las descargas del acuífero cuaternario del Campo de Cartagena al Mar Menor (Murcia), in: El Mar Menor. Estado Actual Del Conocimiento Científico. Fundación Instituto Euromediterráneo del Agua, Murcia, pp. 109–130.
- Singh, R., Irmak, A., 2009. Estimation of Crop Coefficients Using Satellite Remote Sensing. *J. Irrig. Drain. Eng.* 135, 597–608. doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000052
- Terink, W., Lutz, A.F., Simons, G.W.H., Immerzeel, W.W., Droogers, P., 2015. SPHY v2.0: Spatial Processes in HYdrology. *Geosci. Model Dev.* 8, 2009–2034. doi:10.5194/gmd-8-2009-2015
- TRAGSATEC, 2008. Estudio hidrogeológico previo para el apoyo al estudio de viabilidad para la ejecución de zanjas drenantes en el Mar Menor. Cartagena.
- TRAGSATEC, 2013. Informe hidrogeológico de la red de drenaje de aguas salobres del Campo de Cartagena. Cartagena.
- Villalobos, F.J., Orgaz, F., Fereres, E., 2006. Estudio sobre las necesidades de agua de riego de los cultivos en la zona del trasvase Tajo-Segura. Murcia.
- Wösten, J.H.M., Pachepsky, Y., Rawls, W.J., 2001. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *J. Hydrol.* 251, 123–150. doi:10.1016/S0022-1694(01)00464-4
- Yeh W.W.G. (1986). Review of parameter estimation procedures in groundwater hydrology: The inverse problem. *Water Resour Res* 22: 95-108.



## 7 Anejo I. Base de datos espacial

### 7.1 Características principales y versiones

Para la ejecución de este estudio se han recopilado y/o generado decenas de datos espaciales en formato raster o vectorial que se han integrado en una geodatabase o base de datos espacial. Todas las capas disponibles y generadas durante el transcurso del proyecto se han georreferenciado bajo un sistema de proyección único ETRS89 – UTM Zona 30 (EPSG: 25830) (<http://spatialreference.org/ref/epsg/etrs89-utm-zone-30n/>).

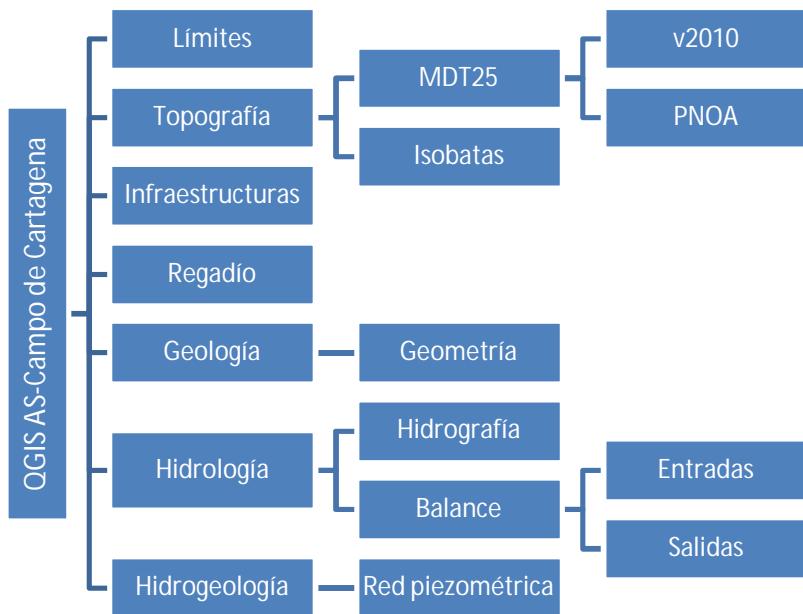
La base de datos espacial es una estructura de archivos o “entidades” en formato raster (archivos con extensión *.tif*) o vectorial (extensión *.shp*) que está en continua evolución en respuesta a las necesidades de información espacial o a la generación de nuevos resultados. La base de datos geoespacial se gestiona utilizando la plataforma de acceso libre y código abierto QGIS (<http://www.qgis.org/es/site/>). Una primera versión de la base de datos geoespacial fue entregada al cliente a finales de junio. Una versión definitiva incluyendo los resultados del proyecto se entrega como parte integrante de la Memoria final (Tabla 11).

**Tabla 11. Versiones de la geodatabase y plazos de entrega.**

Versión	Entrega
V0.1	Junio 2017
V1.0	Octubre 2017

### 7.2 Estructura interna

Las entidades que integran la base de datos geoespacial se han agrupado según grupos y subgrupos dependiendo del carácter y naturaleza de la información espacial que contienen (Figura 53). La geodatabase se acompaña de una tabla de información en formato Excel donde se listan y describen todas las entidades (Figura 54). En la Figura 55 se muestra un ejemplo del visor QGIS.



**Figura 53. Estructura de la geodatabase (organización de entidades espaciales por grupos).**

A	B	C	D	E
Tipo	Grupo/Subgrupo	Entidad QGIS	Descripción	Ubicación
2 Geodatabase	Límites	Límite_Cuenca_Hidrologica	Límites cuenca hidrológica Campo Cartagena	\GIS\Limites\ctg_hidrol_area.shp
3 Geodatabase	Límites	Límite_Modelo_Hidrológico	Ámbito de simulación modelo hidrológico	\GIS\Limites\pcr_base.shp
4 Geodatabase	Límites	Límite_Modelo_Hidrogeológico	Ámbito de simulación modelo hidrogeológico	\GIS\Limites\lmitre_Modelo_Hidrogeologico_ETRS89.shp
5 Geodatabase	Límites	Límite_Terrestre	Ámbito de la superficie terrestre	\GIS\Limites\lmitre_terrestre.shp
6 Geodatabase	Límites	Límite_Uni_Adm	Límite Unidades Administrativas	\GIS\Limites\lmitre_Uni_Adm_ETRS89.shp
