



Título del Trabajo Fin de Máster:

***MODELO MATEMÁTICO PARA LA
CARACTERIZACIÓN E INVESTIGACIÓN
DE LA INTERFAZ SALINA DEL
ACUÍFERO DE LA PLANA LITORAL DE
OROPESA-TORREBLANCA (UNIDAD
HIDROGEOLÓGICA 8.11)***

Intensificación:

RECURSOS HÍDRICOS

Autor:

SANZ GARRIDO, IGNACIO

Director/es:

DR. CAPILLA ROMÁ, JOSÉ E.

Fecha: **SEPTIEMBRE 2013**



Título del Trabajo Fin de Máster:

MODELO MATEMÁTICO PARA LA CARACTERIZACIÓN E INVESTIGACIÓN DE LA INTERFAZ SALINA DEL ACUÍFERO DE LA PLANA LITORAL DE OROPESA-TORREBLANCA (UNIDAD HIDROGEOLÓGICA 8.11)

Autor: **SANZ GARRIDO, IGNACIO**

Tipo	A <input type="checkbox"/> B <input checked="" type="checkbox"/>	Lugar de Realización	VALENCIA
Director	JOSÉ E. CAPILLA ROMÁ	Fecha de Lectura	SEPT 2013
Codirector1			
Codirector2			
Tutor			

Resumen:

RESUMEN

La caracterización de los procesos de salinización por intrusión marina en acuíferos costeros requiere la adecuada modelización hidrodinámica del sistema, no siendo suficiente el conocimiento de las descargas al mar. La mayoría de los estudios recientes, desarrollados desde la entrada en vigor de la Directiva Europea del Agua, tienden a cuantificar estos problemas basándose en dichas descargas con la limitación que ello supone. En el presente TFM se ahonda en la investigación de un acuífero costero y en su adecuada modelación matemática. Se ha implementado un modelo matemático de la Plana de Oropesa-Torreblanca (masa de agua subterránea 080.110) de mucha mayor complejidad y precisión que los realizados hasta el momento. Hasta ahora se basaban en modelos de flujo 2D estacionario y, muy recientemente, se tenía uno transitorio. Este TFM aborda la modelación 3D, en régimen transitorio, en condiciones de densidad variable, y con una resolución y parametrización mayores que en todos los modelos previos. Una vez definida la discretización y acciones externas, se han abordado dos modelos de complejidad creciente. El primero calibrando el flujo sin efectos de densidad variable (MODFLOW); el segundo usando un modelo de flujo y transporte con efectos de densidad variable (SEAWAT). Ambos transitorios calibrados para 1973-2009. El nuevo modelo ha requerido profundizar en la interpretación de estudios previos tanto respecto a las acciones externas, como a los parámetros hidrodinámicos y su funcionamiento. Con respecto a los modelos previos, los resultados conforman la intrusión generalizada aunque se determinan flujos y descargas distintos. La intrusión media anual pasa de unos 0.67 hm³/año a 1.67 hm³/año, los flujos laterales de 27.37 hm³/año a 33.42 hm³/año, y las salidas netas al mar de 9.04 hm³/año a 9.24 hm³/año. Así, siendo este el modelo más complejo y preciso construido hasta el momento, calibrado respecto a piezometría y salinidades, se concluye que la intrusión es sensiblemente superior a lo estimado hasta ahora, y que las recargas laterales medias podrían ser hasta un 30% superiores. En todo caso, el nuevo modelo, supone una mejor aproximación de la realidad física que todos los anteriores y, con las limitaciones derivadas de los datos, aporta nuevas cifras del balance de este acuífero. Esto permitirá dirigir, de forma más efectiva, futuros esfuerzos de investigación en la caracterización del acuífero y acciones sobre este.

RESUM

La caracterització dels processos de salinització per intrusió marina en aqüífers costaners requereix l'adequada modelització hidrodinàmica del sistema, no sent suficient el coneixement de les descàrregues al mar. La majoria dels estudis recents, desenvolupats des de l'entrada en vigor de la Directiva Europea de l'Aigua, tendeixen a quantificar aquests problemes basant-se en aquestes descàrregues amb la limitació que això suposa. En el present TFM s'aprofundeix en la investigació d'un aqüífer costaner i en la seva adequada modelació matemàtica. S'ha implementat un model matemàtic de la Plana d'Orpesa-Torreblanca (massa d'aigua subterrània 080.110) de molta més complexitat i precisió que les realitzades fins al moment. Fins ara es basaven en models de flux 2D estacionari i, molt recentment, es tenia un transitori. Aquest TFM aborda la modelació 3D, en règim transitori, en condicions de densitat variable, i amb una resolució i parametrització majors que en tots els models previs. Un cop definida la discretització i accions externes, s'han abordat dos models de complexitat creixent. El primer calibrant el flux sense efectes de densitat variable (MODFLOW), el segon utilitzant un model de flux i transport amb efectes de densitat variable (SEAWAT). Tots dos transitoris calibrats per 1973-2009. El nou model ha requerit aprofundir en la interpretació d'estudis previs tant pel que fa a les accions externes, com als paràmetres hidrodinàmics i el seu funcionament.

Pel que fa als models previs, els resultats conformen la intrusió generalitzada encara que es determinen fluxos i descàrregues diferents. La intrusió mitjana anual passa d'uns 0.67 hm³/any a 1.67 hm³/any, els fluxos laterals de 27.37 hm³/any a 33.42 hm³/any, i les eixides netes al mar de 9.04 hm³/any a 9.24 hm³/any. Així, sent aquest el model més complex i precís construït fins al moment, calibrat respecte piezometria i salinitats, es conclou que la intrusió és sensiblement superior al que s'estimava fins ara, i que les recàrregues laterals mitjanes podrien ser fins a un 30% superiors. En tot cas, el nou model, suposa una millor aproximació de la realitat física que tots els anteriors i, amb les limitacions derivades de les dades, aporta noves xifres del balanç d'aquest aqüífer. Això permetrà dirigir, de forma més efectiva, futurs esforços d'investigació en la caracterització de l'aqüífer i accions sobre aquest.

ABSTRACT

Characterizing salinization due to seawater intrusion in coastal aquifers requires an adequate hydrodynamic modeling approach. It is not enough to estimate aquifer flows to and from the sea. Most recent studies, already developed within the framework of the European Water Directive, use to quantify these problems based on these water discharges thus limiting the reliability and accuracy of intrusion estimations. This FMP describes a research effort to characterize and model a coastal aquifer. A mathematical model has been developed for the coastal aquifer Plana de Orpesa-Torreblanca (body of groundwater 080.110) of greater complexity and accuracy than all preceding models developed for this aquifer. So far only 2D steady state flow models had been used and, very recently, transient conditions were included. This work addresses 3D modeling, transient flow conditions, including the effects of variable density, and a higher resolution discretization as well as a finer parameters zonification. Once the discretization and external stresses have been defined, two modeling approaches of increasing complexity are used. The first one based on flow without variable density effects (MODFLOW), the second a coupled flow and transport model considering variable density effects (SEAWAT). In both cases the calibration is done for the period 1973-2009 and the modeling effort has been based on a deep study of previous aquifer studies regarding external stresses, water abstractions and hydrodynamic parameters characterization.

This work shows and confirms, compared to previous modeling efforts, that there is a generalized intrusion problem although the local characterization is different with this more realistic and

accurate model. These differences lead to different budget figures: intrusion now is estimated as 0.67 hm³/year – compare to previous 1.67 hm³/year-, lateral inflows from neighboring formations are now 27.37 hm³/year – compared to 33.42 hm³/year - and outflows to sea are 9.04 hm³/year – compared to 9.24 hm³/year-. So, being this the most complex and accurate model ever built, calibrated to honor both piezometric and salinity measurements, it is concluded that the intrusion is appreciably higher than estimated so far, and that average lateral inflows could be up to 30% higher than previously estimated. In any case, the new model is a better approximation of the physical reality than all previous models and provides new figures for the balance of the aquifer – conditioned by the uncertainties and limitations from data. These results will help to guide future research efforts to characterize the aquifer and external stresses on it.

Palabras clave:

intrusión marina, modelación matemática, salinización, densidad variable, acuífero costero

A mis padres y a mi hermana,

*"No se aprecia el valor del agua hasta
que se seca el pozo"*

Proverbio inglés

*"Si hay magia en este planeta, está
contenida en el agua"*

Loran Eisely

Agradecimientos

Quisiera expresar mi agradecimiento, en primer lugar, a José E. Capilla Romá por la guía, apoyo y su confianza antes y durante la realización de este trabajo, así como por todas las enseñanzas que me ha transmitido y por ser un ejemplo para mí. Sin él nada de lo que figura en este documento hubiera sido posible.

Mi más sincero agradecimiento al IGME y a la doctora Arianna Renau Pruñonosa y a su director de tesis doctoral, Ignacio Morell de la UJI, ya que sin sus datos y conocimientos este trabajo no hubiese sido posible.

No podría finalizar sin dar mi más sincero agradecimiento a todos los compañeros con quienes he tenido la suerte y el honor de compartir aula durante este máster. Muchísimas gracias por los buenos momentos, las ayudas en clase y la confianza que me habéis transmitido.

A mi familia, por su incondicional apoyo, por aguantar, por ser como son y estar siempre a mi lado.

¡Gracias a todos!

Índice General

1. INTRODUCCIÓN **1**

1.1. Presentación del Trabajo	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Localización Geográfica	5
1.4. Rasgos geológicos básicos	7
1.5. Marco hidrológico - hidrogeológico	11
1.6. Antecedentes	13
1.6.1. Geología	13
1.6.2. Hidrogeología	13
1.6.3. Modelación del acuífero	15
1.7. Conclusiones	19

2. HIDROGEOLOGÍA **21**

2.1. Introducción	21
2.2. La masa de agua subterránea 080.008: Maestrazgo Oriental	21
2.2.1. Caracterización hidrogeológica	21
2.2.2. Balance hídrico	25
2.2.3. Hidroquímica general	26
2.3. Acuíferos de borde de la Plana	28

2.3.1.	Acuífero de materiales jurásicos _____	29
2.3.2.	Acuífero de materiales aptienses (Cretácico inferior) _____	31
2.3.3.	Acuífero de materiales del Cretácico superior _____	32
2.3.4.	Acuíferos de materiales del Mioceno _____	33
2.4.	La masa de agua subterránea 080.110: Plana de Oropesa-Torreblanca _____	34
2.4.1.	Situación y naturaleza _____	34
2.4.2.	Geometría y límites _____	35
2.4.3.	Parámetros hidrodinámicos _____	41
2.4.4.	Rasgos hidroquímicos básicos _____	41
2.5.	Importancia ambiental del Prat de Cabanes _____	42
2.5.1.	Datos básicos _____	42
2.5.2.	Caracterización paleográfica del Prat _____	43
2.6.	Síntesis e incertidumbres del grado de conocimiento actual _____	44
<u>3. LA INTRUSIÓN MARINA EN LA PLANA DE OROPESA - TORREBLANCA</u>		47
3.1.	Antecedentes de Problemas de Calidad _____	47
3.2.	Conclusiones de la intrusión marina en la Plana de Oropesa - Torreblanca_	48
<u>4. BASE MATEMÁTICA</u>		49
4.1.	Fundamentos matemáticos del flujo de densidad variable y el transporte de solutos en aguas subterráneas _____	49

4.1.1.	Ecuaciones gobernantes del flujo de densidad variable	50
4.1.2.	Ecuaciones gobernantes del transporte	59
4.2.	Estado del arte de la modelación de la intrusión marina	68
4.2.1.	Métodos eulerianos	73
4.2.2.	Métodos lagrangianos	75
4.2.3.	Métodos mixtos: eulerianos - lagrangianos	75
4.2.4.	Procesos de flujo dependientes de la densidad	80
4.3.	El modelo <i>SEAWAT</i>	82
4.3.1.	Limitaciones	82
4.4.	Resumen y conclusiones	83

5. MODELO TRANSITORIO Y TRIDIMENSIONAL DE LA FORMACIÓN HIDROGEOLÓGICA **85**

5.1.	Descripción de los datos disponibles	85
5.1.1.	Topografía de la zona	85
5.1.2.	Muro de la formación hidrogeológica	85
5.1.3.	Prat de Cabanes	86
5.1.4.	Parámetros hidrogeológicos	87
5.1.5.	Muro de la zona cretácica	88
5.1.6.	Recarga	89
5.1.7.	Bombeos	91
5.1.8.	Piezometría y Control de Calidad	96

5.1.9.	Flujo Lateral	100
5.2.	Modelo Matemático	101
5.2.1.	Calibración del modelo de flujo sin efectos de la densidad (<i>MODFLOW</i>)	104
5.2.2.	Calibración del modelo de flujo y transporte con efectos de la densidad variable (<i>SEAWAT</i>)	117
5.2.3.	Análisis de Sensibilidad	130
5.3.	Conclusiones sobre los balances hídricos	135
6.	CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS	143
6.1.	Síntesis y Conclusiones	143
6.2.	Líneas de investigación futuras	149
7.	BIBLIOGRAFÍA	151
ANEJO 1: DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL MODELO		163
ANEJO 2: DATOS DE ENTRADA (INPUTS) DEL MODELO MATEMÁTICO		177
ANEJO 3: BALANCES HÍDRICOS ANUALES		217
ANEJO 4: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD		225

Índice de Figuras

Figura 1. Diferencias entre las masas de aguas subterráneas, acuífero y unidad hidrogeológica Plana de Oropesa - Torreblanca	3
Figura 2. Localización geográfica del área de estudio	5
Figura 3. Red de drenaje de la Plana de Oropesa - Torreblanca y zona húmeda del marjal de Cabanes - Torreblanca.....	6
Figura 4. Localización geológica del área de estudio (<i>Canerot, 1974</i>)	7
Figura 5. Dominios estructurales de la provincia de Castellón (<i>Canerot, 1974</i>).....	9
Figura 6. Sistemas de explotación en la cuenca del Júcar (<i>Cabezas et al., 2008</i>)	11
Figura 7. Masa de agua subterránea del norte de la provincia de Castellón (<i>www.chj.es</i>)	12
Figura 8. Piezometría general del acuífero del Maestrazgo Oriental (<i>Renau, 2013</i>).....	24
Figura 9. Estructura del flujo en la Sierra de Irta. 1- Miocuaternario; 2- Cretácico; 3- Jurásico; 4- Manantiales costeros; 5- Direcciones preferenciales de flujo (<i>Renau, 2013</i>)	24
Figura 10. Situación esquemática de los acuíferos de borde (<i>Renau, 2013</i>).....	28
Figura 11. Serie estratigráfica sintética de los materiales de borde (<i>Renau, 2013</i>)	30
Figura 12. Topografía de la formación hidrogeológica	35
Figura 13. Profundidades del muro de la formación hidrogeológica.....	36
Figura 14. Visualización de la Plana de Oropesa - Torreblanca con Seer3D	37
Figura 15. Mapa Geológico (<i>CHJ, 2007</i>).....	38
Figura 16. Localización geográfica de las principales poblaciones y municipios existentes en la Plana de Oropesa - Torreblanca	39
Figura 17. Volumen elemental representativo (VER) en un medio poroso.....	50
Figura 18. Relación entre un sistema de coordenadas alineado con el eje principal de permeabilidad	54

Figura 19. Balance de masa en un volumen elemental representativo (VER).....	60
Figura 20. (a) Factores que causan la dispersión longitudinal a escala de poros individuales. (b) Trayectorias de flujo en un medio poroso que causa dispersión hidrodinámica lateral (<i>Fetter, 1999</i>)	62
Figura 21. Dispersión longitudinal y transversal vistas a escala microscópica (<i>Oyarzún L., 2007</i>).....	63
Figura 22. Efecto de la dispersión sobre la curva de llegada (<i>Fetter, 1999</i>).....	64
Figura 23. VER alineado con el flujo.....	65
Figura 24. Relación de la carga hidráulica y la interfaz salina	69
Figura 25. Interacción del agua dulce y el agua de mar bajo condiciones de equilibrio	72
Figura 26. Flujo de agua a través de un sistema de bombeo.....	72
Figura 27. Topografía y muro de la formación hidrogeológica	86
Figura 28. Distribución de los factores multiplicadores de las conductancias en el Prat de Cabanes (Referida a la malla de 250x250 m.)	87
Figura 29. Zonas en la que se divide la formación hidrogeológica	88
Figura 30. Zonas donde no hay recarga en algún momento de la simulación (Referidas a la malla de 250x250 m.).....	90
Figura 31. Evolución anual de las precipitaciones en la Plana de Oropesa - Torreblanca	90
Figura 32. Evolución anual de las infiltraciones en la Plana de Oropesa - Torreblanca.....	91
Figura 33. Ejemplo de la información sobre un bombeo	92
Figura 34. Localización de cada bombeo atendiendo al término municipal que riega (Referida a la malla de 250x250 m.)	93
Figura 35. Evolución anual de los bombeos en la Plana de Oropesa - Torreblanca.....	94
Figura 36. Localización de los piezómetros y puntos de control de calidad (Referida a la malla de 250x250 m.).....	98

Figura 37. Zonas de entrada de flujo lateral a la formación (Referida a la malla de 250x250 m.)	100
Figura 38. Opción de discretización vertical alternativa no considerada	101
Figura 39. Opción de discretización vertical seleccionada	102
Figura 40. Comparación de las celdas activas de la capa 1, 2 y 3 (Referidas a la malla de 250x250 m.)	103
Figura 41. Comparación de las celdas activas de la capa 4, 5 y 6 (Referidas a la malla de 250x250 m.)	103
Figura 42. Superficie piezométrica inicial plicuaternaria y cretácica (Referidas a la malla de 250x250 m.)	104
Figura 43. Condiciones de contorno de la formación hidrogeológica (Referidas a la malla de 250x250 m.)	106
Figura 44. Conductividades de la tesis de Arianna Renau (2013) (Referidas a la malla de 250x250 m.)	107
Figura 45. Conductividades resultantes de la calibración del modelo (Calibración del flujo sin efectos de densidad variable) (Referidas a la malla de 250x250 m.).....	107
Figura 46. a) Conductancia Flujo Lateral; b) Conductancia Prat (Calibración del flujo sin efectos de densidad variable) (Referidas a la malla de 250x250 m.).....	108
Figura 47. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312360002, calibración del flujo sin efectos de densidad variable)	109
Figura 48. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312360009, calibración del flujo sin efectos de densidad variable)	110
Figura 49. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312350024, calibración del flujo sin efectos de densidad variable)	111
Figura 50. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312350025, calibración del flujo sin efectos de densidad variable)	111

Figura 51. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312410013, calibración del flujo sin efectos de densidad variable)	112
Figura 52. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312410017, calibración del flujo sin efectos de densidad variable)	112
Figura 53. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312410019, calibración del flujo sin efectos de densidad variable)	113
Figura 54. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312410020, calibración del flujo sin efectos de densidad variable)	113
Figura 55. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312440027, calibración del flujo sin efectos de densidad variable)	114
Figura 56. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 29, calibración del flujo sin efectos de densidad variable)	115
Figura 57. Balance hídrico calculado (Calibración del flujo sin efectos de densidad variable)	115
Figura 58. Salinidades iniciales del modelo (Referidas a la malla de 250x250 m.)	117
Figura 59. Celdas cuya conductividad cambia respecto de la anterior calibración (Referidas a la malla de 250x250 m.)	118
Figura 60. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312360002, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable).....	119
Figura 61. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312360009, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable).....	119
Figura 62. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312350024, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable).....	120
Figura 63. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312350025, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable).....	120
Figura 64. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312410013, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable).....	121

Figura 65. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312410017, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable).....	121
Figura 66. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312410019, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable).....	122
Figura 67. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312410020, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable).....	122
Figura 68. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312440027, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable).....	123
Figura 69. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 29, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)	123
Figura 70. Concentración salinidad Obs vs Calc (Punto 302440005, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable).....	124
Figura 71. Concentración salinidad Obs vs Calc (Punto 46, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable).....	125
Figura 72. Concentración salinidad Obs vs Calc (Punto 312350029, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable).....	125
Figura 73. Concentración salinidad Obs vs Calc (Punto 312360002, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable).....	126
Figura 74. Concentración salinidad Obs vs Calc (Punto 302440027, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable).....	127
Figura 75. Concentración salinidad Obs vs Calc (Punto 312350017, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable).....	127
Figura 76. Concentración salinidad Obs vs Calc (Punto 312410019, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable))	128
Figura 77. Concentración salinidad Obs vs Calc (Punto 312410016, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable))	128

Figura 78. Balance hídrico calculado (Calibración del flujo y del transporte con efectos de densidad variable))	129
Figura 79. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312350025)	131
Figura 80. Concentración salinidad Obs vs Calc (Punto 302440005)	132
Figura 81. Concentración salinidad Obs vs Calc (Punto 312350029)	132
Figura 82. Precipitaciones, bombeos y salidas al mar (1973 - 2009)	136
Figura 83. Intrusión marina y salidas al mar (1973 - 2009).....	136
Figura 84. Intrusión, bombeos y recarga (1973 - 2009).....	137
Figura 85. Precipitaciones, bombeos y salidas al mar (1973 - 2009)	137
Figura 86. Intrusión marina y salidas al mar (1973 - 2009).....	138
Figura 87. Intrusión, bombeos y recarga (1973 - 2009).....	138
Figura 88. a) Distribución en planta de la superficie afectada por intrusión marina; b) Isopiezas en planta de la superficie afectada por intrusión marina (Referidas a la malla de 250x250 m.)	139
Figura 89. Intrusión, recarga y bombeos del sector Sur (1973 - 2009).....	140
Figura 90. Intrusión y salidas al mar en el sector Sur (1973 - 2009)	140

Índice de Tablas

Tabla 1. Límites, materiales y edad de los acuíferos de borde.....	12
Tabla 2. Resumen Datos del Modelo	17
Tabla 3. Comparación balance hídrico calculado IGME-UJI, 2009 vs Renau, 2013	19
Tabla 4. Balance hídrico del acuífero del Maestrazgo Oriental (<i>CHJ, 2005 y 2007</i>).....	25
Tabla 5. Comparación de los diferentes métodos numéricos (<i>Schäfer, 2009</i>).....	77
Tabla 6. Métodos numéricos recomendados a usar en casos de aplicación específicos (<i>Schäfer, 2009</i>).....	78
Tabla 7. Periodo de riego según pozo virtual.....	92
Tabla 8. Pozos ubicados en la Plana de Oropesa - Torreblanca I (<i>Renau, 2013</i>).....	94
Tabla 9. Pozos ubicados en la Plana de Oropesa - Torreblanca II (<i>Renau, 2013</i>)	94
Tabla 10. Pozos ubicados en la Plana de Oropesa - Torreblanca III (<i>Renau, 2013</i>).....	95
Tabla 11. Coordenadas de piezómetros y puntos de control de calidad.....	99
Tabla 12. Celdas Activas por capa	102
Tabla 13. Grupos correspondientes a las precipitaciones.....	105
Tabla 14. Tipos de potencial hidráulico en el límite	105
Tabla 15. Comparación porosidad efectiva, coeficiente almacenamiento y rendimiento específico Renau vs Modelo calibrado.....	109
Tabla 16. Balance hídrico medio calculado (Calibración del flujo sin efectos de densidad variable).....	116
Tabla 17. Comparación balance hídrico medios calculado del modelo calibrado (Calibración del flujo y del transporte con efectos de densidad variable) vs Renau (2013).....	130
Tabla 18. Balance hídrico medio calculado (Análisis de sensibilidad).....	133

Tabla 19. Variación porcentual del balance hídrico medio calculado (Análisis de sensibilidad) respecto del balance del modelo calibrado.....	134
---	-----

1. Introducción

1.1. Presentación del Trabajo

Las aguas subterráneas constituyen un recurso fácilmente accesible y vital para dos billones de personas en todo el mundo. De él depende el suministro de grandes ciudades y zonas rurales, actividades industriales y más de la tercera parte del riego. Aunque se han utilizado desde hace mucho tiempo, su aprovechamiento ha tenido un aumento importante en las últimas décadas y ha sido un factor clave para el desarrollo en algunos países.

Las aguas subterráneas son un recurso natural importante, pero amenazado, que es fundamental para la calidad del medio ambiente en una serie de ecosistemas de agua y tierra, para la producción industrial y agrícola y para el abastecimiento de agua potable.

Éstas representan una fracción importante de la masa de agua presente en todo el mundo, con un volumen mucho más importante que la masa de agua retenida en lagos o circulante por los continentes. El agua del suelo se renueva en general por procesos activos de recarga desde la superficie y se acumula en el interior de la tierra formando acuíferos. Como es bien sabido, en los lugares alejados de ríos, lagos o mares, estos acuíferos son a menudo la única fuente de agua disponible para la población.

Controlar la calidad de las aguas subterráneas es más caro y difícil que hacerlo con las superficiales. El principal problema de los acuíferos es que presentan contaminación difusa, principalmente contaminación por nitratos y por invasión de agua salada. La contaminación por nitratos es un problema generalizado y creciente que afecta a la calidad de las aguas subterráneas y supone un riesgo para la salud, especialmente en el caso de los niños.

El uso sostenible de aguas subterráneas lleva a plantearse qué calidad ofrece este suministro. Hay grandes diferencias entre la contaminación de las aguas superficiales y de las aguas subterráneas que hacen que la de estas últimas sea más grave:

1. La detección: En superficie es perceptible de inmediato. En las aguas subterráneas, cuando se detecta el problema pueden haber transcurrido meses o años.
2. La solución: Las aguas de un río se renuevan con la rapidez de su flujo. En los acuíferos el flujo es tan lento y los volúmenes tan grandes que se necesita mucho tiempo para que se renueve varias veces todo el agua contenida en él, e incluso entonces el problema persiste por las sustancias que quedaron adsorbidas en el acuífero.

1. Introducción

Los acuíferos costeros requieren una adecuada gestión de sus recursos debido a que presentan un mayor grado de afección a la calidad de sus aguas, como consecuencia de una demanda más intensa al constituir la principal fuente de recurso hídrico en zonas con precipitaciones escasas y de poca importancia. Esta es una situación típica de los acuíferos costeros en la vertiente mediterránea española. Debido a la explotación que se produce en estas zonas, principalmente para satisfacer requerimientos agrícolas y relacionados al desarrollo urbano y turístico, se intensifica el fenómeno de salinización que se da en forma natural en la zona de contacto con el mar, induciendo la penetración de la cuña salina tierra adentro a una tasa mayor de la esperada en condiciones de ausencia de explotación. Cuando los niveles de extracción superan a la capacidad de recarga de dichos acuíferos, se está frente a un escenario de sobreexplotación del recurso hídrico, dando origen al problema de contaminación de aguas subterráneas conocido como Intrusión Salina.

El problema de intrusión salina se produce en zonas costeras con altas densidades de población en relación a la disponibilidad del recurso subterráneo, es decir, donde la extracción supera la capacidad de recarga del acuífero. La creciente salinización de las aguas comienza a manifestarse una vez que se ha sobrepasado la capacidad de recarga del acuífero y por lo tanto la penetración de la cuña salina se transforma en un proceso inevitable y difícil de remediar.

En los últimos años, la investigación hidrogeológica se ha centrado en los problemas de la calidad del agua subterránea. Estudiar como la calidad del agua subterránea se ha visto afectada por la actividad humana, predecir la evolución del problema, intentar paliarlo o adoptar las medidas oportunas para que estos problemas no lleguen a producirse.

1.2. Objetivos

El objetivo central de este trabajo fin de master es investigar el actual conocimiento del acuífero de la Plana de Oropesa-Torreblanca (masa de agua subterránea 080.110¹), adoptar un modelo conceptual coherente con toda la información disponible, construir un modelo matemático avanzado tridimensional, transitorio, que estime la evolución de las salinidades en el acuífero, y que tenga en cuenta los efectos de la densidad variable debidos a sus variaciones. Este modelo, que se pretende sea así más representativo de la realidad que todos los realizados previamente, permitirá una mejor caracterización e investigación más precisas de la situación y evolución de la interfaz marina existente en la zona.

En los informes más recientes tanto del IGME como de la CHJ, se considera la masa de agua subterránea 080.110 (Plana de Oropesa - Torreblanca), por esta razón se utilizó dicha masa de agua subterránea en nuestra investigación. En estudios anteriores al 2009 para identificar a la Plana de Oropesa - Torreblanca se utilizaba el código 30320. En la actualidad no se distingue entre el acuífero de Oropesa - Torreblanca y la masa de agua subterránea de la Plana de Oropesa - Torreblanca por eso todos los estudios realizados en la actualidad únicamente hablan de la masa de agua subterránea.

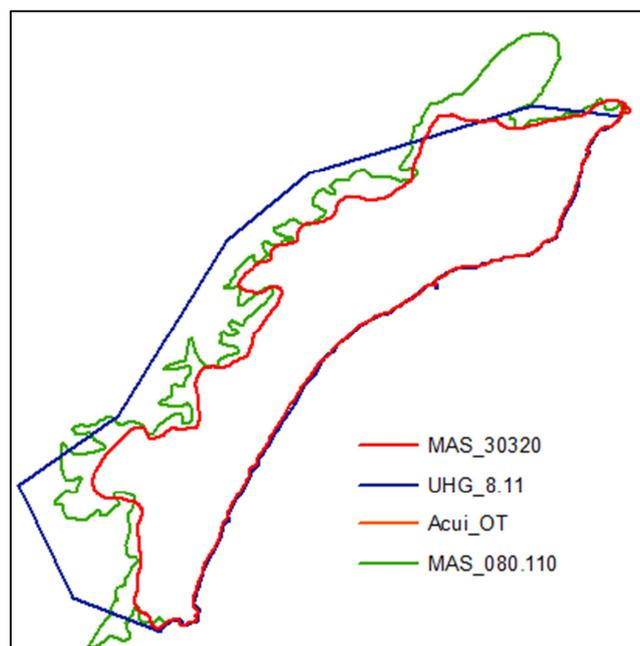


Figura 1. Diferencias entre las masas de aguas subterráneas, acuífero y unidad hidrogeológica Plana de Oropesa - Torreblanca

¹ Según DMA como un volumen claramente diferenciado de aguas subterráneas en un acuífero o acuíferos

1. Introducción

En esencia, el abastecimiento a la población, así como las actividades agrícolas e industriales, mediante las aguas subterráneas producen un descenso de los niveles piezométricos. En los acuíferos costeros, aparte de este problema tenemos el de la intrusión marina que puede verse muy favorecida por un gran descenso del nivel piezométrico producido por una sobreexplotación del acuífero.

Además también existe un problema de contaminación difusa debido a las actividades agrícolas, pero en este trabajo no tenemos en cuenta esta contaminación. En cambio sí que tenemos en cuenta el efecto de la existencia de cultivo en esta zona sobre el acuífero ya que los cultivos necesitan agua y por tanto son un sumidero de ésta para el acuífero.

La diferencia entre las entradas y las salidas constituye la infiltración profunda que, a través de la zona no saturada, proporciona uno de los mecanismos de recarga del acuífero.

Para alcanzar el objetivo de construir un modelo de densidad variable en régimen transitorio y tridimensional que permita una buena representación y observación, tanto la situación actual como de la evolución del acuífero, se plantean los objetivos de investigación siguientes:

- Revisión de estudios y modelos previos para la elaboración de un modelo conceptual más avanzado que los existentes que permita explicar los registros de datos de piezometría y salinidades.
- Concepción de un modelo tridimensional, transitorio y de mayor resolución que los anteriores. Hasta ahora no se ha pasado de la modelación 2D.
- Incremento del zonado para la parametrización del modelo y su calibración, respecto a anteriores modelos.
- Calibración basada tanto en datos de piezometría como de salinidades observadas. Nunca hecho hasta el momento.
- Análisis de sensibilidad.
- Caracterización, de acuerdo con un modelo más avanzado y plausible, de la situación actual del acuífero.

Los objetivos de modelación avanzada propuestos en este trabajo no han sido abordados hasta la fecha en ningún estudio o trabajo de investigación. Los dos antecedentes, hasta la fecha, más avanzados correspondían a las tesis doctorales de Morell (1985) y de Renau-Pruñonosa (2013), puntos de partida fundamentales de este trabajo de investigación de fin de master.

1.3. Localización Geográfica

La Plana de Oropesa - Torreblanca es una llanura costera de forma alargada, que se extiende a lo largo de la costa con una longitud aproximada de 21 km, una anchura variable entre 2.5 y 6 km, y una superficie próxima a los 90 km². Las partes meridional y central del área de estudio pertenecen a la comarca de la Plana Alta y la parte septentrional a la comarca del Baix Maestrat, en la provincia de Castellón (Figura 2).

La Plana de Oropesa-Torreblanca está limitada al sur por la Sierra de Oropesa y las sierras litorales y prelitorales que forman el Macizo del Desert de les Palmes; al norte limita con la Sierra de Irta; al oeste, con las estribaciones del Maestrazgo Oriental y al este con el Mar Mediterráneo (Figura 2).

En el área de estudio se asientan las poblaciones de Oropesa del Mar, Torreblanca y Alcocebre, que tienen poblaciones respectivas de 10.787, 5.767 y 2.151 habitantes (INE, 2011). También existen otros núcleos más pequeños y dispersos como son las pedanías de la Ribera de Cabanes, el Broseral, Torrenostra y Torre la Sal. Realmente, se trata de una zona turística, donde la población en verano es mayor a la censada. Por ello, las necesidades hídricas de la zona, en épocas estivales, aumentan considerablemente.

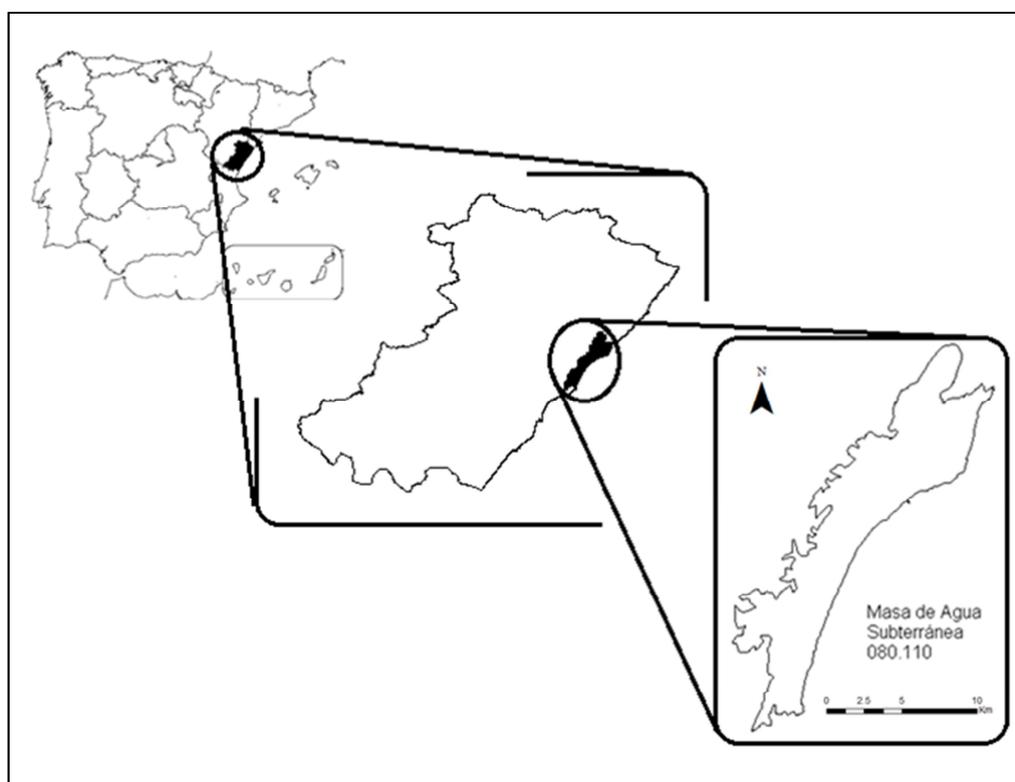


Figura 2. Localización geográfica del área de estudio

1. Introducción

La red hidrográfica es escasamente activa ya que no existen cauces de funcionamiento permanente y ni siquiera estacional. Los dos cauces más importantes son el barranco Chinchilla, que desemboca al norte de la población de Oropesa, y el río Cuevas o San Miguel, que lo hace al norte de Torrenostra (Figura 3), ambos son de funcionamiento esporádico. Otros cauces de cierto interés son los barrancos de Perchets y Campello y las ramblas de Mañes y Estopet, que sólo están activos a causa de fuertes eventos lluviosos.

En el sector central costero de la Plana se encuentra la zona húmeda denominada Prat de Cabanes (Figura 3), que está considerada como una de las mayores marismas valencianas. Fue declarada Paraje Natural en 1988, y desde ese año pertenece a la lista ZEPA (Zona de Especial Protección para las Aves); en 1989 se incluyó en la lista RAMSAR (Humedales de importancia internacional). Se extiende desde Torrenostra hasta Torre la Sal, con una anchura media de 1.5 km. Es un área permanentemente inundada, en relativo proceso de colmatación, con abundante vegetación, limitada por una barra costera de casi 8 km de longitud, unos 20 m de anchura y hasta 3 de altura, constituida por cantos muy redondeados, bien clasificados, con tamaños que oscilan entre 1 y 20 cm.

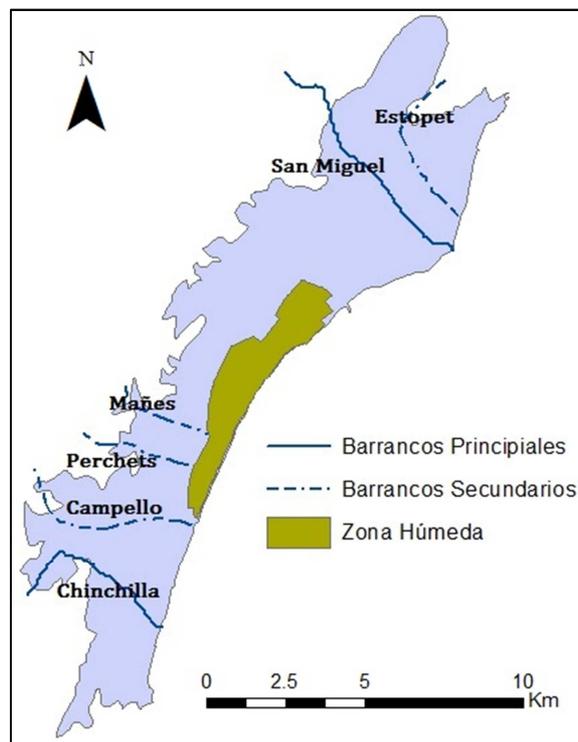


Figura 3. Red de drenaje de la Plana de Oropesa - Torreblanca y zona húmeda del marjal de Cabanes - Torreblanca

1.4. Rasgos geológicos básicos

La plana de Oropesa - Torreblanca está ubicada en la zona sureste fallada de la Cordillera Ibérica. Dentro del sistema Ibérico se pueden diferenciar dos grandes sectores, la Rama Castellana y la Rama Aragonesa, separados por la fosa de Calatayud - Teruel. En general, la cordillera está formada por una serie de macizos mesozoicos, donde se pueden observar núcleos paleozoicos aislados, individualizados por cubetas rellenas de materiales terciarios y cuaternarios.

Geológicamente, la provincia de Castellón se sitúa en la unión del borde más oriental de la Rama Aragonesa con el sector meridional de la Cordillera Costero - Catalana, configurando la transición entre ambas. Las características estructurales de la Cordillera Costero - Catalana se aprecian en los sectores oriental y nororiental, con direcciones de plegamiento NNE - SSO, que condicionan la actual línea de costa (*Giménez, 1994*). Es indudable la influencia ibérica en la región, dirección NO - SE, pero son mucho más visibles las directrices catalanas NNE - SSO, posiblemente por ser ligeramente posteriores y haber cortado a las ibéricas (*ENADINSA, 1973*). En la figura 4 se observa la localización geológica regional de la zona de estudio (*Canerot, 1974*); el círculo rojo indica la situación de la Plana de Oropesa - Torreblanca.



Figura 4. Localización geológica del área de estudio (*Canerot, 1974*)

1. Introducción

En esta región, Sanchis et al. (1989) y posteriormente Morell (1992), diferenciaron cinco dominios, basados en las características descritas por Canerot en 1974 (Figura 5):

- Pliegues septentrionales: Este dominio se sitúa al noroeste de la provincia de Castellón. Destaca por los materiales jurásicos y cretácicos, que ocasionalmente aparecen cubiertos por depósitos terciarios. Estructuralmente se caracteriza por una sucesión de anticlinales y sinclinales.

- Zona tabular del Maestrazgo: Ocupa la parte interior central de la provincia de Castellón, limitando al este con las Alineaciones Costeras, al norte con la región de Pliegues Septentrionales, y al sur con el dominio Triásico del Espadà. Se caracteriza estructuralmente por los pliegues de gran radio, conformando estructuras claramente tabulares. Estratigráficamente predominan los materiales cretácicos, desarrollando buenas secuencias.

- Alineaciones costeras: Abarca la zona oriental de la provincia. Corresponde a la parte meridional de la Cordillera Costero - Catalana. Se caracteriza por una sucesión de fosas y elevaciones alargadas, dirección NNE - SSO, generados por el enrejado de fracturas presente en la zona, donde la complejidad va aumentando con la cercanía de la costa.

- Dominio triásico del Espadà: Conforman la parte meridional de la provincia. Limita al norte con la zona Tabular del Maestrazgo y al este con la Llanura Costera de la Plana de Castellón. El núcleo principal de este dominio es la Sierra de Espadà, donde predominan los materiales triásicos y afloran esporádicamente materiales paleozoicos.

- Llanuras costeras: Dentro de ella se enmarcan las tres llanuras detríticas costeras que se asientan a lo largo de todo el litoral castellonense, que son la Plana de Vinaroz, la Plana de Oropesa - Torreblanca y la Plana de Castellón. En ellas existe un predominio de materiales sedimentarios continentales, en general, provenientes del transporte fluvial, aunque también se observan materiales mixtos y marinos.



Figura 5. Dominios estructurales de la provincia de Castellón (*Canerot, 1974*)

La Plana de Oropesa - Torreblanca limita al norte con la Sierra de Irta, al sur con el Macizo del Desert de les Palmes y al este por las estribaciones meridionales del Macizo del Maestrazgo (Figura 2).

La Sierra de Irta está constituida por dos ramas separadas por una falla de dirección NE-SO. La falla principal presenta un salto de 500 m. En cambio, las dos ramas, antes nombradas, presentan una serie de fallas menores, de orientación semejante, que conjugadas con las fallas de dirección ibérica dan lugar a la formación de pequeños bloques (*ENADINSA, 1973*).

El Macizo del Desert de les Palmes incluye las Sierras del Desert de les Palmes, les Santes, Oropesa, Borriol y Monegre. La estructura principal en este macizo es un anticlinal de dirección ibérica, donde el núcleo viene definido por los materiales más antiguos, de edad paleozoica, que aparecen recubiertos por una serie triásica poco potente, mediante una discordancia angular (*Canerot, 1974*). Esta estructura ibérica está afectada por el conjunto de fallas de orientación catalánide, NNE, generando un conjunto de bloques sin hacer desaparecer la estructura principal anticlinal (*Renau - Llorens, 2010*).

Tectónicamente, las estribaciones meridionales del Macizo del Maestrazgo, presentan una característica fundamental que viene definida por una densa red de fallas verticales, de orientación catalánide, que compartimentaron la región en fosas y pilares donde,

1. Introducción

posteriormente, las fosas sirvieron de base para la sedimentación de los materiales terciarios (*ADARO, 1973b*).

1.5. Marco hidrológico e hidrogeológico

La provincia de Castellón pertenece a la cuenca hidrográfica del Júcar, a excepción del sector noroccidental, que pertenece a la cuenca hidrográfica del Ebro.

Como se observa en la figura 6 la parte de la provincia de Castellón ubicada en la cuenca del Júcar participa de tres grandes sistemas de explotación denominados: Cenia - Maestrazgo, Mijares - Plana de Castellón, y Palancia - Los Valles.

El acuífero costero de la Plana de Oropesa - Torreblanca pertenece al sistema de explotación Cenia - Maestrazgo y según la CHJ, corresponde a la masa de agua subterránea 080.110 (Figura 7).



Figura 6. Sistemas de explotación en la cuenca del Júcar (*Cabezas et al., 2008*)

La zona de estudio es un acuífero detrítico costero de edad pliocuaternaria. Las unidades acuíferas que lo limitan, en mayor o menor medida, presentan interconexiones hidráulicas con el acuífero pliocuaternario, dando lugar a recarga lateral subterránea. En la tabla 1 se indican los materiales de borde, su situación y las edades de los mismos.

1. Introducción

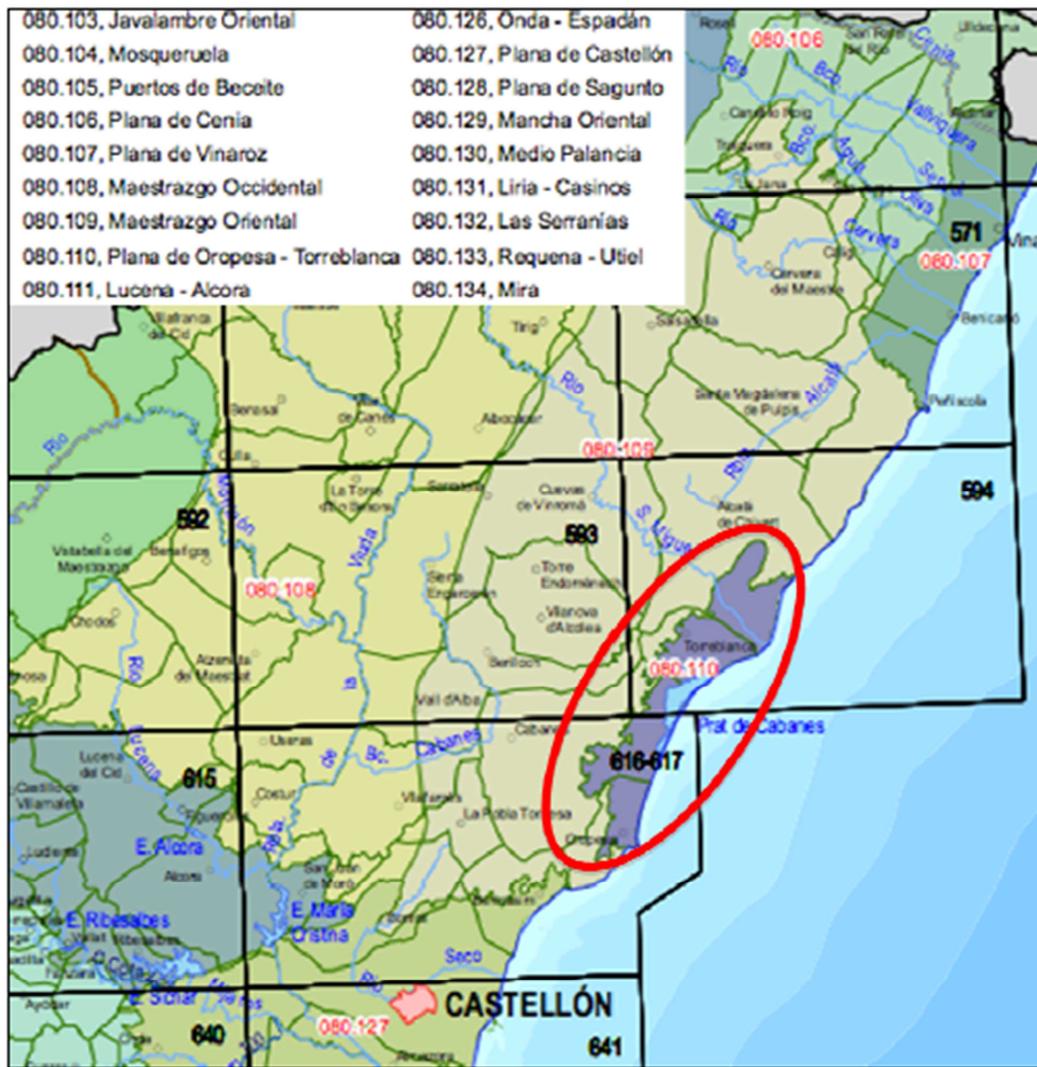


Figura 7. Masa de agua subterránea del norte de la provincia de Castellón (www.chj.es)

LÍMITE	TOPONÍMIA	MATERIALES MAYORITARIOS	EDAD
Norte	Sierra de Irta	Calizas y dolomías	Jurásico
Noroeste	----	Conglomerados calizos	Terciario
Oeste	Sierras de los Perchets y Sernavives	Calizas y dolomías	Cretácico inferior y superior
Suroeste	Pico Ferradura	Calizas y dolomías	Cretácico inferior y superior
Sur	Sierra de Oropesa	Calizas	Cretácico inferior
Este	Mar Mediterráneo	----	----

Tabla 1. Límites, materiales y edad de los acuíferos de borde

1.6. Antecedentes

1.6.1. Geología

El autor que más profundizó en el conocimiento geológico del Baix Maestrat fue Canerot en su Tesis Doctoral (1974), la cual ha servido de base para la mayoría de los trabajos realizados posteriormente. En 1975, EPTISA (1975a y 1975b) realizó para el Instituto Geológico y Minero de España y para el Instituto de Reforma y Desarrollo Agrario (IRYDA) un informe donde se recopilaron los resultados de realizar sondeos con testigo continuo, que permitieron conocer con bastante aproximación la litoestratigrafía de la zona. Los aspectos geomorfológicos fueron tratados por Mateu (1982), que aborda las características del relieve del litoral. En 1985, Morell contribuyó a conocer nuevos datos sobre la geología de la zona. A partir de este momento y hasta la actualidad no se conocen informes significativos donde se aporten nuevos datos sobre la geología del área de estudio.