7 Geodatabase	Topografía	ISOBATAS500	Isobatas (isolineas de profundidad del lecho) cada 500m	\GIS\Topografía\ISOBATAS500_ETRS89.shp
8 Geodatabase	Topografía\MDT25_PNOA	MDT25_PNOA	Modelo Digital de Elevaciones (topografía superficial)	\GIS\Topografía\MDT25_PNOA\MDT25_PNOA_ETRS89.tif
9 Geodatabase	Topografía\MDT25_PNOA	RELIEVE25_PNOA	Relieve	\GIS\Topografía\MDT25_PNOA\RELIEVE25_PNOA_ETRS89.tif
10 Geodatabase	Topografía\MDT25_PNOA	ISOHIPSAS25_PNOA_50m	Isolíneas (isolineas de altitud) cada 50 m	\GIS\Topografía\MDT25_PNOA\ISOHIPSAS25_PNOA_50m_ETRS89.shp
11 Geodatabase	Topografía\MDT25_2010	MDT25_2010	Modelo Digital de Elevaciones (topografía superficial)	\GIS\Topografía\MDT25_2010\MDT25_2010_ETRS89.tif
12 Geodatabase	Regadío	CHS_UDAs	Unidades de Demanda Agraria del Plan Hidrológico	\GIS\Regadío\CHS_UDAs_ETRS89.shp
13 Geodatabase	Regadío	CCRCC_Sectores Riego	Sectores de Riego de la CCRR Campo de Cartagena	\GIS\Regadío\CCRCC_Sectores_ETRS89.shp
14 Geodatabase	Regadío	CCRAS_Parcelario	Parcelario de la CCRR de Arco Sur	\GIS\Regadío\CCRAS_Parcelario_ETRS89.shp
15 Geodatabase	Infraestructuras	Canal_ATS	Canal del Trasvase Tajo-Segura	\GIS\Infraestructuras\CHS_Canal_ATS_ETRS89.shp
16 Geodatabase	Infraestructuras	Canal_MCT	Canal de la Mancomunidad de los Canales del Tajo	\GIS\Infraestructuras\CHS_Canal_Taibilla_ETRS89.shp
17 Geodatabase	Infraestructuras	CCRAS_Red_Drenaje	Principales elementos red de drenaje de la CCRR	\GIS\Infraestructuras\CCRAS_RedDrenaje_ETRS89.shp
18 Geodatabase	Geología	Litología_IGME_1:200000	Mapa litológico Escala 1:200000	\GIS\Geología\MapaGeo_1_200000_ED50N_30N_23030.0.tif
19 Geodatabase	Geología	Contorno Cuaternario	Límite de acuífero cuaternario	\GIS\Geología\CC_Cuaternario_ETRS89.shp
20 Geodatabase	Imagenes	Ortofoto_2013_RM (WMS)	Ortofoto para la Región de Murcia (fecha: 2013, s <a href="http://iderm.imita.es/arcgis/services/Raster/Orto_2013_UTM_ETRS89/">http://iderm.imita.es/arcgis/services/Raster/Orto_2013_UTM_ETRS89/</a>	
21 Geodatabase	Hidrogeología	CHS Red Piezométrica	Red de control piezométrico de la Cuenca del Segura	\GIS\Hidrogeología\CHS_Red_Piezo_ETRS89.shp
22 Geodatabase	Hidrogeología	TRAGSA2013	Pozos en tables informe TRAGSATEC 2013	\GIS\Hidrogeología\TRAGSA2013_ETRS89.shp
23 Geodatabase	Hidrogeología	CCRAS Carmolí Pozos	Pozos piezometría Carmolí	\GIS\Hidrogeología\CCRAS_Carmoli_Pozos_ETRS89.shp
24 Geodatabase	Hidrogeología	IGME y Joaquín Jiménez	Parte de los pozos facilitados por José Luis Arostegui en proximidad a la CCRR	\GIS\Hidrogeología\IGME_JoaquinJimenez_Pozos_JLA_OrijeD50_Proy_ETRS89.shp
25 Geodatabase	Hidrogeología	IEA y Carmolí	Pozos facilitados por José Luis Arostegui en proximidad a la CCRR	\GIS\Hidrogeología\IEA_Carmoli_Pozos_JLA_OrijeETRS89.shp
26 Geodatabase	Hidrología\Meteo	Red_Meteo	Estaciones Meteorológicas del Campo de Cartagena	\GIS\Hidrología\Red_Meteo_CC_ETRS89.shp
27 Geodatabase	Hidrología\Meteo	preYYYYMM	Mapas mensuales precipitación (oct-2000 - dic-2013)	\GIS\Hidrología\Red_Meteo\preYYYYMM.tif
28 Geodatabase	Hidrología\Meteo	petYYYYMM	Mapas mensuales evapotranspiración potencial (oct-2000 - dic-2013)	\GIS\Hidrología\Red_Meteo\petYYYYMM.tif
29 Geodatabase	Hidrología\NDVI	ndYYYYMM	Mapas mensuales de verde máx. de la superficie	\GIS\Hidrología\Red_Meteo\ndYYYYMM.tif
30 Geodatabase	Hidrología\Suelos	soil_ksat	Soil saturated hydraulic conductivity (250m)	\GIS\Hidrología\Suelos\soil_ksat.tif
31 Geodatabase	Hidrología\Suelos	soil_sat	Saturación (250m)	\GIS\Hidrología\Suelos\soil_sat.tif
32 Geodatabase	Hidrología\Suelos	soil_fc	Capacidad de campo (250m)	\GIS\Hidrología\Suelos\soil_fc.tif
33 Geodatabase	Hidrología\Suelos	soil_wp	Punto marchitez (250m)	\GIS\Hidrología\Suelos\soil_wp.tif
34 Geodatabase	Hidrología\Hidrografía	Ramblas	Red ramblas	\GIS\Hidrología\Hidrografía\Ramblas_ETRS89.shp