1.6.2. Hidrogeología

Aunque en las últimas décadas del siglo veinte se realizaron estudios sobre la hidrogeología regional de la zona de estudio (*ITGE, 1989; COPUT, 1990 y 1992; Serrano et al., 1995*) no es hasta entrado el siglo veintiuno cuando los trabajos realizados empiezan a profundizar en la hidrogeología y por tanto en la cuantificación de las distintas partidas que conforman el balance hídrico del Maestrazgo (*Marina, 2006; García - Orellana et al., 2006; Mejías et al., 2007; Antón - Pacheco, 2007; CHJ, 2007*). Dichos estudios ponen de manifiesto la complejidad que presenta la cuantificación del balance hídrico en este acuífero.

Respecto al macizo del Desert de les Palmes, se han publicado varios textos de divulgación (*Albuixech, 1986 y Generalitat Valenciana, 1990*). Los únicos estudios dignos de mención relacionados con temas geológicos son Canerot (1985a, 1985b) y en el 1998 la Tesis Doctoral de Martín.

Los estudios hidrogeológicos documentados más antiguos relativos a la Plana de Oropesa - Torreblanca son los realizados por el Servicio Geológico de Obras Públicas (*EPTISA, 1975a y 1975b; SGOP 1975*). Durante la década de los setenta se profundizó en el estudio de la delimitación de los acuíferos de borde y sus posibles interconexiones con la Plana de Oropesa - Torreblanca (*Doblas, 1976; Aragonés, 1976; IGME, 1977 y Doblas, 1983*). Estos estudios han servido de base para posteriores trabajos.

1. Introducción

La Tesis Doctoral de Morell (1985) aborda la problemática de la intrusión marina y actualiza los conocimientos de la hidrogeología de la zona. En los años posteriores Morell y Giménez (*Morell, 1989; Giménez, 1994; Giménez et al., 1995; Giménez y Morell, 1997*) continúan investigando la hidrogeoquímica de la zona, haciendo hincapié en: procesos hidrogeoquímicos asociados a la mezcla de agua dulce - agua salada y en el intercambio iónico para caracterizar los movimientos de interfaz, pero no añaden datos nuevos sobre la hidrogeología del área y su entorno.

Respecto al Prat de Cabanes, al ser una zona de especial protección se han publicado varios textos de divulgación sobre flora, fauna, paisaje, itinerarios didácticos e historia (*MIMAM, 1996; Gómez - Serrano 1999 y 2001; Molina, 2000; Carmona y Ruiz, 2009*). De los estudios científicos que se han centrado en la zona húmeda destacan aquellos que profundizan en la geomorfología de la zona (*IRYDA, 1983*), la repercusión de la acción antrópica sobre los humedales (*Viñals, 2004*) y las relaciones genético - geológicas de los humedales (*Durán et al., 2009*).

En el siglo XXI, con la aprobación de las Directivas 2000/60/CE (*UE - DMA, 2000*) y 2006/118/CE (*UE, 2006*), empiezan a proliferar informes e investigaciones, en su mayoría promovidas por organismos públicos, orientados a conocer con mayor precisión la situación actual del nivel piezométrico (*Renau - Pruñonosa, 2008 y 2009; Morell, 2010*), actualizar el balance hídrico (*CHJ, 2007; IGME - UJI, 2009b*) y estudiar la intrusión marina (*IGME, 2000; Fidalgo et. al., 2007; IGME - UJI, 2009a*). Se disponen además de los informes de seguimiento del Plan Hidrológico de la CHJ (2004 y 2005).

En la actualidad los modelos matemáticos de flujo son una herramienta ampliamente difundida en el campo de la hidrogeología (*Reeve et al., 2000; Júnior et al., 2003; Pisinaras et al., 2007; Herrera - Carvajal et al., 2007*) que ayudan a mejorar el conocimiento del sistema y valorar alternativas de gestión. En los últimos años existen algunas tentativas de aplicación de modelos matemáticos a la Plana de Oropesa - Torreblanca para cuantificar las partidas que conforman el balance hídrico, como por ejemplo el informe de la CHJ (2007) que calcula el balance hídrico mediante el modelo PATRICAL (*Pérez M.A., 2005*), simulando el ciclo hidrológico a escala mensual a partir de la fórmula de Témez (1977). Pero no fue hasta el 2009 cuando se desarrollaron, por parte del IGME (*IGME - UJI, 2009b*) un modelo de flujo de densidad constante en régimen estacionario.

1.6.3. Modelación del acuífero

El estado actual de conocimiento y modelación de la formación es muy limitado, resumiéndose en un modelo bidimensional de baja resolución, y estacionario, realizado con *MODFLOW*, para la estimación de las descargas al mar. Dicho modelo se describe en un informe del IGME (*Estudio Piloto para el cálculo de descargas ambientales al mar en las masas de agua subterráneas costeras de la provincial de Castellón, IGME-UJI, 2009*).

Como se ha dicho anteriormente, para simular el flujo de aguas subterráneas se ha utilizado el programa modular *MODFLOW*, desarrollado por el US Geological Service, compilado en la adaptación comercial de Waterloo Hydrogeologic Inc., llamada *Visual MODFLOW*, versión 3.1.0.

El código *MODFLOW* es actualmente el código más utilizado a escala mundial (*McDonald y Harbaugh, 1988*). El programa *Visual MODFLOW* es una interfaz del *MODFLOW* que simula el flujo del agua subterránea en dos y tres dimensiones. La discretización se lleva a cabo mediante una red rectangular, con nodos centrados en los bloques. El programa se basa en el método de diferencias finitas, que resuelve el sistema de ecuaciones que rigen el flujo subterráneo.

Para realizar el cálculo en régimen estacionario (estado en que las características de un sistema no varían con el tiempo) se siguieron los siguientes pasos:

- Elaboración de la evolución media de Cl^{-1} en acuífero a partir de los datos de la red de intrusión.
- Se considera que:
 - Períodos en que se existe aumento de la concentración corresponden a situaciones activas de intrusión en las que existe déficit de salidas de agua dulce al mar.
 - Períodos en que se registran descensos de salinidad corresponden a períodos húmedos en que puede estar produciéndose un retroceso del frente salino.
- En cualquiera de los dos casos, se considera que a lo largo de esos períodos se están registrando variaciones positivas o negativas de los caudales de surgencia (movimiento vertical de las masas de agua de niveles profundos hacia la superficie) o afloramientos.

El período de simulación se hizo coincidir con un período en el cual las concentraciones medias de cloruros no variaban significativamente, lo que se interpretó como indicador de una

1. Introducción

cierta situación de equilibrio en la que las salidas anuales al mar eran aproximadamente constantes, y suficientes para impedir el progreso de la intrusión marina.

Estas condiciones de estabilidad correspondían a los siguientes períodos en la Plana de Oropesa - Torreblanca: período 1995 - 2000. Estos períodos coinciden, además, con los últimos datos disponibles de las redes de observación de la intrusión.

La superficie piezométrica fue elaborada a partir de las medias de los niveles piezométricos medidos en los puntos de observación durante el período considerado.

Los datos pluviométricos correspondían a precipitación media del mismo período. Los bombeos fueron estimados a partir de encuestas y de extrapolaciones a las superficies de riego actualizadas.

En la siguiente tabla se resumen los datos topográficos, hidrológicos, etc. utilizados en el modelo.

Datos Topográficos			Cartografía a escala 1:10.000 del Instituto Cartográfico Valenciano
Medidas Celdas del Modelo			500 x 500 m
Permeabilidad			Modelo Isótropo $\rightarrow K_x = K_y$ <i>El valor de K_z no afectó a los resultados; aun así se consideró como una décima parte de K_x (dado que la modelación se limitó al régimen permanente, el almacenamiento no afectó a los resultados).</i>
Entradas	Recarga	Infiltración de lluvia	Media de las precipitaciones del período de simulación (5 - 6 años). Se han utilizado los datos de la estación meteorológica de Castellón Se ha considerado una tasa de infiltración de la precipitación del 14% (Tuñón, 2000).
		Retorno de riego	Realizado según las dotaciones de riego en cada zona y la superficie afectada por la agricultura. Las dotaciones de riego son distintas según el origen del agua, entre 5100 y 6500 m ³ /ha/año para agua procedente del acuífero y 7500 m ³ /ha/año para aguas superficiales. Según Tuñón (2000), la tasa de infiltración debida a retornos de riego es del 8 %.

	Alimentación lateral subterránea	Simulado mediante pozos de inyección.
Salidas	Bombeos	<p>Caudales totales de extracción por una determinada superficie conocidos → Extracciones homogéneas y repartidas equitativamente por el área.</p> <p>Conocida ubicación y caudales de extracción de bombes reales, → Valores y posiciones.</p> <p>Algunos pozos ubicados pero se observó que los datos de los bombes no eran suficientes para satisfacer la demanda de riego → Realización de cálculos a partir de las dotaciones de riego y el área perteneciente al regadío.</p> <p>“Pozos virtuales”.</p>
	Drenes	Salidas a zonas húmedas se simularon introduciendo la condición de dren en todas las celdillas de dichas zonas.
Puntos de Control		Los datos piezométricos de control fueron las medias de los periodos considerados en las simulaciones.
Calibración		<p>La calibración de los distintos parámetros se llevó a cabo de forma simultánea y mediante el método de prueba y error.</p> <p>Fue considerado que la calibración era adecuada cuando la diferencia entre el valor calculado por el programa y el introducido (observado) estaba comprendida entre -1 y 1.</p>

Tabla 2. Resumen Datos del Modelo

Una vez introducidos todos estos datos, se ejecutó el modelo obteniendo las siguientes conclusiones:

- Se obtuvo que el volumen ambiental estimado para la masa de agua subterránea de la Plana de Oropesa - Torreblanca fue de 8 hm³/año, que engloba las salidas al mar y la alimentación a la zona húmeda del Prat de Cabanes (CHJ, 2007). En el escenario simulado (periodo 1995 - 2000), el caudal ambiental de descarga fue 7.9 hm³/año, que

1. Introducción

corresponde a la suma de $4.5 \text{ hm}^3/\text{año}$ de salidas al mar y $3.4 \text{ hm}^3/\text{año}$ de alimentación a la zona húmeda.

- Esta aparente coincidencia no debe ocultar que la situación general del acuífero es preocupante, con elevada salinidad general y sobretodo en los sectores septentrional y meridional del mismo.

En cualquier caso, conseguir un volumen ambiental de $21 - 22 \text{ hm}^3/\text{año}$ requiere la eliminación del orden de $15 \text{ hm}^3/\text{año}$ de los bombeos actuales.

También se desarrollaron una serie de escenarios:

- a) Escenario 0. Corresponde a la situación de partida.
- b) Escenario 1. Reducción del 20% de los bombeos en el sector norte.
- c) Escenario 2. Reducción del 40% de los bombeos en el sector norte.
- d) Escenario 3. Reducción del 100% de los bombeos en el sector sur.
- e) Escenario 4. Reducción del 20% en el sector norte y del 100% en el sector sur.
- f) Escenario 5. Reducción del 40% en el sector norte y del 100% en el sector sur.

Cuyas conclusiones fueron:

- La simulación de escenarios basados en la reducción de los bombeos permitió establecer rangos de descargas ambientales que permitieron prácticamente anular las entradas de agua de mar y propiciar así un proceso de regeneración del acuífero.
- La reducción del 20% de los bombeos en el sector norte y el cese de los mismos en el sector sur (escenario plausible) consiguieron la práctica eliminación de las entradas de agua de mar. En esta situación, los caudales ambientales de descarga fueron de $4.1 \text{ hm}^3/\text{año}$ a la zona húmeda del Prat de Cabanes y de $17.5 \text{ hm}^3/\text{año}$ de salidas subterráneas al mar, lo que totaliza un caudal ambiental de $21.6 \text{ hm}^3/\text{año}$.

Probablemente, una reducción menos exhaustiva de los bombeos en el sector sur pueda conseguir un efecto similar.

Posteriormente a este modelo, la doctora Arianna Renau desarrolló un modelo bidimensional transitorio (*Nueva herramienta para la gestión de las aguas subterráneas en acuíferos costeros. Volumen ecológico de remediación (VER). Metodología y aplicación a la Plana de Oropesa - Torreblanca (Masa de agua subterránea 080.110, 2013)*) de la Plana Oropesa -

Torreblanca, de la misma resolución que el anterior, pero cuyo objetivo fue la propuesta de una metodología para el cálculo del VER (volumen ecológico de remediación) en la zona.

La comparación, de balances hídricos anuales, entre este último modelo (*Renau, 2013*) y el anterior (*IGME-UJI, 2009*) se muestra en la siguiente tabla.

	Entradas (hm ³ /año)			Salidas (hm ³ /año)	
	IGME-UJI, 2009	Renau, 2013		IGME-UJI, 2009	Renau, 2013
Intrusión	2.2	0.65	Salidas al mar	4.5	9.04
Entradas laterales	38	27.37	Bombeos	39	23.74
Infiltración	6.8	6.50	Zona húmeda	3.5	1.28
Total	47	34.52	Total	47	34.05

Tabla 3. Comparación balance hídrico calculado IGME-UJI, 2009 vs Renau, 2013

1.7. Conclusiones

En definitiva, existen numerosos estudios geológicos e hidrogeológicos acerca de la provincia de Castellón. Atendiendo exclusivamente a la Plana de Oropesa - Torreblanca, ésta es una formación hidrogeológica estudiada desde hace cerca de 30 años, primero con el estudio de ésta por parte de Morell en su tesis y después con la realización de dos modelos de ésta desarrollados en el marco de las Directivas 2000/60/CE (*UE - DMA, 2000*) y 2006/118/CE (*UE, 2006*). La tesis de Morell es un estudio hidroquímico que recopiló la información existente e intentó conocer las causas, mecanismos y consecuencias de la intrusión marina en la zona. El primer modelo (modelo estacionario de densidad constante) fue realizado para el cálculo de los volúmenes ambientales de descarga al mar para la contención de la intrusión marina y el mantenimiento de los ecosistemas asociados. Previamente se actualizaron los balances hídricos de 3 masas de agua subterráneas (entre las que se encuentra la Plana de Oropesa - Torreblanca). Y por último, el segundo modelo (transitorio de densidad constante) se desarrolló para la obtención de diferentes volúmenes ecológicos de remediación en la Plana, siendo este modelo el utilizado para la propuesta de una nueva metodología para el cálculo de dichos volúmenes (tesis de Renau, 2013).

1. Introducción

2. Hidrogeología

2.1. Introducción

La Plana de Oropesa - Torreblanca es una unidad geomorfológica e hidrogeológica definida, aunque integrada en un conjunto geológico más amplio, al que está estrechamente vinculada. Dada su reducida extensión y los bajos valores de precipitación media anual que se registran en este sector, la mayor parte de la recarga del acuífero tiene lugar por transferencias laterales subterráneas. De ahí la importancia de conocer las relaciones estructurales y las conexiones hidráulicas existentes entre el acuífero pliocuaternario y los materiales de borde.

En este capítulo, además de sintetizar los conocimientos hidrogeológicos existentes sobre la Plana de Oropesa - Torreblanca, se exponen también los rasgos básicos de las masas de agua subterránea que la circundan. Así, se caracteriza la antigua masa subterránea 080.008, denominada Maestrazgo Oriental, que parcialmente descarga en la Plana, y se describen los materiales que conforman los bordes de la Plana y que también constituyen localmente su substrato. Se caracterizó esta masa de agua debido a la falta de información acerca de los balances hídricos de la actual masa de agua 080.109, Maestrazgo Oriental.

2.2. La masa de agua subterránea 080.008: Maestrazgo Oriental

2.2.1. Caracterización hidrogeológica

Según la descripción realizada por el Ministerio de Medio Ambiente (*MIMAM, 2005*) en el informe titulado “Estudio inicial para la identificación y caracterización de las masas de agua subterránea de las cuencas intercomunitarias” y en el estudio de la Confederación Hidrográfica del Júcar (2005) titulado “Balances hídricos y evaluación del riesgo conforme al estado cuantitativo de las masas de agua subterránea de la Confederación Hidrográfica del Júcar”, la masa de agua denominada Maestrazgo Oriental (080.008) tiene una superficie de 2285 km² y se localiza en la comarca del Maestrazgo, en la provincia de Castellón.

Limita al este con las Planas de Oropesa - Torreblanca y Vinaroz y el mar Mediterráneo, y al noreste con las poblaciones de Peñíscola, San Jorge y Càlig. El límite noroeste se define en la divisoria hidrográfica entre los ríos Celumbres y Bergantes (cuenca del Ebro), y el río Cervera (cuenca del Júcar), y al sureste los ríos Monleón, y Rambla de la Viuda (cuenca del Júcar).

2. Hidrogeología

Desde el punto de vista hidrogeológico, el límite noroccidental se define arbitrariamente en la divisoria del ámbito de planificación del Júcar y el Ebro. Al oeste limita con la masa de agua denominada Maestrazgo Occidental mediante una falla localizada al este de la localidad de Villafranca del Cid, pasando hacia el suroeste a trazarse por distintos afloramientos triásicos. Al suroeste el límite se establece, igualmente, según los materiales triásicos aflorantes en las proximidades de Alcora, pertenecientes a la masa Lucena - Alcora. Al sur limita con los depósitos cuaternarios de la Plana de Castellón y al norte con los cuaternarios de Vinaroz y Cenia, y los materiales carbonatados del Cretácico inferior de Los Puertos de Beceite. El límite con Los Puertos de Beceite se establece siguiendo el contacto de las dolomías y margas pertenecientes a esta masa, separando al norte los flujos que se dirigen hacia el río Servol. El límite oriental alcanza el mar Mediterráneo. Los materiales acuíferos principales están formados por calizas dolomíticas y dolomías del Lias - Kimmeridgiense inferior, y calizas del Kimmeridgiense superior - Barremiense, separados por una serie margosa (130 metros) del Kimmeridgiense superior. En el sector meridional, también conforman el acuífero las calizas del Aptiense. Los materiales que producen la separación hidráulica del acuífero regional están constituidos por una alternancia de calizas y margas con horizontes arenosos del Valanginiense - Bedouliense y arenas, areniscas y arcillas del Albiense.

El acuífero que presenta mayor interés corresponde a los materiales carbonatados del Jurásico - Cretácico inferior, y se encuentra muy plegado y fracturado posibilitando la conexión hidráulica de sus niveles permeables. El impermeable de base está constituido por margas y arcillas, en facies Keuper, del Triásico superior. Sobre los materiales carbonatados mesozoicos se disponen algunos rellenos cuaternarios, aluviales y glaciares; y, en menor proporción, calizas, margas y lutitas, miocenas.

Desde el punto de vista hidrodinámico, en las formaciones geológicas que constituyen el acuífero en la zona litoral, donde se sitúan la mayor parte de las captaciones, se obtienen valores de transmisividad comprendidos entre 1000 y 4000 m²/día (*ITGE, 1989*), con caudales medios de explotación de entre 50 y 1000 litros por segundo y caudales específicos comprendidos entre 5 y 10 l/s/m (*García - Orellana et al., 2006*). La modelación matemática llevada a cabo en algunos estudios (*COPUT, 1990 y 1992*) elevan los valores de transmisividad hasta 9000 y 15000 m²/día, lo que podría explicar los caudales superiores a 1 m³/seg que a veces se registran en los manantiales costeros de Alcocebre, Prat de Peñíscola y Torre Badum. Por otro lado, algunas perforaciones realizadas por la COPUT (Conselleria de Obras Públicas, Urbanismo y Transporte) y FACSA (Sociedad de Fomento Agrícola

Castellonense S.A.) con objetivos de abastecimiento urbano han presentado valores de transmisividad más bajos que los mencionados en el sector oriental del acuífero, con magnitudes variables entre 100 y 1000 m²/día, incluso se han perforado algunos sondeos negativos (*Marina, 2006*).

El drenaje principal del sistema tiene una dirección genérica NNO - SSE, aproximadamente perpendicular a la línea de costa (Figura 8). Llama la atención la existencia de un notable salto hidráulico a lo largo de un umbral de dirección NNE - SSO, aproximadamente en la alineación de las poblaciones de Albocàsser, Tírig, San Mateo y la Jana. Este umbral no significa que exista desconexión hidráulica ya que no se han identificado formaciones impermeables que lo justifique (*Mejías et al., 2007*).

Probablemente se deba a la presencia de tramos acuíferos con diferentes cargas hidráulicas, variable según la posición relativa de los niveles en la zona de umbral, o la existencia de una mayor permeabilidad a ambos lados del mismo (*Antón - Pacheco et al., 2007*). Aguas abajo de este umbral se aprecia una notable divergencia del flujo de manera que las líneas de flujo del sector nororiental y la mayor parte de la descarga procedente de la Sierra de Irta se dirige hacia los manantiales del Prat de Peñíscola y Torre Badum, así como de forma subterránea hacia el acuífero de la Plana de Vinaroz (Figura 9). Por otro lado, el flujo subterráneo del área suroccidental se orienta hacia las surgencias de Alcocebre y hacia el acuífero de la Plana de Oropesa - Torreblanca (*Antón - Pacheco et al., 2007*).

Así pues, el drenaje principal del acuífero del Maestrazgo tiene lugar a través de la Sierras de la Irta y en menor medida por alimentación lateral a los acuíferos detríticos instalados en las planas costeras de Vinaroz y Oropesa - Torreblanca. Estos últimos recursos podrían ser finalmente transferidos de forma difusa al mar a través de las formaciones mesozoicas infrayacentes a dichas planas costeras (*Mejías et al., 2007*).

2. Hidrogeología

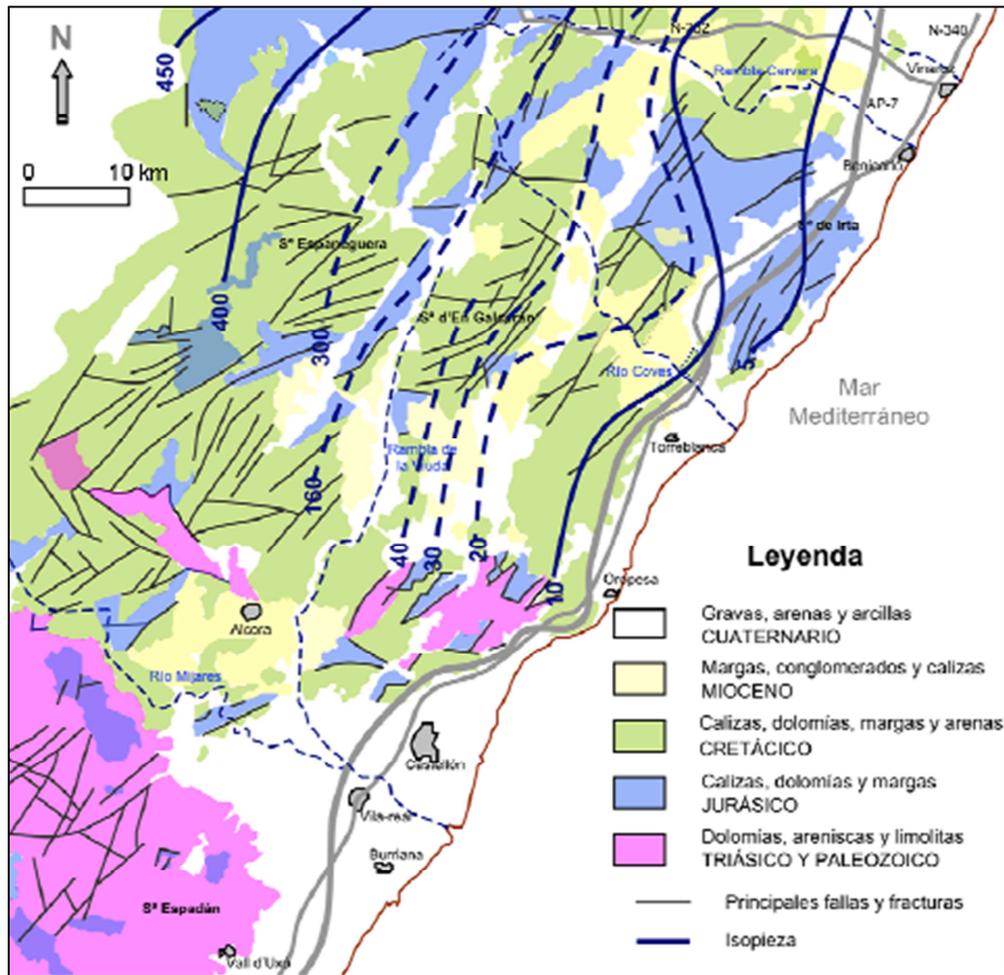


Figura 8. Piezometría general del acuífero del Maestrazgo Oriental (Renau, 2013)

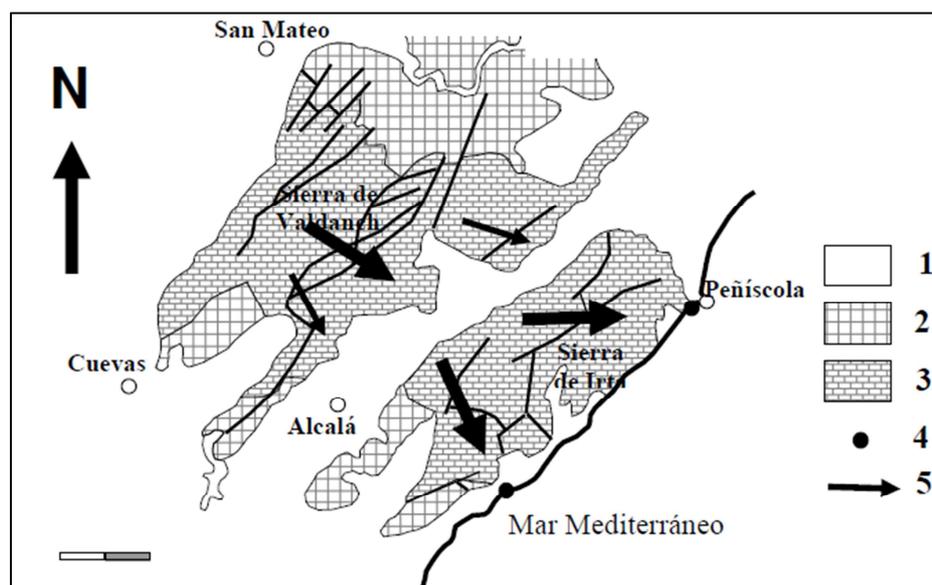


Figura 9. Estructura del flujo en la Sierra de Irtá. 1- Miocuaternario; 2- Cretácico; 3- Jurásico; 4- Manantiales costeros; 5- Direcciones preferenciales de flujo (Renau, 2013)

2.2.2. Balance hídrico

La recarga procede de la infiltración de las precipitaciones y de los posibles aportes laterales de las masas Javalambre y Maestrazgo Occidental.

Según la CHJ (2005, 2007), los recursos renovables son del orden de 292 hm³/año, obtenidas agregando tres parámetros: infiltración del agua de lluvia e infiltración de ríos (270 hm³/año), retorno de riegos (15 hm³/año) y el 80% de las entradas laterales subterráneas (8 hm³/año).

Para calcular los recursos disponibles es necesario detraer de los recursos renovables el volumen medioambiental necesario para garantizar el buen estado ecológico de la masa de agua. El volumen ambiental se calcula teniendo en cuenta el volumen ecológico (descargas subterráneas a los ríos), el 80% del volumen de las descargas subterráneas laterales a otras masas de agua subterránea y el volumen de las descargas al mar y a las zonas húmedas. En este caso sólo se debe considerar como volumen ambiental el 80% de las salidas laterales subterráneas, que es del orden de 111 hm³/año. En consecuencia, los recursos disponibles son del orden de 181 hm³/año (CHJ, 2007).

Los bombeos totales del sistema se estiman en 37 hm³/año, de los que 22 son para usos agrícolas, 14 para usos urbanos y 1 para usos industriales.

Con estos datos, el índice de explotación (K) de la masa de agua, que es el cociente entre los bombeos y los recursos disponibles, es bajo (0.2).

En la tabla 4 se sintetiza el balance hídrico realizado por CHJ (2005, 2007) utilizando el programa Patrical.

Entradas (hm ³ /año)		Salidas (hm ³ /año)	
Infiltración de lluvia y cauces	269.6	Bombeos	36.5
Retorno de riegos	15.5	Descarga lateral	138.7
Recarga lateral	9.5	Salidas al mar y zonas húmedas	0
		Volumen ecológico	0
Total	294.6	Total	175.2

Tabla 4. Balance hídrico del acuífero del Maestrazgo Oriental (CHJ, 2005 y 2007).

Según este balance, la variación de la reserva es de 118.9 hm³/año. Este valor fue estimado considerándose que las salidas al mar son nulas; sin embargo, como ya se ha mencionado en el epígrafe anterior, son bien conocidas las descargas al mar a través de la Sierra de Irta y, muy probablemente también bajo las Planas de Oropesa - Torreblanca y Vinaroz.

2. Hidrogeología

Las descargas a través de la Sierra de Irta han sido identificadas y cartografiadas mediante técnicas de teledetección aeroportada en el infrarrojo térmico (*Antón - Pacheco et al., 2007*). El volumen de salidas es muy difícil de estimar. El ITGE (1989) calculó que las salidas directas al mar a través de manantiales costeros (Prat de Peñíscola, “Las Fuentes” de Alcocebre y Torre Badum) eran 80 hm³/año. Estudios posteriores basados en la reinterpretación del modelo geológico y en sondeos de investigación (*Serrano et al., 1995*) consideraron que la descarga es de 64 hm³/año. En cualquier caso, la suma de las salidas localizadas y difusas a través de la Sierra de Irta y las salidas hacia las planas costeras, estimadas conjuntamente en 65 hm³/año, puede dar una cifra coherente con el desfase entre las entradas y las salidas calculado por la CHJ.

2.2.3. Hidroquímica general

El agua es de tipo bicarbonatada cálcico - magnésica, como corresponde a los materiales acuíferos predominantes (calizas y dolomías). Aunque cuantitativamente no tiene ninguna importancia, cabe mencionar que es conocida la existencia de sectores en los que se han encontrado salmueras, que podrían estar relacionadas con situaciones de flujo muy reducido, quizás asociadas a trampas de petróleo, de las que se tiene conocimiento pero no información detallada.

Sólo puntualmente son conocidos procesos de contaminación que pueden tener su origen en actividades agrícolas de escasa importancia o en los vertidos de purines de las numerosas granjas existentes en el sector (*ITGE, 1989*). A pesar de la alta vulnerabilidad intrínseca de los materiales carbonatados asociada al desarrollo de la karstificación, el considerable espesor de la zona no saturada, que puede ser superior a 500 metros, y la existencia de niveles de baja permeabilidad dan lugar a que este tipo de contaminación sólo afecte a pequeños acuíferos colgados o de interés meramente local. De hecho, no se tiene constancia de la presencia de nitratos en las captaciones más profundas, aunque sí en las existentes en sectores costeros, como en el sector de la Palaba - Estopet, junto a Alcalá de Chivert.

También en la franja costera se constata un proceso de intrusión marina cuya intensidad depende mucho de las condiciones de recarga (*Morell, 1985*). Así, por ejemplo, el agua de los manantiales costeros de Alcocebre puede ser totalmente dulce en años húmedos o ser prácticamente agua de mar en los años más secos. En cualquier caso, pueden esperarse variaciones estacionales notables. Por su parte, en las captaciones más profundas existentes en la fosa de Alcalá, entre las sierras de Irta y de Valdancha, el grado de mezcla con agua de mar

es notable, dando lugar incluso a la aparición de aguas de tipo clorurada sódica en los años más secos.

2. Hidrogeología

2.3. Acuíferos de borde de la Plana

La conexión hidráulica entre los materiales del Maestrazgo y la Plana de Oropesa - Torreblanca se establece a través de tres niveles acuíferos bien definidos que corresponden a los materiales jurásicos en el sector septentrional, calizas aptienses y cenomanienses en el sector central y materiales aptienses en el área meridional (Figura 10).

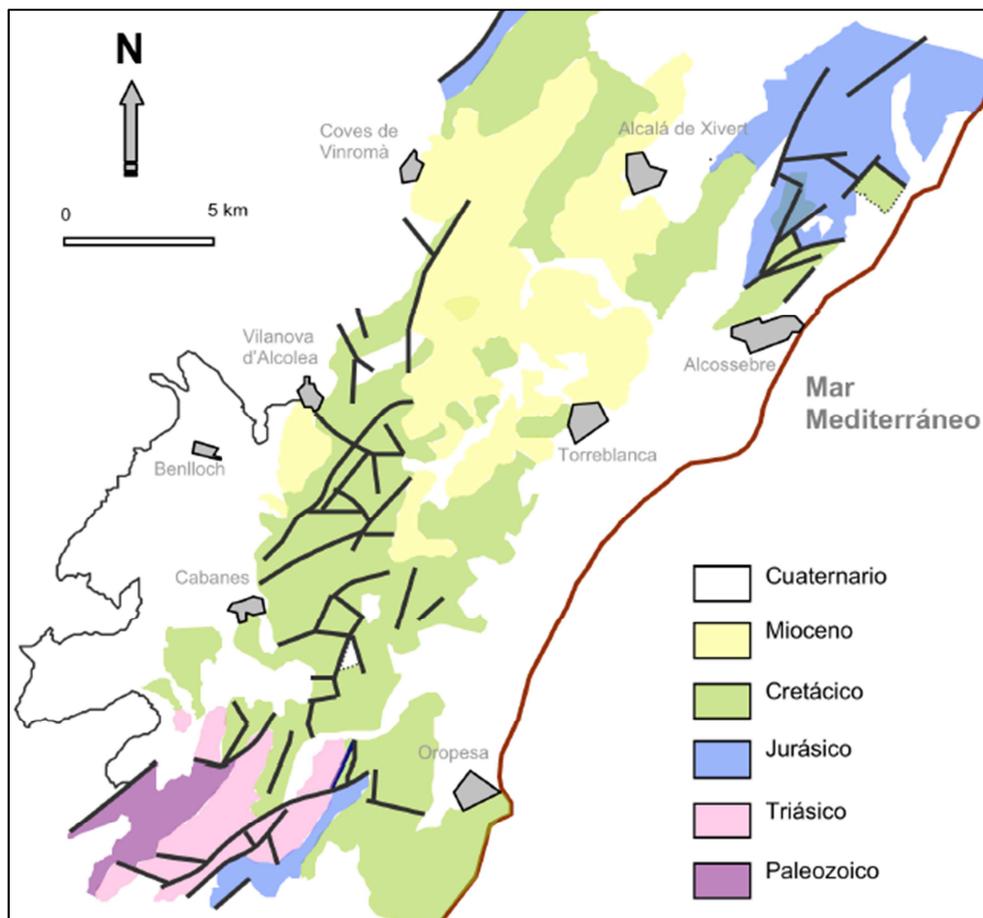


Figura 10. Situación esquemática de los acuíferos de borde (Renau, 2013)

2.3.1. Acuífero de materiales jurásicos

Los materiales jurásicos constituyen el acuífero regional del Maestrazgo, que se encuentra desconectado hidráulicamente de los acuíferos cretácicos. El conjunto jurásico tiene una potencia media del orden de 1.100 a 1.500 metros, aunque muy inferior en el sector oriental (Sierra de Irta) donde no supera los 300 metros.

En general, la sedimentación mesozoica está relacionada con una tectónica distensiva de bloques limitados por fallas lítricas, de dirección NO - SE, y reactivación de fracturas del basamento paleozoico que condiciona una disposición en grabens y semigrabens. El resultado es la formación de pasillos y depresiones encajonados entre alineaciones montañosas paralelas a la línea de costa, de la que la más oriental es la Sierra de Irta.

La serie jurásica más continua se encuentra en las cercanías de la Rambla de Ameler, en el sector meridional de la Sierra de Irta, en donde Morell (1985) describe la serie siguiente, de abajo a arriba (Figura 11):

- Dolomías y brechas dolomíticas grises, pertenecientes al Lias medio y superior
- Dolomías finamente tableadas, margas y calizas margosas beige, parcialmente dolomitizadas, con abundante fauna de braquiópodos y de fragmentos de ammonites que permiten datarlas como Toarciense (5 metros)
- Dolomías grises o negras masivas, que, en razón de su posición, deben pertenecer al Jurásico medio
- Calizas grises masivas seguidas de calizas finamente tableadas, intercaladas con margas y calizas bioclásticas. Estos materiales representan al Oxfordiense superior
 - Kimmeridgiense (100 metros)
- Dolomías negras, masivas, del límite Kimmeridgiense - Portlandiense

En general, los materiales jurásicos presentan una alta permeabilidad por fisuración y karstificación, especialmente los tramos de dolomías del Kimmeridgiense superior - Portlandiense y los de calizas y dolomías del Lías - Dogger. Recientemente, en 2007, se han realizado varios ensayos de bombeo en sondeos de investigación que han arrojado valores de transmisividad para las formaciones jurásico - cretácicas del orden de 3000 m²/día, con caudales específicos comprendidos entre 5 y 60 l/s/m (*Antón - Pacheco et al., 2007*).

Los materiales jurásicos descansan sobre arcillas y margas con yeso pertenecientes al Triásico superior, en facies Keuper, que sólo afloran puntualmente en la Sierra Espaniguera (*Mejías et*

2. Hidrogeología

al., 2006), en el sector meridional del Desierto de las Palmas sí han sido reconocidos en algunos sondeos realizados para captación de aguas en la vertiente occidental de Sierra de Irta.

Este acuífero jurásico descarga en el mar directamente o a través de las surgencias costeras mencionadas. Al sur de la Sierra de Irta ya no afloran y su descarga al mar debe tener lugar bajo el relleno pliocuaternario de la Plana de Oropesa - Torreblanca.

SERIE ESTRATIGRÁFICA SINTÉTICA

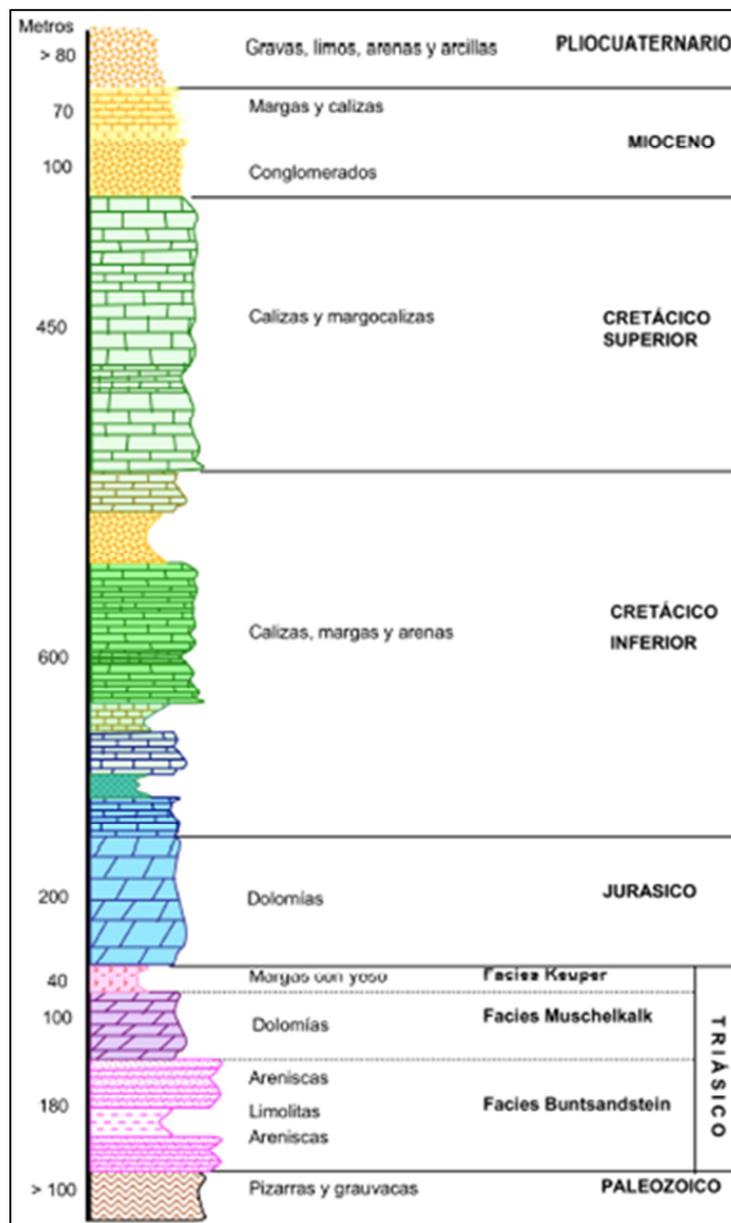


Figura 11. Serie estratigráfica sintética de los materiales de borde (Renau, 2013)

2.3.2. Acuífero de materiales aptienses (Cretácico inferior)

El Aptiense es el piso mejor representado en los alrededores del acuífero pliocuaternario, tanto por su espesor como por la extensión de sus afloramientos.

Estos materiales se encuentran en la Sierra de Oropesa, Sierra de les Santes, Ferradura y en la alineación Cuevas de Vinromá - Vilanova d'Alcolea. En los alrededores de la Plana se encuentran en el sector norte (barranco de Estopet, y extremo meridional de la Sierra de Irta), en el sector central (alrededores de Torreblanca) y en el sector sur (Sierra de Oropesa) (Figura 10).

La litología predominante es de caliza, grises y ocres, con intercalaciones margosas oscuras.

En el borde sur de la Plana, los materiales aptienses se hunden progresivamente bajo el relleno pliocuaternario. En este caso, el espesor es el máximo conocido, concretamente en la Sierra de Oropesa, alcanzando los 400 m. Debido a la baja permeabilidad de los materiales que lo rodean, la alimentación de esta unidad acuífera procede casi exclusivamente de la infiltración de las precipitaciones, por ello las transferencias recibidas de otros acuíferos son poco significativas (*Morell, 1985*).

En cambio, en el sector norte, en la margen occidental del barranco de Estopet y el extremo meridional de la Sierra de Irta, los materiales reciben un gran aporte del macizo jurásico, por existir conexión hidráulica entre ellos, lo que explicaría las surgencias costeras denominadas “Las Fuentes” de Alcocebre, surgencias difusas que pueden alcanzar un caudal máximo de 1 m³/seg, que presenta importantes oscilaciones estacionales (*Giménez, 1994*).

Finalmente queda nombrar los afloramientos de materiales aptienses que se observan en el sector central, entre el barranco del Toll y el núcleo urbano de Torreblanca, en este caso los espesores son los mínimos observados. La alimentación puede tener lugar a través de los conglomerados miocénicos e incluso del acuífero cretácico superior, con el que se encuentra tectónicamente conectado (*Morell, 1985*).

Las transmisividades que caracterizan estos materiales varían desde 500 m²/día a 4 m²/día, que evidencia la heterogeneidad hidráulica del acuífero, seguramente ligada a su funcionalidad de índole kárstica. El coeficiente de almacenamiento es del orden de 10⁻² (*Morell, 1985*).

2. Hidrogeología

2.3.3. Acuífero de materiales del Cretácico superior

Sobre las arenas y areniscas del Albiense superior, definidas como Formación Areniscas del Maestrazgo y que equivalen a la Formación Arenas de Utrillas, se encuentra la formación carbonatada del Cenomaniense que está formada por calizas intraclásticas, biomicritas y bioesparitas, con orbitolinas y lumaquelas con gran abundancia de ostreas, con un espesor conjunto del orden de 200 metros.

El Turoniense - Seroniense está representado por calizas intraclásticas grises de facies marino - lagunar, seguidas de una alternancia de calizas y dolomías (esparitas y doloesparitas), con una potencia mínima de 300 metros (*Morell, 1989*).

Estos materiales se sitúan en el sector central del borde de la Plana, en las inmediaciones de Torreblanca, en el Pico Ferradura y en las Sierras de Perchets y Sernavives. También se pueden reconocer en el sector norte, en el barranco de Estopet (Figura 10).

El macizo calcáreo principal del Cretácico superior, Sierras de los Perchets y Sernavives, constituye un importante acuífero kárstico que se extiende hacia el interior de la provincia. La alimentación que recibe, en rasgos generales, procede de la infiltración de las precipitaciones, pero también cabe la posibilidad de que reciba recarga lateral subterránea, a través de sus acuíferos de borde situados al norte y noroeste, a través del pasillo de Torre Endoménech e, incluso, desde la Sierra de Valdancha oriental. En cambio, en el afloramiento que se observa en las inmediaciones de Torreblanca, la alimentación debe proceder de los conglomerados miocénicos por existir continuidad hidráulica. En el sector norte, los materiales que se observan en el barranco de Estopet, son alimentados por el acuífero jurásico (*Morell, 1989*).