**Figura 54. Tabla de información asociada a la geodatabase.**



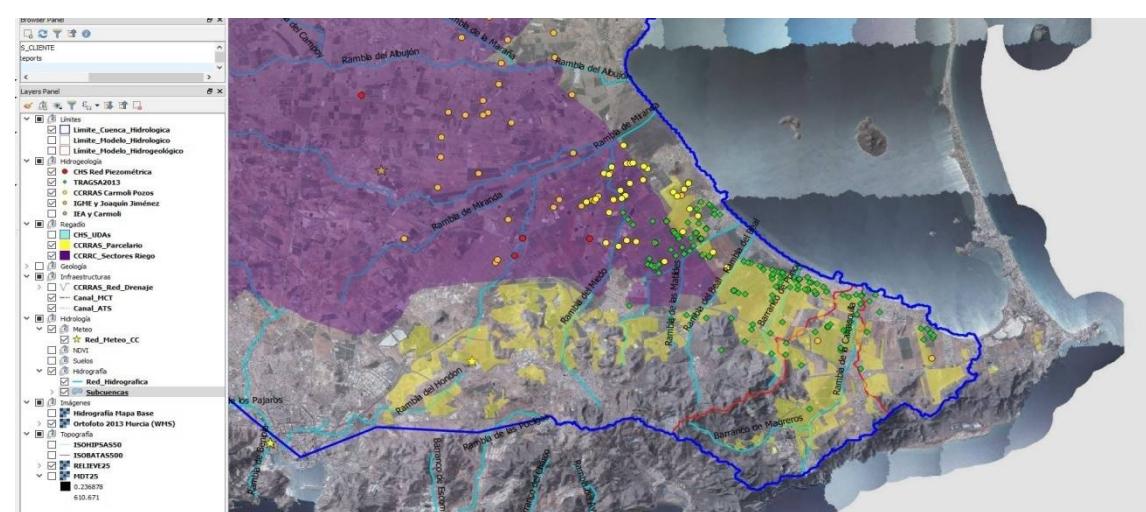
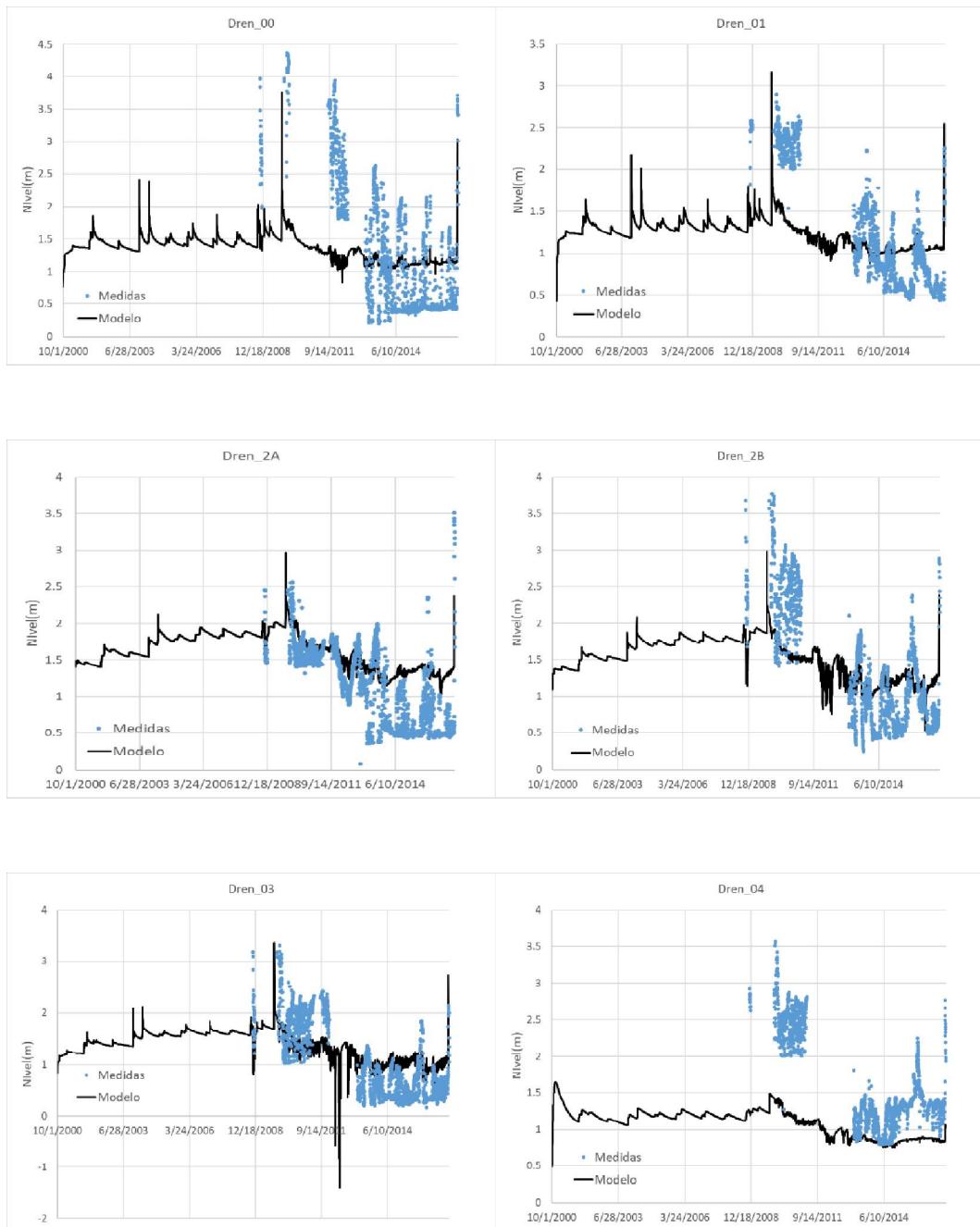
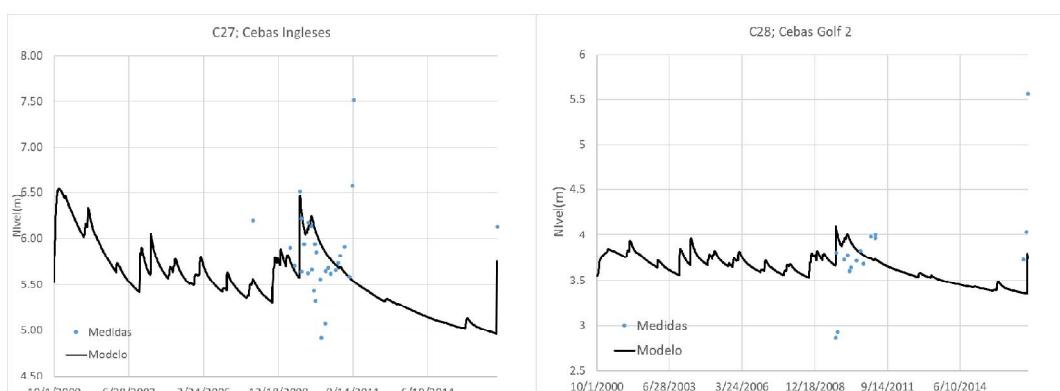
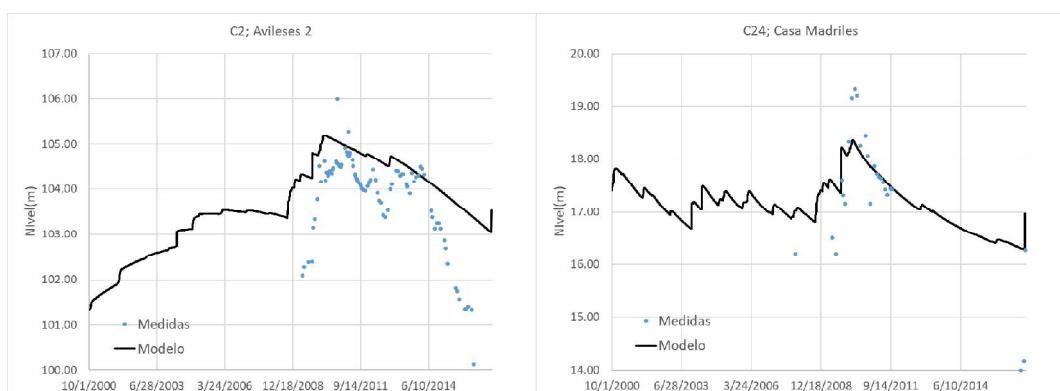
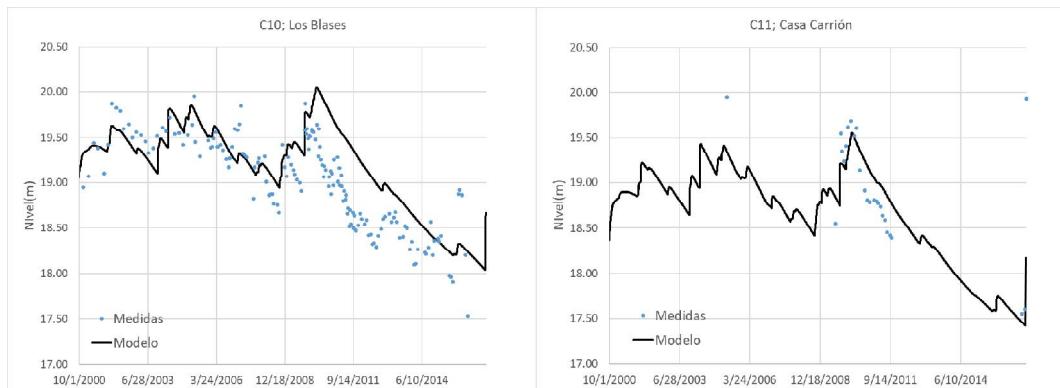
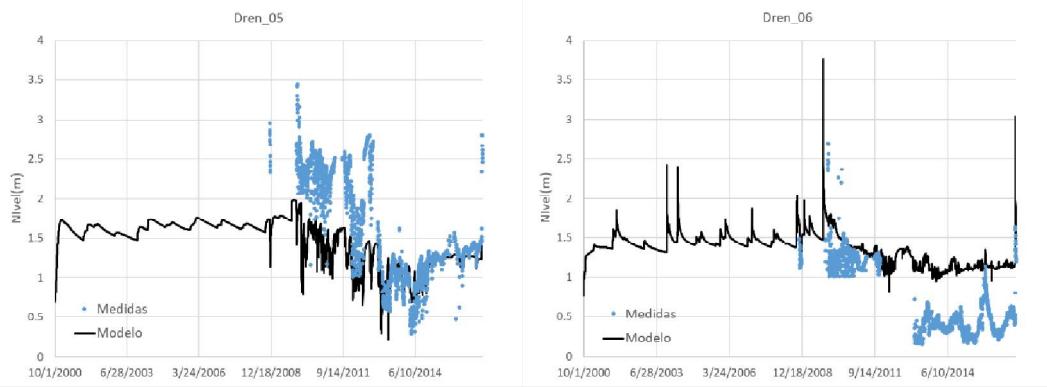