El grado de explotación de este acuífero es muy limitado y se dispone de escasa información sobre sus parámetros hidrodinámicos. Morell (1989) refiere valores de transmisividad comprendidos entre 15 y 212 m²/día y de coeficiente de almacenamiento del orden de $0.4 \cdot 10^{-1}$.

2.3.4. Acuíferos de materiales del Mioceno

Los materiales miocénicos afloran extensamente al oeste y al norte de Torreblanca, en clara discordancia sobre los materiales cretácicos, a los que recubren. El borde de la Plana, entre Torreblanca y el río Cuevas, está formado por materiales miocénicos, que rompen la continuidad en superficie de la rama occidental de la Sierra de Irta.

En cartografía, se pueden observar dos tramos litológicos bien definidos. El tramo inferior está constituido esencialmente por conglomerados calizos, de cantos muy redondeados, aunque de tamaño y clasificación variables. El origen de estos conglomerados es fluvio-torrencial, y su edad está comprendida entre el Oligoceno superior y Mioceno, la base de la formación es Chatiense (*IGME, 1975*) o, cuando menos, anterior a la facie lacustre. El espesor es superior a 100 metros. El tramo litológico superior está formado por materiales de naturaleza lacustre, tales como margas y calizas, con algunos episodios conglomeráticos e, incluso, arenosos. La potencia máxima reconocida en sondeos es de 70 metros en el entorno del río San Miguel, 90 metros en la Ribera de Cabanes y casi 100 metros cerca de la desembocadura del río Chinchilla, en Oropesa. En ambos casos se ha detectado la existencia de materiales de origen litoral e incluso marino (*Morell, 2008*).

Este nivel lacustre constituye un pequeño acuífero confinado en el que se llega a captar agua de mar en un pozo situado cerca de la desembocadura del río Chinchilla para el abastecimiento a la planta desaladora de Marina d'Or (*Morell, 2008*).

Sólo en los tres sondeos mencionados y en otros sondeos de investigación realizados por el Servicio Geológico de Obras Públicas en los años setenta (*SGOP, 1977*) se han caracterizado los materiales miocenos bajo el relleno cuaternario. En otros casos, los materiales miocenos están ausentes y el conjunto pliocuaternario reposa directa y discordantemente sobre materiales mesozoicos.

2. Hidrogeología

2.4. La masa de agua subterránea 080.110: Plana de Oropesa-Torreblanca

2.4.1. Situación y naturaleza

La Plana de Oropesa - Torreblanca es una llanura de derrame fluvio-torrencial de origen árido que se extiende paralela al litoral en dirección NE - SO, con una longitud de 21 km y una anchura variable entre 2.5 y 6 km. Se pueden diferenciar una llanura costera sensiblemente horizontal y una rampa de erosión hacia los bordes de los macizos calcáreos circundantes (Figura 13).

Se extiende de forma paralela a la costa desde Oropesa hasta Alcocebre, en la provincia de Castellón. Limita al oeste con los macizos de Torreblanca y Les Santes de la zona oriental del Maestrazgo, y al este con el mar Mediterráneo. Al norte y al sur limita con la Sierra de Irta y la Sierra de Oropesa respectivamente.

Los materiales que lo componen son de edad pliocuaternaria, de naturaleza detrítica. Básicamente se trata de acumulaciones de cantos rodados calizos, gravas y conglomerados procedentes de las sierras adyacentes con abundantes lentejones de arena gruesa, limos y arcillas, con frecuentes cambios laterales y verticales de facies, y con una distribución poco uniforme, sobre los que se encuentran depósitos más recientes de conos de deyección, coluviones, aluviales, dunas y turberas (*ENADINSA, 1973*).

En el sector central de la Plana, donde se encuentra la zona húmeda denominada el Prat de Cabanes, los materiales corresponden a limos y margas de color pardo y negro, donde se reconoce un nivel de turba de 3 a 4 metros de espesor, el cual se explota económicamente. El Prat de Cabanes presenta una forma alargada, con una anchura media de un 1.5 km y una longitud aproximada de 9 km. Su orientación es paralela a la costa, dirección catalánide, con una superficie de unos 9 km². Está limitado por una barra costera de casi 8 km de longitud, de unos 20 m de anchura y 3 de altura, constituida por cantos rodados, bien clasificados, con tamaños que oscilan entre 1 y 20 cm (*ADARO, 1973a*).

2.4.2. Geometría y límites

Los límites hidrogeológicos del acuífero pliocuaternario están definidos al norte por los afloramientos calizos cretácico - jurásicos de la Sierra de Irta. El límite occidental está constituido por calizas masivas gargasienses y aptienses en conexión hidráulica con el pliocuaternario, excepto en las inmediaciones del barranco de Chinchilla y río de San Miguel donde aflora el impermeable mioceno de base. Por el sur limita con las calizas cretácicas de la Sierra de Oropesa. El límite oriental es abierto, permitiendo la conexión hidráulica con el mar (*EPTISA, 1975a y 1975b; SGOP, 1975; Morell, 1985*).

Con su observa en las figuras 12 y 13, se alcanzan cotas en la Plana de alrededor de los 130 msnm, alcanzando profundidades cercanas a los 125 mbnm.

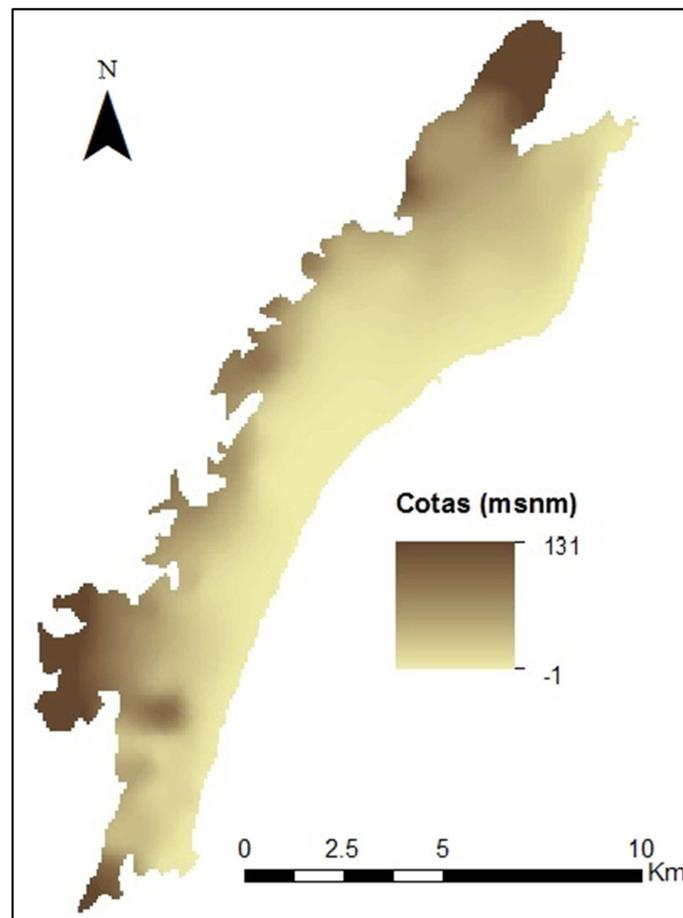


Figura 12. Topografía de la formación hidrogeológica

2. Hidrogeología

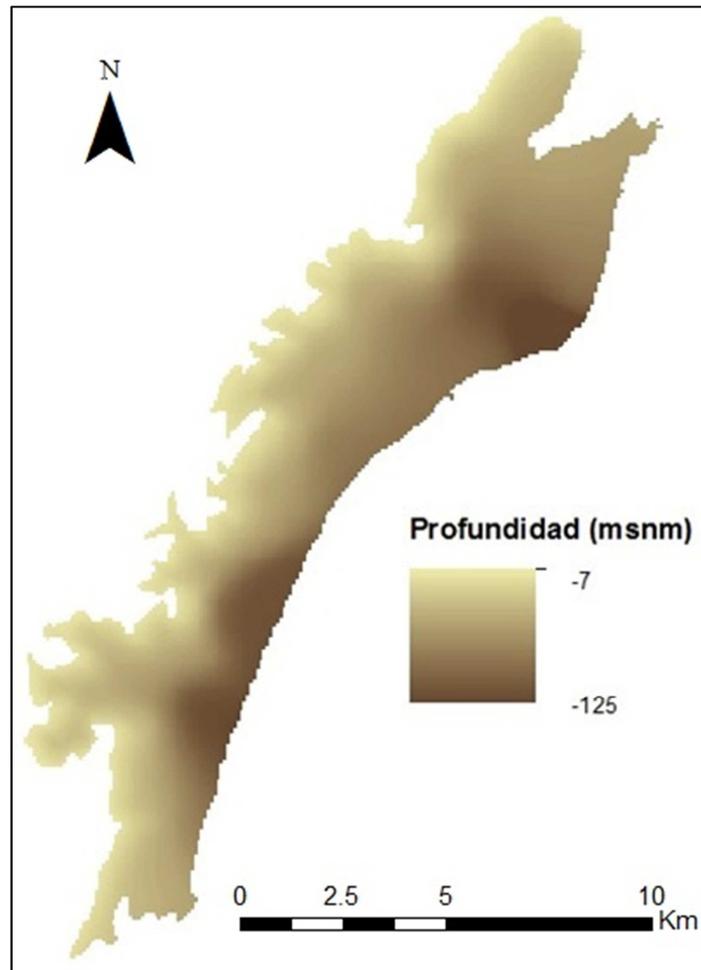


Figura 13. Profundidades del muro de la formación hidrogeológica

Como se observa en la figura 14, la geometría de la Plana es similar a una cuña excepto en el borde interior de ésta dónde los espesores aumentan considerablemente debido a la fuerte pendiente observada en la topografía en estas zonas.

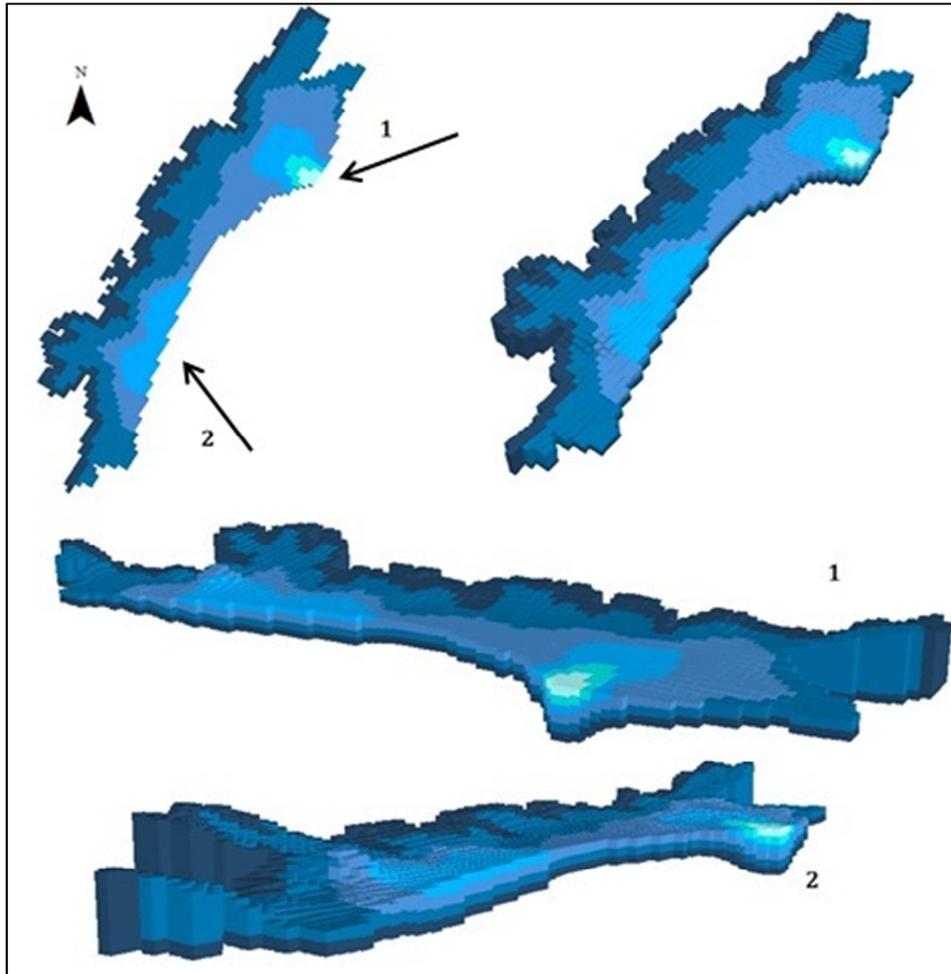


Figura 14. Visualización de la Plana de Oropesa - Torreblanca con Seer3D

Desde el punto de vista de la geología, la provincia de Castellón está situada en las estribaciones orientales de la Cordillera Ibérica. Esta cordillera está formada por una serie de macizos mesozoicos con núcleos paleozoicos aislados que, en general, quedan individualizados por cubetas rellenas de materiales terciarios o cuaternarios.

Por lo que respecta a nuestro caso de estudio, la Plana de Oropesa - Torreblanca es una llanura costera situada en el extremo oriental de la Cordillera Ibérica.

Está flanqueada por las Sierras de Irta, Oropesa y Torreblanca, con alineaciones de orientación catalánide (N10 E), que condicionan el máximo alargamiento de la Plana en esa misma dirección.

Las sierras mencionadas están formadas por materiales esencialmente carbónicos, de edad Cretácico - Jurásico (materiales orogénicos) situándose sobre la masa de agua subterránea 080.008 Maestrazgo Oriental, mientras que la Plana está constituida por materiales

2. Hidrogeología

pliocuaternarios (postorogénicos). Reseñar que como se dijo anteriormente la zona del Prat de la Ribera o Pantano del Prat se encuentra constituido por marjalería (Figura 15).

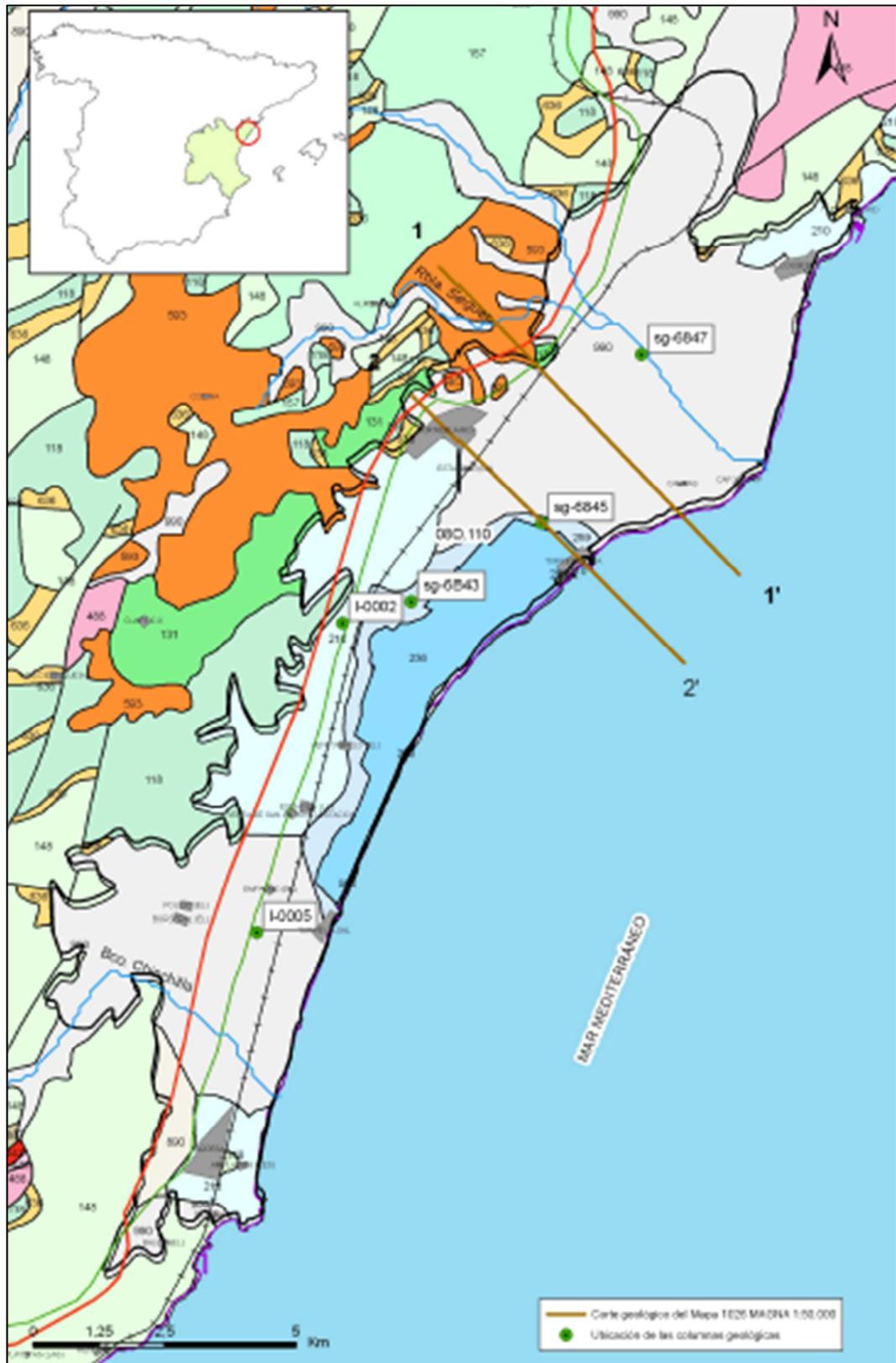


Figura 15. Mapa Geológico (CHJ, 2007)

Diferentes sondeos realizados en la zona determinaron que el acuífero se encuentra constituido por una depresión tectónica rellena, en una primera fase, por materiales margoarcillosos sobre los que se depositaron, en fase posterior, una serie de conglomerados alternantes con lentejones dispersos de arenas gruesas, limos y arcillas -que constituyen el soporte del acuífero detrítico-, sobre los que se encuentran depósitos de conos de deyección, aluviones de cauces de ramblas, dunas costeras, etc.

Por lo que respecta al marco socioeconómico, la Plana de Oropesa - Torreblanca goza de un clima típicamente mediterráneo si bien sus constantes climáticas son de una notable originalidad derivada del fuerte control que sobre ellas ejercen sus peculiaridades geográficas y atmosféricas.

La temperatura media anual varía entre 15 - 17 °C, donde raramente se baja de 0 °C ni se sobrepasan los 40 °C.

En cuanto a las precipitaciones, la media anual es del orden de 500 - 600 mm, siendo la característica más notable del régimen de lluvias su irregularidad tanto en su distribución estacional como hiperanual, produciéndose años secos y húmedos desigualmente repartidos.

En el área de estudio se asientan poblaciones como Oropesa del Mar, Torreblanca, Alcocebre, Torrenostrá y Torre la Sal, siendo las principales poblaciones que se asientan sobre la Plana: Oropesa del Mar y Torreblanca (Figura 16).



Figura 16. Localización geográfica de las principales poblaciones y municipios existentes en la Plana de Oropesa - Torreblanca

2. Hidrogeología

Diferenciando entre los distintos municipios existentes en la Plana de Oropesa - Torreblanca, podemos observar diferentes economías como:

- Agricultura: Uno de los pilares económicos de la población, siendo sus principales productos las almendras, aceitunas, naranjas, uva de mesa (moscatel) y vino, cereales y leguminosas.
- Industria: Construcción de muebles y sus derivados, tejidos, prendas de vestir, depósitos de materiales de construcción, molinos de aceite, talleres de armaduras metálicas, carpinterías, reparación de automóviles y afines, así como varios almacenes de frutas donde se manipulan, envasan y comercializan muchos de los frutos del término municipal.
- Turismo: Repartido entre el término de Cabanes y el de Oropesa del Mar, se encuentra el complejo turístico Marina d'Or, Ciudad de Vacaciones. En la actualidad se ha desarrollado de manera importante el sector turístico en la playa de Torrenostra (Torreblanca).
- Ganadería: Granjas porcinas, avícolas, vacuno, lanar y cabrío.

En relación a la demanda hídrica, las dotaciones de riego son distintas según el origen del agua, entre 5100 y 6500 m³/ha/año para agua procedente del acuífero y 7500 m³/ha/año para aguas superficiales. Los bombeos para usos agrícolas son del orden de 32.5 hm³/año, mientras que la demanda para consumo humano es de 3.35 hm³/año, por lo que los bombeos totales del acuífero son la suma de los bombeos para usos agrícolas y usos urbanos, que son 35.85 hm³/año (IGME, 2009).

2.4.3. Parámetros hidrodinámicos

La Plana de Oropesa - Torreblanca presenta, como se dijo anteriormente, conexiones hidráulicas con la masa de agua subterránea Maestrazgo Oriental, que la delimita al norte, al oeste y al sur. Al norte se sitúan los afloramientos calizos del cretácico inferior (aptiense) y jurásicos de la Sierra de Irta; en el borde occidental se observan conglomerados terciarios, calizas masivas del cretácico superior (garganiense) e inferior (aptiense); y en el suroeste destacan las calizas del cretácico inferior (aptiense) de la Sierra de Oropesa. En el sur, el límite se considera cerrado, por no existir continuidad hidráulica entre los materiales limítrofes y el acuífero pliocuaternario. Las transmisividades en el acuífero pliocuaternario varían entre 100 y 2500 m²/día y los coeficientes de almacenamiento entre el 2 y el 12% (*Morell, 1985*).

El flujo subterráneo transcurre en general en sentido NO-SE, aunque en los sectores del barranco de Chinchilla y este de Torreblanca se puede invertir el sentido del flujo debido a la intensa explotación de los recursos, provocando la entrada de agua de mar.

2.4.4. Rasgos hidroquímicos básicos

El acuífero cuaternario de la Plana recibe aportes laterales subterráneos importantes desde los acuíferos de borde. En general, las aguas procedentes de los acuíferos de borde, que son de naturaleza carbonática, son aguas bicarbonatadas cálcicas de baja mineralización. Sin embargo, la mayor parte del acuífero presenta facies cloruradas como consecuencia de la mezcla con agua de mar que afecta a la casi totalidad del acuífero. Los procesos de cambio iónico inverso inherentes a la mezcla, que involucran preferentemente al sodio y al calcio, conducen a la prevalencia de la facies clorurada cálcica. También se han encontrado concentraciones elevadas de ión nitrato, procedente de los abonos nitrogenados utilizados en la agricultura de la zona (*Giménez, 1994*).

En el área de Oropesa se encuentran aguas con mayor componente sulfatada y enriquecidas en potasio, boro y yoduro, que se relacionan (*Morell, 1985*) con flujos de circulación restringida, escasa potencia, transmisividad muy baja, escasa conexión con el mar y el tipo de alimentación proviene de materiales triásicos (Macizo del Desert de les Palmes), lo que confiere al sector un carácter de subacuífero aislado.

2. Hidrogeología

2.5. Importancia ambiental del Prat de Cabanes

2.5.1. Datos básicos

La Generalitat Valenciana, en el ejercicio de las competencias autonómicas en la materia, consideró necesaria la declaración de un régimen especial de protección para los valores naturales del Prat de Cabanes - Torreblanca, también denominado Prat de Cabanes. Dicho régimen contempla la ordenación de las actividades que se desarrollan en el área, con el objeto de hacerlas compatibles con la conservación de los valores ecológicos del espacio.

La Ley de la Generalitat Valenciana 11/1994 de Espacios Naturales de la Comunidad Valenciana regula la figura de protección del Parque Natural la cual se aplica al Prat de Cabanes - Torreblanca de acuerdo con los Decretos 188/1988 de 12 de diciembre, y 264/1994, de 20 de diciembre, del Consell de la Generalitat Valenciana.

Además, el Prat de Cabanes - Torreblanca se incluye como Zona Húmeda de especial importancia en el acuerdo de RAMSAR (Convención sobre Zonas Húmedas de Importancia como Hábitat para las Aves Acuáticas), por decisión del Consejo de Ministros del 28 de julio de 1989, a propuesta del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

Está declarado como Zona de Especial Protección para las Aves (Zona ZEPA), de acuerdo con la Directiva 79/409/CEE, relativa a la Conservación de las Aves Silvestres.

Este espacio está también incluido en el catálogo de Important Bird Areas in Europe, confeccionado por las siguientes asociaciones: ICBP (International Council for Birds Preservation), IWRB (International Waterfowl and Wet Lands Research Bureau) y RSPB (Royal Society for the Protection of Birds).

En la actualidad el Prat dispone de un Plan de Ordenación de los Recursos Naturales y Rector de Uso y Gestión del Parque, aprobado por el Decreto 4/2003, de 21 de enero, del Consell de la Generalitat.

2.5.2. Caracterización paleográfica del Prat

El Prat de Cabanes - Torreblanca es una estrecha franja de terreno de marismas y pantanos formada por depósitos cuaternarios. El paisaje característico del Prat es el propio de una zona húmeda litoral, separada del mar por un cordón de gravas y cantos rodados con algunas zonas de playa arenosa. Se trata de una antigua albufera cerrada por un cordón litoral de gravas y cantos, colmatada por sedimentos de carácter aluvial (acumulaciones de cantos calizos con potentes intercalaciones arcillosas) procedentes de los relieves circundantes.

El Prat, es una zona húmeda, que presenta una lámina de agua permanente en algunos lugares y estacional en otros. La inundación de determinadas zonas tiene lugar cuando el nivel freático alcanza la cota topográfica de las zonas deprimidas. Otros aportes de agua de escasa importancia se producen como consecuencia de precipitaciones extraordinarias. No existe en el Prat ningún curso fluvial de régimen continuo, aunque si se encuentran manantiales de agua dulce que contribuyen a mantener zonas inundadas durante todo el año.

Dicho humedal se puede clasificar como una zona húmeda del ámbito costero mediterráneo dominado por la dinámica litoral (*Durán et al., 2009*). El predominio de la dinámica litoral significa que su formación se concreta en el cierre de una bahía mediante el crecimiento de una barra litoral que la separa total o parcialmente del mar.

La génesis del Prat, según Viñals (2004), se remonta al periodo postflandriense, ya que la presencia de restos fósiles de otras restingas sugiere la presencia de este modelo morfológico durante el Pleistoceno.

Según Carmona y Ruiz (2009), la restinga de cantos se extiende entre los abanicos aluviales del río Cuevas o San Miguel (Punta de Cap i Corp) y el abanico del río Chinchilla a lo largo de ocho kilómetros. Intercalados entre el cordón de cantos y las facies distales de los abanicos pleistocenos aparecen diversos afloramientos rocosos de arenisca (eolianitas) discontinuos. Se localizan principalmente al sur del Quarter Vell, en la Torre de la Sal y en la desembocadura del río Chinchilla. En la restinga se puede distinguir un tramo septentrional de cantos (hasta el norte del Quarter Vell), un tramo central arenoso y un tramo meridional (hasta la Torre de la Sal) de cantos, pero con una pequeña acera arenosa en la base de la cresta y abundantes afloramientos de eolianita. El tramo central arenoso podría explicarse por la refracción del oleaje en el centro de la bahía. Carmona y Ruiz (2009) realizaron sondeos de investigación en la zona húmeda para caracterizarla desde el punto de vista sedimentológico.

2. Hidrogeología

2.6. Síntesis e incertidumbres del grado de conocimiento actual

La plana litoral de Oropesa-Torreblanca, tiene una superficie aproximada de 90 km², se extiende a lo largo de 21 km. de costa entre las localidades de Alcocebre y Oropesa. La formación se considera de edad pliocuaternaria constituida por conglomerados brechoides, heterogéneos y heterométricos, alternantes con lentejones de arenas gruesas, limos y arcillas, sobre los que se encuentran depósitos recientes como conos de deyección, colusiones, aluviones, dunas costeras, depósitos de marjal y turberas, estos últimos muy desarrollados en la zona de Torrenostra. El espesor del acuífero crece hacia la costa hasta un máximo de 125 y 85 metros en las desembocaduras de los ríos San Miguel y Chinchilla, respectivamente.

El impermeable de base lo constituyen las margas y arcillas del mioceno, que incluyen alguna intercalación conglomerática y de calizas. Los límites hidrogeológicos del acuífero pliocuaternario están definidos al norte por los afloramientos calizos cretácico jurásicos de la Sierra de Irta. El límite occidental está constituido por calizas masivas gargasienses y aptienses en conexión hidráulica con el pliocuaternario, excepto en las inmediaciones del barranco de Chinchilla y río de San Miguel donde aflora el impermeable mioceno de base. Por el sur limita con las calizas cretácicas de la Sierra de Oropesa. El límite oriental es abierto, permitiendo la conexión hidráulica con el mar.

El flujo subterráneo transcurre en general en sentido NO-SE, aunque en los sectores del barranco de Chinchilla y este de Torreblanca se puede invertir el sentido del flujo debido a la intensa explotación de los recursos, provocando la entrada de agua de mar. Las transmisividades calculadas en el acuífero pliocuaternario varían entre 100 y 2500 m²/día y los coeficientes de almacenamiento entre el 2 y el 12% (*Morell, 1985*).

Sobre la Plana de Oropesa - Torreblanca se sitúan las poblaciones de: Oropesa del Mar, Ribera de Cabanes, Torreblanca y Alcocebre, mientras que en sus alrededores se localizan Benicásim, Cabanes, Torre Endoménech, Cuevas de Vinromá y Alcalá de Chivert.

El sector septentrional está atravesado por el Río Cuevas o de San Miguel y su afluente principal, la rambla de Seguer, y el meridional, por el Barranco de Chinchilla, ambos de régimen intermitente.

Diferenciando entre los distintos municipios existentes en la Plana de Oropesa - Torreblanca, podemos observar diferentes economías como: agricultura, industria, turismo y ganadería.

Cuando analizamos el último estudio (*Renau, 2013*) y la documentación existente al respecto, observamos que, aun siendo en estado transitorio, este modelo sigue teniendo una geometría diferente a la real, lo cual implica que tanto los bombeos, flujos laterales como la recarga de la masa serán menores a los reales. El objetivo de modelar en tres dimensiones se justifica fundamentalmente a que de este modo se va a poder reproducir de forma más realista lo que ocurre en la zona o franja litoral que tiene una gran influencia en todo el acuífero. La resolución usada en los antecedentes, de 500x500 m, es considerable pero queda insuficiente, para poder llevar a cabo una representación realista de la topografía, permeabilidades, transmisividades, profundidades del acuífero, etc. Es evidente que la necesidad de interpolaciones para muchos datos de tipo espacial limita la representatividad del modelo, y que un aumento de la resolución espacial requerirá una mayor interpolación. Sin embargo, es necesaria una mayor resolución de la discretización para construir un modelo en que pueda resolverse de forma realista el problema de flujo y transporte; téngase en cuenta que en algunas zonas la dimensión del acuífero perpendicularmente a la costa es apenas un orden de magnitud mayor que la escala de modelado. En conclusión, partiendo de los últimos progresos en el conocimiento de la formación, se detecta la necesidad de que el nuevo modelo reúna las características siguientes:

- Transitorio, para el periodo de datos disponible facilitados por Renau (2013)
- Tridimensional
- Mayor resolución
- Se considere una capa subyacente en línea con lo postulado por Renau (2013)
- Abarque la masa de agua subterránea que recibe parte de los aportes provenientes de los acuíferos limítrofes y que alimenta al acuífero principal.
- Incluya recargas laterales de las formaciones vecinas constituidas por materiales jurásicos, cretácicos superiores e inferiores y miocénicos
- Parta de unas recargas de riegos, de lluvia y datos de bombeo que se consideran una aproximación plausible, y que provienen de los estudios de González-Hidalgo (2008) y González-Hidalgo et al. (2010) para las lluvias, de Tuñón (2000) para las tasas de infiltraciones, y de los ayuntamientos y comunidades de regantes para los bombeos.
- Se considere el Prat de Cabanes debido a su importancia ambiental, y a su papel en el balance hídrico del acuífero.

2. Hidrogeología

- Incluya la modelación del flujo y transporte y tenga en cuenta los datos de piezometría y salinidades en la calibración; el zonado de los parámetros hidrodinámicos deberá incrementarse con respecto a modelos anteriores.

3. La intrusión marina en la Plana de Oropesa - Torreblanca

3.1. Antecedentes de Problemas de Calidad

Si bien en informes elaborados por el IGME y el SGOP entre 1975 y 1980 existían algunas referencias al proceso de intrusión marina existente en la Plana de Oropesa - Torreblanca, el primer trabajo específico sobre el tema es la tesis doctoral de Morell (1985) y los trabajos derivados de la misma (*Morell y Pulido - Bosch, 1986; Morell et al., 1987; Morell 1988; Morell et al., 1988; Morell et al., 1996a, 1996b y 1996c*). Estos trabajos hacen hincapié en los aspectos hidrogeoquímicos del proceso e indican que el mismo “se encuentra en fase de progresivo incremento y se extiende a todo el acuífero” y aportan información de interés sobre la utilidad de iones minoritarios, como bromuro y estroncio, en la caracterización de la intrusión marina. También ponen de manifiesto la importancia de las reacciones de cambio iónico y analizan, mediante perfiles verticales de conductividad eléctrica, la respuesta de la posición de la interfaz a los eventos lluviosos.

Más tarde, Giménez (1994) actualiza la información y profundiza en el estudio de los procesos de cambio iónico (*Giménez et al., 1995; Giménez y Morell, 1997*) permitiendo identificar situaciones de avance o retroceso de la interfaz mediante la aplicación de análisis de facies hidroquímicas.

Basado en el análisis de los datos proporcionados por las redes de control de intrusión, el IGME (2000) actualizó los conocimientos sobre los acuíferos costeros de las cuencas del Júcar, Segura e Islas Baleares. El informe destaca que la práctica totalidad del acuífero de Oropesa - Torreblanca superaba en 1999 los 400 mg/l de Cl^- y más de dos tercios los 800 mg/l. Diferencia tres zonas con valores superiores a 1200 mg/l de Cl^- : al norte del barranco de Chinchilla, al suroeste del núcleo urbano de Torreblanca, y la última desde la desembocadura del río San Miguel extendiéndose rambla arriba. En los dos primeros casos interpreta la existencia de domos salinos mientras que en el caso de río San Miguel parece deberse al avance horizontal de la cuña salina.

La CHJ (*Fidalgo et al., 2007*) efectuó un estudio para la caracterización del estado cualitativo de las masas de agua subterránea de la franja litoral de la cuenca del Júcar. Según este estudio, la presión en la masa de agua subterránea 080.110 (Plana de Oropesa - Torreblanca) conforme al índice de densidad de captaciones subterráneas es significativa y según el índice de explotación de la masa de agua subterránea costera es no significativa. Por consiguiente, la

3. La intrusión marina en la Plana de Oropesa - Torreblanca

presión global por intrusión marina según estos criterios es significativa. Pero el estudio va más allá y evalúa los impactos con influencia de la intrusión marina, siendo:

- El impacto probable global (impacto probable cuantitativo y químico), es considerado probable
- El impacto comprobado global (impacto comprobado cuantitativo y químico), es considerado probable
- El impacto global, por tanto, es probable

Por consiguiente, la evaluación del riesgo de no alcanzar los objetivos medioambientales por intrusión marina en 2015 según las directivas 2000/60/CE (*UE - DMA, 2000*) y 2006/118/CE (*UE, 2006*) es de riesgo SEGURO.

Según estas directivas, los planes de gestión debieron aplicarse en 2012 y su objeto fue:

- Prevenir el deterioro, mejorar y restaurar el estado de las masas de agua superficiales, lograr que estén en buen estado químico y ecológico a más tardar a finales de 2015, y reducir la contaminación debida a los vertidos y emisiones de sustancias peligrosas;
- Proteger, mejorar y restaurar la situación de las aguas subterráneas, prevenir su contaminación y deterioro y garantizar un equilibrio entre su captación y su renovación;
- Preservar las zonas protegidas.

3.2. Conclusiones de la intrusión marina en la Plana de Oropesa - Torreblanca

A la vista de los datos aportados por los estudios realizados hasta fechas muy recientes se podría resumir que la intrusión marina en el acuífero pliocuaternario de la Plana de Oropesa - Torreblanca es patente desde hace más de cuatro décadas y que ha ido progresando hasta afectar a la totalidad del acuífero. Sin duda, la conversión de extensas áreas de secano tradicional (almendros principalmente) a cultivos de regadío (cítricos) ha sido la causa principal de la sobreexplotación que ha sufrido el acuífero; en menor medida, también ha contribuido el auge turístico experimentado hacia finales del siglo XX. Sin embargo, existen evidencias de que el proceso debe encontrarse en situación estacionaria e incluso en regresión en algunos sectores ya que la modernización de los sistemas de riego, que incluye el cambio de sistema de riego de inundación a goteo, el progresivo abandono de las tierras de cultivo por la presión urbanística y el estancamiento del turismo han reducido notablemente los volúmenes de bombeo, especialmente en la mitad sur del acuífero.

4. Base Matemática

4.1. Fundamentos matemáticos del flujo de densidad variable y el transporte de solutos en aguas subterráneas

El desarrollo de ecuaciones matemáticas que describen los procesos de flujo y transporte subterráneo se pueden determinar a partir del principio fundamental de la conservación de la masa de un fluido o de un soluto. El proceso de flujo subterráneo está regido por las relaciones expresadas mediante la ley de Darcy, mientras el transporte contempla los cambios de la concentración de una especie química disuelta en un acuífero en cada instante de tiempo y en cada punto, debido a los procesos tales como la advección, dispersión hidrodinámica, la mezcla con un fluido fuente y las reacciones químicas que se puedan dar.

El agua subterránea puede presentar compuestos disueltos que en concentraciones relativamente bajas, generan variaciones espaciales en la densidad del fluido mínimas; bajo esta condición los métodos matemáticos para cuantificar índices y patrones del flujo del agua subterránea son relativamente directos. Cuando la concentración de compuestos disueltos es significativa, ciertas propiedades como la densidad puede variar en el espacio o tiempo, además si las propiedades del agua son heterogéneas y/o transitorias, las relaciones entre los niveles de agua, las presiones del fluido y las velocidades del flujo no son ni simples ni directas. En dichos casos la ecuación de flujo se escribe y se resuelve en función de la presión y las densidades del fluido y la permeabilidad intrínseca del medio poroso (*Konikow, 2002*). De esta manera, la variación de las concentraciones del soluto representadas en los cambios de densidad en el medio afecta directamente tanto las ecuaciones de transporte como flujo.

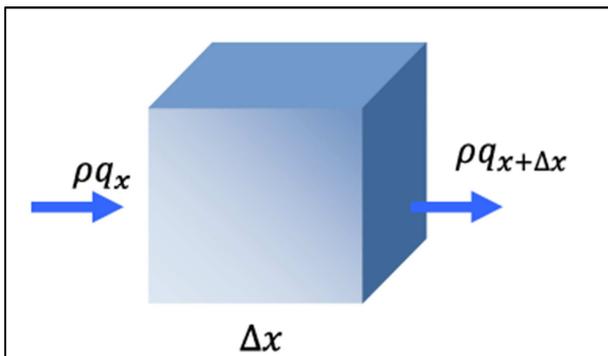
Bajo las consideraciones anteriores, en esta sección se presenta las ecuaciones gobernantes para el flujo y transporte, y las ecuaciones de estado usadas para representar la densidad del fluido como una función de variables de estado.

4. Base matemática

4.1.1. Ecuaciones gobernantes del flujo de densidad variable

4.1.1.1. Flujo másico en medios porosos

Si se considera un volumen elemental representativo en un medio poroso como se muestra en la figura 17 y basados en el principio de conservación de masa del fluido y el soluto, la tasa de acumulación de masa almacenada en el volumen es igual a la suma algebraica de los flujos de masa a través de las caras del elemento y el intercambio de masa debido a la presencia de fuentes/sumideros. La expresión matemática para la conservación de masa es igual a:



$$-\nabla(\rho\vec{q}) + \bar{\rho}q_s = \partial(\rho\theta)/\partial t \quad (1)$$

Figura 17. Volumen elemental representativo (VER) en un medio poroso

donde

∇ : es el operador gradiente $\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$

ρ : es la densidad del fluido en (M/L³)

\vec{q} : es el vector de descarga específica (L/T)

$\bar{\rho}$: es la densidad del fluido entrante desde una fuente o saliente a través de un sumidero (M/ L³)

q_s : es la tasa de flujo volumétrico por unidad de volumen del acuífero representando fuentes/sumideros (1/T)

θ : Porosidad

t : Tiempo

Los términos de la izquierda en la ecuación 1, representan el flujo másico a través de las caras del VER y el término de la derecha representa la tasa de cambio en la masa almacenada en el mismo en un periodo de tiempo dado. La tasa de cambio en la masa almacenada puede ser expandida empleando la regla de la cadena tal como se presenta en la ecuación 2.

$$\partial(\rho\theta)/\partial t = \rho \partial\theta/\partial t + \theta \partial\rho/\partial t \quad (2)$$

Si sólo se considera que los cambios en la porosidad son asociados al cambio de presión en el fluido, dicho cambio es expresado en la ecuación 3 como:

$$\partial\theta/\partial t = \partial\theta/\partial P * \partial P/\partial t \quad (3)$$

Bajo condiciones isotérmicas, la densidad es función de la presión del fluido en el poro y la concentración del soluto. Por lo tanto, la ecuación de estado de la densidad es:

$$\rho = f(P, C) \quad (4)$$

Al diferenciar la ecuación 4 con respecto a un tiempo dado se tiene:

$$\partial\rho/\partial t = (\partial\rho/\partial P * \partial P/\partial t) + (\partial\rho/\partial C * \partial C/\partial t) \quad (5)$$

Reemplazando las ecuaciones 3 y 5 en 2, el almacenamiento en el VER corresponde a:

$$\frac{\partial(\rho\theta)}{\partial t} = \rho \left(\frac{\partial\theta}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial t} \right) + \theta \left[\left(\frac{\partial\rho}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial t} \right) + \left(\frac{\partial\rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} \right) \right] \quad (6)$$

(1) (2) (3)

Los términos 1 y 2 en la ecuación 6, representan la tasa de acumulación de la masa del fluido debido a los efectos de almacenamiento del agua subterránea (por ejemplo, debido a la compresibilidad del material poroso y la compresibilidad del fluido). El tercer término, representa la tasa de acumulación de la masa del fluido debido a los cambios de la concentración del soluto (*Guo & Langevin, 2002*).

Bear (1979) planteó la relación entre porosidad, presión y la compresibilidad del material poroso a través de la compresibilidad del material poroso (ζ) y el coeficiente de la compresibilidad del agua (ξ); los cuales son definidos de la siguiente manera:

$$\xi = 1/(1 - \theta) * \partial\theta/\partial P \quad (M^{-1}LT^2) \quad \zeta = 1/\rho * \partial\theta/\partial P \quad (M^{-1}LT^2) \quad (7)$$

Al reemplazar la ecuación 7 en 6, reordenando la ecuación se obtiene

4. Base matemática

$$\frac{\partial \rho \theta}{\partial t} = \rho \xi (1 - \theta) \left(\frac{\partial P}{\partial t} \right) + \theta \rho \zeta \left(\frac{\partial P}{\partial t} \right) + \theta \left(\frac{\partial \rho}{\partial C} \right) \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right) \quad (a)$$

$$\frac{\partial \rho \theta}{\partial t} = [\xi (1 - \theta) + \theta \zeta] \left(\rho \frac{\partial P}{\partial t} \right) + \theta \left(\frac{\partial \rho}{\partial C} \right) \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right) \quad (b)$$

(8)

El almacenamiento específico en términos de presión (S_p) representa el volumen de agua liberada desde el almacenamiento por unidad de volumen de un acuífero confinado elástico por cambio de unidad de la presión; la expresión matemática corresponde a:

$$S_p = [\xi (1 - \theta) + \theta \zeta] \quad (9)$$

Al sustituir la ecuación 9 en 8, el almacenamiento en VER es definido como:

$$\frac{\partial \rho \theta}{\partial t} = \rho S_p \frac{\partial P}{\partial t} + \theta \left(\frac{\partial \rho}{\partial C} \right) \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right) \quad (10)$$

(a) (b)

De esta manera se obtiene que los cambios de masa en el almacenamiento son debidos a los cambios de presión en el poro (termino a) y a los cambios en la concentración del soluto (termino b). Al sustituir la ecuación 10 en 1, se obtiene la forma general de la ecuación de flujo de densidad variable de agua subterránea en términos de derivadas parciales:

$$-\nabla(\rho \vec{q}) + \bar{\rho} q_s = \rho S_p \frac{\partial P}{\partial t} + \theta \frac{\partial \rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} \quad (11)$$

Al considerar la densidad constante, el término $\partial \rho / \partial C$ en la ecuación 11 se hace cero y los términos de densidad restantes se cancelan, de esta manera, se obtiene la ecuación de flujo basada en la conservación del volumen del fluido comúnmente usada para casos de densidad uniforme (*Guo & Langevin, 2002*).