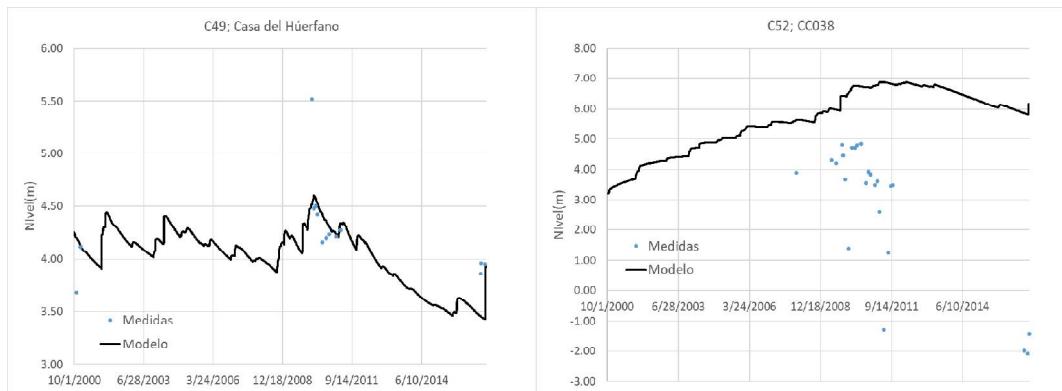
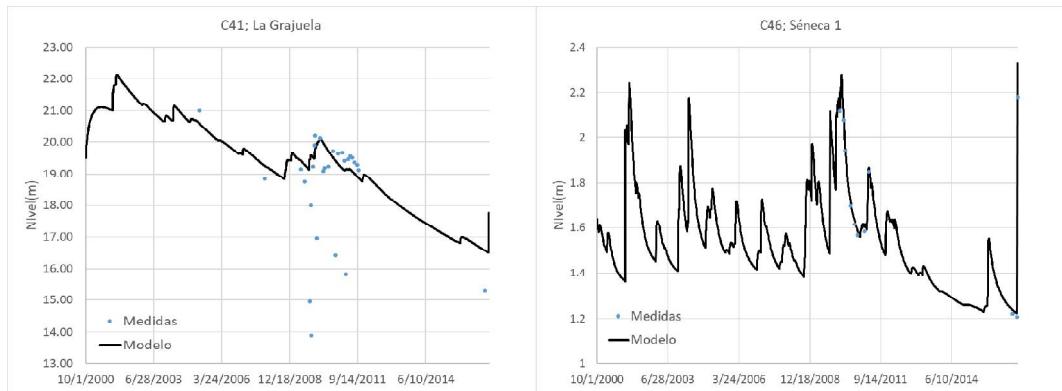
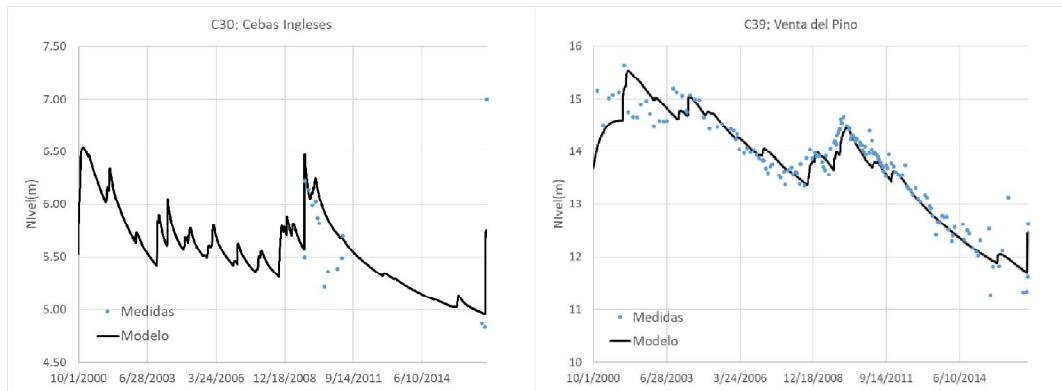
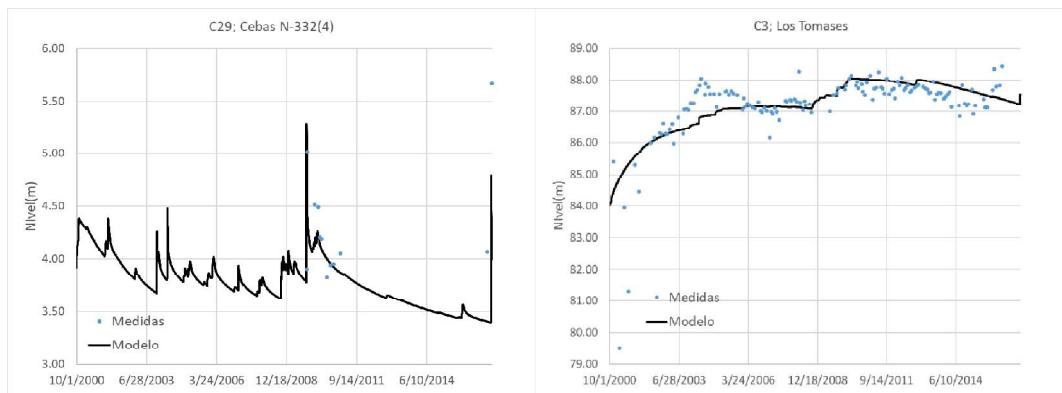
Figura 55. Visor QGIS con la geodatabase Arco Sur-Campo de Cartagena.

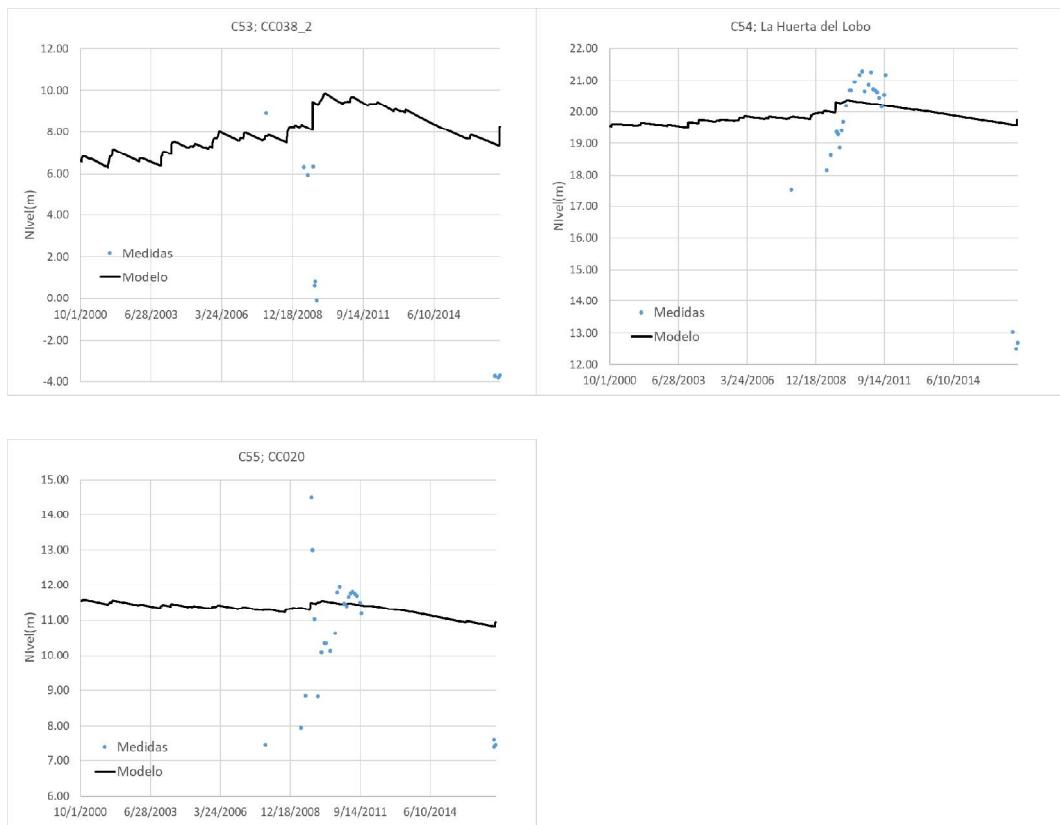
## 8 Anexo II. Niveles piezométricos calculados y medidos

Las gráficas siguientes presentan la comparación entre niveles calculados (línea negra) y medidos (círculos azules) en los pozos con serie larga de medidas utilizados para la calibración del modelo hidrogeológico. De las medidas presentadas en adelante, se han descartado para la calibración aquellas medidas en las que se detecta el impacto de un bombeo cercano, dado que las únicas extracciones consideradas en el modelo son las de los drenes en el ámbito de actuación de CCRR Arco Sur.









**Figura 56. Niveles calculados (línea negra) y medidos (símbolos azules) en los pozos con serie larga de medidas utilizados para la calibración del modelo.**

# 9 Anejo III. Bases matemáticas de la simulación numérica

## 9.1 Anejo III.1. Modelización hidrológica superficial: conceptualización de procesos y métodos de cálculo

### 9.1.1 Entradas por precipitación y aportes de riego.

La precipitación (pre) y los aportes de riego (irr) representan las principales entradas de agua al suelo:

$$I = pre + irr \quad \text{Ec. (5)}$$

La precipitación es una variable externa conocida y cuantificada a partir de datos meteorológicos y técnicas de interpolación. En cambio, los aportes por riego son una variable desconocida que se estima indirectamente en SPHY-CC a partir de la simulación del agua en el suelo y la evapotranspiración potencial.

Las pérdidas por: 1)evaporación debido a la intercepción de la lluvia por la vegetación (*int*), 2) escorrentía superficial por saturación (*rof*), 3) evapotranspiración (*eta*), y 4) percolación profunda (*per*) constituyen las principales salidas de agua del sistema:

$$O = in + rof + eta + per \quad \text{Ec. (6)}$$

### 9.1.2 Pérdidas por intercepción y escorrentía superficial

Antes de que la lluvia alcance el suelo, las pérdidas por intercepción se cuantifican de acuerdo con un coeficiente  $\alpha$  definido por el usuario y la fracción del suelo cubierto por la vegetación (FVC):

$$int = pre \cdot \alpha \cdot FVC \quad \text{Ec. (7)}$$

FVC simula el área cubierta por la vegetación por unidad de suelo, y se estima a partir del valor observado del índice de verdor de la superficie (NDVI o Indice Verde Normalizado) y los valores representativos de un suelo completamente cubierto por vegetación y un suelo desnudo (Carlson and Riziley, 1997):

$$FVC = \left( \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{p \cdot NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \right)^y \quad \text{Ec. (8)}$$

El parámetro  $y$  controla la forma de la función y comúnmente adopta valores entre 1 y 2. El parámetro  $p$  es un parámetro de tolerancia, con valor entre 0 y 1, que reduce el umbral máximo

de NDVI que se asume para una superficie completamente cubierta por vegetación. Para SPHY-CC se ha asumido valores de 1 para ambos parámetros.

Una vez descontadas las pérdidas por intercepción, el volumen de precipitación restante ingresa en el sistema añadiéndose al agua previamente almacenada en el suelo. Si el volumen total de agua sobrepasa la capacidad de saturación del suelo ( $S_{sat}$ ), entonces se genera escorrentía por saturación (rof):

$$rof = \max[0, (S_{t-1} + pre - int) - S_{sat}] \quad \text{Ec. ( 9 )}$$

#### 9.1.3 Cálculo de la evapotranspiración y aportes de riego

En SPHY-CC, la demanda de agua de la vegetación puede suplirse por dos vías: a) a través del agua almacenada en el suelo en periodos precedentes, o b) a través de aportes de riego cuando el agua contenida en el suelo no resulta suficiente para cubrir la demanda del cultivo. Según esta aproximación, la evapotranspiración real se calcula como:

$$eta = eta^{sm} + eta^{irr} \quad \text{Ec. ( 10 )}$$

Para el cálculo de la fracción de evapotranspiración satisfecha por el agua almacenada en el suelo o  $eta^{sm}$  se utiliza la aproximación IV-CC o Índice de Vegetación-Coeficiente de Cultivo (Contreras et al., 2011; Glenn et al., 2011; Kamble et al., 2013) y un factor de estrés hídrico que regula la pérdida de agua. La aproximación IV-CC combina las medidas satelitales de un Índice de Vegetación (IV) con datos meteorológicos obtenidos en estaciones de observación terrestre para estimar la evapotranspiración potencial o  $etr$ , esto es la máxima tasa de evapotranspiración esperable bajo condiciones de no estrés hídrico. Los índices satelitales de vegetación se consideran buenos indicadores de la fracción de la vegetación que está fotosintéticamente activa y por tanto de los procesos fisiológicos de la planta (absorción de  $CO_2$ , generación de biomasa y evapotranspiración). El uso de los índices de vegetación para la estimación de los coeficientes de cultivo y la evapotranspiración es una práctica ampliamente contrastada (ver revisiones de Groenveld (2007) y Glenn et al. (2010)).

El cálculo de  $eta^{sm}$ , se estima según:

$$eta^{sm} = \begin{cases} etr * k_c * \zeta, & S - S_{wp} > etr * k_c * \zeta \\ S - S_{wp}, & S - S_{wp} < etr * k_c * \zeta \end{cases} \quad \text{Ec. ( 11 )}$$

Donde,  $etr$  es la evapotranspiración de referencia calculada según la ecuación de Penman-Monteith (Allen et al., 1998),  $k_c$  es el coeficiente de evapotranspiración de la vegetación/cultivo,  $\zeta$  es un coeficiente de estrés dependiente del contenido de agua del suelo, y  $S - S_{wp}$  es el volumen de agua disponible para evapotranspiración en la zona radicular.

Para el cálculo del coeficiente de evapotranspiración, SPHY usa el índice de vegetación NDVI como subrígido-predictor. La definición de la función NDVI-kc resulta un paso crítico en la implementación de SPHY y el cálculo de las pérdidas por evapotranspiración. En algunos estudios, la adopción de una función lineal “general” se ha demostrado suficiente para la

estimación de la evapotranspiración a escala local o de paisaje(Kamble et al., 2013; Mutiibwa and Irmak, 2013; Singh and Irmak, 2009). Sin embargo, el ajuste puede mejorarse cuando se adoptan funciones específicas según el tipo de vegetación y cultivo, ya que de esta manera se estarían reconociendo las diferencias fenológicas entre diferentes grupos funcionales de vegetación (por ejemplo, sistemas leñosos vs arbustivos vs herbáceos, cítricos vs hortícolas, etc. )[Glenn et al., 2011]. El modelo SPHYpermite adoptar ambas aproximaciones: 1) función lineal general o, 2) una función combinada que resulta de la combinación de dos funciones específicas que representan dos tipos de sistema vegetativo.

En el modelo SPHY-Campo de Cartagena se ha optado por una aproximación de función lineal única para la zona no regable – para la cual se asume la dominancia de un sistema herbáceo-arbustivo con elementos arbustivos no superiores a 1 m de altura -, y una aproximación dual que diferencia entre dos funciones tipo: a) la primera, para caracterizar un sistema dominado por cítricos, y b) la segunda, para caracterizar un sistema dominado por hortícolas. Para el cálculo de  $K_c$ , SPHY-CC usa fracción de cobertura vegetal -FVC (Ec. 12) para escalar linealmente entre un valor tipo de un coeficiente de evaporación de un suelo desnudo (FVC=0), y un valor tipo del coeficiente de evapotranspiración de la vegetación/cultivo cuando alcanza su máxima cobertura o verdor (FVC=1):

$$k_c = \min \left[ 1, k_{c,\max}, k_{c,\min} + (k_{c,\max} - k_{c,\min}) \cdot FVC \right] \quad \text{Ec. ( 12 )}$$

El coeficiente de estrés impuesto por el contenido de agua disponible en la zona activa del suelo se estima de acuerdo con:

$$\zeta[s(t), t] = \min \left[ 1, \frac{s - s_{wp}}{s_{fc} - s_{wp}} \right] \quad \text{Ec. ( 13 )}$$

siendo  $s$  el contenido de humedad del suelo simulado en el tiempo  $t$ , y  $s_{wp}$  and  $s_{fc}$  los valores relativos de humedad del suelo para el punto de marchitez y capacidad de campo, respectivamente.

En SPHY-CC, se asume que el agua de riego solo se aporta en las zonas regables solo y cuando la demanda potencial ( $etp=etr*k_c$ ) no es satisfecha al 100% por el agua efectiva contenida en el suelo. Así,

$$eta^{irr} = \begin{cases} etp - eta^{sm}, & \text{en zonas regables} \\ 0, & \text{en zonas no regables} \end{cases} \quad \text{Ec. ( 14 )}$$

Una vez calculada la cantidad de agua de riego estimada para suprir la demanda del cultivo a nivel de celda, se calcula el volumen de riego aplicado teniendo en cuenta el coeficiente de pérdidas (o eficiencia de riego) característico a nivel de parcela

$$irr = eta^{irr} / \varepsilon_{irr} = eta^{irr} / 1 - CP_{irr} / 100 \quad \text{Ec. ( 15 )}$$

Donde,  $\varepsilon_{irr}$  es la eficiencia de riego entre 0 y 1 (0.9 representa una eficiencia de riego del 90%), y  $CP_{irr}$  es el coeficiente de pérdidas en % (una eficiencia de 0.9 equivale a un coeficiente de

pérdidas del 10%). Las pérdidas de agua por riego incrementarían el volumen de agua contenida en la zona activa del suelo.

#### 9.1.4 Pérdidas por percolación profunda (recarga en tránsito)

SPHY-CC considera dos mecanismos de generación de percolación (Figura 14); a) un flujo preferencial o “rápido” ( $per_{pref}$ ) hacia la zona no saturada, y b) un flujo difuso o “lento” ( $per_{diff}$ ). Para el cálculo del primero se asume una pérdida porcentual de la precipitación una vez descontadas las pérdidas por intercepción (Ec. 17). La componente de flujo preferencial se ha considerado nula en SPHY-CC. La generación de percolación difusa tiene lugar cuando la humedad del suelo supera el valor de capacidad de campo (agua drenable)(Ec. 18).

$$per = per_{pref} + per_{diff} \quad \text{Ec. ( 16 )}$$

$$per_{pref} = (pre - int) \cdot \varepsilon_{inf} \quad \text{Ec. ( 17 )}$$

$$per_{diff} = \min \left[ (S - S_{fc}), (S - S_{fc}) \cdot \left( \frac{S - S_{fc}}{S_{sat} - S_{fc}} \right)^{\beta} \right] \quad \text{Ec. ( 18 )}$$

siendo  $S-S_{fc}$  el volumen de agua drenable contenido en el suelo y  $\beta$  un coeficiente calibrado que regula la velocidad con que el agua del suelo se drena en función del agua total drenable disponible en el suelo ( $\beta=5$  en este estudio). En la Figura 57 se muestra la sensibilidad de la función de generación de percolación difusa a los valores del coeficiente  $\beta$ .