4.1.1.2. Ley general de Darcy

La ecuación gobernante del flujo de agua subterránea para densidad variable incluye el término de descarga específica (\vec{q}) el cual es calculado con la ley de Darcy, mediante la siguiente expresión general (Bear, 1979):

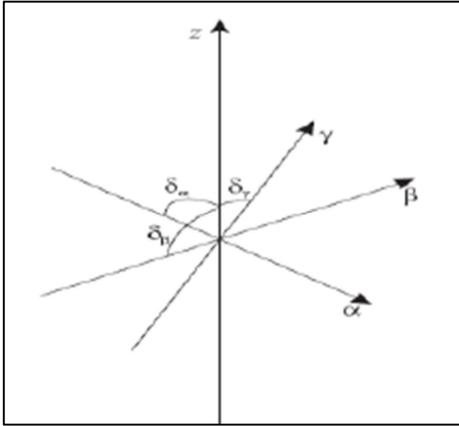
$$q = -\frac{k}{\mu}(\nabla P + \rho g \nabla z) \quad (12)$$

donde

- k : es el tensor de la permeabilidad del medio (L^2)
- μ : viscosidad dinámica del fluido (M/LT)
- g : gravedad (L/T^2)
- P : presión (M/LT²)
- z : es la dirección de la coordenada alineada con la gravedad (positiva hacia arriba)

Considerando que los ejes principales de permeabilidad no coincidan con los ejes coordinados x , y , z ; la ley de Darcy puede ser expresada de forma general, asumiendo un sistema coordenadas alineadas a las direcciones principales de la permeabilidad tal como se muestra en la figura 18. Donde γ representa la dirección normal al lecho, α y β representan las direcciones principales paralelas a la permeabilidad del lecho; los gradientes de presión que actúan en las direcciones α , β y γ se pueden formular por separado considerando la componente de la fuerza gravitacional q se aplica en cada dirección de la coordenada, ya que ninguna de las direcciones del sistema empleado es horizontal, por lo tanto:

4. Base matemática



$$q_{\alpha} = \frac{k_{\alpha}}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial \alpha} + \rho g \cos \delta_{\alpha} \right) \quad (13)$$

$$q_{\beta} = \frac{k_{\beta}}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial \beta} + \rho g \cos \delta_{\beta} \right) \quad (14)$$

$$q_{\gamma} = \frac{k_{\gamma}}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial \gamma} + \rho g \cos \delta_{\gamma} \right) \quad (15)$$

Figura 18. Relación entre un sistema de coordenadas alineado con el eje principal de permeabilidad

Siendo

$q_{\alpha}, q_{\beta}, q_{\gamma}$ Los componentes de la descarga específica en los ejes coordinados (LT^{-1})

$k_{\alpha}, k_{\beta}, k_{\gamma}$ Las permeabilidades en las direcciones (L^2)

$\delta_{\alpha}, \delta_{\beta}, \delta_{\gamma}$ Los ángulos entre las coordenadas respectivas y las direcciones

Para los casos en que la densidad del fluido es variable espacialmente, generalmente se recurre al concepto de altura de agua dulce equivalente, cuya relación con la presión es:

$$h_f = \frac{P}{\rho_f g} + z \quad P = \rho_f g (h_f - z) \quad (16)$$

donde

h_f : Altura de agua dulce equivalente

ρ_f : Densidad de agua dulce

P : Presión en el punto de medición

z : Elevación del punto de medida con respecto al eje de referencia

Al diferenciar la ecuación 16 con respecto a la dirección del sistema de coordenadas considerado, se tiene:

$$\frac{\partial P}{\partial \alpha} = g \rho_f \frac{\partial h_f}{\partial \alpha} - g \rho_f \frac{\partial z}{\partial \alpha} \quad (17)$$

Reemplazando la ecuación 17 en 13 y teniendo en cuenta que $\cos \delta_\alpha = \partial z / \partial \alpha$, se obtiene la siguiente relación:

$$q_\alpha = \frac{k_\alpha}{\mu} \left(\rho_f g \frac{\partial h_f}{\partial \alpha} - \rho_f g \frac{\partial z}{\partial \alpha} + \rho g \frac{\partial z}{\partial \alpha} \right) \quad (18)$$

Siendo ρ_f la densidad del agua equivalente y la densidad del agua en el punto de cálculo de la velocidad. Dado que se plantea la ecuación en términos de agua dulce equivalente, la conductividad hidráulica correspondiente a esta condición es definida por la ecuación 19 ((*Senger & Fogg, 1990*) citado por (*Langevin & Guo, 2006*)).

$$K_{f_i} = -\frac{k_i \rho_f g}{\mu_f} \quad \text{Para } i = \alpha, \beta, \gamma \quad (19)$$

donde

- k_i Permeabilidad del medio en el eje coordenado correspondiente
- K_{f_i} Conductividad hidráulica del agua dulce equivalente en el eje coordenado correspondiente
- μ_f Viscosidad del agua dulce equivalente bajo condiciones estándar (p.e. 20 grados centígrados y 1 atm de presión)

Utilizando este término, la ley de Darcy es reescrita para cada eje coordenado corresponde a:

$$q_\alpha = -k_{f\alpha} \frac{\mu_f}{\mu} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \alpha} + \left(\frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \right) \frac{\partial z}{\partial \alpha} \right] \quad (20)$$

$$q_\beta = -k_{f\beta} \frac{\mu_f}{\mu} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \beta} + \left(\frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \right) \frac{\partial z}{\partial \beta} \right] \quad (21)$$

$$q_\gamma = -k_{f\gamma} \frac{\mu_f}{\mu} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \gamma} + \left(\frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \right) \frac{\partial z}{\partial \gamma} \right] \quad (22)$$

Generalmente en muchas aplicaciones, el término μ_f / μ puede ser considerado igual a 1, ya que para aplicaciones prácticas, las variaciones locales en la viscosidad frecuentemente son menores que las variaciones locales no conocidas en la permeabilidad y así los efectos de la viscosidad variable son importantes sólo para casos raros ((*Holzbecher, 1998*) citado por (*Langevin & Guo, 2006*)).

4. Base matemática

4.1.1.3. Ecuación de estado de la densidad

Generalmente la densidad de un fluido puede ser considerada como una función de la presión P , la concentración del soluto C , y la temperatura T .

$$\rho = f(P, C, T) \quad (23)$$

Los campos diferenciales totales considerados son:

$$d\rho = (\partial\rho/\partial P)dP + (\partial\rho/\partial C)dC + (\partial\rho/\partial T)dT \quad (24)$$

$$d\rho = \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial\rho}{\partial P}\right) \rho dP + \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial\rho}{\partial C}\right) \rho dC + \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial\rho}{\partial T}\right) \rho dT \quad (25)$$

$$d\rho = \bar{\zeta} \rho dP + \frac{\bar{\alpha}}{(C_s - C_0)} \rho dC + \bar{\beta} \rho dT \quad (26)$$

Siendo

- $\bar{\zeta}$ Comprensibilidad del fluido
- $\bar{\alpha}$ Es el coeficiente de expansión volumétrico del soluto, normalizado por la diferencia entre la máxima concentración (C_s) y la concentración de referencia (C_0)
- $\bar{\beta}$ Coeficiente de expansión volumétrico térmico del fluido

La ecuación de estado para la densidad del fluido es frecuentemente aproximada a una forma lineal, integrando la ecuación 25 considerando a $\bar{\zeta}$, $\bar{\alpha}$ y $\bar{\beta}$ como constantes (*Diersch & Kolditz, 2002*):

$$\rho = \rho_f e^{\left[\bar{\zeta}(P - P_0) + \frac{\bar{\alpha}}{(C_s - C_0)}(C - C_0) - \bar{\beta}(T - T_0)\right]} \quad (27)$$

$$\rho = \rho_f \left[1 + \bar{\zeta}(P - P_0) + \frac{\bar{\alpha}}{(C_s - C_0)}(C - C_0) - \bar{\beta}(T - T_0)\right] \quad (28)$$

P_0 , C_0 y T_0 , corresponden a los valores de referencia respectivos.

Generalmente $\bar{\zeta}$, $\bar{\alpha}$ y $\bar{\beta}$ son considerados constantes, pero para la mayor parte de las aplicaciones esta consideración es válida para $\bar{\zeta}$ y $\bar{\alpha}$, mientras que para $\bar{\beta}$ puede ser inapropiado para aplicaciones geotérmicas donde se consideran grandes rangos de

temperaturas y las anomalías térmicas en la densidad también pueden jugar un rol importante (*Diersch & Kolditz, 2002*).

Aproximaciones generales

La ecuación de estado para la densidad del fluido (ec. 28), bajo condiciones isotérmicas con un fluido incomprensible, se reduce a una función de la fracción de masa de la solución concentrada del soluto C . Generalmente esta función debe ser determinada en condiciones experimentales para cada caso particular, pero para soluciones que presentan una composición similar al agua de mar típica, es decir, densidades hasta 1025 kg/m^3 , la ecuación de estado puede ser aproximada a una relación lineal en la cual se considera el efecto combinado en la densidad de la solución debido a los factores de: la variación de la masa de sal y la variación del volumen de la solución (*Zheng, Chunmiao; Bennett, Gordon D, 2002*).

$$\rho = \rho_f + F * C \tag{29}$$

donde

ρ_f	Densidad de referencia
C	Concentración volumétrica del soluto o la masa de sal por unidad de volumen de la solución (ML^{-3})
F	Término adimensional

Dependiendo del trabajo experimental de referencia, el término adimensional F puede adoptar diferentes valores.

4. Base matemática

4.1.1.4. Ecuación de flujo en términos de altura de agua dulce equivalente

Teniendo en cuenta la definición de la ley de Darcy en términos de alturas de agua dulce equivalente, la ecuación general del flujo (ecuación 11) es reescrita de la siguiente manera.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \alpha} \left[\rho K_{f\alpha} \left(\frac{\partial h_f}{\partial \alpha} + \left(\frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \right) \frac{\partial z}{\partial \alpha} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial \beta} \left[\rho K_{f\beta} \left(\frac{\partial h_f}{\partial \beta} + \left(\frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \right) \frac{\partial z}{\partial \beta} \right) \right] \\ + \frac{\partial}{\partial \gamma} \left[\rho K_{f\gamma} \left(\frac{\partial h_f}{\partial \gamma} + \left(\frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \right) \frac{\partial z}{\partial \gamma} \right) \right] = \rho S_p \frac{\partial P}{\partial t} + \theta \frac{\partial \rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} - \bar{\rho} q_s \end{aligned} \quad (1) \quad (2) \quad (30)$$

Para escribir los términos de la derecha de la ecuación 30 en términos de agua dulce equivalente, debe considerarse las siguientes relaciones.

La variación de la presión con respecto al tiempo y el almacenamiento específico en términos de presión (termino 1) puede ser escribirse en términos de agua dulce equivalente, considerando la relación existente entre P y h (ecuación 16); que al ser diferenciada con respecto al tiempo se obtiene:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \rho_f g \frac{\partial h_f}{\partial t} \quad (31)$$

Adicionalmente, el almacenamiento específico en términos de alturas de agua dulce equivalente (S_f) corresponde al volumen de agua adicionado al almacenamiento o expulsado desde él, en una unidad de volumen del medio poroso por unidad de incremento o detrimento de la altura piezométrica; el cual es definido por Bear (1979) como:

$$S_f = \rho_f g [\xi(1 - \theta) + \theta \zeta_f] \quad S_f = \rho_f g S_p \quad (\text{ver ecuación 9}) \quad (32)$$

Donde $\zeta_f = \zeta$, ya que la diferencia entre el coeficiente de compresibilidad del agua dulce y el agua el mar puede ser ignorada. Así, el término (1) es reescrito como:

$$\rho S_p \frac{\partial P}{\partial t} = \rho S_f \frac{\partial h_f}{\partial t} \quad (33)$$

La variación de la densidad con respecto a la concentración, es aproximada generalmente a la relación lineal mostrada en la ecuación 29. Al derivar dicha relación se obtiene:

$$\rho = \rho_0 + F * C \quad \frac{\partial \rho}{\partial C} = F \quad (34)$$

Por lo tanto, el termino (2) es reescrito de la siguiente manera

$$\theta \frac{\partial \rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} = \theta F \frac{\partial C}{\partial t} \quad (35)$$

Finalmente la ecuación de flujo para densidad variable en términos de alturas de agua es escrita de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \alpha} \left[\rho K_{f\alpha} \left(\frac{\partial h_f}{\partial \alpha} + \left(\frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \right) \frac{\partial z}{\partial \alpha} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial \beta} \left[\rho K_{f\beta} \left(\frac{\partial h_f}{\partial \beta} + \left(\frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \right) \frac{\partial z}{\partial \beta} \right) \right] \\ + \frac{\partial}{\partial \gamma} \left[\rho K_{f\gamma} \left(\frac{\partial h_f}{\partial \gamma} + \left(\frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \right) \frac{\partial z}{\partial \gamma} \right) \right] = \rho S_f \frac{\partial h_f}{\partial t} + \theta F \frac{\partial C}{\partial t} - \bar{\rho} q_s \end{aligned} \quad (36)$$

4.1.2. Ecuaciones gobernantes del transporte

El transporte de solutos en un medio poroso puede darse por procesos de advección, dispersión mecánica y difusión. Los procesos de dispersión mecánica y difusión son englobados bajo el nombre de dispersión hidrodinámica. A continuación se hace una descripción acerca de las ecuaciones que describen cada uno de estos componentes.

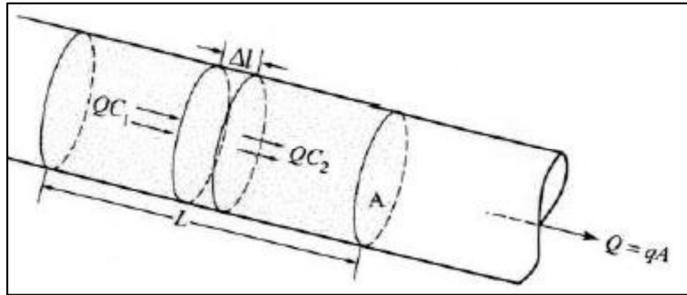
4.1.2.1. Transporte por advección

El transporte advectivo o convección es el proceso por el cual los contaminantes miscibles viajan a través del medio poroso a la misma velocidad que el agua subterránea.

La ecuación para el transporte advectivo puede ser descrita a través del balance de masa. Si se considera un VER definido por dos secciones de una columna de área transversal separadas una distancia Δl (ver Figura 19), la masa Q_m de soluto transportada a través del área transversal A será la correspondiente a la que viene en el caudal que la atraviesa disuelta a una

4. Base matemática

concentración C . Si se emplea el vector de velocidad de Darcy - q -, el vector de flujo másico advectivo puede ser calculado como se presenta en la ecuación 38.



$$Q_m = Q * C \quad (37)$$

$$q_m = q * C \quad (38)$$

Figura 19. Balance de masa en un volumen elemental representativo (VER)

La tasa a la cual la masa del soluto entra al volumen $A\Delta l$ es igual a $Q_1 * C_1$ y la tasa a la cual la masa sale corresponde a $Q_2 * C_2$. Si se considera que el flujo es estacionario, la diferencia entre la tasa de entrada y salida, representa la masa del soluto acumulada por unidad de tiempo (M) en el volumen $A\Delta l$ (Zheng & Bennett, 2002), es decir:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = QC_1 - QC_2 = qA(C_1 - C_2) \quad (39)$$

Siendo q la magnitud del escalar de la velocidad de Darcy.

La tasa de acumulación de masa del soluto en el volumen elemental es dada por $\theta \Delta x \Delta y \Delta z \partial C / \partial t$. La ecuación general del transporte advectivo es:

$$-\left[\frac{\partial}{\partial x} (q_x C) + \frac{\partial}{\partial y} (q_y C) + \frac{\partial}{\partial z} (q_z C) \right] + q_s C_s = \theta \frac{\partial C}{\partial t} \quad (40)$$

4.1.2.2. Transporte por dispersión hidrodinámica

El fenómeno de dispersión hidrodinámica propaga la masa de soluto más allá de la región que ocupa si consideramos sólo el proceso de transporte advectivo causando la mezcla y dilución del soluto. Este fenómeno, es una combinación de dos procesos físicamente diferentes pero hidráulicamente inseparables: la difusión molecular y la dispersión mecánica, los cuales se explican a continuación.

Difusión molecular

Un soluto en el agua puede moverse de un área de mayor concentración hacia un área donde la concentración es menor. Este proceso es conocido como difusión molecular o difusión (*Fetter, 1999*). La difusión ocurrirá mientras los gradientes de concentración existan, aun si el fluido no tiene movimiento. La masa del fluido difuso es proporcional al gradiente de concentración, el cual puede ser expresado como la primera ley de Fick, que es escrita para una dimensión como:

$$F = -D_d \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (41)$$

donde

- F : Es el flujo másico del soluto por una de área por unidad de tiempo
- D_d : Coeficiente de difusión (L^2/T)
- C : Concentración del soluto (M/L^3)
- $\partial C/\partial x$: Gradiente de concentración ($M/L^3/L$)

El signo negativo indica que el movimiento es de zonas de mayor concentración a zonas de menor concentración. En los sistemas donde las concentraciones varían con el tiempo (estado transitorio), la segunda ley de Fick es aplicada, la cual es expresada para una dimensión como:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_d \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) \quad (42)$$

Donde $(\partial^2 C)/(\partial x^2)$: es el cambio de la concentración con el tiempo ($M/L^3/L$)

En medios porosos, la difusión no puede proceder tan rápido como ocurre en el agua porque los iones deben seguir senderos más largos, como los viajes alrededor de granos minerales, además el soluto sólo se mueve a través de aquellos poros que permitan su movimiento. Acorde a esto, es necesario el uso de un coeficiente de difusión efectiva D^* , el cual es definido como (*Fetter, 1999*):

$$D^* = \omega * D_d \quad (43)$$

4. Base matemática

donde

ω : Coeficiente empírico (siempre menor a 1), relacionado con la tortuosidad del medio

La tortuosidad es una medida del efecto de la forma del camino de flujo seguido por las moléculas de agua en medios porosos. Si L es la menor distancia entre el comienzo y el final de un camino tortuoso de longitud L_e , la tortuosidad T se define como: $T = L_e/L$.

Dispersión mecánica

El agua subterránea se mueve a tasas que pueden ser menores o mayores que la velocidad lineal media. A escala macroscópica, hay tres causas básicas de este fenómeno (Figura 20): (a) el fluido se mueve más rápido a través del centro de los poros que en la proximidad del borde del grano, (b) algunas partículas del fluido pueden viajar a lo largo de los caminos de flujo más largos en el medio poroso en comparación que otras partículas que van a la misma distancia lineal y (c) el fluido que se mueve a través de los poros más grandes viaja más rápido que aquel que se mueve a través de poros pequeños (Fetter, 1999).

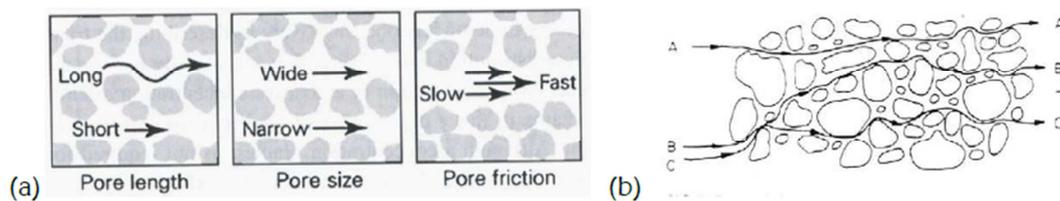


Figura 20. (a) Factores que causan la dispersión longitudinal a escala de poros individuales. (b) Trayectorias de flujo en un medio poroso que causa dispersión hidrodinámica lateral (Fetter, 1999)

Debido a las heterogeneidades de movimiento en el medio poroso, un soluto no viajará a la misma velocidad por los poros, creando una mezcla a lo largo de las trayectorias de flujo. Esta mezcla es llamada dispersión mecánica y causa una dilución del soluto en los bordes con el avance del flujo. La mezcla que ocurre en la dirección del flujo se denomina dispersión longitudinal y la que ocurre en la dirección a la trayectoria del flujo es llamada dispersión transversal (Fetter, C.W., 2001).

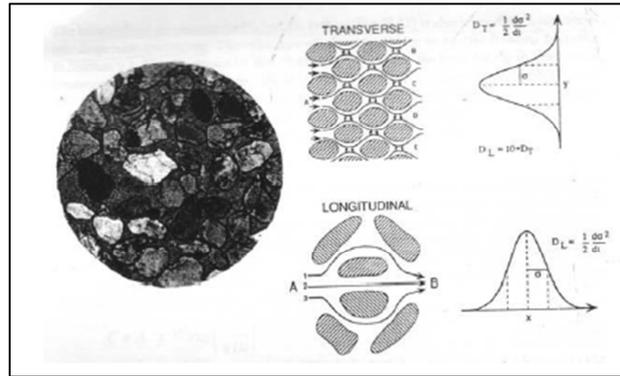


Figura 21. Dispersión longitudinal y transversal vistas a escala microscópica (Oyarzún L., 2007).

Al igual que para la difusión, la dispersión puede ser descrita por la ley de Fick (ecuaciones 41 y 42).

Los estudios a escala microscópica del fenómeno de dispersión mecánica demuestran que tanto la dispersión longitudinal como la transversal son proporcionales a la velocidad media del flujo y que la dispersión longitudinal es más grande que la transversal. Matemáticamente lo anterior se expresa introduciendo el concepto de dispersividad dinámica o simplemente dispersividad (α). Si i es la dirección principal del flujo, las siguientes definiciones son aplicadas:

Coeficiente de dispersión mecánica longitudinal $\alpha_L = \alpha_i * v_i$

Coeficiente de dispersión mecánica transversal $\alpha_T = \alpha_j * v_j$

Siendo

v_i : Velocidad lineal media del flujo de agua subterránea (L/T)

α_i, α_j : Dispersividad dinámica en las direcciones i y j , respectivamente (L)

4. Base matemática

Dispersión hidrodinámica

Los procesos de difusión y dispersión son combinados a partir de la definición de un parámetro denominado coeficiente de dispersión hidrodinámica, D , el cual es representado por:

$$D_L = \alpha_L * v_i + D^* \quad (a)$$

$$D_T = \alpha_T * v_i + D^* \quad (b)$$

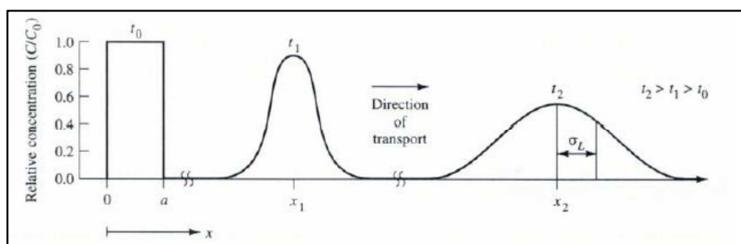
(44)

Siendo

D_L : Coeficiente de dispersión hidrodinámica paralelo al eje de dirección principal del flujo (longitudinal).

D_T : Coeficiente de dispersión hidrodinámica perpendicular al eje de dirección principal del flujo (transversal).

El proceso de dispersión hidrodinámica puede ser representado gráficamente por la figura 22. Una masa de soluto es introducida instantáneamente al interior del acuífero en el tiempo t_0 . En el proceso, el soluto de concentración C_0 , se extiende haciendo que la máxima concentración decaiga con el tiempo. El modelo de difusión hidrodinámica predice que las curvas de concentración podrían tener una distribución Gausiana, que es descrita por la media y la varianza (σ^2). Con esta distribución, los coeficientes de dispersión hidrodinámica pueden definirse como (Fetter, 1999):



$$D_L = \sigma_L^2 / 2 \quad (a)$$

$$D_T = \sigma_T^2 / 2 \quad (b)$$

(45)

Figura 22. Efecto de la dispersión sobre la curva de llegada (Fetter, 1999)

Siendo

σ_L^2 Varianza de la extensión longitudinal del penacho

σ_T^2 Varianza de la extensión transversal del penacho

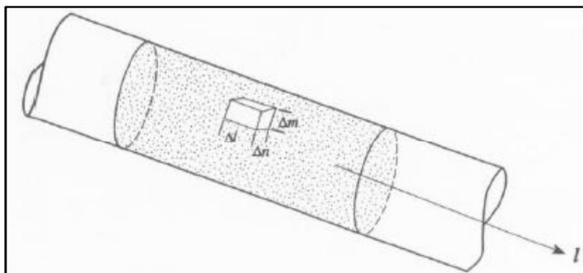
La dispersión puede ocurrir también a grandes escalas, como por ejemplo el caso de aguas subterráneas que deben desviarse cuando se encuentran con zonas con suelos de relativamente baja permeabilidad o por efecto de depósitos estratificados con intercalación de materiales de diferentes conductividades hidráulicas. En este caso, ya no es el tamaño de partícula individual si no los tiempos de flujo variables a lo largo de zonas de baja permeabilidad lo que determina la dispersividad. A esta escala, el proceso se denomina macrodispersión (Oyarzún L., 2007).

4.1.2.3. Ecuación de advección - dispersión del transporte

La derivación de la ecuación de advección - dispersión es basada en los trabajos realizados por Freeze y Cherry (1979), Bear (1972) y Ogata (1970) (Citados por Fetter, 1999), la cual es realizada bajo las hipótesis de que el medio poroso es homogéneo, isotrópico y saturado, y que para las condiciones de flujo es válida la ley de Darcy.

La derivación de la ecuación es basada en la conservación de la masa del soluto dentro de un volumen elemental representativo (VER) cuyo volumen es $\Delta l * \Delta m * \Delta n$ (Figura 23). El flujo sigue la dirección, m y n corresponden a las direcciones normales. Dado que l es la dirección del flujo, solo se considera el transporte advectivo en esta coordenada.

El área transversal que atraviesa el flujo está dada por $\Delta m * \Delta n$, por lo tanto, el transporte advectivo a través de ésta área es: $qC * \Delta m * \Delta n$. La diferencia neta entre el flujo advectivo de ambas caras corresponde a la ecuación 46. Por otra parte, la dispersión longitudinal sucederá en el área $\Delta m * \Delta n$, siendo la componente dispersiva longitudinal igual a la ecuación 47 y la dispersión transversal ocurrirá en las direcciones m y n . Suponiendo que la dispersividad transversal es igual en ambas direcciones, la tasa de transporte por masa bajo esta consideración en la dirección n es igual a la ecuación 48.



$$-\frac{\partial}{\partial t}(qC)\Delta l\Delta m\Delta n \quad (46)$$

$$-\frac{\partial}{\partial t}\left(\theta D_L \frac{\partial C}{\partial l}\right)\Delta l\Delta m\Delta n \quad (47)$$

$$-D_n \left(\frac{\partial C}{\partial n}\right)\theta\Delta l\Delta m \quad (48)$$

Figura 23. VER alineado con el flujo

4. Base matemática

La diferencia entre la entrada y salida de masa en las direcciones n (a) y m (b), es igual a:

$$-\frac{\partial}{\partial n}\left(\theta D_n \frac{\partial C}{\partial n}\right) \Delta l \Delta m \Delta n \quad (a) \quad -\frac{\partial}{\partial m}\left(\theta D_m \frac{\partial C}{\partial m}\right) \Delta l \Delta m \Delta n \quad (a)$$

(49)

Por otra parte, la tasa de acumulación de masa de soluto en el interior del elemento es igual a:

$$\frac{\partial(\theta C)}{\partial t} \Delta l \Delta m \Delta n$$

(50)

Considerando todas las componentes, y añadiendo el valor de masa entrante/saliente por fuentes/sumideros ($Q_s C_s$), el balance de masa general puede ser escrito como:

$$\frac{\partial(\theta C)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial l}(qC) + \frac{\partial}{\partial l}\left(\theta D_L \frac{\partial C}{\partial L}\right) + \frac{\partial}{\partial n}\left(\theta D_n \frac{\partial C}{\partial n}\right) + \frac{\partial}{\partial m}\left(\theta D_m \frac{\partial C}{\partial m}\right) + q_s C_s$$

(51)

Generalizando la ecuación 51, para los ejes coordenados x, y, z, el cambio de ejes genera la ecuación general de flujo advectivo-dispersivo:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\theta C)}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(q_x C) + \frac{\partial}{\partial x}\left[\left(\theta D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \left(\theta D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \left(\theta D_{xz} \frac{\partial C}{\partial z}\right)\right] - \frac{\partial}{\partial y}(q_y C) \\ & + \frac{\partial}{\partial y}\left[\left(\theta D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \left(\theta D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \left(\theta D_{yz} \frac{\partial C}{\partial z}\right)\right] - \frac{\partial}{\partial z}(q_z C) \\ & + \frac{\partial}{\partial z}\left[\left(\theta D_{zx} \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \left(\theta D_{zy} \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \left(\theta D_{zz} \frac{\partial C}{\partial z}\right)\right] + q_s C_s \end{aligned}$$

(52)

Siendo, q_x, q_y, q_z los componentes de la velocidad de Darcy y q_s , la tasa volumétrica de flujo de fuentes/sumideros por unidad de volumen del acuífero.

Ecuación general del transporte

La forma general de la ecuación de transporte, considera además de los términos mencionados anteriormente, el término adicional $\sum R_n$ que representa todas las reacciones químicas, geoquímicas y biológicas que provocan la transferencia de masa entre las fases líquida y sólida, o la conversión de las especies químicas disueltas de una forma a otra.

Generalmente la ecuación general del transporte es descrita por la ecuación:

$$\frac{\partial(\theta C)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C) + q_s C + \sum R_n \quad (53)$$

(1) (2) (3) (4)

Y está constituida por: el primer término de la derecha de la ecuación representa la variación de la concentración debida a la dispersión hidrodinámica. El segundo término representa el transporte advectivo. El tercer término representa los efectos de la mezcla con un fluido fuente que posee una concentración diferente a la del agua subterránea que se encuentra en la zona de recarga o de inyección y por último, el cuarto término representa todas las reacciones químicas del soluto con el medio.

4. Base matemática

4.2. Estado del arte de la modelación de la intrusión marina

Las aguas subterráneas están expuestas a fuentes de contaminación puntual o permanente, derivadas principalmente de las actividades del hombre. Se suele distinguir dos tipos de procesos contaminantes: los "puntuales" que afectan a zonas localizadas y los "difusos" que provocan una contaminación dispersa en zonas amplias, en las que no es fácil identificar el foco principal. Generalmente en estos procesos de contaminación las variaciones de la densidad de los fluidos no son lo suficientemente grandes para requerir el uso de modelos de densidad variable. Son resueltos con modelos en los cuales la densidad se aproxima como constante. Sin embargo, autores como Molen y Ommen (1988) han concluido que los efectos de densidad en el transporte de contaminantes miscibles en aguas subterráneas es probablemente más común de lo que es usualmente asumido.

Las variaciones espaciales de la densidad del fluido pueden afectar los patrones de flujo del agua subterránea. Tal es el caso del flujo de las aguas subterráneas cerca de la costa, o problemas que involucren el almacenaje y recuperación del acuífero, pozos de inyección muy profundos, transporte de salmueras, flujo de agua subterránea cerca de bóvedas de la sal, o procesos de contaminación bastante frecuentes como la intrusión de agua salina en acuíferos costeros, infiltración de lixiviados provenientes de vertederos de basuras, el transporte de sales debido a prácticas de agricultura, flujo de aguas subterráneas a través de formaciones de sal en conexión con la disposición de desechos radiactivos de alto nivel, entre otros.

Debido al interés generado en los procesos de contaminación, su modelación y descripción en sistemas de aguas subterráneas, los procesos de flujo dependientes de la densidad del fluido en medios porosos, ha sido un tema de particular interés en el campo de la hidrogeología. Existen trabajos que datan de hace más de medio siglo, pero con una importante actividad investigativa durante los últimos 30 años, como lo reportan (*Diersch & Kolditz, 2002*) y Simmons (2001, 2005) en la revisión del estado de arte realizado sobre este tema con una vasta referencia bibliográfica al respecto.

Los primeros estudios de la relación del agua dulce y del agua salada en regiones costeras se realizaron en Holanda y Alemania por Badon Ghyben en 1889 y Herzberg en 1901. En donde la máxima penetración de la cuña de agua salada viene limitada por el fondo impermeable del acuífero que se produce cuando (Figura 24):

$$h_d = z_0 * \beta \quad (54)$$

donde

h_d : Cota sobre el nivel del mar del agua dulce en la vertical del punto A.

z_0 : Profundidad de la base del acuífero bajo el nivel del mar

$$1/\beta = (\gamma_s - \gamma_d)/\gamma_d \quad (55)$$

donde

γ_s : Peso específico del agua salada, la cual varía generalmente entre 1020 y 1030 g/cm³, siendo el más frecuente 1025 g/cm³

γ_d : Peso específico del agua dulce \cong 1000 g/cm³

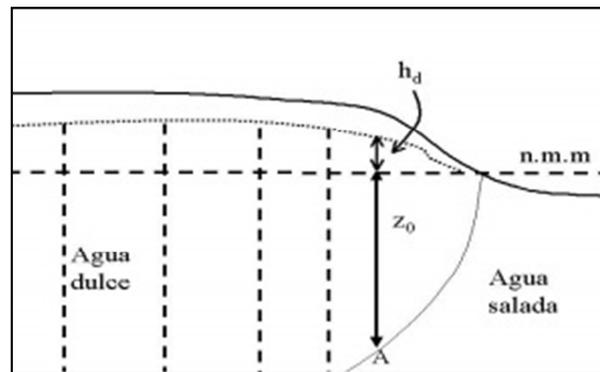


Figura 24. Relación de la carga hidráulica y la interfaz salina

El valor de $1/\beta$ varía entre 33 y 55 siendo el valor más frecuente 40. Ello quiere decir que la interfaz se sitúa a una profundidad bajo el nivel del mar igual a 40 veces la cota del agua dulce sobre el nivel medio del mar en aquel punto.

$$z_0 = 40 * h_d \quad (56)$$

En el siglo XX la potencia de cálculo superior permite el uso de métodos numéricos (por lo general las diferencias finitas o elementos finitos) que necesitan un menor número de supuestos y se pueden aplicar de manera más general.

El modelado de la intrusión de agua salada se considera difícil. Algunos de los problemas típicos que surgen son:

4. Base matemática

- La posible presencia de fisuras y grietas y fracturas en el acuífero, cuyas posiciones precisas se desconocen, pero que tienen gran influencia en el desarrollo de la intrusión de agua salada
- La posible presencia de pequeñas heterogeneidades a gran escala en las propiedades hidráulicas del acuífero, que son demasiado pequeños para ser tener en cuenta por el modelo, pero que también pueden tener gran influencia en el desarrollo de la intrusión de agua salada
- El cambio de las propiedades hidráulicas de la intrusión de agua salada. Una mezcla de agua salada y agua dulce se encuentra a menudo infrasaturada con respecto al calcio, provocando la disolución de calcio en la zona de mezcla y el cambio de propiedades hidráulicas.
- El proceso conocido como intercambio catiónico, lo que ralentiza el avance de la intrusión de agua salada y también hace más lento el retiro de una intrusión de agua salada.
- El hecho de que las intrusiones de agua salada a menudo no están en equilibrio hace que sea más difícil de modelar. La dinámica de los acuíferos tienden a ser lentos y se necesita el cono de la intrusión de un largo tiempo para adaptarse a los cambios en el bombeo de los sistemas, las precipitaciones, etc. Por lo tanto la situación en el campo puede ser significativamente diferente de lo que cabría esperar en función del nivel del mar, bombeo de régimen, etc.
- Para modelos a largo plazo, el futuro cambio climático constituye una gran incógnita. Los resultados del modelo a menudo dependen en gran medida el nivel del mar y la tasa de recarga. Se espera que ambos cambien en el futuro.

Existen dos puntos de vista para describir el movimiento de un fluido en un sistema. El primero en el cual la historia de partículas individuales es descrita, es llamado métodos Lagrangianos; mientras que el segundo, cuyo foco de atención son puntos fijos en el espacio, es llamado método Euleriano. En la aproximación Lagrangiana, las coordenadas del movimiento de una partícula son representadas como una función del tiempo y son variables dependientes (*Bear J., 1972*).

En la aproximación Euleriana, se investiga que sucede en puntos específicos que están fijados en el espacio dentro del campo de flujo, mientras que diversas partículas pasan a través de ellos en el curso de tiempo. Por consiguiente, una descripción completa del flujo implica una imagen instantánea de las velocidades en todos los puntos en el campo. Aquí, las velocidades

son las variables dependientes, mientras que las coordenadas son independientes (*Bear J., 1972*).

En general, la aproximación Euleriana es frecuentemente usada para resolver la ecuación gobernante del flujo. Por otra parte, la ecuación del transporte es en general más difícil que la ecuación de flujo subterráneo, principalmente porque las propiedades matemáticas de la ecuación varían dependiendo del término dominante de la ecuación en una situación particular (*Konikow, 2002*).

Los métodos numéricos usados hoy en día para la solución del transporte pueden ser agrupados dentro de cuatro clases: eulerianos, lagrangianos, mixtos (eulerianos/lagrangianos) y métodos TVD (*Salamon y col., 2006*). Los métodos TVD son esencialmente diferencias finitas (o volumen finito) de orden superior y como tal, pertenecen a la familia de las aproximaciones Eulerianas (*Zheng y Wang, 1999*).

El interés científico durante los últimos años ha estado alrededor del transporte de solutos en el agua subterránea, principalmente y de manera más activa en el área de la advección en medios porosos continuos como lo resaltan Nield y Bejan (1999) (citado por *Simmons y col., 2001*) quienes reportaron una tasa de publicación sobre este tema de aproximadamente 100 artículos/año.

En un acuífero costero en condiciones naturales, se produce un movimiento tridimensional del agua dulce hacia el mar y considerando que el agua dulce y salada son miscibles, existe una zona de transición donde por procesos de difusión, estas aguas se mezclan progresivamente (*López, 1988*). La zona de mezcla se puede desplazar por efecto de: la disminución del flujo de agua dulce al mar, del aumento de la permeabilidad y heterogeneidad, de la diferencia de densidades y de las oscilaciones de las mareas. En un acuífero costero sin explotación existe un equilibrio agua dulce-agua salada que dependen del volumen de agua dulce que se vierta al mar (Figura 25).

4. Base matemática

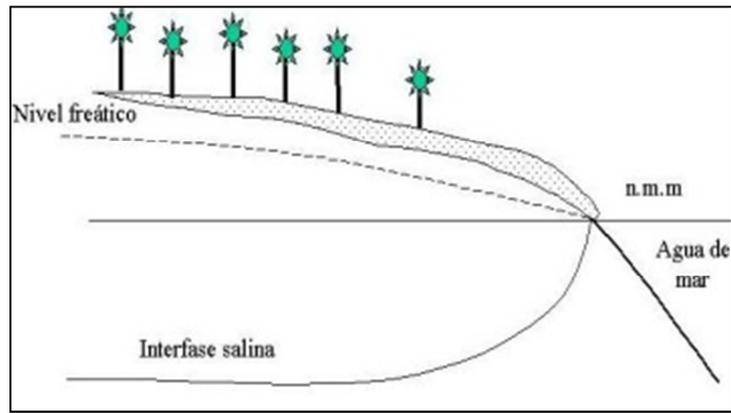


Figura 25. Interacción del agua dulce y el agua de mar bajo condiciones de equilibrio

Cuando el acuífero es explotado, el volumen de agua dulce que fluye hacia el mar se reduce y la interfaz tiende a alcanzar un nuevo equilibrio, penetrando tierra adentro (Figura 26). Si el volumen de extracción es mayor que la recarga del acuífero el proceso dinámico de la intrusión es continuo y en un cierto tiempo los pozos o sondeos de explotación se contaminarían por agua salina. Por lo tanto, para mantener la interfaz en un cierto equilibrio hay que dejar que una porción de volumen de agua dulce se vierta hacia el mar (Custodio, 1983).

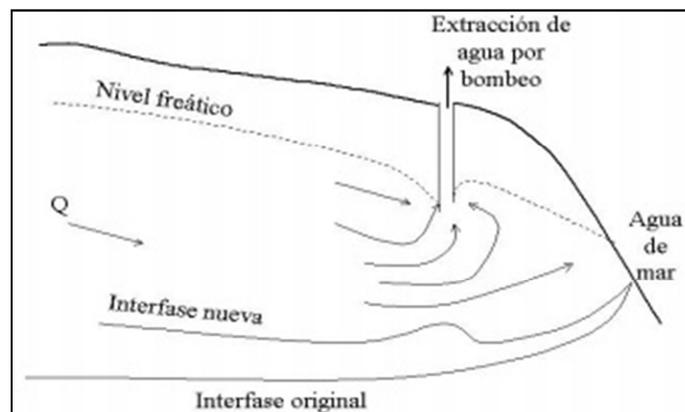


Figura 26. Flujo de agua a través de un sistema de bombeo

A continuación se realiza una breve descripción de los métodos numéricos empleados en los modelos numéricos empleados acorde a su clasificación. Una descripción más detallada de los diferentes métodos puede encontrarse en Zheng y Bennett (2002).

4.2.1. Métodos eulerianos

Dentro de la aproximación euleriana, se encuentran los métodos de: diferencias finitas (DF), elementos finitos (EF) y disminución de la variación total (TVD).

Los modelos numéricos empleados en el desarrollo del presente trabajo, tienen como fundamento el método de diferencias finitas para el cálculo del proceso de flujo. Por otra parte, la ecuación de transporte de advección - dispersión tiene como alternativa de solución las diferencias finitas y el método TVD.

Método de diferencias finitas

Las ecuaciones en derivadas parciales que describen los procesos de flujo y transporte en el agua subterránea incluyen términos que representan las derivadas de las variables continuas. Los métodos de diferencias finitas tienen como objetivo aproximar estas derivadas (o pendientes de las curvas) mediante cambios lineales discretos en unos intervalos discretos de espacio o de tiempo. Para ello se requiere que el área del dominio sea discretizada en una malla. Si los intervalos son lo suficientemente pequeños entonces todos los incrementos lineales representan una buena aproximación de la superficie curvilínea verdadera (*Konikow, 2002*).

Existe un cierto error implícito al aproximar las derivadas mediante diferencias finitas, pero este error disminuye a medida que la discretización es más fina. Este error se denomina “error de truncamiento” ya que la substitución de una derivada por un cociente de diferencias equivalente a usar las series truncadas de Taylor, de manera que la solución exacta de una ecuación diferencial difiere de la solución correspondiente a la ecuación diferencial (*Peaceman, 1977*) (citado por *Konikow, 2002*).

Tampoco se puede conseguir una solución “exacta” de la ecuación diferencial a causa de los límites de precisión al almacenar los números en un ordenador. Al resolver un gran sistema de ecuaciones diferenciales se realizan muchas operaciones aritméticas durante las que se pueden ir acumulando errores de redondeo. Debido a estos errores se pueden presentar problemas de dispersión numérica y oscilaciones artificiales, por ello, el método estándar de diferencias finitas es conveniente solamente para resolver modelos de transporte no dominados por la advección (*Zheng y Bennett, 2002*).

4. Base matemática

Métodos TVD

El término TVD se refiere a la característica compartida por estos métodos, de que la suma de las diferencias de la concentración entre los nodos adyacentes disminuye sobre pasos sucesivos del transporte, una condición necesaria si se pretende que la solución del transporte se mantenga libre de oscilaciones falsas.

Dado que generalmente los métodos de orden superior (higher-order) reducen al mínimo la dispersión numérica a expensas de introducir oscilaciones falsas, los esquemas de TVD típicamente son implementados con procedimientos numéricos (llamados limitadores del flujo) para suprimir o para eliminar oscilaciones falsas mientras que preservan los frentes de concentración agudos (*Zheng y Wang, 1999*).

Comparados con los métodos estándar de diferencias finitas, los esquemas de TVD generalmente son mucho más exactos en solucionar problemas dominados por la advección, no obstante con una mayor carga de cómputo. Con respecto a algunos métodos lagrangianos o mixtos, los esquemas de TVD no son tan eficaces en la eliminación de la dispersión numérica mientras que preservan los “picos” de concentración. Pero por la propiedad de la conservación de la masa y los requerimientos menores de memoria, los esquemas TVD representan una mejor opción de solución en comparación a otros métodos eulerianos como las DF o EF.

4.2.2. Métodos lagrangianos

Los métodos lagrangianos tratan al transporte de masa del soluto por medio de una gran cantidad de partículas móviles, y evitan solucionar la ecuación de advección - dispersión directamente. Como consecuencia, los métodos lagrangianos están libres de dispersión numérica y son particularmente efectivos para manejar los problemas dominados por el transporte advectivo. El método de camino aleatorio (random walk) es el típico ejemplo de aproximación lagrangiana, el cual utiliza la técnica de rastreo de partículas (particle tracking) para aproximar el transporte por advección. El efecto de dispersión es incorporado por la adición de desplazamientos aleatorios a la locación de la partícula después de cada movimiento advectivo. La sorción y el decaimiento son manejados por el ajuste de la velocidad y la masa llevada por las partículas (*Zheng y Bennett, 2002*).

Ejemplos de aplicación de este método en la modelación del transporte de solutos se presentan en los trabajos de Ahlstrom y col. (1977), Prickett y col. (1981), Uffink (1985, 1988), Kinzelbach (1986, 1988), Tompson y Gelhar (1990), Tompson y Dougherty (1992), Kitanidis (1994), LaBolle y col. (1996, 1998) (citados por Zheng y Bennett, 2002), Salamon y col. (2006), Capilla y col., (1998), Llopis-Albert y Capilla (2009-(2)).

4.2.3. Métodos mixtos: eulerianos - lagrangianos

Los métodos mixtos, resultan ser los métodos numéricos de mayor diversidad para la resolución de los problemas de transporte. Las aproximaciones mixtas permiten tomar ventaja de las características de cada aproximación y por lo tanto, cada término de la ecuación de transporte es resuelto por distintos métodos. Es así como los métodos lagrangianos son empleados para el manejo de la componente advectiva dado a que son particularmente convenientes y los métodos eulerianos por su efectividad son utilizados para el manejo de la dispersión y el término de las reacciones del soluto.

Dependiendo del uso de diferentes técnicas lagrangianas para la aproximación del término advectivo, los métodos mixtos pueden ser agrupados como:

- a) Método de las características (MOC),
- b) Método de las características modificado (MMOC) y
- c) Combinación de ambos métodos: método híbrido (HMOC).

4. Base matemática

Método de las características MOC

Al principio de la simulación, un sistema de partículas móviles se distribuye en el campo del flujo aleatoriamente o con un patrón fijo. Una concentración y una posición en el sistema coordinado cartesiano se asocian a cada una de estas partículas. Las partículas son rastreadas hacia adelante a través del campo del flujo, usando un incremento pequeño del tiempo, basados en el método de particle tracking. Al final de cada incremento de tiempo, la concentración media en la celda es debida solamente a la advección en el incremento del tiempo (*Zheng y Wang, 1999*).

Una de las principales características del método es que está virtualmente libre de dispersión numérica causada por errores de truncamiento espaciales y trabaja bien en los casos donde existen frentes de concentración agudos.

La principal desventaja es que dada la cantidad de partículas que emplea por celda, es un método lento y requiere gran cantidad de memoria de la computadora, en especial cuando se trabaja en tres dimensiones. Además, en términos de balance de masa no es un método conservativo.

Método de las características modificado MMOC

La técnica de MMOC es similar a la técnica del MOC excepto en el tratamiento del término de la advección. En este método, en la rejilla fija del dominio se ubica una partícula ficticia en el punto nodal y es rastreada hacia atrás para encontrar su posición en un intervalo de tiempo anterior al evaluado. Así, la concentración calculada corresponde al efecto de la advección durante el periodo, desde el tiempo precedente.

El método emplea solo una partícula para cada celda de la diferencia finita, utiliza conjuntamente un esquema simple de interpolación de bajo-orden y no almacena las identidades de la partícula en la computadora, lo que hace que sea un esquema más rápido. Sin embargo, el uso del esquema de interpolación de bajo-orden introduce una dispersión numérica considerable, especialmente para los problemas con frentes agudos de concentración. Por lo tanto, su uso está condicionado a situaciones donde los frentes de concentración sean suaves.

Método híbrido de las características HMOC

El método híbrido es una adaptación automática del proceso de solución, a la naturaleza del campo de la concentración. Cuando hay presencia de frentes agudos de concentraciones, el término de la advección es solucionado por la técnica de MOC, en caso contrario, la advección es solucionada por la técnica de MMOC.

La dificultad del uso del método se basa en la selección del criterio apropiado que define el control de la interacción entre los esquemas de MOC y de MMOC. Este procedimiento por su adaptabilidad puede combinar las mejores características de ambos métodos: proporcionar soluciones exactas a los problemas del transporte sobre la gama de números de Peclet a partir de la 0 al ∞ , dar soluciones libres virtualmente de dispersión numérica y usar pocas partículas (Zheng y Wang, 1999).

En la tabla 5 se indican las características más importantes de los diferentes métodos usados en los modelos numéricos a utilizar.

Característica	FD		TVD	MOC	MMOC	HMOC
	Explícitas	Implícitas				
Esfuerzo computacional y demanda de almacenamiento	Bajo	Medio	Grande	Grande	Bajo	Grande
Dispersión numérica y/o oscilaciones	Grande	Grande	Pequeña	Nula	Medio	Pequeña
Balance de masa	Exacto	Exacto	Exacto	No exacto	No exacto	No exacto
Máximo paso de tiempo	Pequeño	Grande	Pequeño	Grande	Grande	Grande

Tabla 5. Comparación de los diferentes métodos numéricos (Schäfer, 2009)

Considerando las diferentes recomendaciones típicas para la solución de los problemas del transporte, en la tabla 6 se presenta los métodos recomendados acorde a las características del modelo de aplicación. Cabe aclarar que estas recomendaciones no son universalmente validas, pero puede considerarse una guía de orientación (Schäfer, 2009).

4. Base matemática

Características del modelo de aplicación	Método recomendado
Gradientes de concentración espacialmente pronunciados (ej. Penacho de contaminantes con una fuente puntual, estudios de laboratorio con contaminantes)	TVD, MOC, HMOC
Transporte de contaminantes a escala regional con gradientes de concentración pequeños (ej. Transporte de nitrato con fuentes distribuidas)	FD
Exactitud en balance de masas (ej. Acoplamiento de transporte y reacción no lineales)	FD, TVD
Pasos de tiempo requeridos grandes (ej. Transporte de grandes rangos de soluto en décadas)	FD implicit, HMOC
Números de Peclét de mallas grandes (pequeñas dispersividades o espaciamiento grande del mallado)	MOC, HMOC

Tabla 6. Métodos numéricos recomendados a usar en casos de aplicación específicos

(Schäfer, 2009)

Los modelos más populares a nivel mundial a la hora de resolver un problema de intrusión marina son:

- ✓ *SUTRA*: Modelo en 2D o 3D, que permite resolver problemas con densidad variable, flujo variablemente saturado, transporte de energía o soluto.
- ✓ *SEAWAT*: Es un programa genérico basado en *MODFLOW/MT3DMS* para simular en tres dimensiones de densidad variable flujo de agua subterránea, junto con varias especies de solutos y el transporte de calor. El programa ha sido utilizado para una amplia variedad de estudios de aguas subterráneas entre ellos los de la migración de salmuera en los acuíferos continentales, así como aquellos centrados en la intrusión de agua salada en los acuíferos costeros. *SEAWAT* utiliza la estructura familiar de *MODFLOW* y *MT3DMS*. Así, la mayoría de los resultados se pueden utilizar para crear conjuntos de datos *SEAWAT* y visualizarlos. Los conceptos *MODFLOW* de "paquetes" y "procesos" se mantienen en *SEAWAT*, que permite que el programa para trabajar con muchos de los programas de software relacionados con *MODFLOW*, tales como *MODPATH*, *ZONEBUDGET*, y los programas de estimación de parámetros. *SEAWAT* es un programa de dominio público. El código fuente y el software se distribuye libre de cargo por el Servicio Geológico de EE.UU. (USGS).
- ✓ *HST3D* (The Heat- and Solute-Transport Program): Simula el flujo del agua subterránea y el calor asociado y el transporte de solutos en tres dimensiones. El programa *HST3D* puede ser utilizado para el análisis de problemas tales como los relacionados con la inyección subterránea de residuos, la lixiviación de vertederos, intrusión de agua salada, la

recarga de agua dulce y la recuperación, eliminación de residuos radiactivos, sistemas de agua caliente geotérmica, y el almacenamiento subterráneo de energía. Las tres ecuaciones que gobiernan están acoplados a través de la velocidad de poro intersticial, la dependencia de la densidad del fluido en la presión, temperatura, y la fracción de soluto de masa, y la dependencia de la viscosidad del fluido en la temperatura y la fracción de soluto en masa. La ecuación de transporte de solutos es de una sola especie, los solutos con posible equilibrio lineal de sorción y descomposición lineal. En diferencias finitas se utilizan técnicas para discretizar las ecuaciones que gobiernan mediante una red de puntos distribuidos.

- ✓ *FEFLOW*: Es un paquete de software profesional para la modelización del flujo de fluidos y el transporte de constituyentes disueltos y / o procesos de transporte de calor en el subsuelo. Contiene la funcionalidad de pre y post procesamiento y un motor de simulación eficiente. Una interfaz gráfica de fácil uso facilita el acceso a las opciones de modelado extensas. Es un sistema completamente integrado de motor de simulación de interfaz gráfica de usuario. También incluye una interfaz de programación pública para el código de usuario.

Además de estos modelos existen otros como: *MOCDENSE*, *SHARP*, *FEMWATER* o *3DFEMFAT*, también ampliamente utilizados.

Pero no sólo se han utilizado alguno de estos modelos para resolver casos de estudios. Por ejemplo en el caso del estudio de la zona industrial de Heraclión (Creta, Grecia), desarrollado en 2005, se utilizó modelo subterráneo PTC (*Princeton Transport Code*, 1994) desarrollado por la universidad Princeton. PTC es un modelo en tres dimensiones, que utiliza un programa de simulación de diferencias / elementos finitas para resolver tanto el flujo subterráneo como el transporte de solutos. Éste fue implementado en el software ArgusOne (2004) para facilitar al usuario la entrada de datos SIG así como conseguir una mejor visualización.

Otro modelo diferente a los anteriores es el *GFLOW*, desarrollado por Haitjema Software (2007). *GFLOW* es un programa de Windows basado en el método de elemento de análisis. Modela el flujo en estado estacionario de un acuífero único heterogéneo utilizando la hipótesis de Dupuit-Forchheimer. Si bien permite el modelado del flujo local transitorio y tres dimensiones, es especialmente adecuado para el modelado de flujo horizontal regional. Para facilitar la modelación detallada del flujo local, *GFLOW* admite una opción de *MODFLOW* para generar automáticamente los archivos de *MODFLOW* en un área definida por el usuario

4. Base matemática

con las propiedades del acuífero y las condiciones de contorno que proporciona el modelo *GFLOW*.

GFLOW permite también:

- Importar multitud de vectores diferentes y archivos de gráficos de mapa de bits de un mapa base
- Inhomogeneidades con fronteras comunes
- Incorporar la función de corriente y detracciones
- Implementar un escenario para la calibración y el análisis de sensibilidad
- Incorporar soporte integrado para la optimización de parámetros utilizando PEST o UCODE
- Consultar "What is new in GFLOW?" para obtener información adicional

4.2.4. Procesos de flujo dependientes de la densidad

Por otra parte, los procesos de flujo dependientes de la densidad en medios porosos, son cruciales en una amplia gama de los problemas de transporte térmicos y salinos, en muchas disciplinas de la investigación y diversos campos del uso (*Diersch HJG, Kolditz O, 2002*). Los trabajos que se han desarrollado en los flujos de mezcla advectiva se han enfocado en la interacción del agua dulce/salada en los acuíferos costeros. La formulación más simple del problema, donde el agua fresca o la menos densa cubre el agua de mar en un patrón estable de la estratificación, se ha analizado exhaustivamente. Es así como en el campo de la intrusión marina en acuíferos y el efecto de la variación de la densidad en los patrones de flujo, son temas de preocupación y estudio específico.

La aproximación de tratar el agua salada y el agua dulce como dos fluidos miscibles ha sido aplicada y mejorada en numerosos trabajos, por ejemplo Reilly y Goodman (1985), Bear (1999), Cheng y Quazar (1999). Sin embargo, al evaluar las concentraciones de sal en sistemas de flujos regionales y locales, es deseable contar con una aproximación más rigurosa de los fluidos miscibles. La primera aproximación al modelo de sistemas agua dulce/salada miscible dependiente de la densidad aplicado a problemas costeros fue hecho por Henry (1964) y Pinder y Cooper (1970).

Debido a su importancia práctica, los modelos numéricos de la intrusión de la agua salada ha recibido la atención creciente en la literatura de los recursos de agua durante los últimos 20 años, dando como resultado mejores maneras de modelar los mecanismos advectivos y dispersivos con los efectos de la densidad y viscosidad del fluido. Algunos ejemplos de ello son los trabajos realizados por Segol y col. (1975), Segol y Pinder (1976), Huyakorn y Taylor (1976), Huyakorn y col. (1987), Volker y Rushton (1982), Frind (1982), Voss (1984, 1999), Voss y Souza (1987), Putti y Paniconi (1995), Diersch (1988), Galeati y col. (1992), Gambolati y col. (1999), Kolditz y col. (1998), Bues y Oltean (2000) (citado por Diersch HJG, Kolditz O (2002)).

Estudios recientes indican la importancia de emplear modelos de flujo de densidad variable para la determinación del transporte de solutos en la intrusión de agua de mar en acuíferos costeros ya que dicho modelo ofrece resultados más realistas en comparación con los modelos de densidad constante (*Arlai P., Koch M., 2009*).

4. Base matemática

4.3. El modelo *SEAWAT*

SEAWAT se utilizó para la resolución del problema del transporte y del flujo conjuntamente. La calibración en este caso del modelo partió de la realizada resolviendo el flujo únicamente (*MODFLOW*).

SEAWAT es un programa de simulación tridimensional para la modelación de flujo transitorio bajo condiciones de densidad variable, pero considera a ésta exclusivamente como función de la concentración de soluto, despreciando los efectos de la temperatura.

SEAWAT es una combinación de los códigos *MODFLOW* y *MT3DMS*. Partes del código original de *MODFLOW* (Harbaugh y col. 2000) fueron modificadas para resolver la ecuación de flujo bajo condiciones de densidad variable mediante la reformulación del sistema de ecuaciones en términos de flujo másico en vez de volumen de flujo, incluyendo los términos de densidad necesarios.

Para la resolución de cualquier problema planteado, *SEAWAT* parte de inicializar el stress period, calculando la longitud del timestep y resolviendo el flujo y el transporte. Calcula entonces las densidades y el cambio de éstas en las sucesivas iteraciones realizadas dentro del stress period. Si no hay gran cambio entre éstas, el proceso sigue con el siguiente stress period y así sucesivamente hasta el último donde termina la simulación.

4.3.1. Limitaciones

El programa resuelve bajo cualquier esquema las ecuaciones de flujo y transporte para cada paso de tiempo, aun si se consideran sistemas de densidad constante o variable, por lo tanto, el tiempo de ejecución de las simulaciones es sensiblemente mayor en comparación a los programas base (*MODFLOW* y *MT3DMS*).

No existe un planteamiento general para la ecuación de estado de la densidad, ésta es basada en la aproximación lineal planteada por Baxter y Wallace (1916) y definida por la ecuación 34. Dicha ecuación tiene aplicación en sistemas que interactúan con fluidos con características similares al agua de mar. En el caso del uso de solutos con características diferentes, es necesaria la determinación del factor F por medio de ensayos de laboratorio.

Debido a la incompatibilidad de los procesos de calibración con los procesos *VDF*, no puede emplearse esta herramienta para ajustar los parámetros de los modelos realizados.

4.4. Resumen y conclusiones

En los últimos 30 años ha tenido lugar una importante actividad investigativa en la revisión del estado de arte realizado sobre la intrusión marina con una vasta referencia bibliográfica al respecto. En estos años el interés científico se centrado en el transporte de solutos en el agua subterránea, principalmente en su componente de advección en medios porosos continuos.

El modelo matemático empleado para la consideración de los efectos de la variación de la densidad en los procesos de flujo, supone la necesidad de acoplamiento con la ecuación que describe el transporte. Dada la complejidad de esta última ecuación, el uso de diferentes métodos numéricos de solución para cada término componente (advección, dispersión, reacciones) influye en la obtención de resultados más exactos y realistas al problema propuesto.

Considerando las diferentes ventajas y desventajas de los métodos numéricos descritos, el uso de aproximaciones lagrangianas supone soluciones libres problemas numéricos, aunque la desventaja en la exactitud del balance de masa podría influir en los cálculos de gradientes de densidad, especialmente en los tiempos de desarrollo cuando se inicia el movimiento del soluto en el medio. Por otra parte, el uso de aproximaciones Eulerianas tiene implícito los problemas de dispersión numérica, pero la ventaja de la conservación de masa puede representar una mejor opción.

Teniendo en cuenta lo anterior y las consideraciones de uso de cada método, para resolver la componente advectiva del transporte se escogió el método híbrido (HMOC), donde, cuando hay presencia de frentes agudos de concentraciones, el término de la advección es solucionado por la técnica de MOC, en caso contrario, la advección es solucionada por la técnica de MMOC.

4. Base matemática

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

Una vez visualizada y caracterizada la zona, deberemos obtener aquellos datos necesarios para una correcta representación de la realidad en el modelo. En los siguientes apartados se describen: los datos disponibles (en el caso de desconocerlos, que hipótesis se consideraron), el modelo desarrollado de la Plana de Oropesa - Torreblanca, la calibración que se realizó de este modelo en estado estacionario y transitorio, el análisis de incertidumbre fruto de esta calibración y, por último, las conclusiones a las que se llegó tras la realización de los apartados anteriores. El modelo contara con discretización horizontal de 250x250 m. (mayor que la de modelos anteriores (*IGME-UJI, 2009* y *Renau, 2013*) siendo ésta la adoptada en los datos referidos a la base geográfica (geometría del acuífero, recargas, bombeos, etc.)

5.1. Descripción de los datos disponibles

En este apartado se describirán los datos disponibles (en el caso de desconocerlos, que hipótesis se consideraron) sobre la Plana Oropesa - Torreblanca que serán introducidos en el modelo realizado.

5.1.1. Topografía de la zona

Los datos topográficos se obtuvieron a partir de 4 modelos digitales del terreno, que fueron unidos mediante *ArcGIS* para después ser extraída de ellos la información acerca de la Plana de Oropesa - Torreblanca, y de *Google Earth*, que se utilizó para afinar las cotas en aquellos lugares donde se dudaba de la buena representación de los “MDT”. Observando la información topográfica nos damos cuenta que el terreno mantiene una pendiente más o menos constante a lo largo y ancho de la Plana, excepto en las inmediaciones de la Sierra de Irtá y del Desierto de las Palmas, donde en pocos metros las cotas aumentan considerablemente. También podemos distinguir claramente en estos “MDT” tanto el río San Miguel o Cuevas, el barranco de Chichilla y la Rambla de Seguer como el Prat de Cabanes. Esta información topográfica fue revisada para evitar posibles errores en sus valores.

5.1.2. Muro de la formación hidrogeológica

Para la obtención del muro de la Plana de Oropesa - Torreblanca se utilizó el mapa de isopacas existente en la tesis doctoral de Ignacio Morell Evangelista (*Caracterización Hidroquímica de la Intrusión Marina en la Plana de Oropesa - Torreblanca* (prov.

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

Castellón, 1985). Mediante su transcripción a *AutoCAD* y posteriormente a *ArcGIS*, donde se interpolaron dichas líneas, se obtuvo el muro. Éste fue revisado minuciosamente para evitar errores fruto de la interpolación que se realizó mediante el programa *Surfer*. Tras esta revisión observamos que el muro de la Plana tiene una forma, básicamente, lenticular en la que se puede observar cómo se mantiene una pendiente constante en toda la formación hidrogeológica a excepción de las zonas anteriormente dichas, donde la pendiente es más acusada.

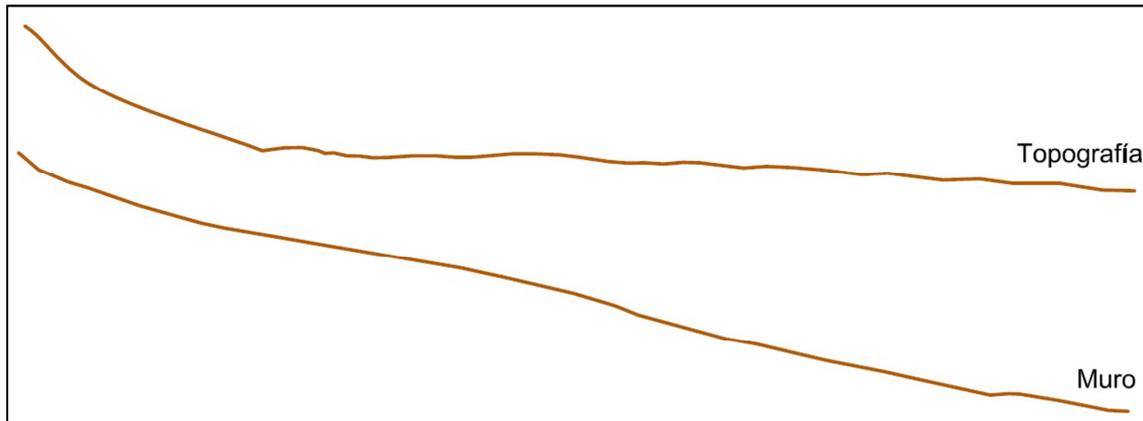


Figura 27. Topografía y muro de la formación hidrogeológica

5.1.3. Prat de Cabanes

La geometría del Prat de Cabanes se obtuvo de la página web de la Confederación Hidrológica del Júcar (www.chj.es), de donde también se obtuvieron sus características litológicas que se explicaron anteriormente. Se adoptó una profundidad constante igual a 4 m. (dato importante para la parte de transporte, *SEAWAT*) y se asumió una distribución de los factores multiplicadores de la conductancia del terreno en el Prat de Cabanes como se muestra en la figura 28, siendo la conductancia el doble en el N que en el S y siendo 0 en aquellas celdas donde se consideró que las alturas piezométricas se sitúan por debajo de la cota topográfica.

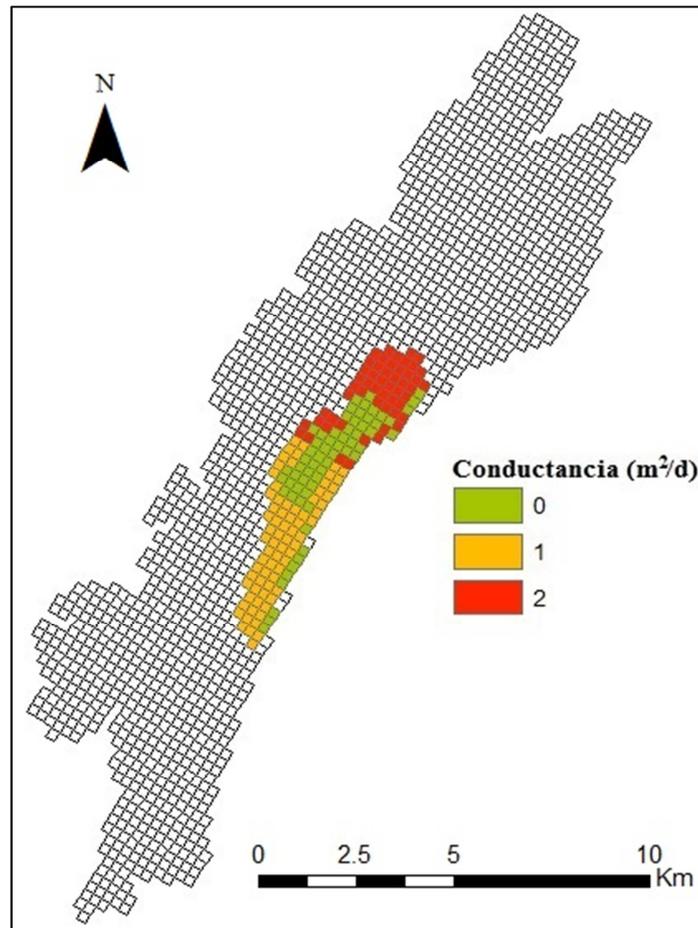


Figura 28. Distribución de los factores multiplicadores de las conductancias en el Prat de Cabanes (Referida a la malla de 250x250 m.)

5.1.4. Parámetros hidrogeológicos

Por lo que respecta a los parámetros hidráulicos de la formación, teniendo en cuenta la geología de la zona (fuente: *Confederación Hidrológica del Júcar*) y diferentes cortes geológicos de la tesis de Ignacio Morell Evangelista, podemos caracterizar estas tres zonas:

- Zona Pliocuaternaria (Zona 1) → Gravas y conglomerados
- Zona Miocénica (Zona 2) → Arcillas y margas
- Zona Cretácica (Zona 3) → Calizas

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

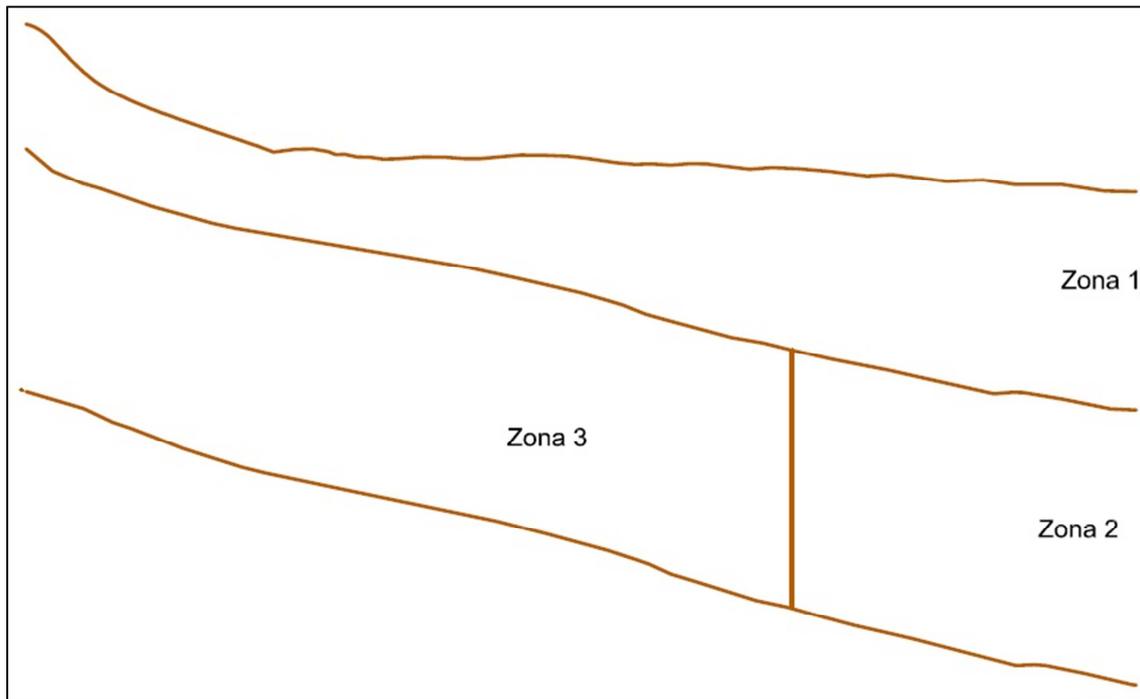


Figura 29. Zonas en la que se divide la formación hidrogeológica

Gracias a esta caracterización de la formación hidrogeológica en tres zonas, sabemos que atendiendo a sus características geológicas, los parámetros hidráulicos pueden resumirse en:

- Conductividad Hidráulica Horizontal \rightarrow Zona 2 < Zona 3 < Zona 1
- Conductividad Hidráulica Vertical \rightarrow Zona 3 < Zona 1
- Almacenamiento Específico \rightarrow Zona 3 < Zona 1
- Porosidad Efectiva \rightarrow Zona 3 < Zona 1 < Zona 2
- Transmisividades \rightarrow Zona 3 < Zona 1

5.1.5. Muro de la zona cretácica

Como ya se ha comentado anteriormente, la formación hidrogeológica fue dividida en tres zonas basándose en sus propiedades geológicas e hidrológicas. Debido al desconocimiento de la profundidad exacta de la zona cretácica situada por debajo de la zona pliocuaternaria y a la izquierda de la miocénica, y la profundidad de esta última respecto de la pliocuaternaria, se consideró que el muro de la zona cretácica tiene una potencia media de 200 m respecto de la pliocuaternaria. Con todo esto se decidió no considerar la zona miocénica ya que tampoco se conocen datos de piezometría en dicha zona, por lo que se corre el riesgo de desvirtuar la realidad considerando que la piezometría de esta zona sería contigua a la cretácica.

5.1.6. Recarga

Por lo que respecta a la recarga, ésta se define en las siguientes componentes: la infiltración de las precipitaciones y los retornos de riego.

Debido a la ausencia de datos de las precipitaciones en la zona de estudio durante casi todo el periodo elegido (1973-2009), se han utilizado datos correspondientes a un área próxima a la zona de estudio, situada en las cercanías del polígono industrial el Campaner en la Asociación de Viveristas de Agrios (AVASA), término municipal de Alcalà de Xivert. La serie histórica mensual completa comprendida entre el año 1973 y el año 2005 se obtiene a partir de los estudios realizados por González-Hidalgo (2008) y González-Hidalgo et al. (2010). Para completar el periodo que se quiere simular los datos mensuales de precipitación pertenecientes al periodo 2006-2009 se han obtenido a partir de la estación Agroclimática de la Ribera de Cabanes, perteneciente al Sistema de Información Agroclimático para el Regadío (SIAR), de la Consellería de Agricultura, Pesca y Alimentación (www.ivia.es). La tasa de infiltración de la precipitación considerada para todo el periodo es del 14% (Tuñón, 2000).

La infiltración debida al retorno de riego se ha calculado en función del método de regadío:

- *Riego por inundación o manta*: Dotación de riego estimada $9000 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{año}^{-1}$. En este caso la tasa de infiltración se ha considerado del 8% (Tuñón, 2000); por ello la infiltración anual del retorno del riego es de 72 mm.

- *Riego por goteo*: Dotación estimada de $5000 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{año}^{-1}$. La tasa de infiltración considerada es del 4% (Tuñón, 2000); por ello la infiltración anual del retorno del riego es de 20 mm.

En la actualidad se podría considerar que la totalidad de la superficie dedicada al cultivo, en la Plana de Oropesa-Torreblanca, se riega mediante riego por goteo. En la mayor parte de los casos se tiene información del momento en que se realizó la reconversión del sistema de riego. En el resto de los casos se ha asumido que la transformación tiene lugar en el periodo 1995-1996. Durante este periodo de transición se ha estimado que la mitad de la superficie se regó a goteo y la otra mitad a manta; por ello, la infiltración proveniente del retorno de riego será de 46 mm/año.

Las únicas zonas en las que, en algún momento de la simulación, no hay recarga, ya sea fruto de riego o de precipitación, son las zonas pobladas como: Oropesa, Marina d'Or, Torreblanca, Alcocebre y Torrenostra, que son las que se muestran en la figura 30.

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

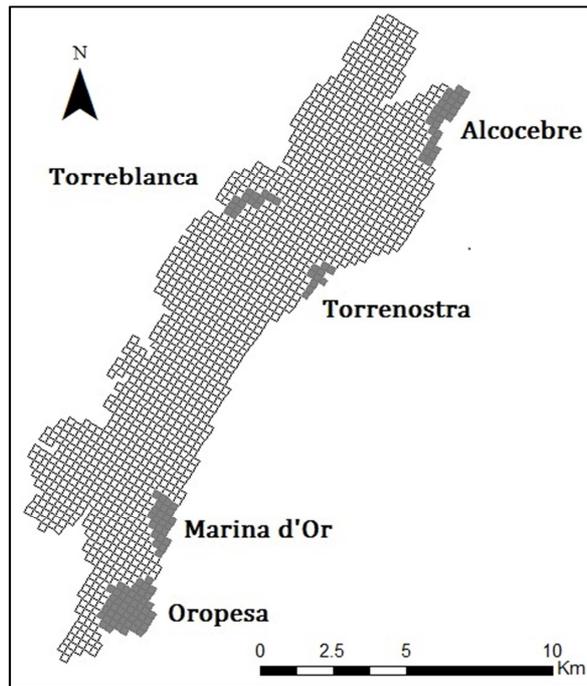


Figura 30. Zonas donde no hay recarga en algún momento de la simulación (Referidas a la malla de 250x250 m.)

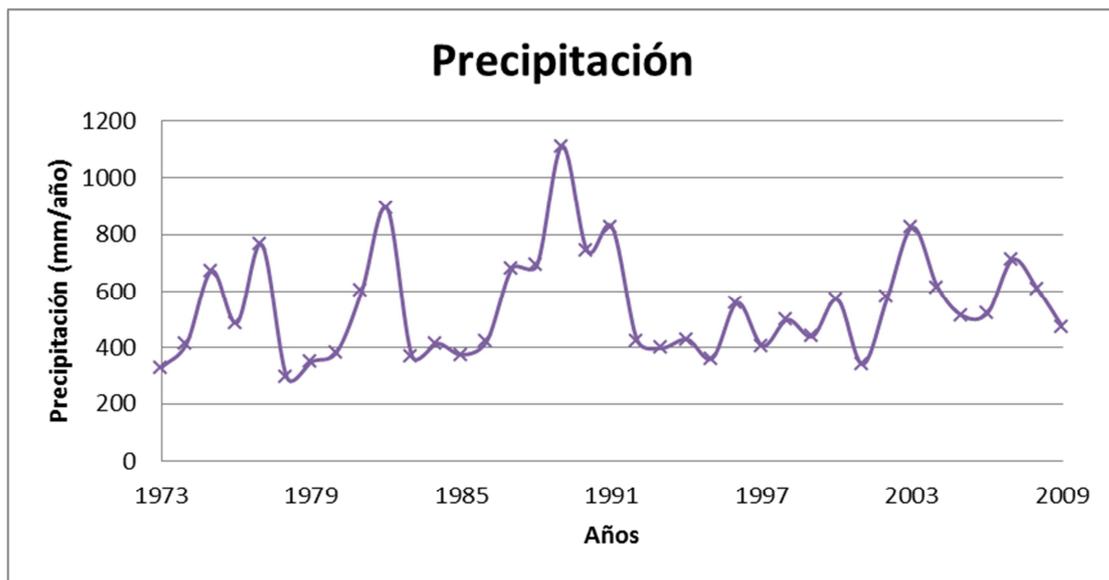


Figura 31. Evolución anual de las precipitaciones en la Plana de Oropesa - Torreblanca

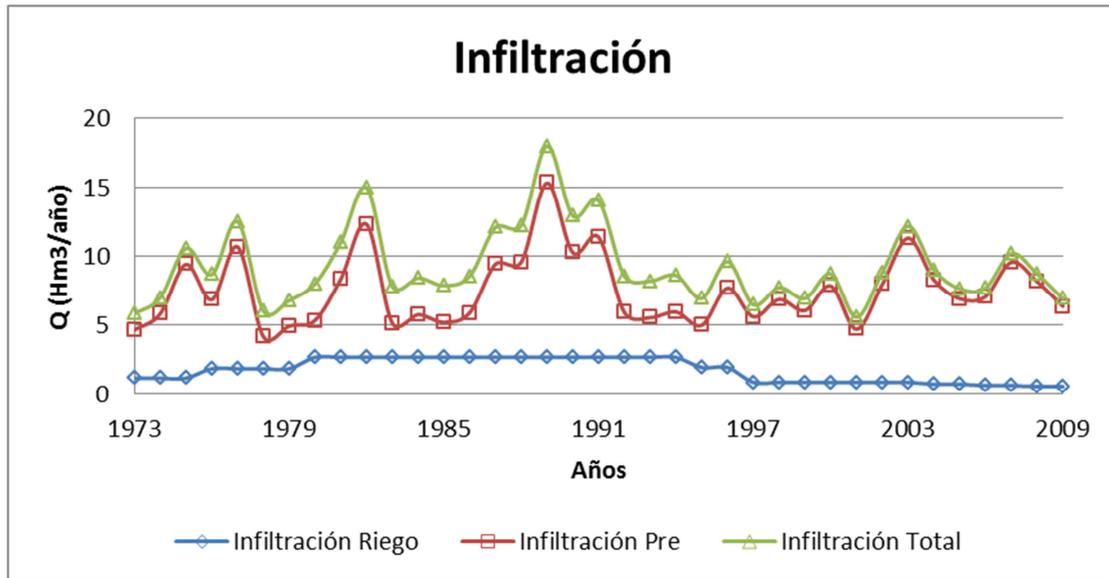


Figura 32. Evolución anual de las infiltraciones en la Plana de Oropesa - Torreblanca

5.1.7. Bombeos

Los bombeos se han obtenido a partir de distintas fuentes: las administraciones públicas, comunidades de regantes e informes técnicos. Los bombeos son de dos tipos:

- 1) Datos que nos han proporcionado las comunidades de regantes y los ayuntamientos, en estos casos los pozos tienen nombre propio (por ejemplo Diluvio, Laguna,...) o un número asignado (por ejemplo 149, 2945,...). En las fichas de los pozos aparecen los siguientes datos:
 - Término municipal al que pertenece
 - Toponimia (nombre)
 - Actualidad: aquí se responde SI o NO y significa si en el 2009 funcionaba o no.
 - Retorno de riego (Rr) en función del tipo de riego que es (Rr del riego a manta es del 8% y del riego a goteo es del 4%).
 - Coordenadas UTM

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

Termino Municipal: Alcalà de Xivert					
Pozo: Anna					
Actualidad: SI					
	Periodo	Tipo de Riego	Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraido (m³/año)	Retorno riego (mm/año)
	73-75	Manta	33	292500	72
	76-79	Manta	49	438750	72
Sup.máx reg.	80-84	Manta	65	585000	72
	85- 90	Manta	65	585000	72
	91- 92	Manta	65	585000	72
	93- 94	Manta	65	585000	72
	95- 96	Manta	65	585000	72
	97- 98	Manta	65	585000	72
	99- 03	Manta	65	585000	72
	04- 05	Manta	65	585000	72
	06- 07	Manta	65	585000	72
	08- 09	Manta	65	585000	72
Obs:	RIEGA SIEMPRE A MANTA				
Dot. Riego MANTA:			9000		m3/ha/año

Figura 33. Ejemplo de la información sobre un bombeo

- 2) Existen unas zonas que tienen campos de cultivo pero no se les ha asignado ningún pozo de los anteriormente citados, entonces nos hemos “inventado” unos pozos que riegan esas áreas. Para conocer cada pozo lo que riega se ha considerado la dotación de riego (riego a manta $9000 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ y riego goteo $5000 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{año}^{-1}$). Cada pozo de este tipo riega 20 hectáreas.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Periodo de Riego	1973-2009	1976-2009	1980-2009	1985-2003	1985-2005	1985-2007	2004-2009

Tabla 7. Periodo de riego según pozo virtual

NOTA. En algunos casos es desconocido es el caudal de extracción entre los años setenta y ochenta. En este caso se ha optado por aumentar paulatinamente los bombeos hasta alcanzar el caudal máximo en los años noventa y posteriormente ir disminuyéndolos hasta el caudal que se ha considerado o hasta su desaparición en función de la superficie de regadío existente en el último periodo. El caudal de inicio (en los casos que no se conoce) es la mitad del caudal máximo (años 90).

Para más información consúltese el “Anejo 2: Datos de entrada (inputs) del modelo matemático” donde se explican detenidamente los procesos de obtención y cálculos de los diferentes apartados enumerados.

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

La siguiente figura muestra la localización de cada bombeo sobre la Plana de Oropesa - Torreblanca, diferenciando en colores aquel municipio dentro del cual riega.

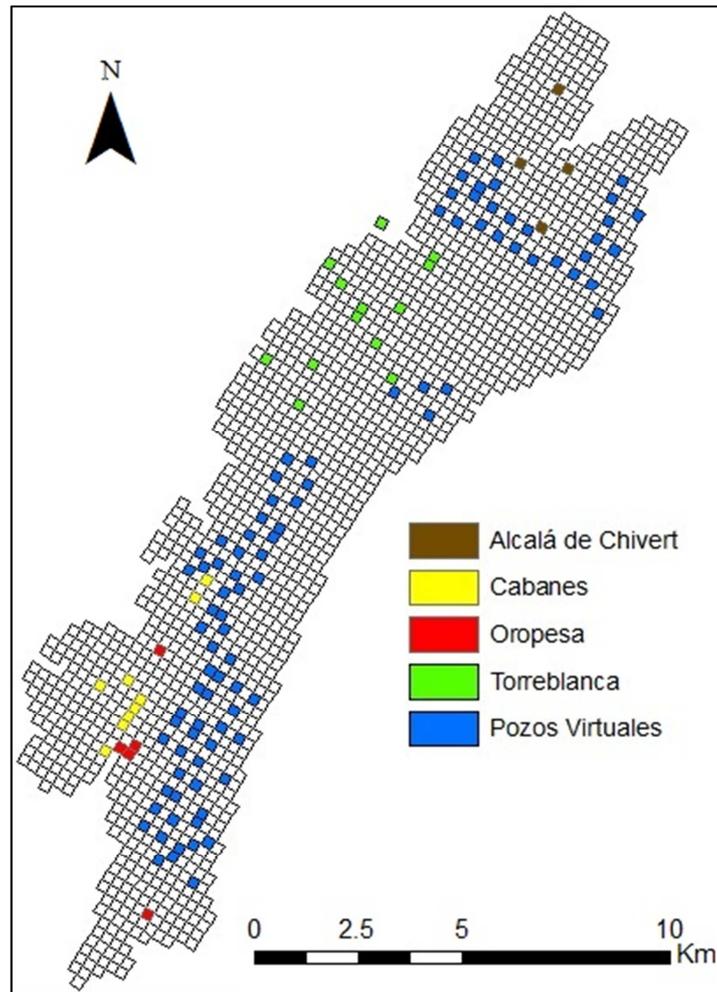


Figura 34. Localización de cada bombeo atendiendo al término municipal que riega (Referida a la malla de 250x250 m.)

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

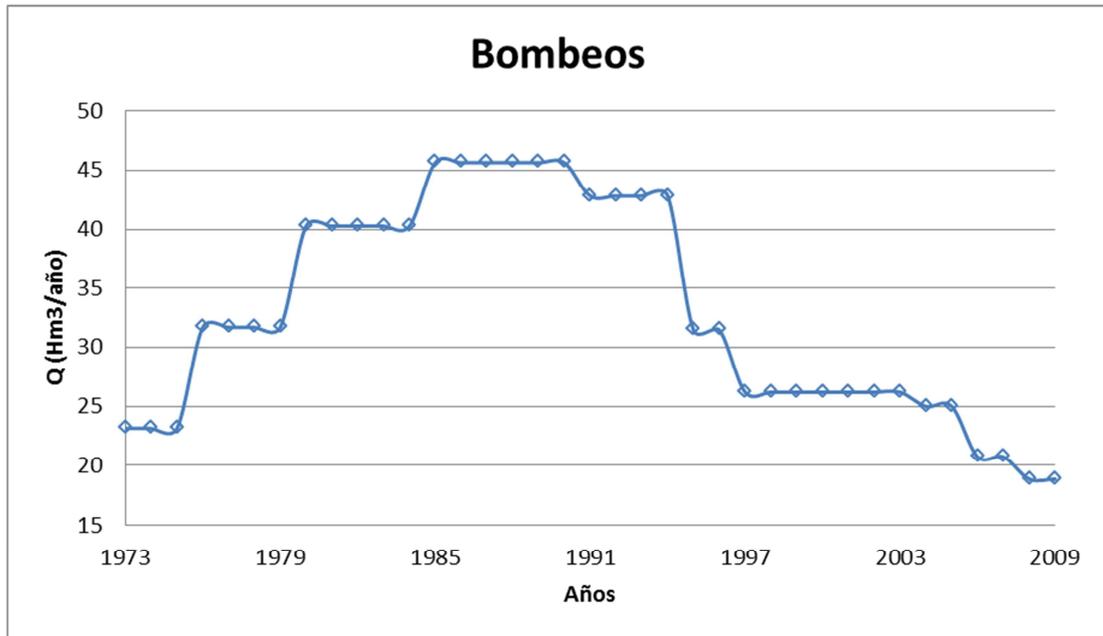


Figura 35. Evolución anual de los bombeos en la Plana de Oropesa - Torreblanca

Pozo Calculado	Periodo de funcionamiento	Q. máx. (m ³ /año)
P1	1973-2009	180000
P2	1976-2009	180000
P3	1980-2009	180000
P4	1985-2003	180000
P5	1985-2005	180000
P6	1985-2007	180000
P7	2004-2009	100000

Tabla 8. Pozos ubicados en la Plana de Oropesa - Torreblanca I (Renau, 2013)

Pozo Abst Urb	Periodo de funcionamiento	Q. máx. (m ³ /año)
S.VICENTE	1973-2009	2300000
PU1	1973-1990	2453500

Tabla 9. Pozos ubicados en la Plana de Oropesa - Torreblanca II (Renau, 2013)

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

Término Municipal	Pozo	Periodo de funcionamiento	Q. máx. (m³/año)
Alcocebre	Anna	1973-2009	585000
	Racó-Vale	1973-2007	450000
	Tossalet1	1973-1990	378000
	Tossalet2	1973-2009	210000
	Palaba-Estopet	1973-2009	2025000
Cabanès	Diluvio	1973-2009	792000
	Hidráulica	1973-2009	324000
	Laguna	1973-2009	900000
	Polido	1973-2009	212400
	R.Cabanès	1973-2009	986400
	R.Localizados	1973-2009	972000
	S.Isidro	1973-2009	616680
	Soquets	1973-2009	403200
	Progreso	1973-2009	1026000
Oropesa	Diluvio1	1973-1984	792000
	Progreso-viejo2	1973-1984	1022400
	Porvenir	1973-2009	446400
	29	1973-2009	334197
	Riegos_Fuera	1973-2009	288000
Torreblanca	149	1973-2009	585000
	890	1973-2009	382500
	2076	1973-2009	562500
	2499	1973-2009	517500
	3948	1973-2009	1620000
	4412	1973-2009	540000
	7586	1973-2009	472500
	8136	1973-2009	967500
	8391	1973-2009	234287
	8443	1973-2009	360000
	8135	1973-2009	2385000
	513_Fuera	1973-2009	1440000
	6919_Fuera	1973-2009	4500000
	258_Fuera	1973-2009	900000
3896_Fuera	1973-2009	1260000	

Tabla 10. Pozos ubicados en la Plana de Oropesa - Torreblanca III (Renau, 2013)

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

5.1.8. Piezometría y Control de Calidad

Tanto la piezometría como el control de calidad son importantes en nuestra investigación ya que son las dos únicas variables que utilizaremos para la calibración del modelo. Ambas informaciones proceden de la red de control de la CHJ y fueron obtenidas de su página web (www.chj.es).

Atendiendo a la piezometría, en el archivo “*Piezómetros*” de la CHJ encontramos todos los piezómetros existentes. Cada punto de control viene identificado por la siguiente información:

- Código de identificación del punto de control
- Coordenadas X y Y (proyectadas en el sistema ETRS_89)
- Altitud a la que se encuentra el punto de control
- Código y Nombre del Municipio en el que se encuentra
- Código y Nombre de la Unidad Hidrogeológica en el que se encuentra
- Código y Nombre de la Masa de Agua Subterránea en el que se encuentra
- Red Básica y Operativa (Si forman parte de ella o no)

Observamos 32 puntos de observación de la piezometría en la masa de agua subterránea Plana de Oropesa - Torreblanca, en los que tenemos como información el descenso producido en metros y la altura piezométrica respecto del nivel del mar. De estos 32 se utilizaron 10 en el proceso de calibración, ya que 11 se encuentran por encima de la cota del terreno. Se consideró también un piezómetro adicional perteneciente a la masa de agua Maestrazgo Oriental, que como ya se dijo, se sitúa por debajo de la masa de agua objeto de estudio y cuyo nivel piezométrico es superior al de ésta. Este punto de control adicional permitirá realizar una buena representación de las condiciones iniciales, por lo que se representará mejor la realidad.

Por lo que respecta a la calidad, en el archivo “*PuntosControlIntrusionCal*” de la CHJ encontramos todos los puntos de control existentes. Cada punto de control viene identificado por la siguiente información:

- Código de identificación del punto de control
- Coordenadas X y Y (proyectadas en el sistema ETRS_89)
- Altitud a la que se encuentra el punto de control
- Código y Nombre del Municipio en el que se encuentra
- Código y Nombre de la Unidad Hidrogeológica en el que se encuentra

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

- Código y Nombre de la Masa de Agua Subterránea en el que se encuentra
- Red Operativa (Si forman para de ella o no)

Observamos 37 puntos de control en la masa de agua subterránea Plana de Oropesa - Torreblanca, en los que tenemos como información las siguientes concentraciones: bicarbonatos (mg/l HCO_3) en mg/l , cloruros (mg/l Cl) en mg/l , conductividad en uS/cm , conductividad a 25 °C (Campo) en uS/cm , nitratos (mg/l NO_3) en mg/l , oxígeno disuelto (% satur., Campo) en % sat.O_2 , oxígeno disuelto (mg/l , Campo) en ppm O_2 , sulfatos (mg/l SO_4) en ppm SO_4 y la temperatura del agua en °C . De estos 37 se utilizaron 8 por la misma razón anteriormente expuesta.

En la figura 36 se muestra la distribución de los diferentes piezómetros y puntos de control de calidad sobre la Plana.

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

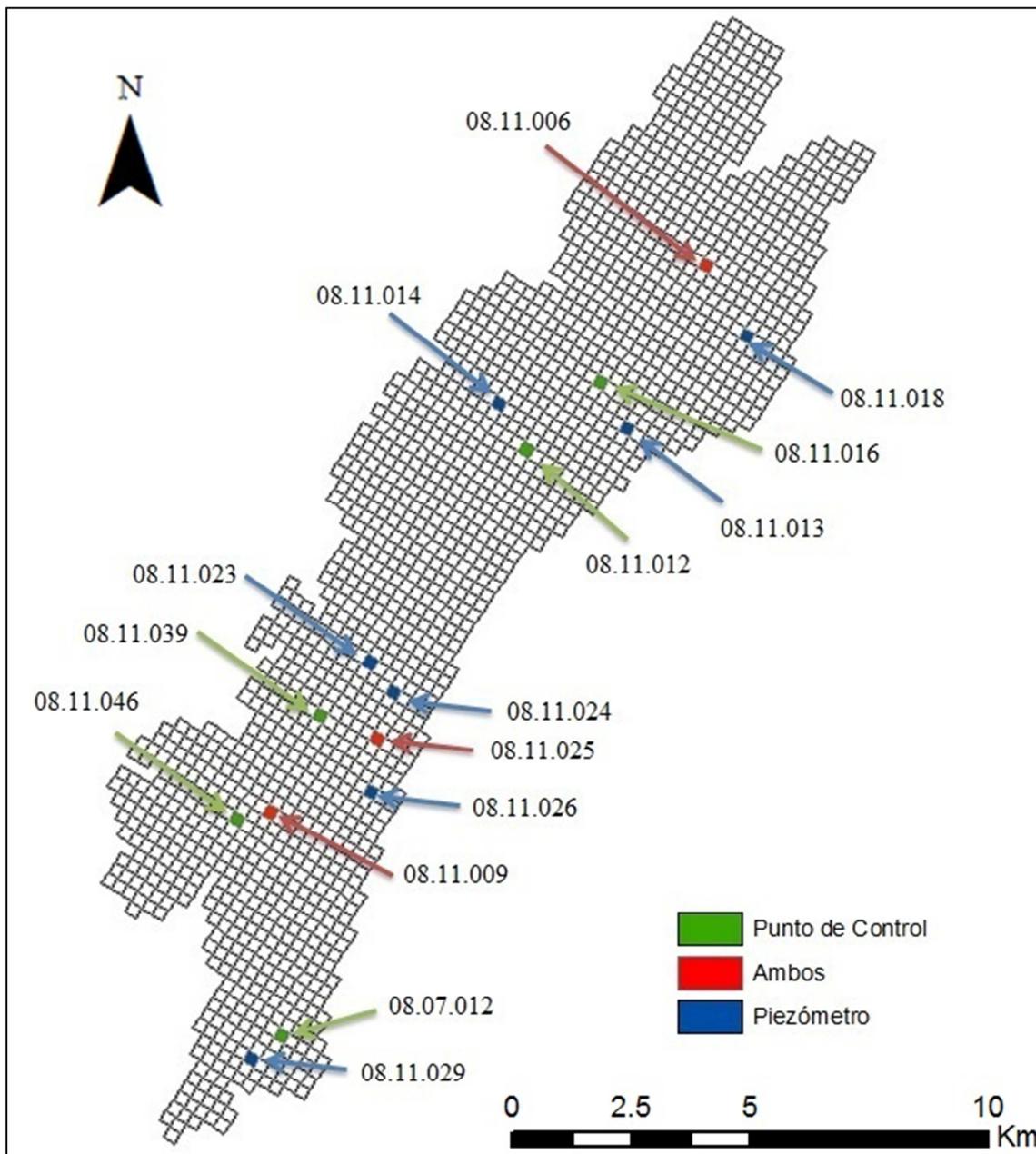


Figura 36. Localización de los piezómetros y puntos de control de calidad (Referida a la malla de 250x250 m.)