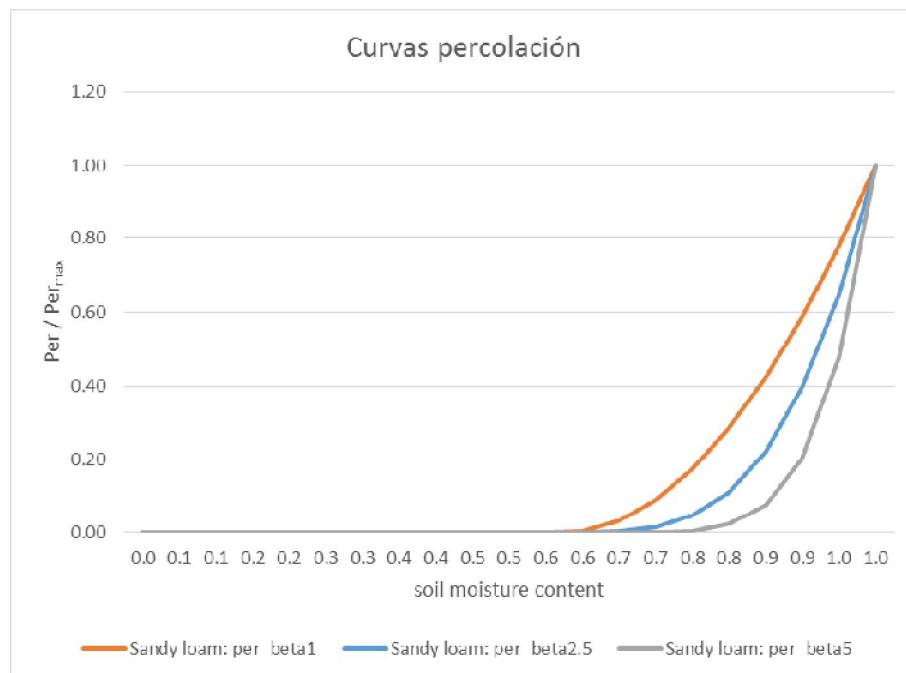


Figura 57. Sensibilidad de la función de generación de percolación difusa ( $per_{diff}$ ) en función del parámetro  $\beta$  para un suelo franco arenoso.

## 9.2 Modelización hidrológica subterránea: la ecuación de flujo con densidad variable

Si bien todos los resultados del modelo se presentan en términos de nivel piezométrico equivalente de agua dulce, la variable primaria que resuelve el software SUTRA es presión de agua,  $p$  [Pa=kg/(ms<sup>2</sup>)]. La relación entre nivel piezométrico y presión se establece a través del trinomio de Bernouilli, el cual, despreciando el término de velocidad del agua subterránea por su pequeña magnitud, establece que:

$$h = z + p / (\rho g) \quad \text{Ec. (19)}$$

donde  $h$  [m] es el nivel piezométrico,  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] es la densidad del fluido y  $g$  [m/s<sup>2</sup>] es la aceleración de la gravedad.

La variable primaria para la resolución de la ecuación de transporte de solutos es la concentración o fracción mísica de soluto  $C=M_s/M$ , expresada como el cociente entre masa de soluto  $M_s$  [kg] y masa de agua  $M$  [kg]. La densidad y la viscosidad del fluido dependen de la presión y de la concentración de soluto. De hecho, si se define la concentración volumétrica del fluido como  $c$  [kg/m<sup>3</sup>]= $\rho C$ , entonces la densidad se define como  $\rho=\rho_w+c$ , siendo  $\rho_w$  la densidad del agua pura. SUTRA simula la densidad en función de la fracción mísica mediante una expansión de Taylor de primer orden:

$$\rho(C) = \rho_0 + \frac{\partial \rho}{\partial C} (C - C_0) \quad \text{Ec. (20)}$$

donde  $\rho_0$  es la densidad de referencia de un fluido con concentración  $C_0$ . La viscosidad dinámica del fluido suele tomarse constante, con valor  $\mu=10^{-3}$  kg/(ms).

Las propiedades del fluido también dependen del espacio. El volumen total de medio poroso se compone de una matriz de granos sólidos y del espacio de poros entre ellos. El volumen de poros puede estar completa o parcialmente saturado por el fluido (o por gas). Se define la porosidad  $\varepsilon$  [-] del medio como la relación entre el volumen de poros y el volumen total (matriz+poros). La fracción del volumen total ocupada por el fluido es  $\varepsilon S_w$ , siendo  $S_w$  [-] el grado de saturación del medio, definido como el cociente entre el volumen de fluido y el volumen de poros. Cuando  $S_w = 1$  se habla de medio saturado. Si  $S_w < 1$ , se trata de un medio parcialmente saturado, en el que el fluido se adhiere a los granos sólidos por efecto de tensiones capilares (efecto de succión). En este caso, la presión de fluido es menor que la atmosférica (de hecho, negativa, pues se suele trabajar con presiones relativas a la atmosférica, considerada como cero absoluto), y se habla de presión capilar.

En este trabajo se ha considerado dicha posibilidad, que tiene especial relevancia en las primeras capas de suelo, por encima del nivel piezométrico (o freático en un acuífero libre). Tradicionalmente, se suele presentar el medio de forma simplificada, asumiéndose que, por encima de la superficie piezométrica, el suelo está seco ( $S_w=0$ ). Esto no es así en la práctica, dado que la saturación del suelo es mayor cuanto más cerca se encuentra la superficie piezométrica. De hecho, puede ocurrir que la primera capa (edáfica) esté casi totalmente saturada, pero la capa inmediatamente inferior no lo esté, o viceversa. La saturación del suelo

se ha modelado mediante la función de van Genuchten (1980), que relaciona saturación con presión capilar:

$$S_w = S_{w,res} + (1 - S_{w,res}) \left[ \frac{1}{1 + (ap_c)^n} \right]^{\frac{n-1}{n}} \quad \text{Ec. ( 21 )}$$

donde  $S_{w,res}$  es una saturación mínima o residual por debajo de la cual el fluido no puede moverse, y  $a$  y  $n$  son parámetros.

La masa total de fluido contenida en el volumen total, VOL (volumen de matriz + volumen de poros) es  $(\varepsilon S_w \rho) VOL$ . Como se observa, dicha masa depende sólo de la concentración de soluto y de la presión, a través de la saturación del medio y de la densidad del fluido. El cambio en la masa total de agua en un volumen VOL, que se asume constante (es decir, el medio no se deforma), se expresa como:

$$VOL \cdot d(\varepsilon S_w \rho) = VOL \cdot \left[ \frac{\partial(\varepsilon S_w \rho)}{\partial p} dp + \frac{\partial(\varepsilon S_w \rho)}{\partial C} dC \right] \quad \text{Ec. ( 22 )}$$

Nótese que la saturación  $S_w$  sólo depende de la presión de fluido, que la porosidad  $\varepsilon$  no depende de la fracción mísica y que el factor  $\frac{\partial(S_w)}{\partial p}$  se deriva directamente de la Ec. 21:

$$\frac{\partial(S_w)}{\partial p} = \left[ \frac{a(n-1)(1-S_{w,res})(ap_c)^{n-1}}{(1+(ap_c)^n)^{\frac{2n-1}{n}}} \right] \quad \text{Ec. ( 23 )}$$

Además, el factor  $\frac{\partial\rho}{\partial C}$  es un valor constante y dado, (1040 kg/m<sup>3</sup>/kg/kg en este trabajo).