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

Código CHJ	Código IGME	Coord X	Coord Y	Piezometría	Control de Calidad
08.07.012	302440005	767764	4442682	NO	SI
08.11.006	312360002	776513	4458619	SI	SI
08.11.009	302440027	767498	4447242	SI	SI
08.11.012	312350017	772718	4454959	NO	SI
08.11.013	312350024	774798	4455201	SI	NO
08.11.014	312350025	772219	4455676	SI	NO
08.11.016	312350029	774129	4456181	NO	SI
08.11.018	312360009	777368	4457294	SI	NO
08.11.023	312410013	769525	4450434	SI	NO
08.11.024	312410017	770071	4449729	SI	NO
08.11.025	312410019	769663	4448781	SI	SI
08.11.026	312410020	769655	4447728	SI	NO
08.11.029		767110	4442234	SI	NO
08.11.039	312410016	768465	4449289	NO	SI

Tabla 11. Coordenadas de piezómetros y puntos de control de calidad

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

5.1.9. Flujo Lateral

El flujo lateral es uno de las entradas a la Plana con una mayor incertidumbre, ya que hay pocos estudios donde se cuantifique claramente este valor. Tras los procesos de calibración, que se detallarán a continuación, se observó que las zonas en las que se cuantifica éste son las que se muestran en la siguiente figura (Figura 37).

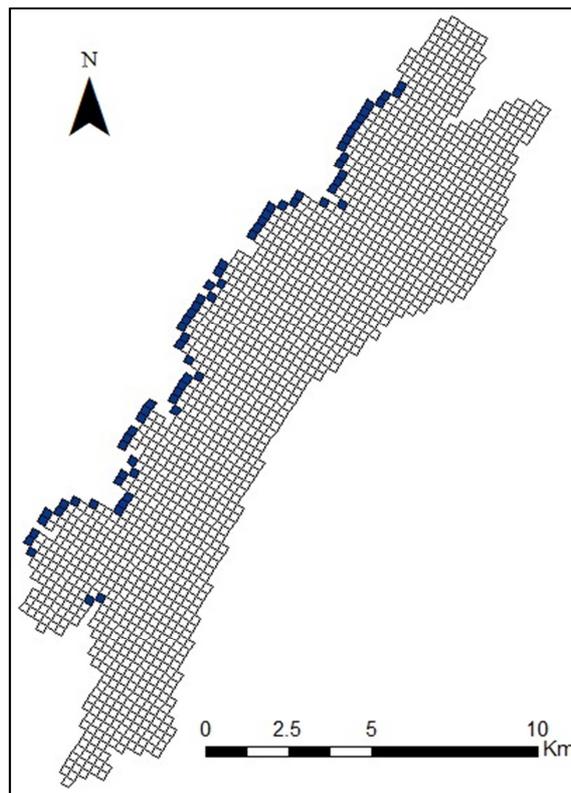


Figura 37. Zonas de entrada de flujo lateral a la formación (Referida a la malla de 250x250 m.)

5.2. Modelo Matemático

Como ya se ha dicho, gracias a un modelo digital del terreno, *Google Earth* y al mapa de isopacas existente en la tesis doctoral de Ignacio Morell Evangelista (*Caracterización Hidroquímica de la Intrusión Marina en la Plana de Oropesa - Torreblanca (prov. Castellón), 1985*), se pudo determinar tanto la topografía como el muro de la formación hidrogeológica subterránea Oropesa - Torreblanca. Este muro se obtuvo mediante la interpolación del mapa de isopacas mediante *Krigging* linear con la aplicación *Surfer*.

Mediante el programa *ArcGIS* se superpuso una malla de 7250 x 26000 m., cuya discretización horizontal fue de 250 x 250 m. (por lo que tenemos 104 filas y 29 columnas), al contorno de la formación hidrogeológica para conocer cuántas celdas de 250 x 250 m. abarca la formación hidrogeológica. Tras esta operación quedaron seleccionadas 1659 celdas, es decir, 1659 celdas abarca la formación hidrogeológica.

El modelo desarrollado consta de 5035 celdas activas repartidas en 7 capas, en las que se discretizó la formación hidrogeológica. A parte se introdujeron 331 celdas en el borde Este del acuífero para representar el mar. De estas 7 capas, 6 pertenecen al acuífero pliocuaternario (zona 1) y la restante al cretácico (zona 3). El acuífero mioceno (zona 2), no se tuvo en cuenta en el modelo ya que, según los informes consultados y la tesis de Renau (2013), tiene muy poca influencia en el modelo.

Para realizar la discretización vertical de las capas se barajaron las siguientes opciones:

- Tomando como referencia la topografía de la zona

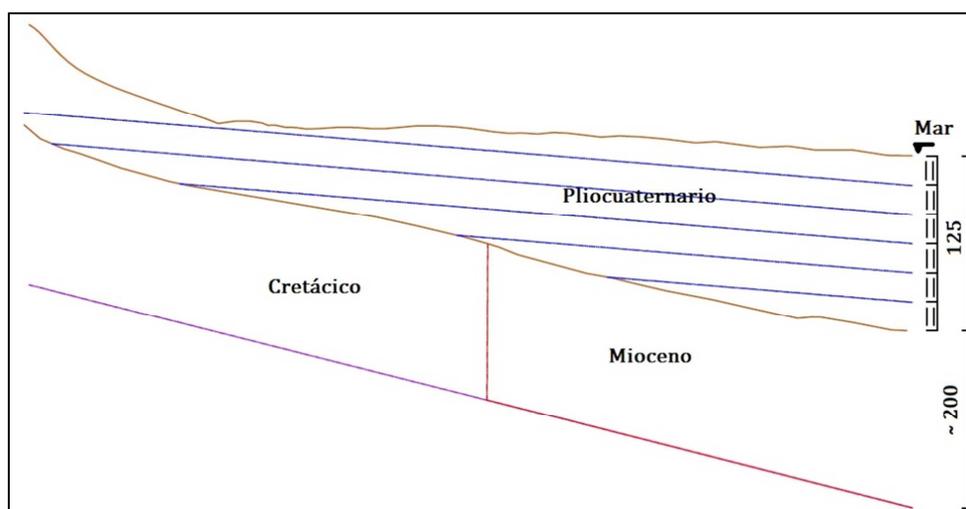


Figura 38. Opción de discretización vertical alternativa no considerada

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

- Tomando como referencia el muro del acuífero pliocuaternario

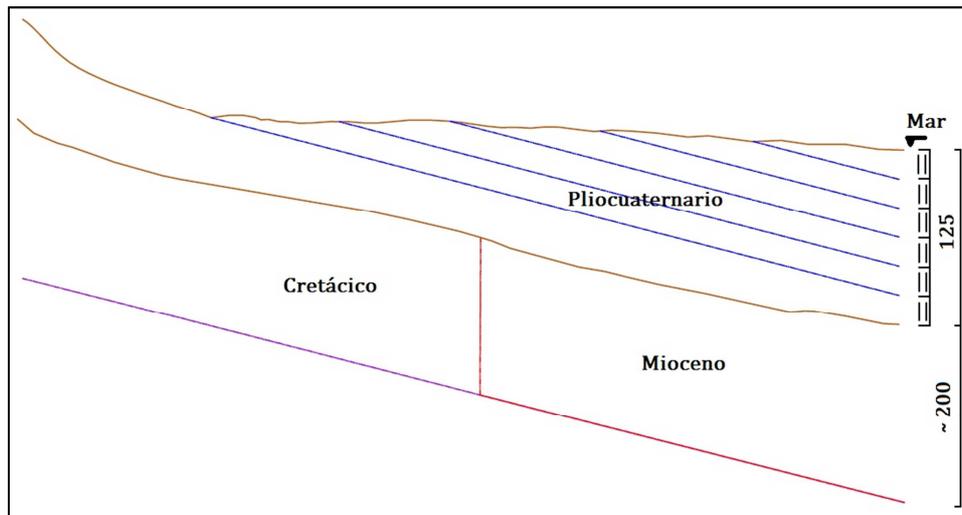


Figura 39. Opción de discretización vertical seleccionada

Entre estas dos opciones se seleccionó la segunda (opción tomando como referencia el muro del acuífero pliocuaternario) ya que, en este caso siempre son posibles los flujos hacia la capa 7, caso contrario al de la primera opción en el que se desconectarán las capas superiores de la capa 7 al movernos hacia el NO.

Se optó por una discretización vertical, como se indica en la figura 39, igual para todas las capas del acuífero pliocuaternario (de la 1 a la 6) de unos 21 m., y de aproximadamente 200 m, de media, para los acuíferos mioceno y cretácico (capa 7). La realización de la discretización vertical de la formación hidrogeológica en 6 capas se realizó mediante *Excel* creando muros a una distancia de unos 21 m. del muro de la capa inferior. Para la realización del muro de la capa 7, se creó una capa con una pendiente constante de 22.5° en las zonas situadas en el centro y sur de la formación hidrogeológica y de 9° en el norte, mediante la función de interpolación anteriormente nombrada.

Una vez discretizado, la disposición de la formación hidrogeológica en cada capa fue la siguiente.

Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4	Capa 5	Capa 6	Capa 7
12	33	256	682	1300	1659	1093

Tabla 12. Celdas Activas por capa

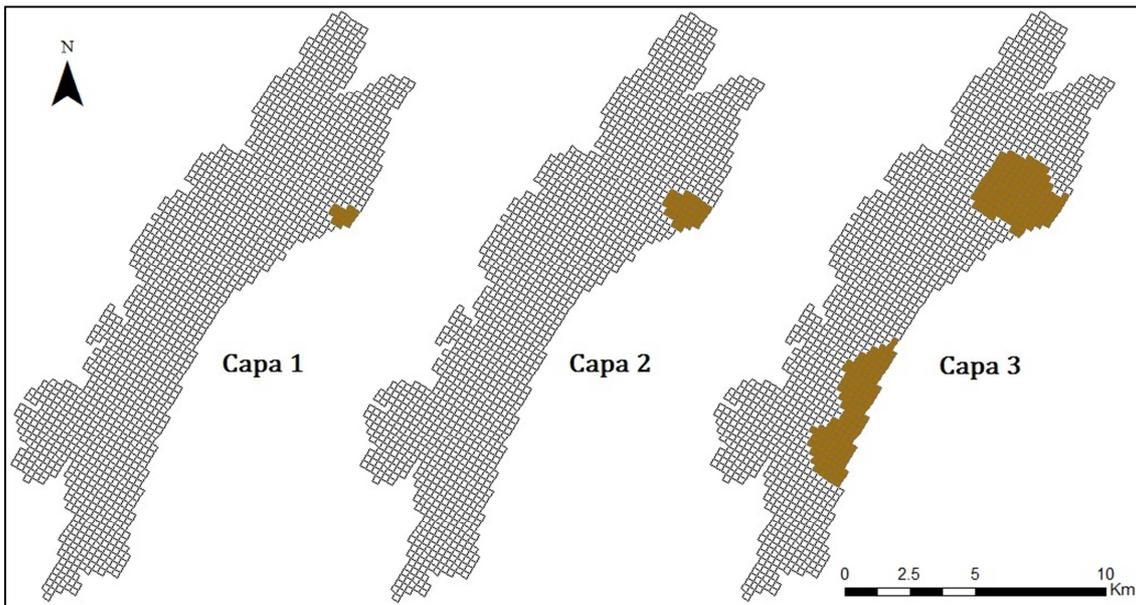


Figura 40. Comparación de las celdas activas de la capa 1, 2 y 3 (Referidas a la malla de 250x250 m.)

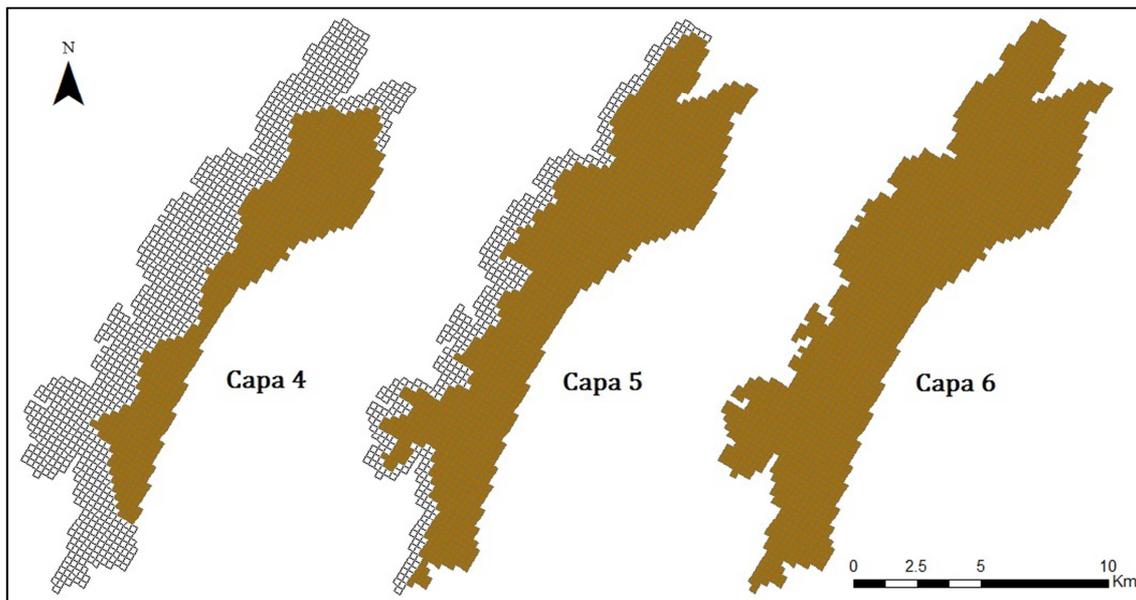


Figura 41. Comparación de las celdas activas de la capa 4, 5 y 6 (Referidas a la malla de 250x250 m.)

En el modelo se consideraron dos espacios temporales: estacionario (utilizado para calibrar el modelo) y transitorio (objetivo del trabajo fin de master y utilizado para analizar los resultados).

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

5.2.1. Calibración del modelo de flujo sin efectos de la densidad (*MODFLOW*)

En este apartado se explican los pasos y datos introducidos en el modelo para la calibración de la masa de agua subterránea gracias a los datos de piezometría de la CHJ, es decir, teniendo en cuenta únicamente la resolución del flujo.

5.2.1.1. Condiciones Iniciales

La superficie piezométrica inicial ha sido obtenida por interpolación a partir de los datos puntuales disponibles de la CHJ. Como en la mayoría de puntos de piezometría el dato del mes de Enero de 1973 (primero de nuestra simulación) se desconoce, a partir de la observación de su evolución a lo largo de los años, se supusieron unos valores para estos datos, gracias a los cuales y con la ayuda de la interpolación del programa *Surfer*, se obtuvo la superficie piezométrica inicial correspondiente a las capas 1, 2, 3, 4, 5 y 6 (Figura 42). Para la obtención de la correspondiente a la capa 7, se optó por elevar la anterior progresivamente (en las zonas cercanas al mar la elevación es inferior a la de las zonas interiores) para que las alturas piezométricas en la capa 7 fueran superiores a las de las capas correspondientes al pliocuaternario. Todos los datos obtenidos tras las interpolaciones fueron modificados a lo largo de la calibración para obtener, finalmente las siguientes superficies piezométricas.

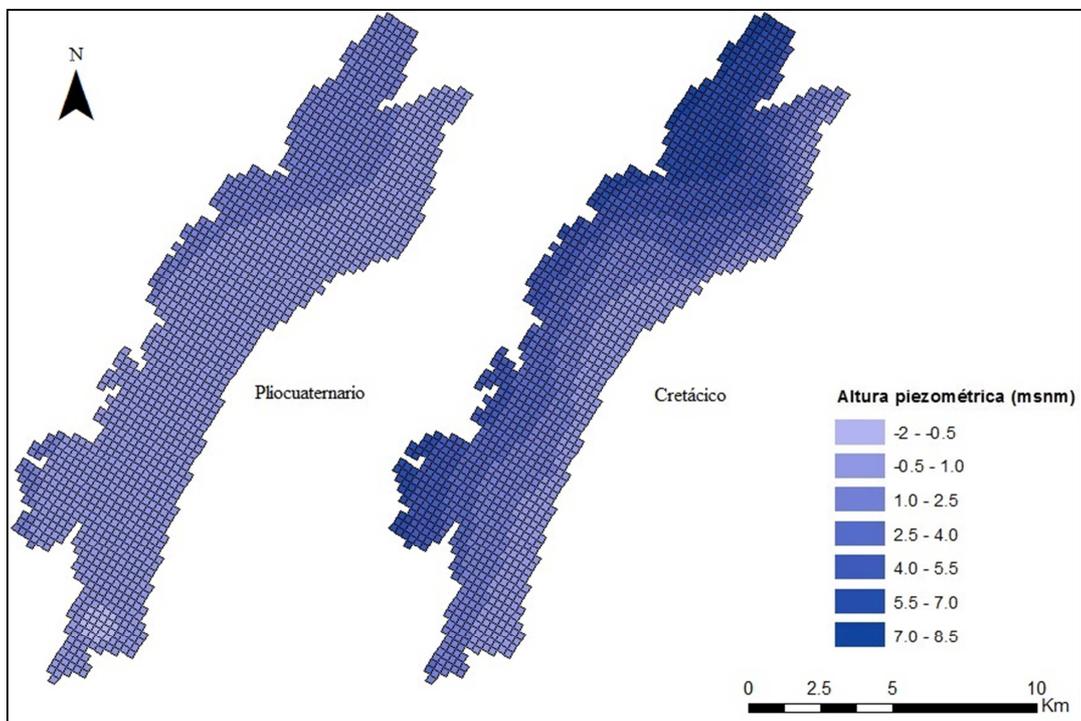


Figura 42. Superficie piezométrica inicial plicuaternaria y cretácica (Referidas a la malla de 250x250 m.)

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

5.2.1.2. Condiciones de contorno

Los flujos laterales (FL) provienen del acuífero del Maestrazgo, el cual es un acuífero con una importante capacidad de almacenamiento y se encuentra en situación cercana al régimen natural. La piezometría en el acuífero del Maestrazgo, en las proximidades del contacto con el sistema, es conocida y no experimentan grandes fluctuaciones, se ha decidido utilizar una condición de contorno de potencial general (*GHB*).

En los contactos laterales subterráneos asociados a la capa 7, en las celdas que se va a imponer esta condición de contorno, se ha relacionado el potencial hidráulico en el límite (que a priori es desconocido) con las precipitaciones. Para facilitar este proceso las precipitaciones se han dividido en tres grupos y se han diferenciado tres tipos de potencial hidráulico (Tabla 13 y 14).

Grupo	Precipitaciones	Magnitud (mm/año)
1	Muy abundantes	> 800
2	Abundantes	de 600 a 800
3	Normales	< 600

Tabla 13. Grupos correspondientes a las precipitaciones

Tipo	Potencial Hidráulico	Observaciones
1	Máximo	Nivel piezométrico 2008 (Año con mayor nivel piezométrico registrado)
2	Medio	Media entre el tipo 1 y el 2
3	Mínimo	Nivel piezométrico 2005 (Año con menor nivel piezométrico registrado)

Tabla 14. Tipos de potencial hidráulico en el límite

En el sector central se sitúa la zona húmeda (Prat de Cabanes), alimentada por el acuífero, que ha sido aproximada en el modelo con una condición de tipo dren (*DRNI*).

En la costa se ha establecido un potencial constante de 0 msnm, que no variará durante la simulación (Figura 43).

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

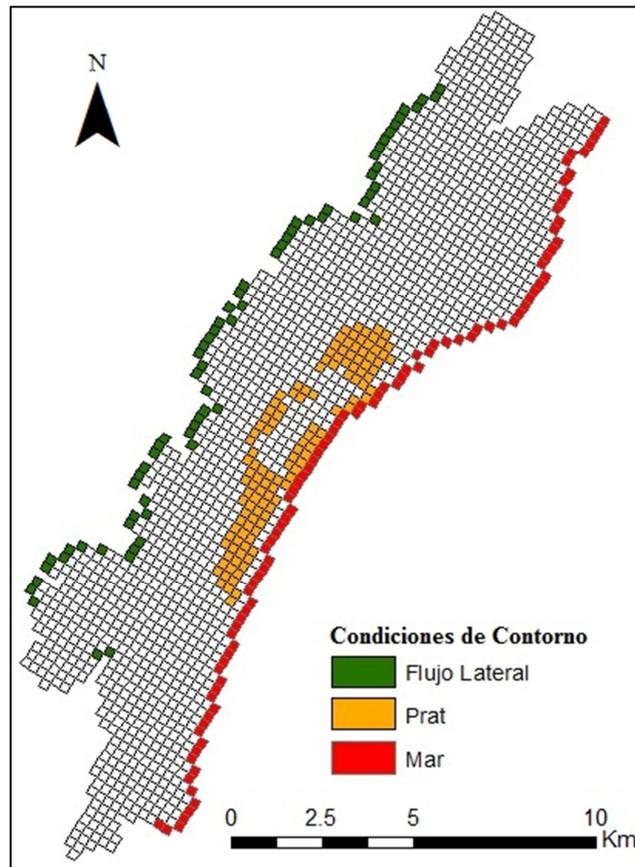


Figura 43. Condiciones de contorno de la formación hidrogeológica (Referidas a la malla de 250x250 m.)

5.2.1.3. Recarga y Bombeo

En la calibración del modelo se introdujeron como bombeo y recarga las medias diarias, medidas en m^3/d y m/d respectivamente, de todo el periodo de estudio (1973 - 2009).

Los bombeos se consideraron como totalmente penetrantes y la recarga fue aplicada a la celda activa más alta o con mayor cota (superficie de la formación hidrogeológica).

5.2.1.4. Proceso de Calibración

Para realizar la calibración del modelo se partió de los datos de conductividades de la Tesis doctoral de Arianna Renau (*Nueva herramienta para la gestión de las aguas subterráneas en acuíferos costeros. Volumen ecológico de remediación (ver). Metodología y aplicación a la Plana de Oropesa - Torreblanca (Masa de agua subterránea 080.110, 2013)*), siendo las conductividades resultantes de la calibración las que se muestran en la figura 44.

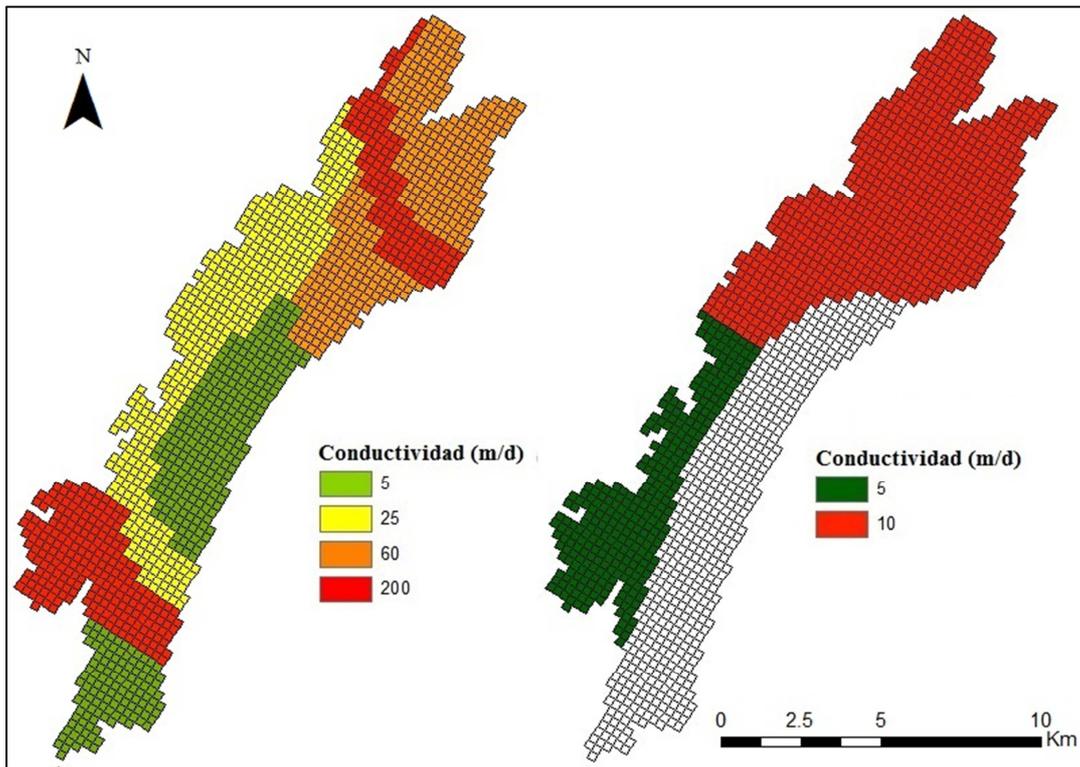


Figura 44. Conductividades de la tesis de Arianna Renau (2013) (Referidas a la malla de 250x250 m.)

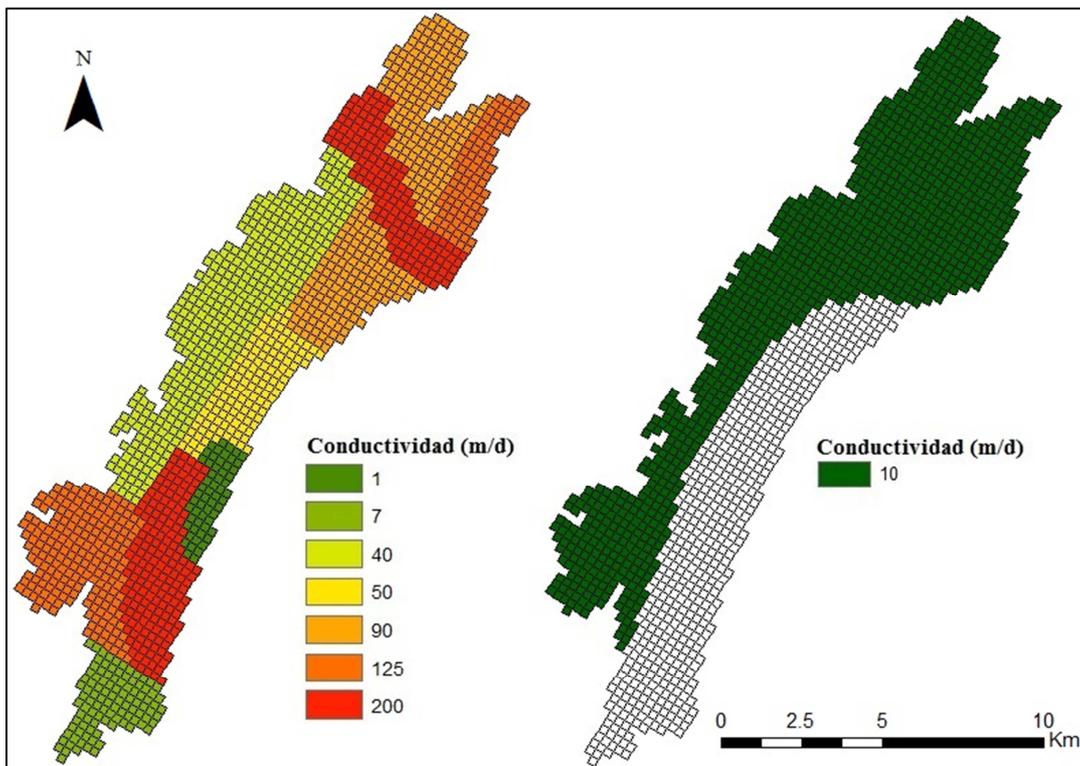


Figura 45. Conductividades resultantes de la calibración del modelo (Calibración del flujo sin efectos de densidad variable) (Referidas a la malla de 250x250 m.)

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

Estas son las conductividades calibradas en el modelo. Se observa, en la anterior figura, uno de los avances no abordados hasta la fecha en los modelos existentes (el aumento del zonado para la parametrización del modelo y su calibración). Existen dos zonas cuya conductividad es de $200 \text{ m}^2/\text{d}$ situadas en el lecho del río San Miguel y en los alrededores del Prat de Cabanes. Otras dos de $125 \text{ m}^2/\text{d}$, una debida a los manantiales costeros de Alcocebre y otra situada al SO de la masa bordeando el Desierto de las Palmas. En el Prat de Cabanes se observan tres valores de conductividad porque, según estudios consultados, éstas son mayores en la parte norte del Prat que en la sur. Una zona de $7 \text{ m}^2/\text{d}$ correspondiente a Oropesa y sus alrededores y otra de $40 \text{ m}^2/\text{d}$ situada desde Torreblanca hasta el interior de la masa a la altura de Torre la Sal. Finalmente se consideró una conductividad de $10 \text{ m}^2/\text{d}$ para toda la capa 7.

También se calibraron las conductancias correspondientes a los flujos laterales y al dren (Figuras 46a y 46b, respectivamente).

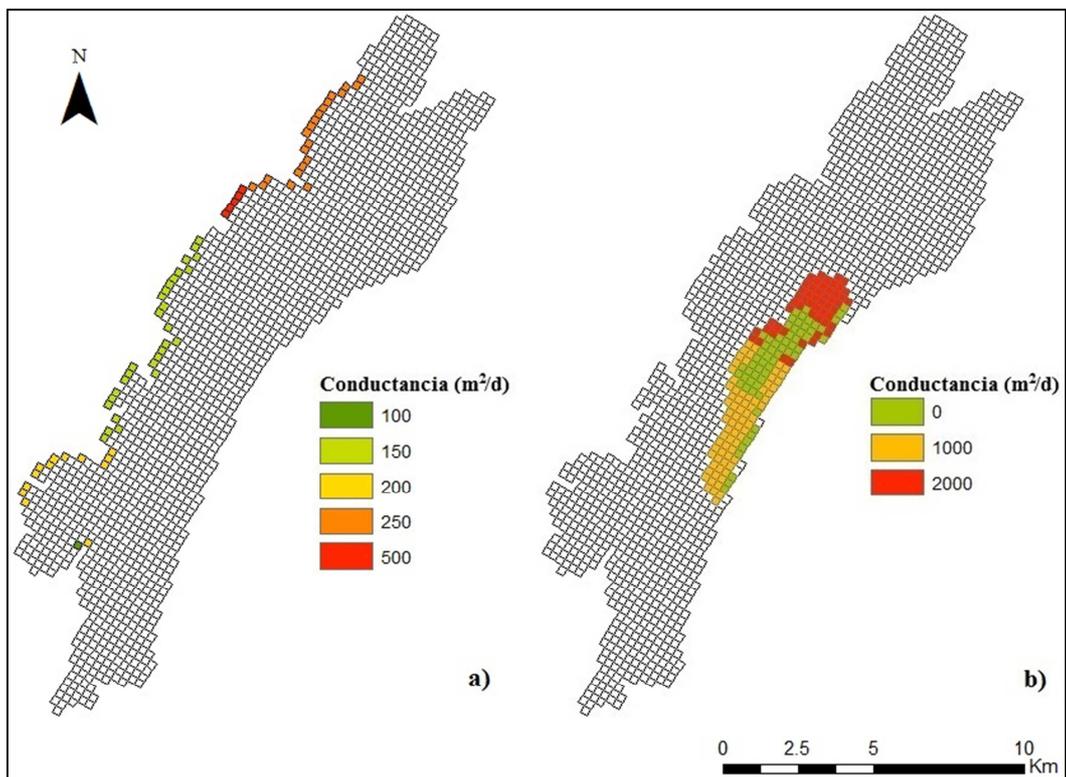


Figura 46. a) Conductancia Flujo Lateral; b) Conductancia Prat (Calibración del flujo sin efectos de densidad variable) (Referidas a la malla de 250x250 m.)

Por último se muestran en la siguiente tabla las porosidades efectivas y los coeficientes de almacenamiento y el rendimiento específico.

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

Capa	Renau (2013)			Modelo Calibrado		
	n (%)	S_s	S_y (%)	n (%)	S_s	S_y (%)
Pliocuaternaria	2 - 12	$5 \cdot 10^{-4} - 10^{-5}$	5 - 10	10	$8 \cdot 10^{-4}$	10
Cretácica				3	$5.1 \cdot 10^{-6}$	3

Tabla 15. Comparación porosidad efectiva, coeficiente almacenamiento y rendimiento específico Renau vs Modelo calibrado

El resultado de la calibración, para los diferentes puntos de piezometría, fue el que se muestra en las siguientes figuras, donde se comparan los datos observados y los valores calculados.

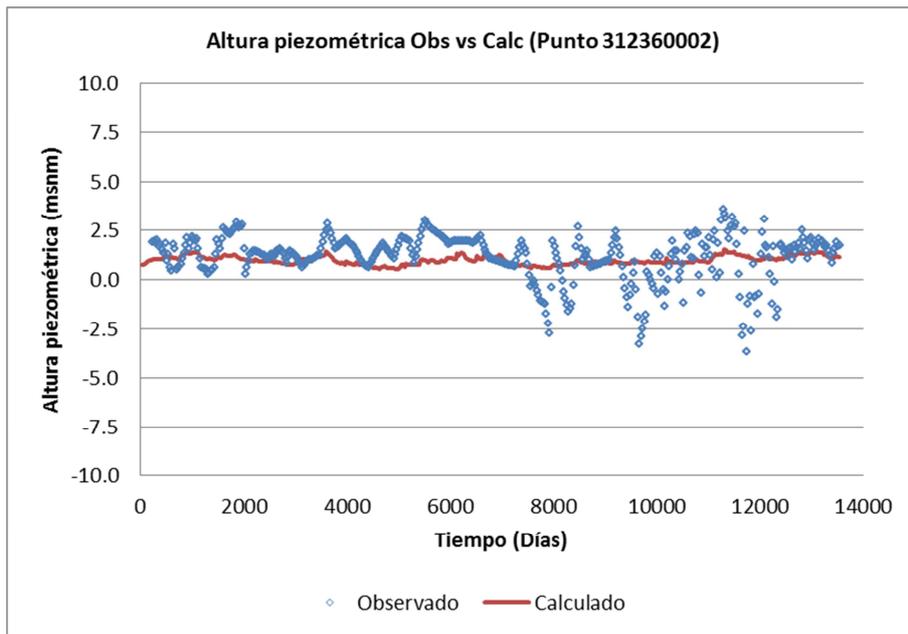


Figura 47. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312360002, calibración del flujo sin efectos de densidad variable)

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

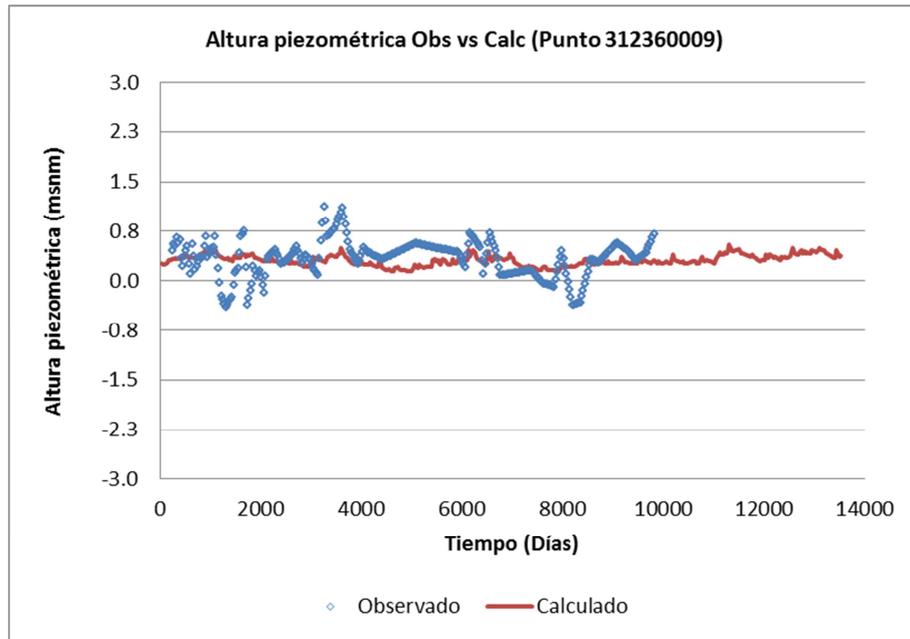


Figura 48. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312360009, calibración del flujo sin efectos de densidad variable)

En el sector Norte se sitúan los puntos 312360002 y 312360009. El primero se caracteriza por presentar datos de observación piezométrica por debajo del nivel del mar durante la segunda mitad del periodo de simulación; los datos reales de observación piezométrica presentan un máximo próximo a los 4 msnm y un mínimo cercano a los 4 msnm en un corto periodo de tiempo. Seguramente el causante de este salto piezométrico sea la ubicación de un pozo activo (Anna) en los alrededores del mismo. En el segundo podemos observar que hasta septiembre de 1983 los datos de observación varían considerablemente igual que entre noviembre de 1989 y de 1994. Esto puede ser debido a bombes situados cerca del punto de observación utilizados para regar campos de cultivo.

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

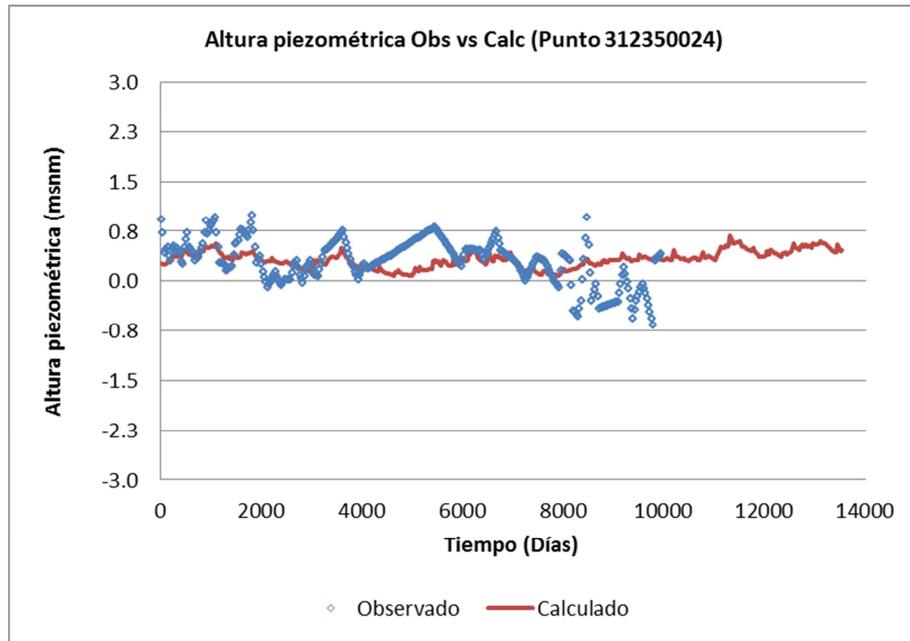


Figura 49. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312350024, calibración del flujo sin efectos de densidad variable)

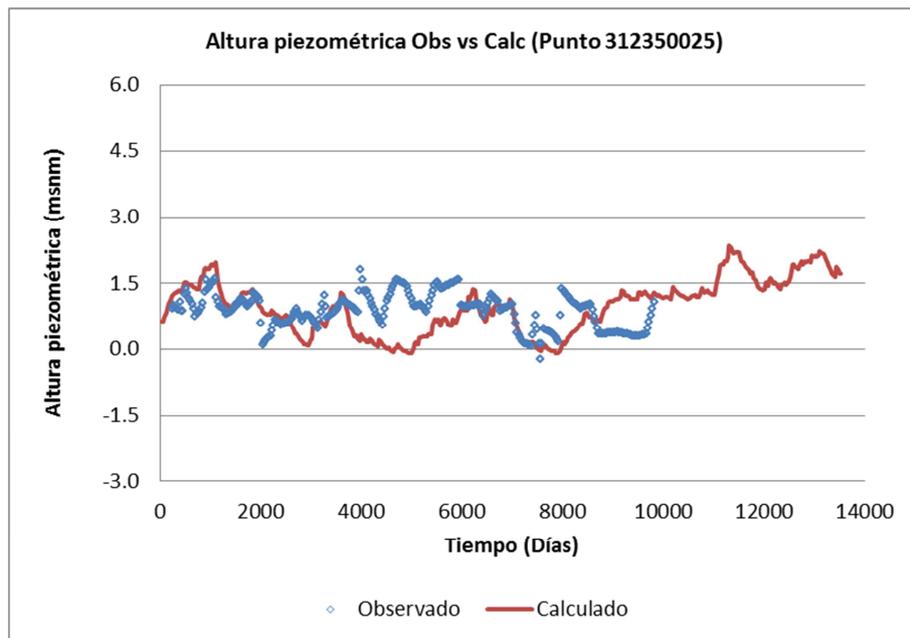


Figura 50. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312350025, calibración del flujo sin efectos de densidad variable)

El sector que abarca Torreblanca (sector Central) es el que presenta mejor calibración de todo el modelo. Se puede observar que los datos reales y los calculados presentan los mejores ajustes. Aunque en la mitad del periodo de simulación los valores observados se diferencian de los calculados, sobre todo en el punto 312350025.

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

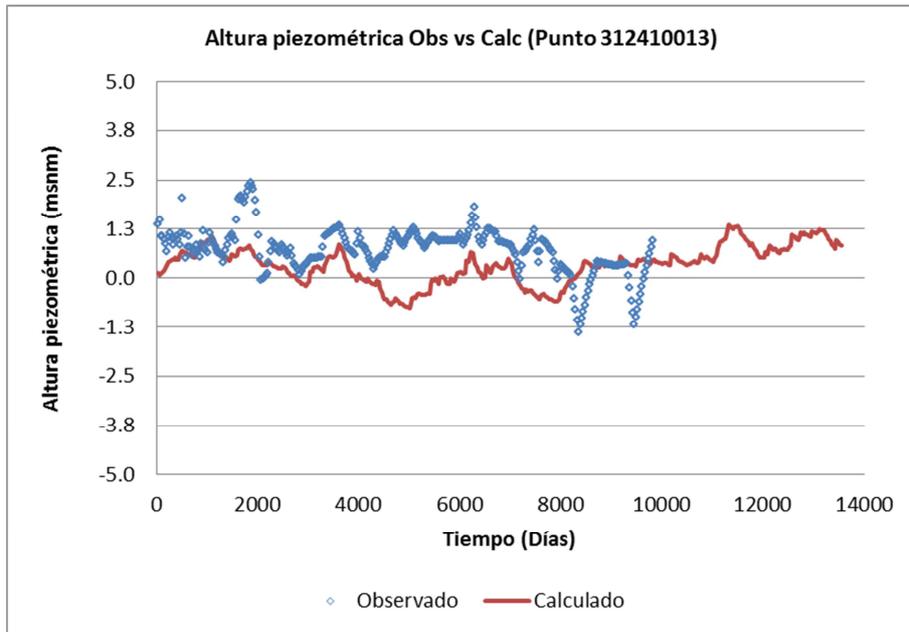


Figura 51. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312410013, calibración del flujo sin efectos de densidad variable)

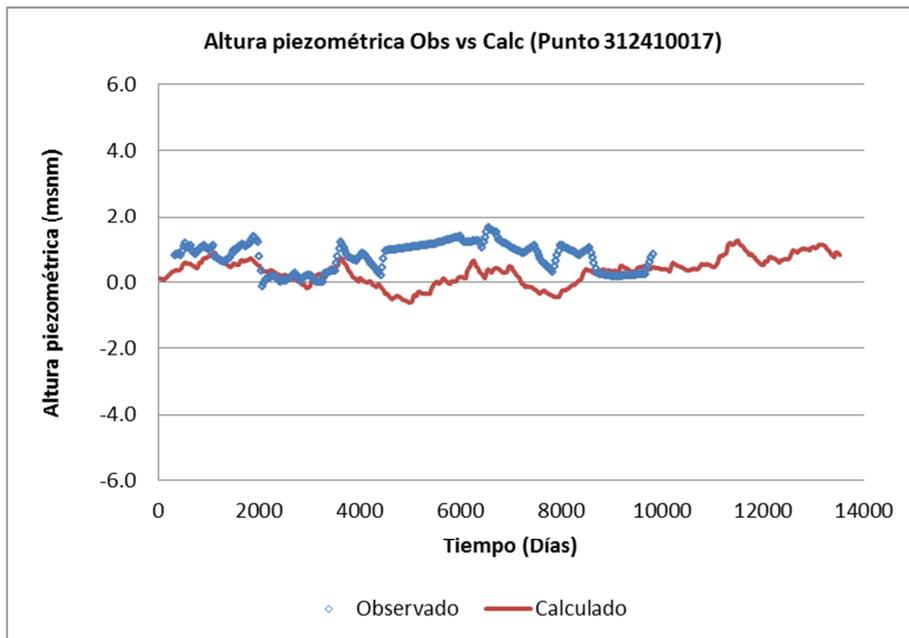


Figura 52. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312410017, calibración del flujo sin efectos de densidad variable)

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

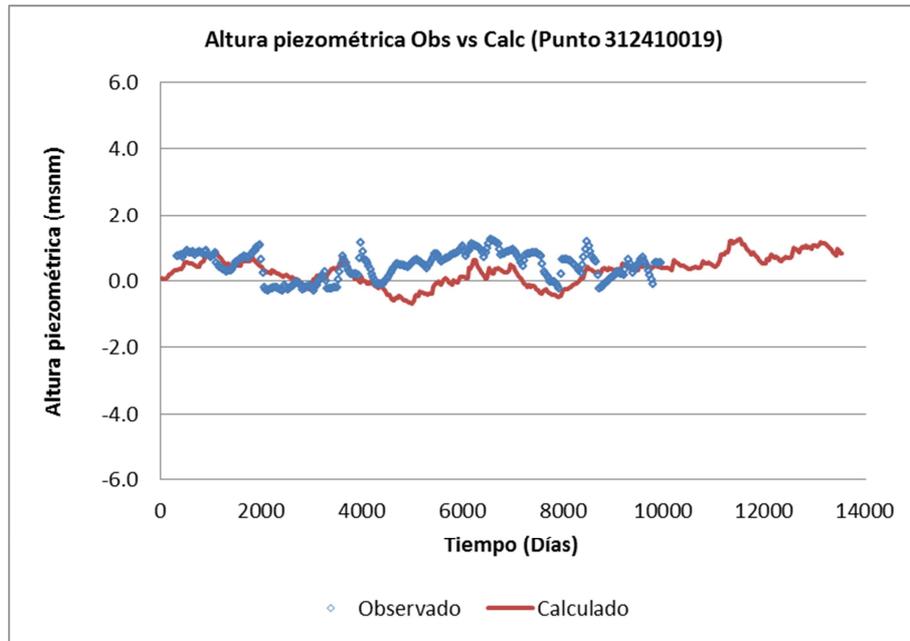


Figura 53. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312410019, calibración del flujo sin efectos de densidad variable)

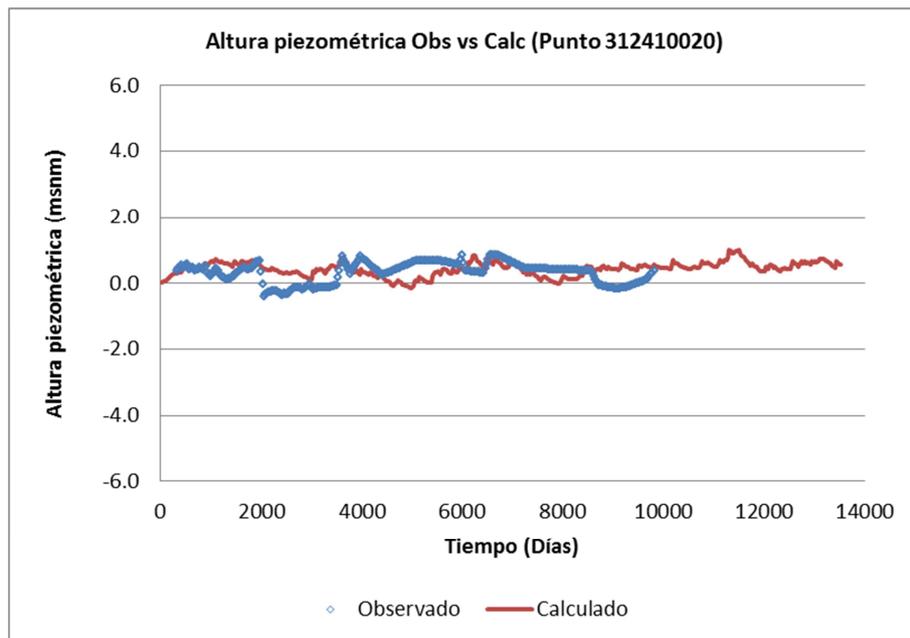


Figura 54. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312410020, calibración del flujo sin efectos de densidad variable)

En los alrededores del Prat de Cabanes y dentro de éste, se observa como el modelo también capta en general las tendencias y el valor de las observaciones de campo. A excepción de algunos valores en la mitad del periodo de simulación, sobre todo en los puntos 312410013 y 312410017.

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

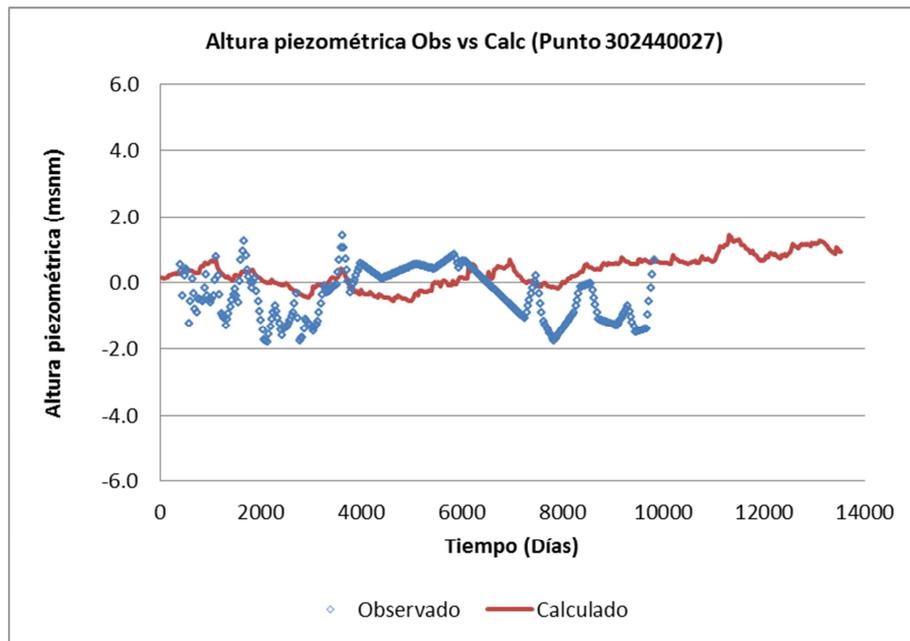


Figura 55. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312440027, calibración del flujo sin efectos de densidad variable)

En el punto ubicado en el interior del sector Sur (punto 312440027) es complicado observar una tendencia clara de la evolución piezométrica. En la gráfica se observan dos nubes de datos reales, una al principio de la simulación y otra al final, en las que muchos se encuentran por debajo del nivel del mar. En cambio el tramo central del periodo a simular, donde predominan los datos de piezometrías positivos, es donde se pueden apreciar claramente valores negativos calculados.

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

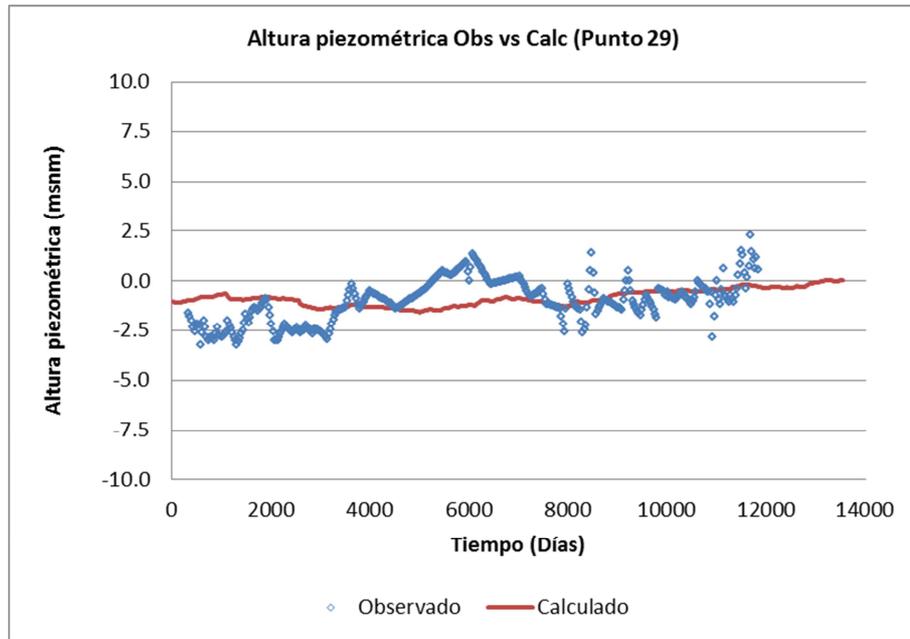


Figura 56. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 29, calibración del flujo sin efectos de densidad variable)

El punto 29, perteneciente a Oropesa, no es representativo y su calibración es pobre seguramente debido a la situación del mismo, situándose, como se observa en la figura 36 (mapa de localización de los piezómetros y puntos de control de calidad), muy cercano al límite del contorno de la masa de agua. Se cree que por ello es un punto dinámico.

Por último se muestra el balance hídrico anual (Figura 57) y una tabla resumen que muestra el balance hídrico medio del periodo de simulación.

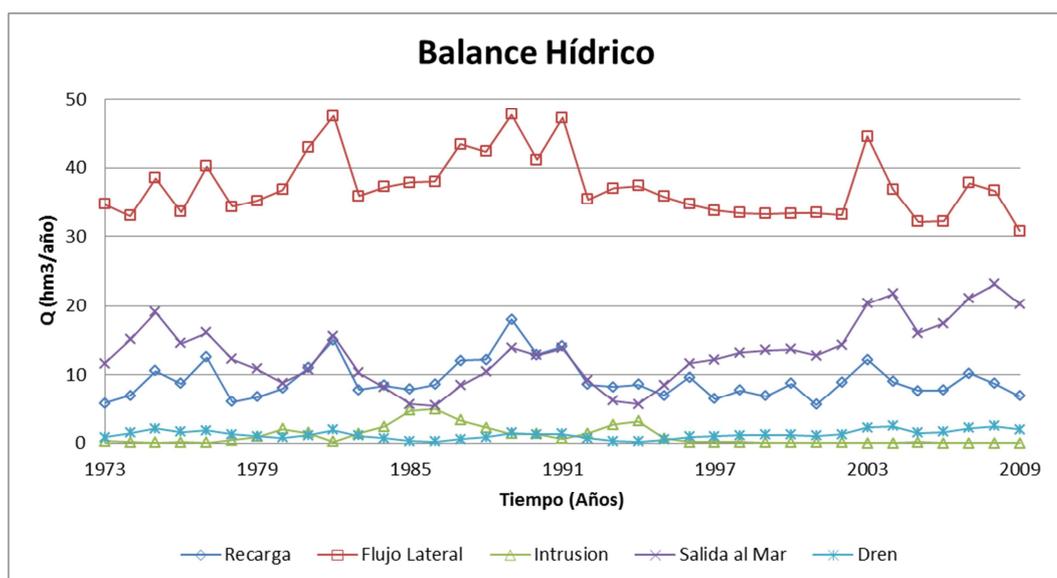


Figura 57. Balance hídrico calculado (Calibración del flujo sin efectos de densidad variable)

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

En el balance hídrico anual podemos observar tres periodos (1980 - 81, 1984 - 88 y 1993 - 94) en los que la intrusión aumenta hasta alcanzar los 2.03 hm³ en 1980, 4.93 hm³ en 1986 y 3.18 hm³ en 1994. Esto es debido a la fuerte explotación de los pozos que tiene lugar entre 1984 y 1994. También es debido a las fuertes y sucesivas disminuciones en la cantidad de precipitación entre 1977 - 78, 1982 - 83 y 1991 - 92.

Entradas (hm³/año)		Salidas (hm³/año)	
Intrusión	1.00	Salidas al Mar	13.09
Entradas laterales	37.26	Pozos	32.93
Infiltración	9.23	Dren	1.23
Total	47.49	Total	47.25

Tabla 16. Balance hídrico medio calculado (Calibración del flujo sin efectos de densidad variable)

Por lo que respecta al balance hídrico medio, se observa una fuerte entrada procedente de los flujos o entradas laterales y otra menor en la infiltración de agua de lluvia y riego, mientras que como salidas se observan una gran salida a raíz de los bombeos, casi igual que la entrada por flujo lateral, y otra inferior en las salidas al mar. Los totales no son iguales debido al almacenamiento de agua por parte de la formación hidrogeológica.

5.2.2. Calibración del modelo de flujo y transporte con efectos de la densidad variable (SEAWAT)

En este apartado se explican los pasos y datos introducidos en el modelo para la calibración de la masa de agua subterránea gracias a los datos de piezometría y calidad del agua de la CHJ, es decir, teniendo en cuenta la resolución del flujo y del transporte.

5.2.2.1. Condiciones Iniciales

En este caso aparte de la superficie piezométrica como condición inicial tenemos la salinidad existente en el instante 0 de la simulación. Ésta se obtuvo como quedó explicado en el “Anejo 1: Definición de la geometría del modelo” y en la siguiente figura se muestran sus superficies de salinidad.

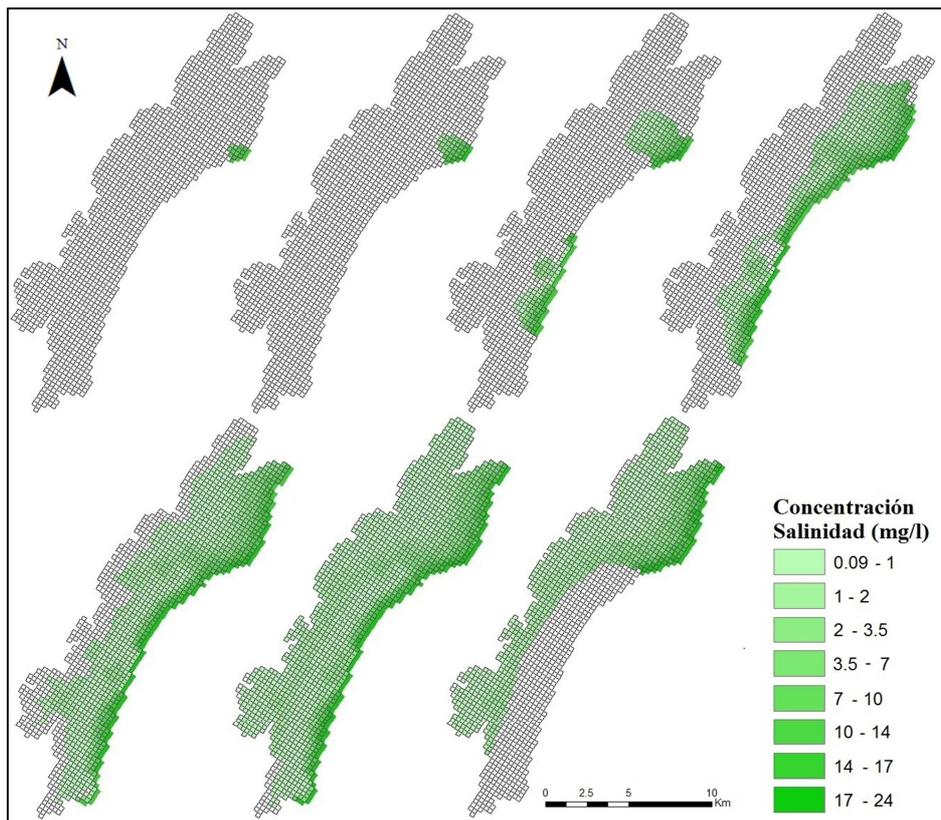


Figura 58. Salinidades iniciales del modelo (Referidas a la malla de 250x250 m.)

5.2.2.2. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno son las mismas que en el apartado anterior (transferencias laterales subterráneas, zona húmeda en el sector Central de la plana y potencial constante de 0 msnm en la costa).

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

5.2.2.3. *Recarga y Bombeo*

Similares a los utilizados en el apartado anterior.

5.2.2.4. *Proceso de Calibración*

Para realizar esta calibración del modelo se partió de los datos de conductividades obtenidos en el apartado anterior. También se calibraron las conductancias correspondientes al dren siendo las resultantes de 400 y 800 m²/d en vez de los 1000 y 2000 m²/d del apartado anterior. En este caso no se modificaron los datos obtenidos relativos al coeficiente de almacenamiento ni a las conductancias calibradas de los flujos laterales.

A la hora de calibrar el modelo se optó por modificar las conductividades de aquellas celdas más cercanas a la costa, siendo esta conductividad más baja en las capas más profundas, consiguiendo así simular la cuña salina característica de los acuíferos costeros.

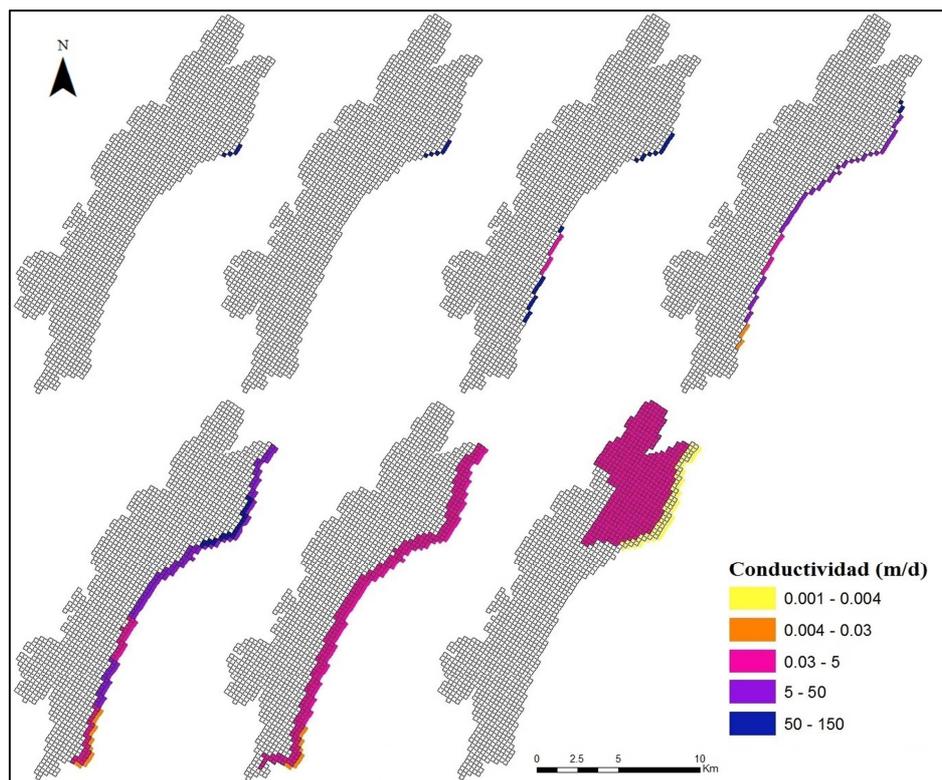


Figura 59. Celdas cuya conductividad cambia respecto de la anterior calibración (Referidas a la malla de 250x250 m.)

El resultado de la calibración, para los diferentes puntos de piezometría y de control de la calidad, fue el que se muestra en las siguientes figuras.

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

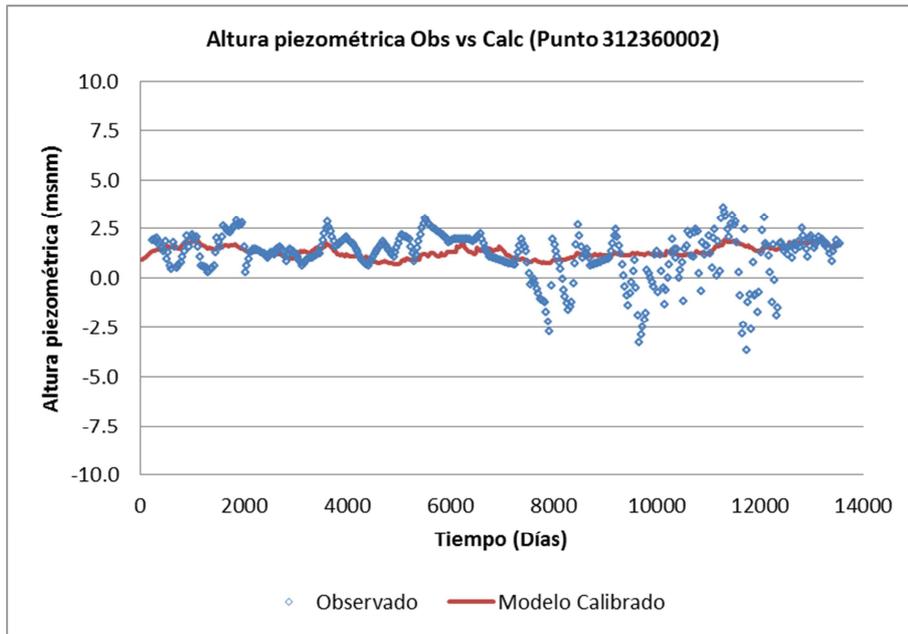


Figura 60. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312360002, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)

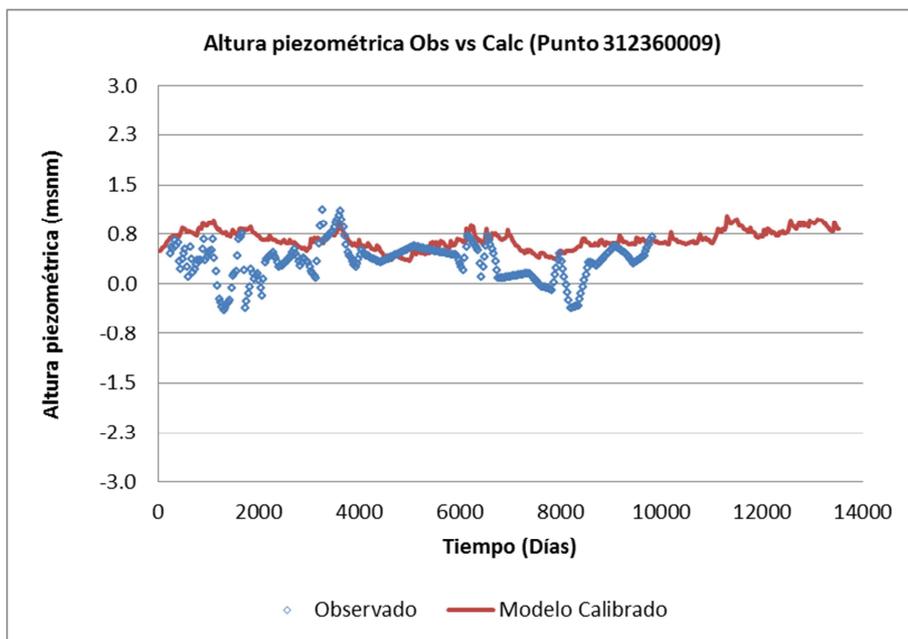


Figura 61. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312360009, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

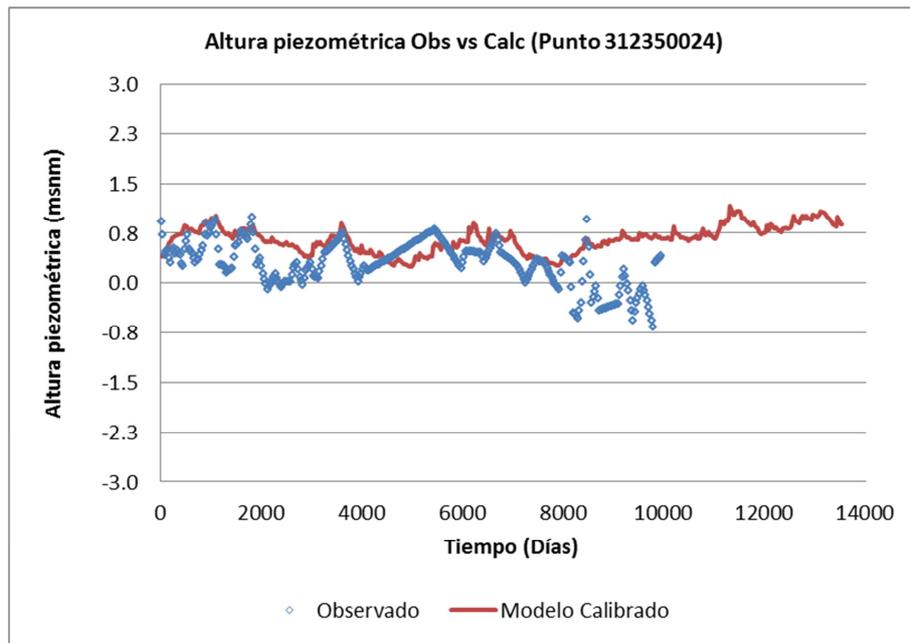


Figura 62. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312350024, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)

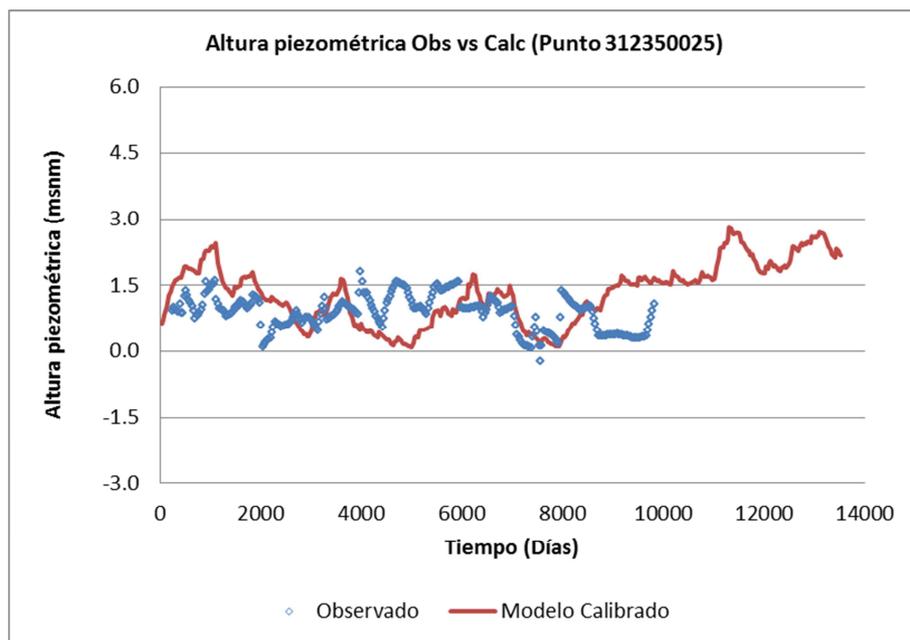


Figura 63. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312350025, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

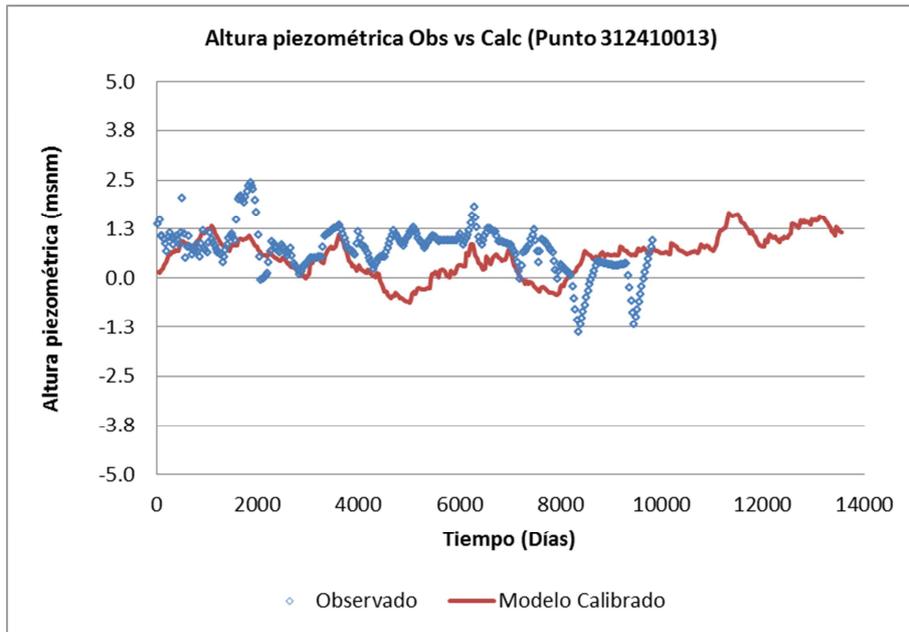


Figura 64. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312410013, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)

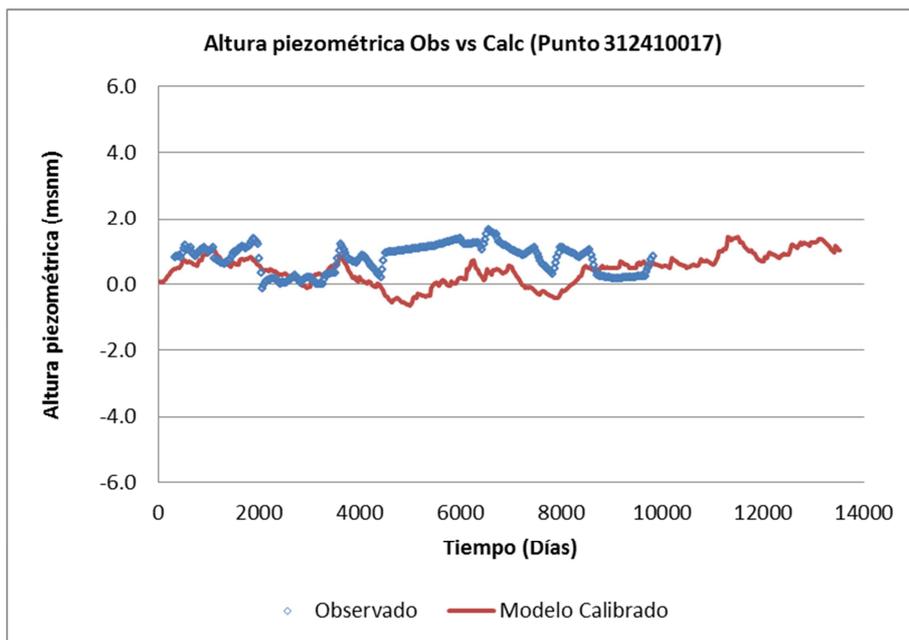


Figura 65. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312410017, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

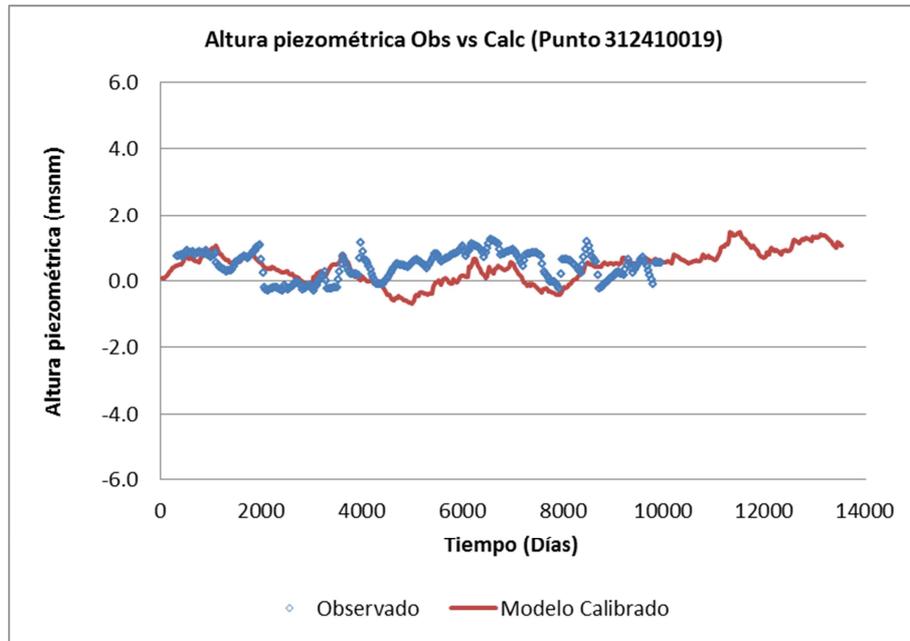


Figura 66. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312410019, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)

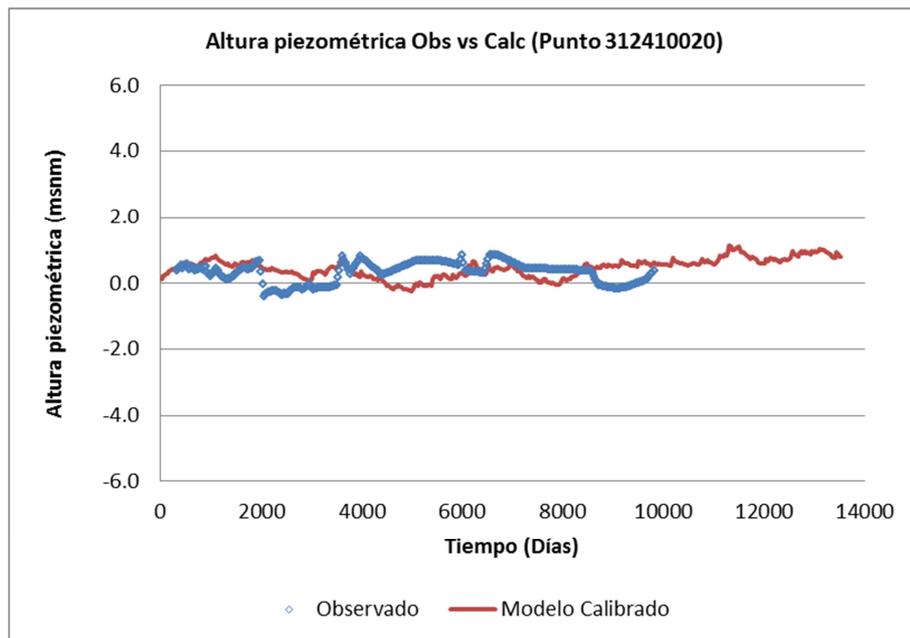


Figura 67. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312410020, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

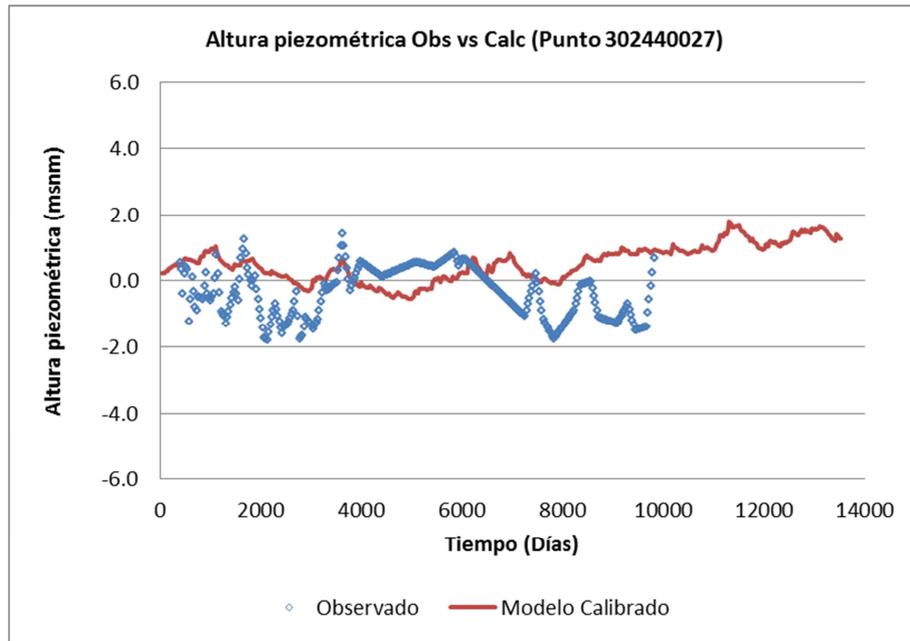


Figura 68. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312440027, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)

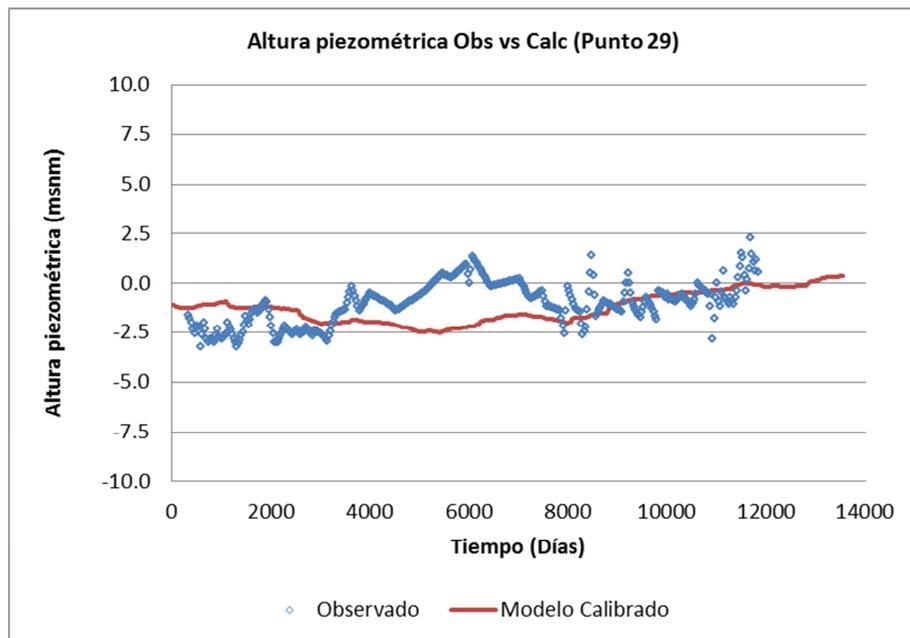


Figura 69. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 29, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)

En las anteriores figuras no se observan grandes cambios respecto de la anterior calibración (calibración del flujo sin efectos de densidad variable), si bien los cambios realizados en las conductividades y conductancias aumentan los rangos de valores calculados en los

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

piezómetros en esta calibración (calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable).

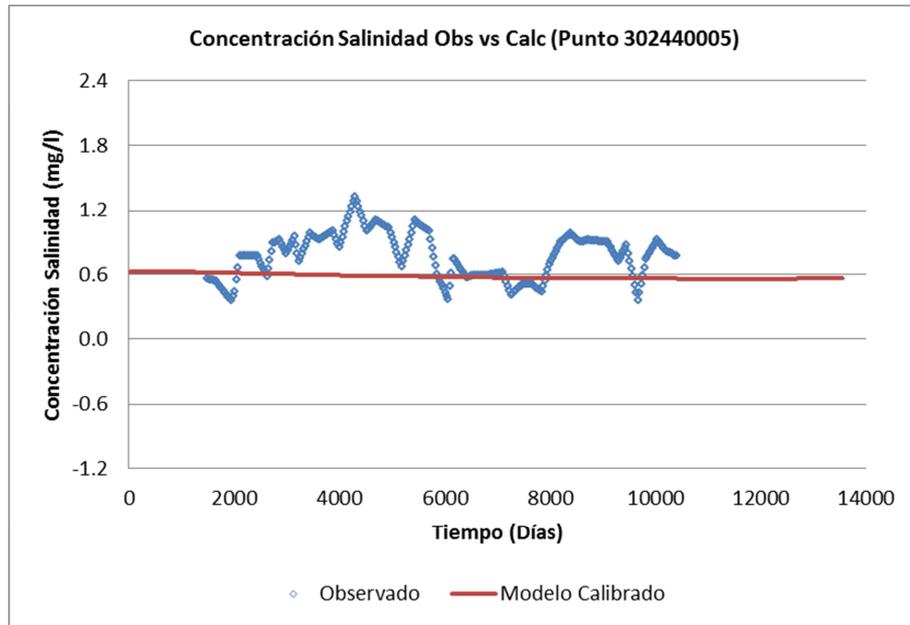


Figura 70. Concentración salinidad Obs vs Calc (Punto 302440005, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)

El punto 302440005, perteneciente a Oropesa, no es representativo y su calibración es pobre seguramente debido a la situación del mismo. Como se observa en la figura 36 (mapa de localización de los piezómetros y puntos de control de calidad) dicho punto se ubica dentro del término municipal de Oropesa por lo que lo más probable es que esté influenciado por riegos de jardines, parques públicos, etc.

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

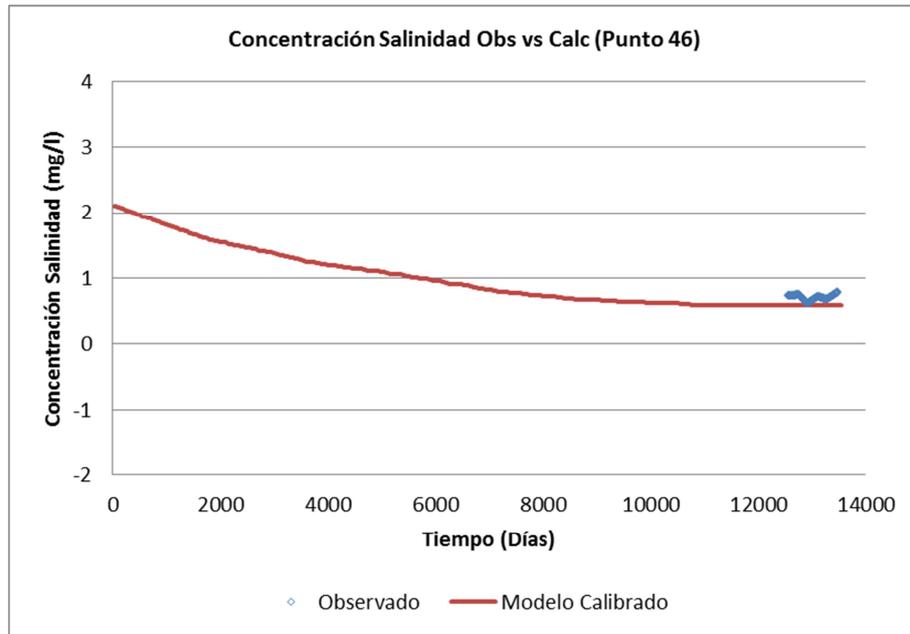


Figura 71. Concentración salinidad Obs vs Calc (Punto 46, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)

En el caso del punto 46, situado en el interior de Cabanes, su calibración es compleja debido que únicamente se tienen datos desde abril del 2007. La tendencia mostrada en la gráfica podría ser correcta, aunque también podría ser creciente en este punto, pero por falta de datos se desconoce esta tendencia.

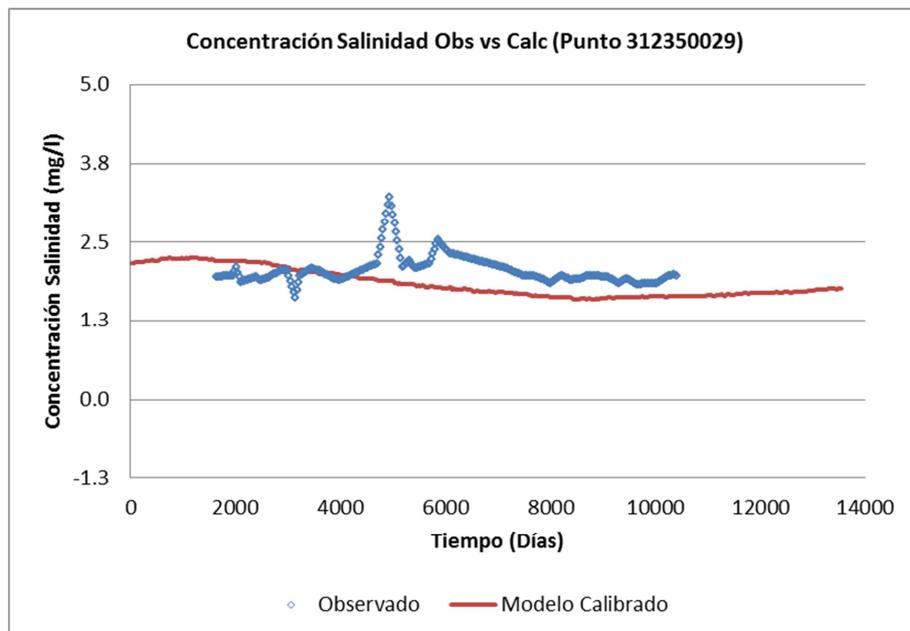


Figura 72. Concentración salinidad Obs vs Calc (Punto 312350029, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

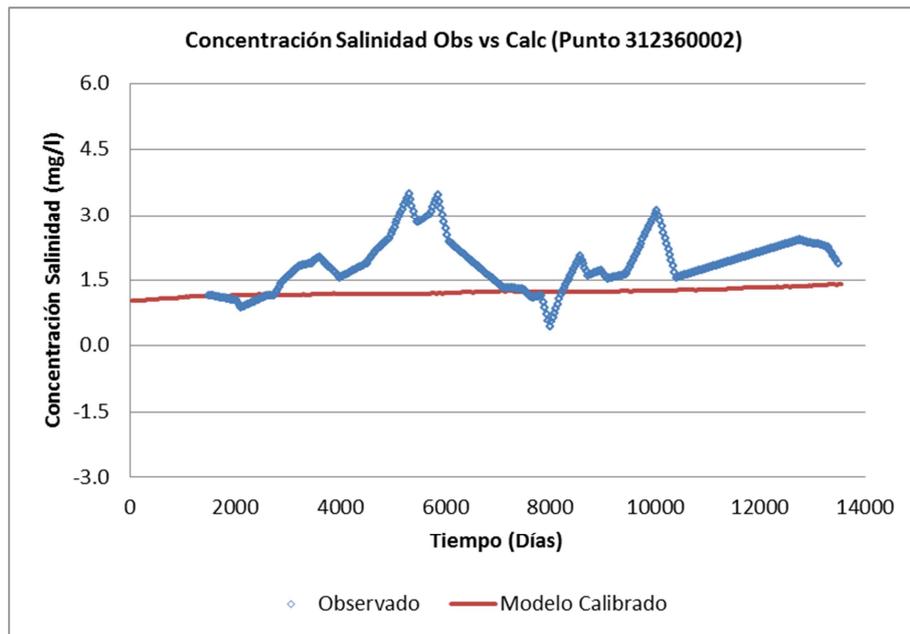


Figura 73. Concentración salinidad Obs vs Calc (Punto 312360002, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)

En los puntos 312350029 y 312360002, situados cerca de Torrenotra y Alcocebre, respectivamente, se consiguió obtener la tendencia de los datos observados, aunque en la parte final de la simulación se observan diferencias de casi 0.5 mg/l entre los datos observados y los calculados, en el caso del punto 312350029 y de 1 mg/l en el punto 312360002.

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

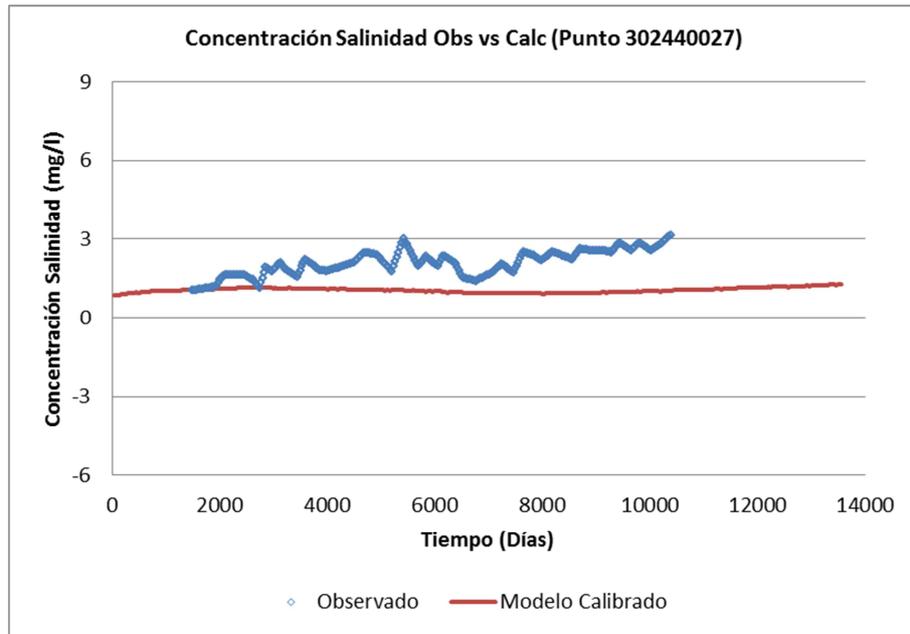


Figura 74. Concentración salinidad Obs vs Calc (Punto 302440027, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)

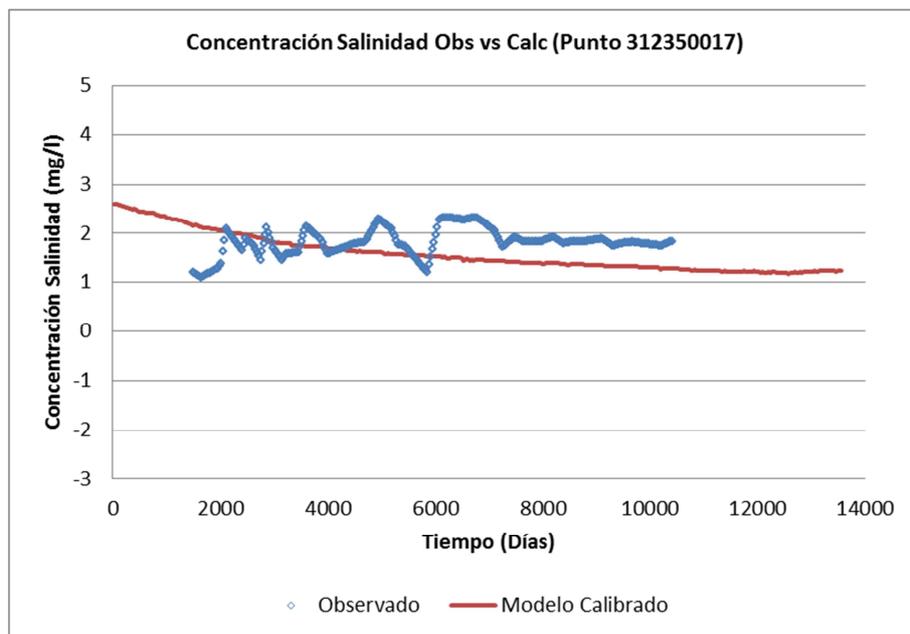


Figura 75. Concentración salinidad Obs vs Calc (Punto 312350017, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)

Los puntos 302440027 y 312350017, situados cerca del punto 46 y al NO del Prat de Cabanes, respectivamente, son puntos cuyas calibraciones son las peores de todos los puntos elegidos para hacer la calibración. En el caso del punto 302440027 no se consiguió una tendencia creciente como es la de los datos observados, mientras que el caso del punto

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

312350017, la tendencia obtenida guarda cierta semejanza con la de los datos observados pero no es la correcta.