La capacidad de almacenamiento del acuífero bajo condiciones de saturación total está, por definición, relacionada con el factor  $\frac{\partial(\varepsilon\rho)}{\partial p}$  (Bear, 1972):

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho)}{\partial p} = \rho S_{op} \quad \text{Ec. ( 24 )}$$

siendo  $S_{op}$  [ms<sup>2</sup>/kg] el almacenamiento específico en términos de presión (volumen de agua liberado por un medio poroso saturado, por unidad de volumen total, al variar la presión en una unidad):

$$S_{op} = \frac{1}{VOL} \frac{\partial VOL}{\partial p} \quad \text{Ec. ( 25 )}$$

Nótese que el almacenamiento específico  $S_0$ , que multiplicado por el espesor saturado define el bien conocido coeficiente de almacenamiento ( $S$ ), está relacionado con  $S_{op}$  mediante la relación:

$$S_o = \rho |g| S_{op} \quad \text{Ec. ( 26 )}$$

El movimiento del fluido en un medio poroso está condicionado por (1) diferencias de presión y (2) diferencias de densidad de fluido entre dos puntos del medio. Los mecanismos que condicionan el flujo se modelan en SUTRA mediante la forma general de la ley de Darcy:

$$\mathbf{v} = - \left( \frac{kk_r}{\varepsilon S_w \mu} \right) (\nabla p - \rho \mathbf{g}) \quad \text{Ec. ( 27 )}$$

donde  $\mathbf{v}$  [m/s] es la velocidad del fluido con respecto a la matriz inmóvil,  $\mathbf{k}$  [m<sup>2</sup>] es el tensor de permeabilidad,  $k_r$  es la permeabilidad relativa y  $\mathbf{g}$  [m/s<sup>2</sup>] es el vector de aceleración de la gravedad. Como se observa, la movilidad del fluido depende de las propiedades del medio (permeabilidades y porosidad), pero también del fluido (a través de la viscosidad) y de la interacción entre ambos (a través del grado de saturación). Si se asume que el flujo (o la velocidad) no depende de la densidad ni de la saturación, la ecuación 23 puede escribirse como la tradicional ley de Darcy para suelos saturados, en términos de nivel piezométrico y conductividad hidráulica:

$$\mathbf{v} = - \left( \frac{K}{\varepsilon} \right) \nabla h \quad \text{Ec. ( 28 )}$$

Las ecuaciones anteriores se integran en la ecuación de balance de masas de agua en el medio, que expresa como varía la masa de agua en el mismo en función del tiempo, por ejemplo, debido a extracciones por bombeos o por descargas. La ecuación de balance (Ec. 3) se expresa de forma matemática como la suma de balances de agua pura y de soluto para un volumen de matriz que se asume indeformable e inmóvil:

$$\frac{\partial(\varepsilon S_w \rho)}{\partial t} = -\nabla(\varepsilon S_w \rho \mathbf{v}) + Q_p + \beta \quad \text{Ec. ( 29 )}$$

donde  $Q_p$  [kg/m<sup>3</sup>s] son términos fuente (aportes >0) o sumidero (extracciones <0) de fluido y  $\beta$  [[kg/m<sup>3</sup>s] son los análogos de soluto (por ejemplo, por disolución o precipitación de minerales). El término de la izquierda representa el cambio total de masa de fluido contenido en los poros con el tiempo. El término gradiente engloba las contribuciones locales al cambio de masa debidos a flujos laterales. Desarrollando la ecuación 29 y despreciando los efectos de mineralización  $\beta$  se obtiene la expresión general de la ecuación de flujo con transporte de soluto y densidad variable:

$$\frac{\partial(\varepsilon S_w \rho)}{\partial t} = \left( S_w \rho S_{op} + \varepsilon \rho \frac{\partial S_w}{\partial p} \right) \frac{\partial p}{\partial t} + \left( \varepsilon S_w \frac{\partial \rho}{\partial C} \right) \frac{\partial C}{\partial t} \quad \text{Ec. ( 30 )}$$

$$\left( S_w \rho S_{op} + \varepsilon \rho \frac{\partial S_w}{\partial p} \right) \frac{\partial p}{\partial t} + \left( \varepsilon S_w \frac{\partial \rho}{\partial C} \right) \frac{\partial C}{\partial t} = -\nabla(\varepsilon S_w \rho \mathbf{v}) + Q_p \quad \text{Ec. ( 31 )}$$

### 9.3 Anejo III.2 Calibración del modelo. El método de problema inverso

La calibración de un modelo, también conocida como problema inverso, problema de optimización, estimación de parámetros, tomografía inversa o “history matching” entre otras, consiste en estimar los parámetros del modelo (por ejemplo, transmisividad y coeficiente de almacenamiento, mostrados en este trabajo a través del cociente entre ellos, la difusividad hidráulica) a partir de medidas de la respuesta del acuífero (niveles piezométricos en este trabajo) y de información previa, apropiadamente ponderada, sobre los propios parámetros (Carrera et al. 2005). La objetivo ideal de la calibración sería el de encontrar el conjunto de parámetros (que varían en el espacio) que hace que la respuesta del modelo sea igual a los niveles piezométricos reales en el acuífero. No obstante, esto es utópico, puesto que el error “cero” no puede obtenerse nunca. Por diversos motivos:

1. Las ecuaciones del modelo resultan de simplificar el sistema físico.
2. La resolución de dichas ecuaciones no es exacta ni tampoco en todos los puntos del espacio, dado que sólo se resuelve en los nudos de la malla o en los centroides de sus elementos y en el resto de puntos se interpola. Además, deben tenerse en cuenta los errores de redondeo inherentes a cualquier proceso computacional.

Las medidas de niveles disponibles siempre contienen errores, por ejemplo, siendo el más común de ellos el debido a la precisión del ojo humano, del orden de medio milímetro.

Ninguno de los errores anteriores puede conocerse de forma individual. Sin embargo, la suma de todos ellos, esto es, la diferencia entre los niveles calculados y los niveles medidos, si se conoce.

En adelante, el vector  $\mathbf{z}$  denota valores calculados y contiene los valores calculados de la variable de estado (nivel piezométrico) y los valores de los parámetros del modelo a lo largo del proceso iterativo o de calibración/optimización. De forma correspondiente, el vector  $\mathbf{z}^*$  contiene los valores medidos y la información previa sobre los parámetros del modelo. Se utiliza la expresión “información previa” en lugar de “medidas de parámetros” porque raramente (como es el caso) se dispone de medidas directas de los parámetros del modelo, sino de estimaciones de sus valores interpretadas, por ejemplo, a partir de ensayos hidráulicos.

La forma usual para definir un buen ajuste entre valores calculados y medidos consiste en definir una función  $F$  de distancia entre  $\mathbf{z}$  y  $\mathbf{z}^*$ , también conocida como función objetivo. Así, el problema de calibración consiste en minimizar dicha función objetivo. En el contexto del problema inverso hidrogeológico se utilizan diversas funciones, y suelen dividirse en dos grupos, en función de si usan o no un contexto estadístico en su definición (Yeh, 1986):

1. Mínimos cuadrados:

$$F = (\mathbf{z} - \mathbf{z}^*)^t (\mathbf{z} - \mathbf{z}^*) \quad \text{Ec. ( 32 )}$$

2. Mínimos cuadrados generalizados: muy similar al anterior, pero permite asignar distintos pesos a cada medida (en el espacio y en el tiempo) en función de su fiabilidad

$$F = (\mathbf{z} - \mathbf{z}^*)^t \mathbf{W} (\mathbf{z} - \mathbf{z}^*) \quad \text{Ec. ( 33 )}$$

donde  $\mathbf{W}$  es una matriz simétrica y definida positiva que contiene los pesos asociados a las medidas y las correlaciones entre los residuos de calibración asociados a las mismas.

3. El método de máxima verosimilitud (ML). Este método maximiza la probabilidad de calcular con el modelo los datos medidos, dado un conjunto de parámetros del modelo. En este caso debe seleccionarse un modelo estadístico, definiendo la verosimilitud de

los parámetros como proporcional a la probabilidad de calcular de forma correcta los valores medidos.

4. El método de máxima verosimilitud a posteriori (MAP), que maximiza la verosimilitud de los parámetros dadas las medidas. También requiere un modelo estadístico de correlación y la formulación y los resultados son muy similares a los de ML.

El hecho de que ML o MAP requieren un modelo estadístico para la calibración de los parámetros del modelo puede parecer un hándicap con respecto a formulaciones más simples como mínimos cuadrados. Sin embargo, es precisamente este modelo estadístico el que permite introducir la información previa sobre los parámetros del modelo. Además, permite evaluar la plausibilidad de los valores de parámetros calculados.

En este trabajo, se ha utilizado la formulación del método de máxima verosimilitud (Edwards 1972). La base del método es el axioma de verosimilitud, según el cual toda la información que un conjunto de datos aporta sobre los méritos relativos de dos hipótesis está contenida en el cociente de verosimilitudes de ambas hipótesis. Sea  $R$  un conjunto de datos medidos y  $H$  una hipótesis del sistema físico (el modelo conceptual y, consecuentemente, su representación en el modelo numérico). Sea  $f(R|H)$  la función de densidad de probabilidad de observar los resultados  $R$  dada la hipótesis  $H$  de acuerdo con el modelo estadístico establecido. La verosimilitud de  $H$  dado  $R$  es, de acuerdo con el axioma de máxima verosimilitud,  $L(H|R) = kf(R|H)$ , donde  $k$  es una constante arbitraria. Nótese que  $k$  toma un único valor para todas las hipótesis  $H$  dado un conjunto de datos  $R$  y un modelo estadístico. El método de máxima verosimilitud consiste pues en encontrar los parámetros que maximizan el valor de  $L(H|R)$ . La definición del modelo estadístico requiere hipótesis adicionales sobre la función de densidad de probabilidad, dado que ésta tampoco se conoce. Los criterios de estimación, o de bondad de ajuste del modelo, se establecen en términos de residuos (esto es, la diferencia entre los valores calculados y medidos). La estructura de dicha diferencia o error es también desconocida. Las fuentes de error que contribuyen a los residuos de calibración se dividen en tres grupos: conceptuales, de cálculo o de medida. Los errores conceptuales proceden de simplificaciones erróneas del modelo físico (por ejemplo, despreciar la densidad variable cuando ésta juega un papel importante). Los errores de cálculo son los de redondeo, inherentes a cualquier cálculo computacional y a cualquier método de interpolación y son generalmente pequeños si la discretización espacio-temporal del modelo, como es el caso, es adecuada. Los errores de medida sobrevienen por interpretaciones incorrectas de los datos (por ejemplo, pozos mal nivelados o georreferenciados) o por toma incorrecta de las medidas (por ejemplo, sensores mal calibrados o nivelados). En resumen, el gran número posible de fuentes de error justifica el uso del teorema del límite central. Esto es, se asume que los errores se distribuyen estadísticamente según una distribución gaussiana.

Bajo esta hipótesis estadística, la función de verosimilitud de los parámetros dados los datos se puede escribir como:

$$L = (2\pi)^{-n/2} (|\mathbf{C}_z|)^{-1/2} \exp \left[ -\frac{1}{2} (\mathbf{z} - \mathbf{z}^*)^t \mathbf{C}_z^{-1} (\mathbf{z} - \mathbf{z}^*) \right] \quad \text{Ec. (34)}$$

donde  $n$  es el número total de medidas (la dimensión de  $\mathbf{z}$  o  $\mathbf{z}^*$ ) y  $\mathbf{C}_z$  es la matriz de covarianza estadística (análoga a  $\mathbf{W}$  en la ecuación 33). Nótese que el vector  $\mathbf{z}^*$  puede acomodar distintos tipos de medidas. Por ejemplo, si se consideran niveles piezométricos  $h$  y concentraciones volumétricas de sólidos disueltos  $c$ , se asume que la matriz de covarianzas es por bloques



(es decir, no hay correlación entre los errores en las medidas de niveles y concentraciones, la ecuación 34 puede reescribirse como:

$$L = (2\pi)^{-n/2} (|\mathbf{C}_h||\mathbf{C}_c||\mathbf{C}_p|)^{-1/2} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( (\mathbf{h} - \mathbf{h}^*)^t \mathbf{C}_h^{-1} (\mathbf{h} - \mathbf{h}^*) + (\mathbf{c} - \mathbf{c}^*)^t \mathbf{C}_c^{-1} (\mathbf{c} - \mathbf{c}^*) + (\mathbf{p} - \mathbf{p}^*)^t \mathbf{C}_p^{-1} (\mathbf{p} - \mathbf{p}^*) \right) \right] \quad \text{Ec. ( 35 )}$$

Usualmente, resulta más sencillo conocer un valor relativo de las covarianzas que sus valores absolutos. Es decir, dar un valor cualitativo a la fiabilidad de una medida es más sencillo que dar un valor absoluto. Por ello, y siguiendo la formulación de Neuman and Yakowitz (1979), se asume que existen escalares desconocidos  $\tau_h$ ,  $\tau_c$ ,  $\tau_i$ ,  $i = 1: n_t$  (número de tipos de medidas) tales que

$$\mathbf{C}_h = \tau_h \mathbf{V}_h \quad \mathbf{C}_c = \tau_c \mathbf{V}_c \quad \mathbf{C}_i = \tau_i \mathbf{V}_i \quad \text{Ec. ( 36 )}$$

donde  $\mathbf{V}_h$ ,  $\mathbf{V}_c$  y  $\mathbf{V}_i$  son matrices conocidas, simétricas y definidas positivas. De hecho,  $\mathbf{V}_h$ ,  $\mathbf{V}_c$  y  $\mathbf{V}_i$  representan el mejor conocimiento disponible para las matrices de covarianza  $\mathbf{C}_h$ ,  $\mathbf{C}_c$  and  $\mathbf{C}_i$ . Bajo esta hipótesis, el problema se reduce a obtener los parámetros  $p$  que maximizan la ecuación 35. Sin embargo, resulta mucho más sencillo minimizar la expresión derivada de tomar el logaritmo natural a ambos lados de la ecuación 35:

$$S = \ln(L) = n \ln(2\pi) + \ln|\mathbf{V}_h| + \ln|\mathbf{V}_c| + \sum_i \ln|\mathbf{V}_i| + n_h \ln \tau_h + n_c \ln \tau_c + \sum_i \ln \tau_i + \tau_h^{-1} F_h + \tau_c^{-1} F_c + \sum_i \tau_i F_i \quad \text{Ec. ( 37 )}$$

donde  $F_h$ ,  $F_c$  y  $F_i$  son las contribuciones parciales de niveles, concentraciones y parámetros a la función objetivo  $S$  y  $n_h$ ,  $n_c$  y  $n_i$  son el número de medidas correspondientes.  $F_h$ ,  $F_c$  y  $F_i$  se definen como:

$$\begin{aligned} F_h &= (\mathbf{h} - \mathbf{h}^*)^t \mathbf{C}_h^{-1} (\mathbf{h} - \mathbf{h}^*) \\ F_c &= (\mathbf{c} - \mathbf{c}^*)^t \mathbf{C}_c^{-1} (\mathbf{c} - \mathbf{c}^*) \\ F_i &= (\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_i^*)^t \mathbf{C}_i^{-1} (\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_i^*) \end{aligned} \quad \text{Ec. ( 38 )}$$

Nótese que, además de los parámetros “físicos” del modelo  $\mathbf{p}$ , la formulación incluye la calibración de los parámetros puramente estadísticos que intervienen en la ecuación 37 ( $\tau_h$ ,  $\tau_c$ ,  $\tau_i$ ).

## 10 Anejo IV. Análisis de geolocalización de pozos

En este anejo se presentan las coordenadas espaciales de los pozos utilizados para la calibración del modelo (Anejo II). La Tabla 12 muestra el código del pozo en el modelo, la toponimia local, sus coordenadas X,Y en sistema de proyección ETRS89-Zona 30N, y la elevación del punto de referencia para las medidas (original y de acuerdo con el Modelo Digital del Terreno, valor este último considerado como válido).

**Tabla 12. Coordenadas de los pozos utilizados para la calibración del modelo.**

Modelo	Toponimia	X_ETRS89	Y_ETRS89	Z_orig	Z_MDT
C10	Los Blases	686549	4180639	21.8	17
C11	Casa Carrión	687133	4181393	20.6	20
C2	Avileses	681712	4191048	119.5	116
C24	Casa Madriles	683078	4175601	25.8	22
C27	Cebas Ingleses	688726	4174170	7.1	6.1
C28	Cebas Golf 2	687856	4177145	6.42	9
C29	Cebas N-332(4)	688437	4175535	5.84	6
C3	Los Tomases	677975	4186961	101.9	103
C30	Cebas Ingleses	688729	4174185	7	6
C39	Venta del Pino	691765	4187735	21.8	24
C41	La Grajuela	691430	4188691	27.6	30
C46	Séneca 1	691858	4181978	4.3	7
C49	Casa del Huérfano	691660	4183760	7	8
C52	CC038	695279	4168020	16.6	18.6
C53	CC038-2	695163	4167810	16.6	19
C54	La Huerta del Lobo	684605	4170393	31.2	33
C55	CC020	694026	4167542	48.3	47

Comunidad de Regantes  
**ARCO SUR MAR MENOR**

[www.cr-arcosur.com](http://www.cr-arcosur.com)  
[arcosurmm@arcosurmm.com](mailto:arcosurmm@arcosurmm.com)  
Tel. +34 968 981 548  
Paraje de los Chaparros, s/n  
30370 - Cabo de Palos - Cartagena - Murcia