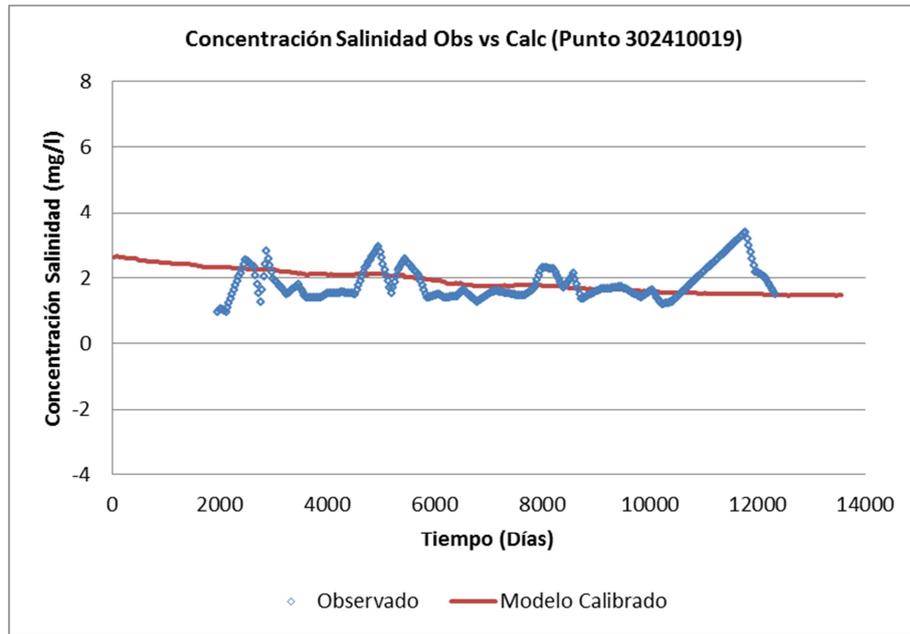


Figura 76. Concentración salinidad Obs vs Calc (Punto 312410019, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable))

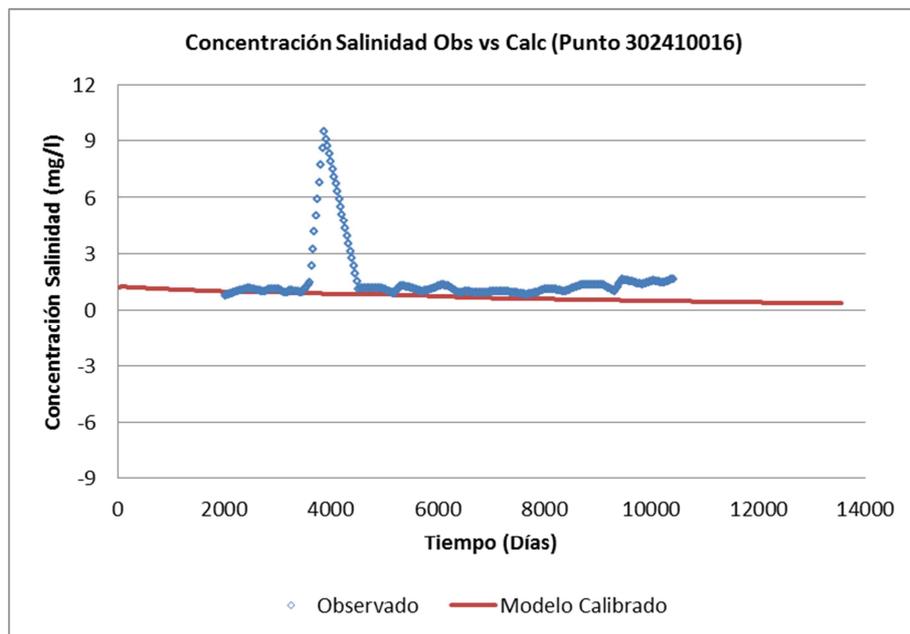


Figura 77. Concentración salinidad Obs vs Calc (Punto 312410016, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable))

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

Por último, los puntos 312410019 y 312410016, situados ambos al S del Prat de Cabanes, aunque el primero dentro y el segundo fuera, son puntos cuya calibración es buena, en el sentido que en ambos puntos las tendencias calculadas y las observadas son similares.

Por último se muestra el balance hídrico anual (Figura 78) y una tabla resumen que muestra el balance hídrico medio del periodo de simulación.

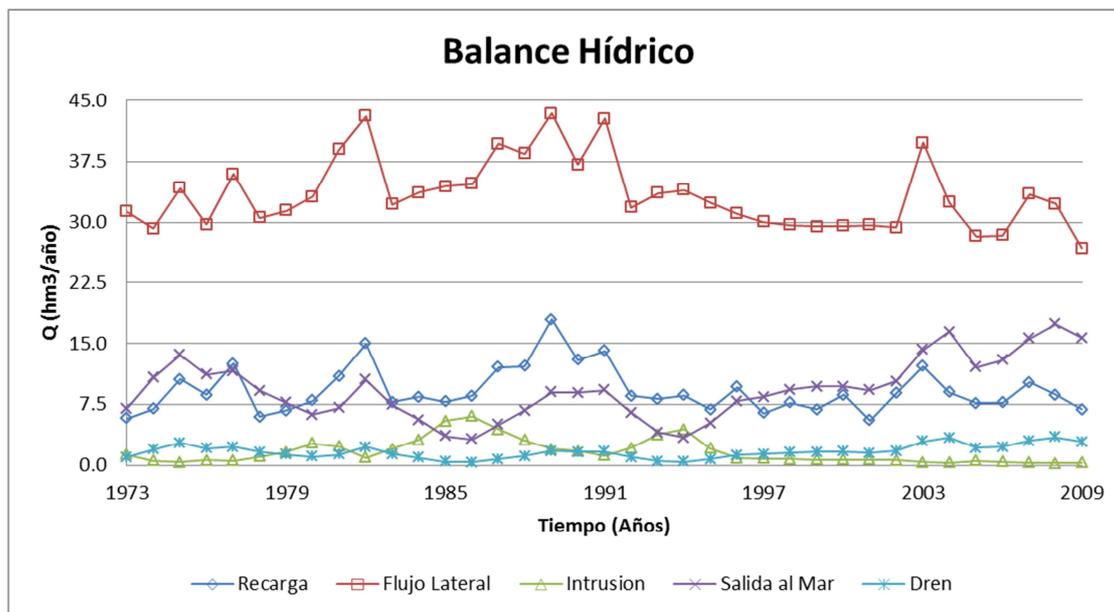


Figura 78. Balance hídrico calculado (Calibración del flujo y del transporte con efectos de densidad variable))

En el balance hídrico anual podemos observar, como en el caso anterior, tres periodos (1980 - 81, 1984 - 88 y 1993 - 94) en los que la intrusión sobrepasa considerablemente los valores calculados en el resto del simulación. A diferencia del balance obtenido de la calibración del flujo únicamente, en el balance de esta calibración (flujo y transporte con efectos de densidad variable) observamos que en los periodos segundo y tercero los valores registrados de intrusión superan los valores de salidas al mar en los años 1985 y 1986, en el segundo periodo, y 1994, en el tercero. Al igual que se explicó anteriormente, esto es debido a la fuerte explotación de los pozos que tiene lugar entre 1984 y 1994 y a las fuertes y sucesivas disminuciones en la cantidad de precipitación entre 1977 - 78, 1982 - 83 y 1991 - 92.

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

	Entradas (hm ³ /año)			Salidas (hm ³ /año)	
	Renau, 2013	Modelo Calibrado		Renau, 2013	Modelo Calibrado
Intrusión	0.65	1.67	Salidas al Mar	9.04	9.24
Entradas laterales	27.37	33.42	Pozos	23.74	32.93
Infiltración	6.8	9.23	Dren	1.28	1.68
Total	34.52	44.32	Total	34.05	43.85

Tabla 17. Comparación balance hídrico medios calculado del modelo calibrado (Calibración del flujo y del transporte con efectos de densidad variable) vs Renau (2013)

Por lo que respecta al balance hídrico medio, se observan grandes diferencias entre los resultados del modelo de Renau (2013) y el modelo calibrado. Estas diferencias son debidas a la geometría utilizada en cada caso (la geometría de este modelo es mayor y por tanto los valores de los flujos entrantes y salientes serán mayores), utilización de una mayor discretización vertical y horizontal de la formación, siendo los resultados de los flujos más precisos y a que este modelo considera el flujo y el transporte a diferencia del de Renau (2013) que únicamente considera el flujo. Se observa que mientras las salidas al mar y las salidas por el dren, prácticamente son iguales en ambos modelos, valores como la intrusión casi triplica su valor en este modelo respecto del de Renau (2013). Esto es debido a la utilización de *SEAWAT*, ya que en nuestro modelo, la entrada de agua del mar a la masa de agua subterránea depende del gradiente de concentraciones de salinidad y del de piezometría. Con todo esto, los almacenamientos en ambos modelos también son similares.

5.2.3. Análisis de Sensibilidad

Tras la calibración del modelo de flujo y transporte, se sometió éste a un análisis de sensibilidad para conocer cómo la variación de los valores alcanzados en la calibración de la conductividad, la recarga y la conductancia de los flujos laterales, pueden variar los flujos y por tanto la intrusión marina en la masa de agua subterránea. Con ello se puede hacer una evaluación de la robustez del modelo e incluso replantarse, en algunos casos, la idoneidad de la solución adoptada. Es claro que el número de grados de libertad presente en la calibración supone que haya infinidad de soluciones plausibles. Las decisiones adoptadas para los distintos parámetros y/o variables del modelo podrían ser inadecuadas.

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

Se escogieron las variables conductividad hidráulica, recarga y conductancia en zonas de entrada de flujo lateral. En principio se consideran las variables / parámetros del modelo con una mayor incertidumbre.

A continuación se muestran el punto de piezometría en el que el cambio en el valor de las variables consideradas produce una mayor variación de los valores obtenidos respecto del modelo calibrado y dos puntos de control de salinidad en los que el primero es el menos influenciado por el cambio y el segundo el más influenciado (el resto se encuentran en el “Anejo 4: Análisis de Sensibilidad”).

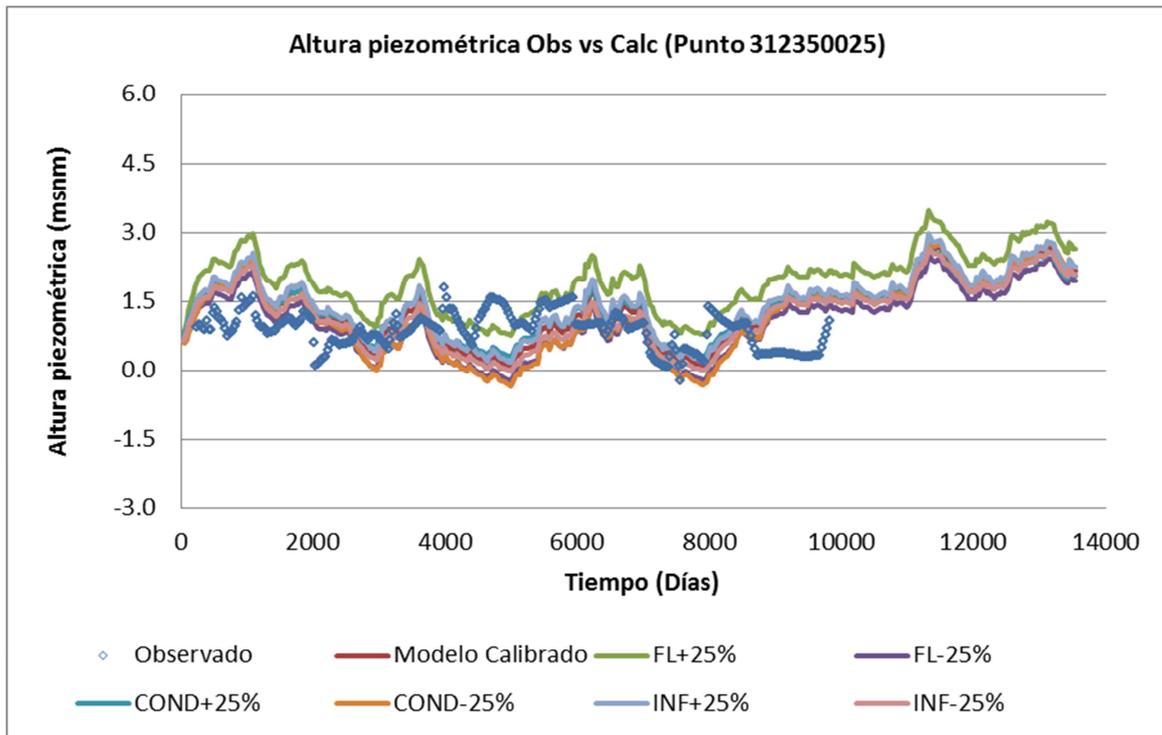


Figura 79. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312350025)

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

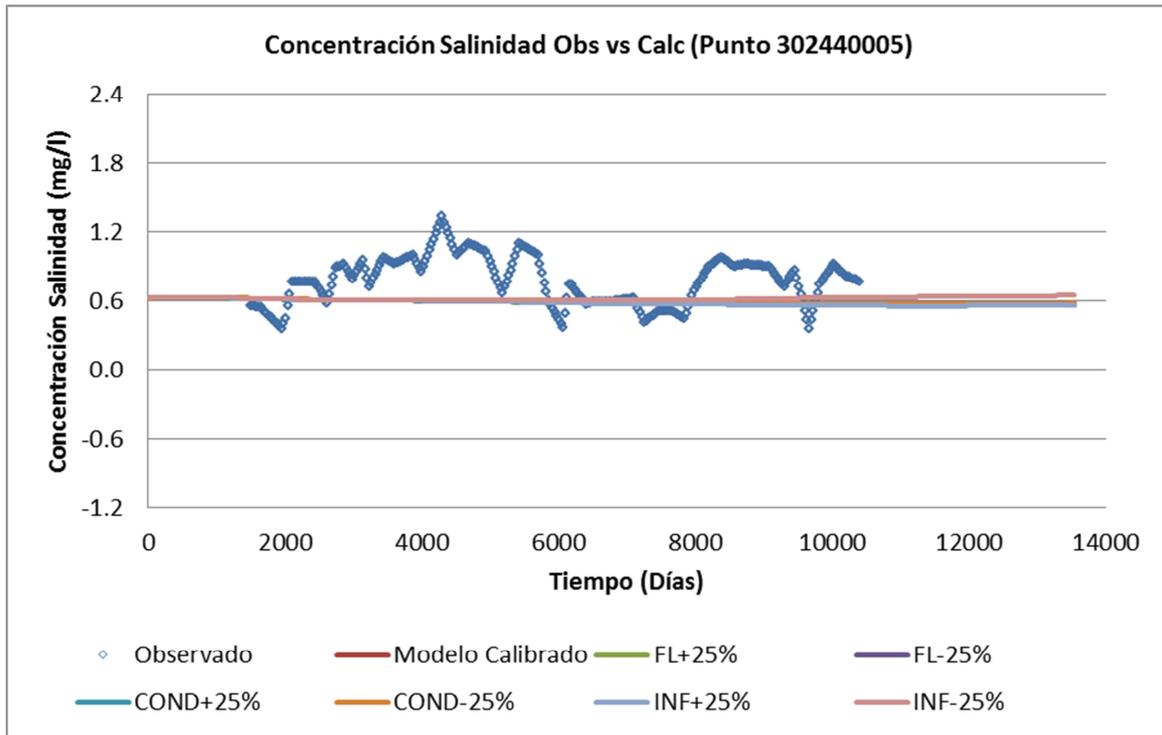


Figura 80. Concentración salinidad Obs vs Calc (Punto 302440005)

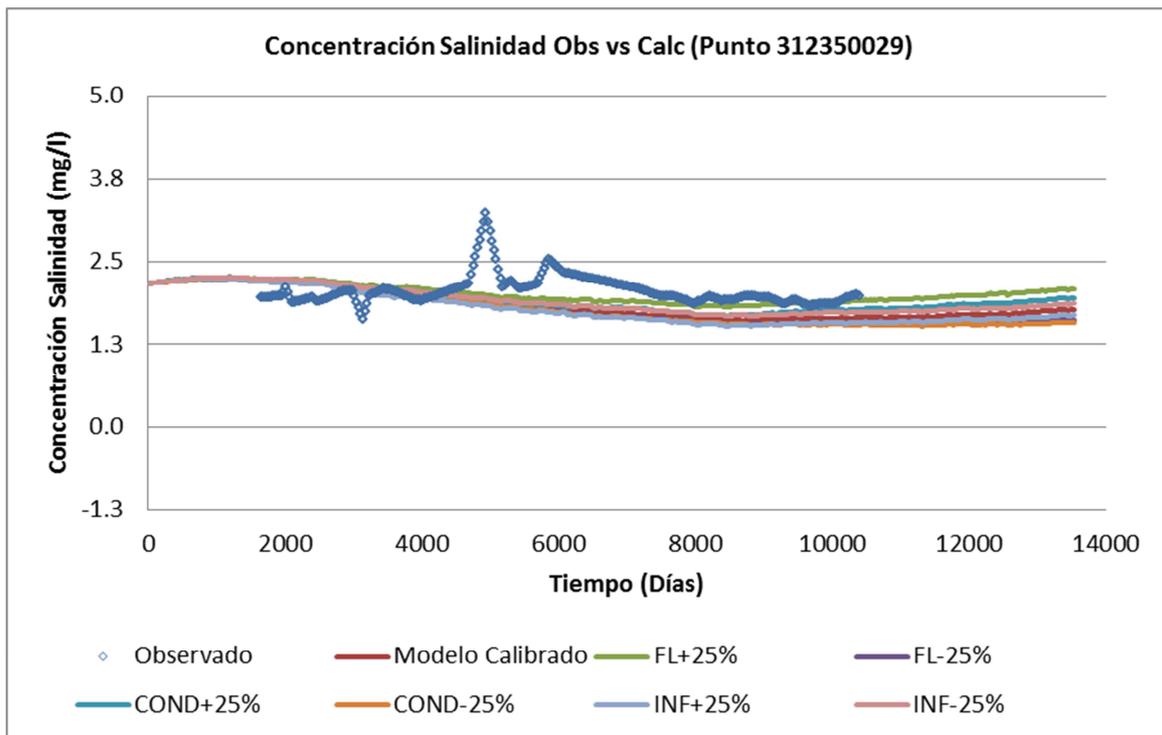


Figura 81. Concentración salinidad Obs vs Calc (Punto 312350029)

Como se observa en las anteriores figuras variaciones de las condiciones del modelo producen cambios prácticamente inapreciables en los resultados del modelo. Si bien, cabe decir que

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

como se observa en estas figuras al aumentar en un 25% la conductancia del flujo lateral respecto de su valor calibrado, se produce una mejora en los resultados de concentración de salinidad pero aumentan los niveles, sobretodo en los piezómetros cercanos al borde interior de la masa de agua. La disminución de la recarga produce una mejora en algunos puntos piezométricos y de control de calidad. Este análisis de sensibilidad permite considerar como buena la calibración realizada de flujo y transporte con efectos de la densidad del modelo.

A continuación se muestran dos tablas resumen en las que se comparan los balances medios anuales obtenidos en los diferentes casos del análisis de sensibilidad con el balance del modelo calibrado tanto en términos de magnitudes, siendo el mayor cambio apreciable el producido por el cambio en los flujos laterales, como de incrementos o decrementos porcentuales que implican esas variables respecto del calibrado, observando que es la variación de los flujos laterales la que produce la variación más grande de las entradas y salidas respecto de los valores del modelo calibrado, a excepción de la salida al mar que la mayor disminución la produce el descenso de las conductividades.

Entradas (hm³/año)							
	Modelo Calibrado	FL		COND		INF	
		+25%	-25%	+25%	-25%	+25%	-25%
Intrusión	1.67	1.02	2.68	1.66	1.83	1.36	2.04
Entradas laterales	33.42	37.72	29.81	35.75	30.55	32.96	33.89
Infiltración	9.23	9.23	9.23	9.23	9.23	11.53	6.92
Total	44.32	47.97	41.72	46.64	41.61	45.85	42.85
Salidas (hm³/año)							
	Modelo Calibrado	FL		COND		INF	
		+25%	-25%	+25%	-25%	+25%	-25%
Salida al Mar	9.24	11.87	7.07	11.52	6.67	10.46	8.08
Pozos	32.93	32.93	32.93	32.93	32.93	32.93	32.93
Dren	1.68	2.58	1.35	1.72	1.52	1.94	1.43
Total	43.85	47.38	41.35	46.17	41.12	45.33	42.44

Tabla 18. Balance hídrico medio calculado (Análisis de sensibilidad)

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

Entradas (hm³/año)						
	FL		COND		INF	
	+25%	-25%	+25%	-25%	+25%	-25%
Intrusión	-38.9%	60.5%	-0.6%	9.6%	-18.6%	22.2%
Entradas laterales	12.9%	-10.8%	7.0%	-8.6%	-1.4%	1.4%
Infiltración	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	24.9%	-25.0%
Salidas (hm³/año)						
	FL		COND		INF	
	+25%	-25%	+25%	-25%	+25%	-25%
Salida al Mar	28.5%	-23.5%	24.7%	-27.8%	13.2%	-12.6%
Pozos	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Dren	53.6%	-19.6%	2.4%	-9.5%	15.5%	-14.9%

Tabla 19. Variación porcentual del balance hídrico medio calculado (Análisis de sensibilidad) respecto del balance del modelo calibrado

5.3. Conclusiones sobre los balances hídricos

Las partidas que conforman los balances hídricos calculados por el programa son las siguientes:

- Entradas: recarga (infiltración de las precipitaciones y retorno de riego), flujos laterales e intrusión marina.
- Salidas: bombeos, salidas subterráneas al mar y drenes (zona húmeda).

En el balance hídrico calculado resolviendo el problema del flujo únicamente (calibración del modelo de flujo) en general se observa que entre 1984 y 1994 el sistema sufrió un proceso de sobreexplotación (Figura 83), a consecuencia del cual la intrusión marina avanzó considerablemente. Durante este periodo se observan dos situaciones de intrusión marina severa en las que ésta ve aumentados sus valores considerablemente respecto del resto de simulación, acercándose estos valores a las salidas del agua al mar de la plana, 85 - 86 y 94, que corresponden a periodos de sequía. Las precipitaciones durante este periodo se pueden dividir en tres fases (Figura 82): la primera fase (1985 - 1986) corresponde a un periodo seco en el que las precipitaciones fueron menores de 400 mm/año, la segunda fase (1987 - 1991) fue un periodo húmedo con un máximo de más de 1000 mm/año y la tercera fase (1992 - 1994) volvió a ser un periodo seco con precipitaciones de menos de 400 mm/año. En el “Anejo 2: Datos de entrada (inputs) del modelo matemático”, apartado 1º, vienen detalladas la precipitaciones mensuales del periodo 1973 - 2009.

Si se compara la recarga con el ingreso de agua marina (Figura 84) se observa que la intrusión, en estas condiciones, es debida a los bombeos (sobreexplotación del sistema) aunque es cierto que el máximo de precipitación ocurrido en 1989 hizo retroceder parcialmente la intrusión marina.

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

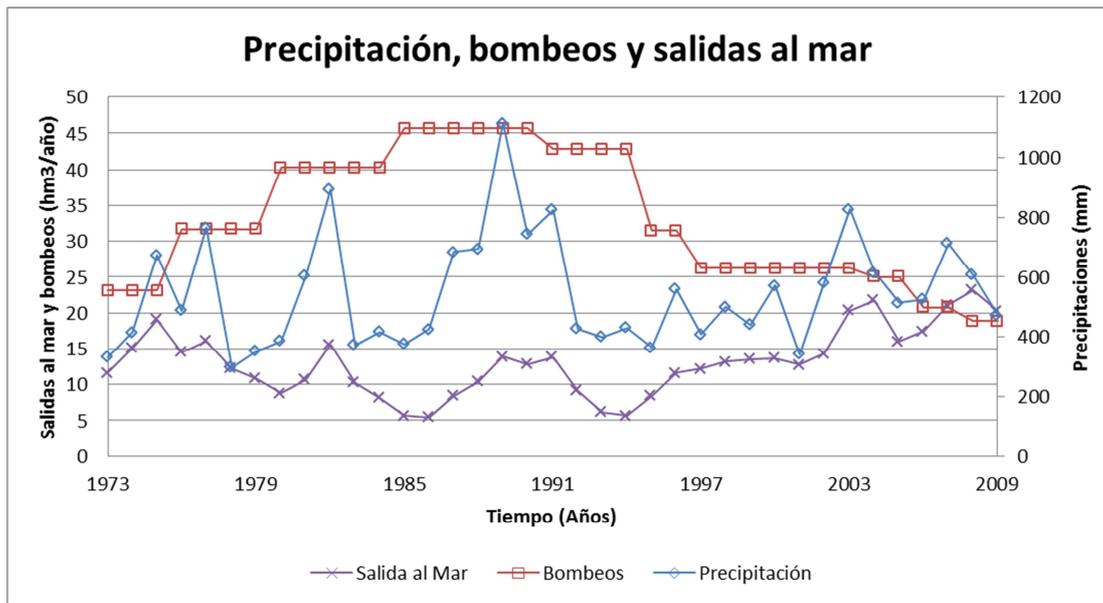


Figura 82. Precipitaciones, bombeos y salidas al mar (1973 - 2009)

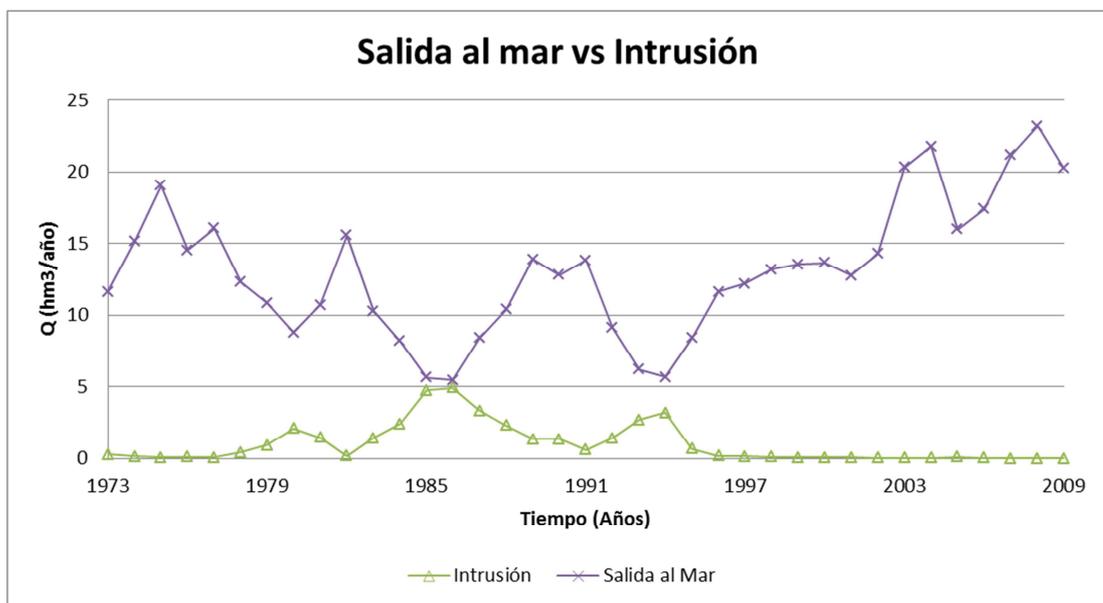


Figura 83. Intrusión marina y salidas al mar (1973 - 2009)

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

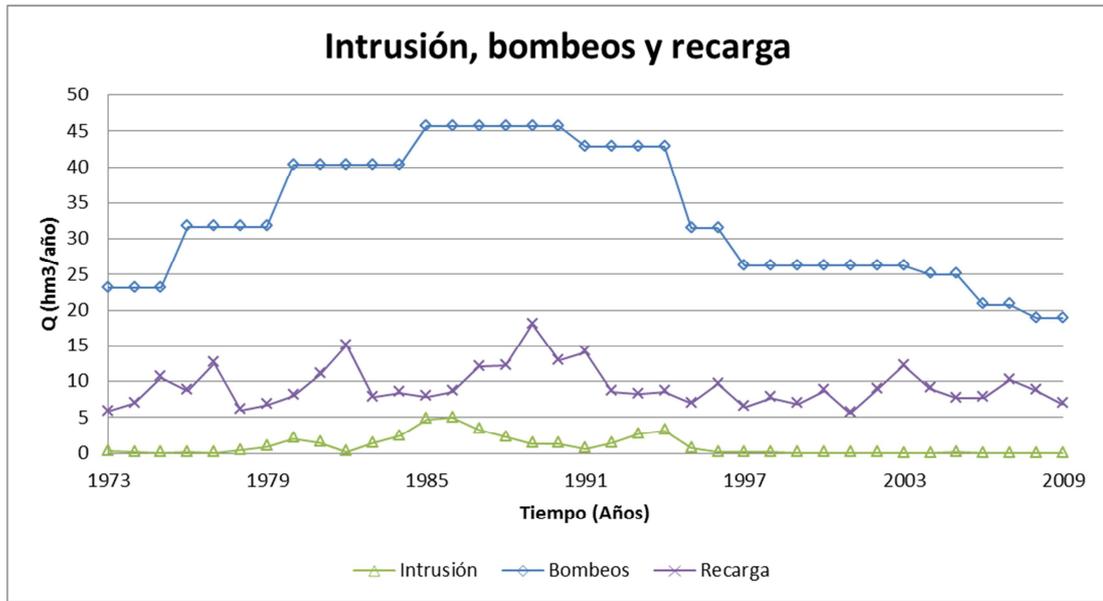


Figura 84. Intrusión, bombeos y recarga (1973 - 2009)

Por otra parte, en el balance hídrico calculado resolviendo el problema del flujo y transporte (calibración del modelo de flujo y transporte) en general se observa que durante el periodo de simulación también existen dos situaciones de intrusión marina severa en las que ésta supera las salidas del agua al mar de la plana, 85 - 86 y 94, que corresponden a periodos de sequía.

En este caso se obtuvieron las siguientes figuras.

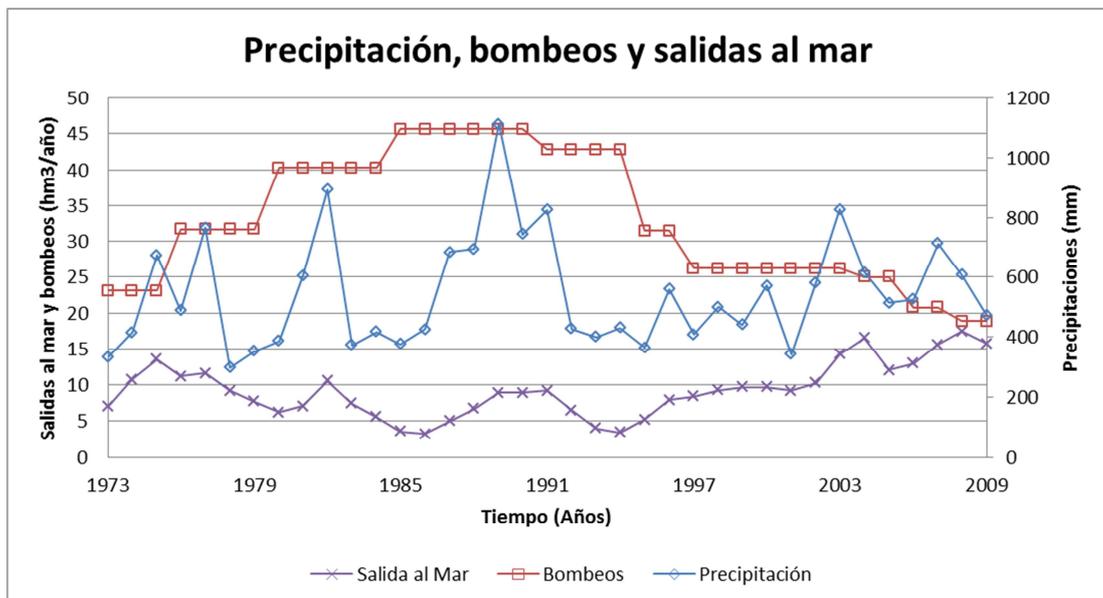


Figura 85. Precipitaciones, bombeos y salidas al mar (1973 - 2009)

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

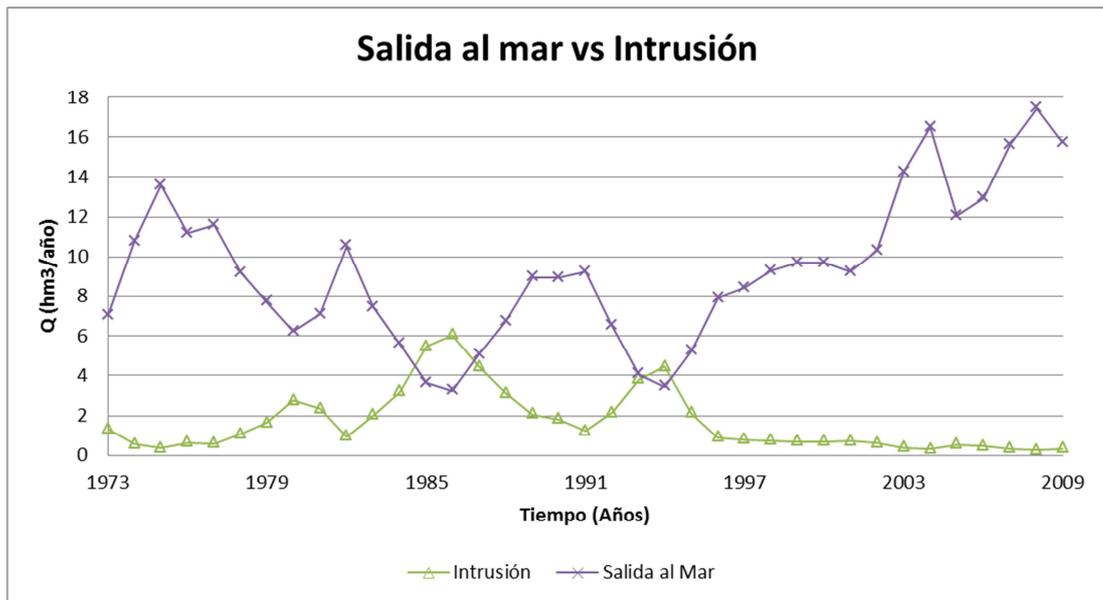


Figura 86. Intrusión marina y salidas al mar (1973 - 2009)

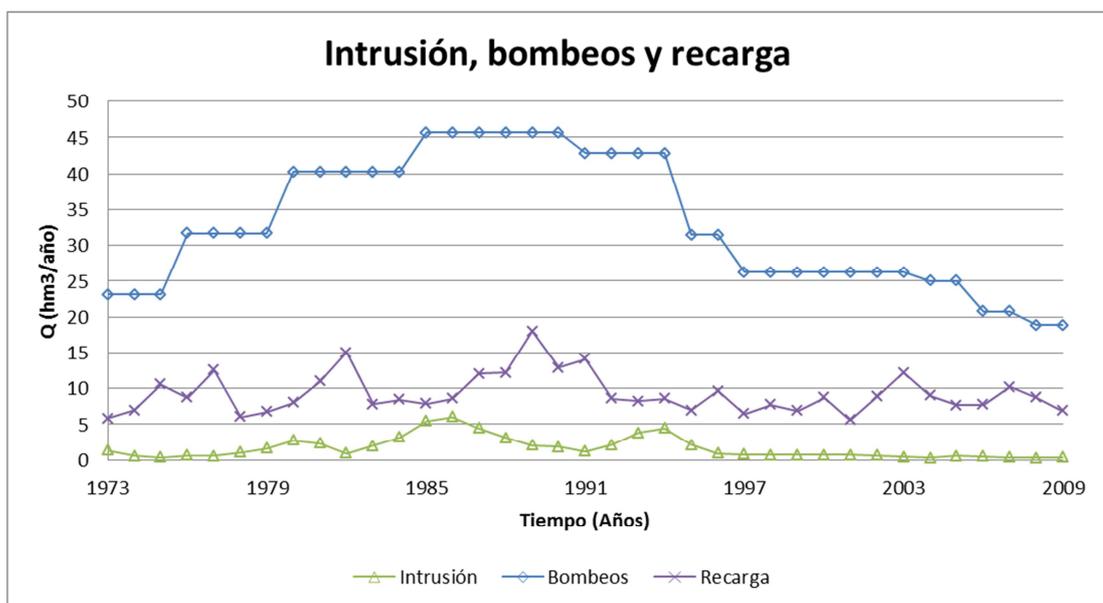


Figura 87. Intrusión, bombeos y recarga (1973 - 2009)

De la imagen obtenida (Figura 88), que muestra las isopiezas en el periodo de mayor afección de la intrusión marina, se deduce que este proceso no se reparte homogéneamente por toda la superficie estudiada, sino que es el sector Sur (Cabanés y Oropesa) el más afectado. En este sector, por tanto las relaciones de la intrusión marina con la recarga, los bombeos y las salidas al mar (Figuras 89 y 90) se identifican más claramente.

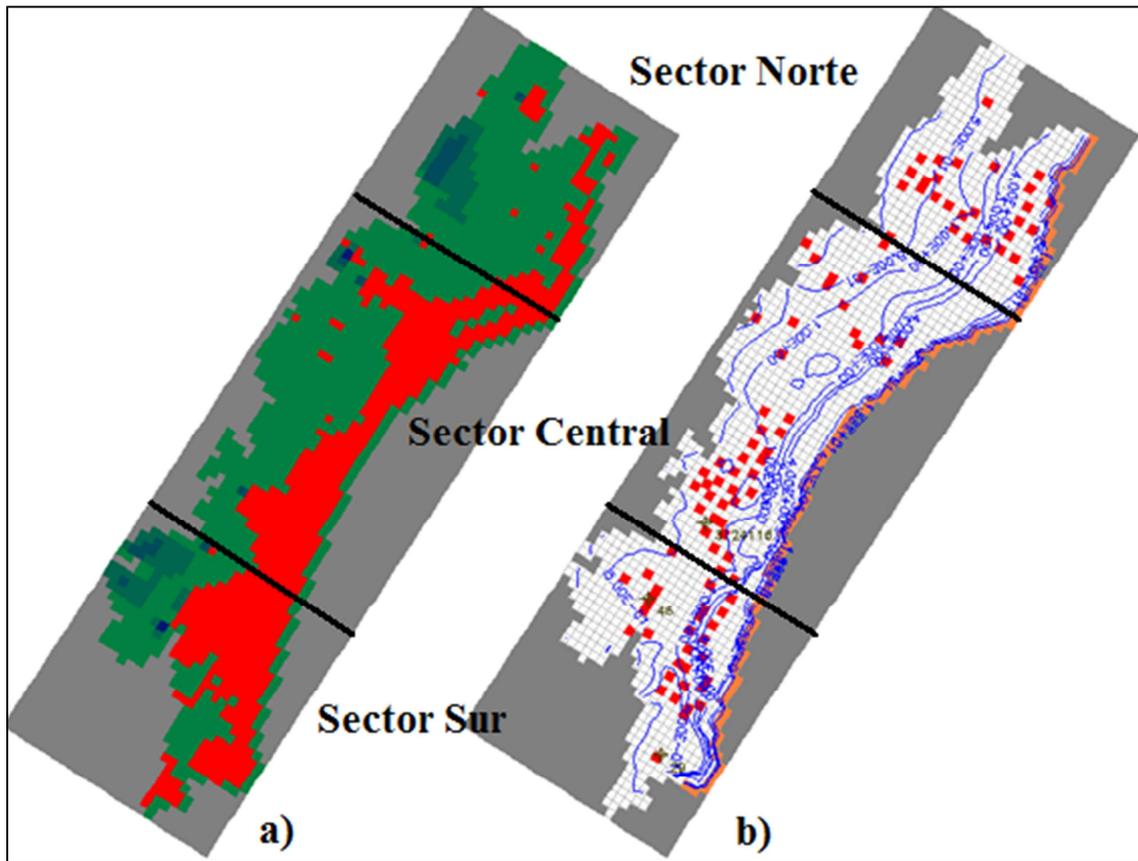


Figura 88. a) Distribución en planta de la superficie afectada por intrusión marina; b) Isopiezas en planta de la superficie afectada por intrusión marina (Referidas a la malla de 250x250 m.)

En la figura 88a se observa la distribución en planta de la superficie afectada por intrusión marina donde las celdas en color rojos representan las celdas el flujo es de derecha a izquierda, es decir, en aquellas celdas situadas en la costa es por donde se produce intrusión. Por lo que respecta a la figura 88b, ésta representa las isopiezas observándose que cerca de la costa, las isopiezas se encuentran más cercanas entre sí. Esto es debido a la cuña marina, en la que las concentraciones de salinidad disminuyen fuertemente en los primeros metros de costa hacia el interior, mientras que a medida que profundizamos hacia el interior de la masa, las concentraciones disminuyen paulatinamente.

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

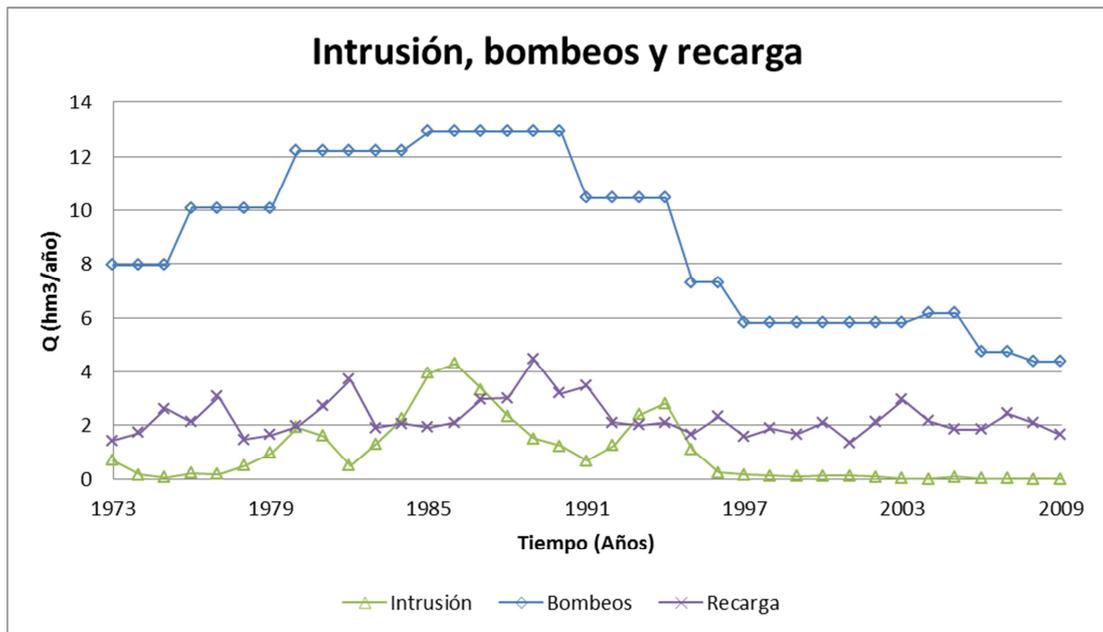


Figura 89. Intrusión, recarga y bombeos del sector Sur (1973 - 2009)

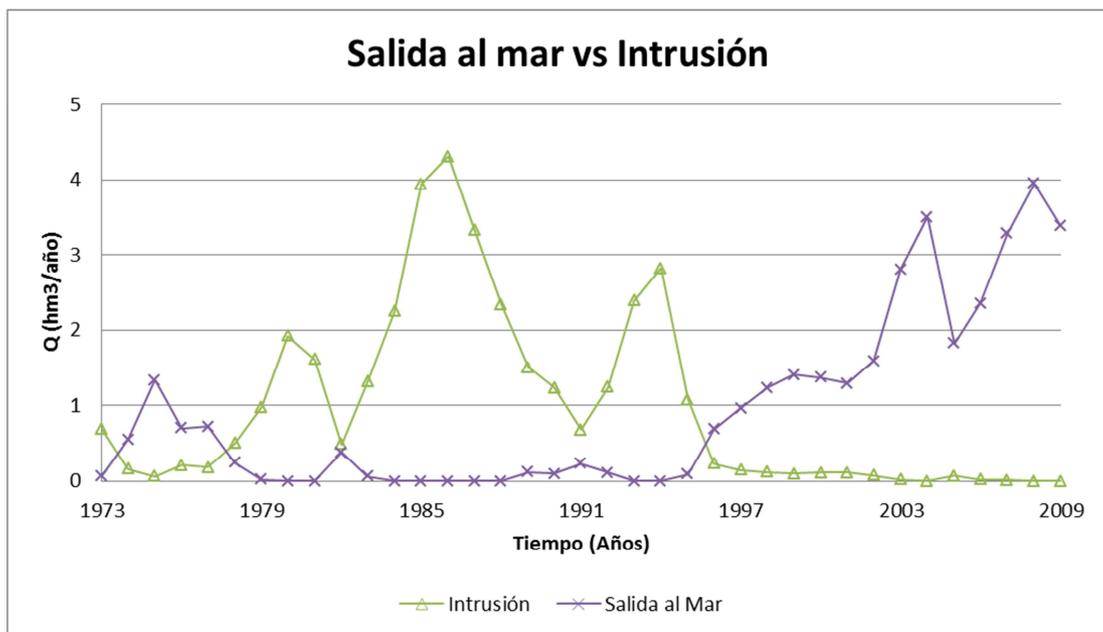


Figura 90. Intrusión y salidas al mar en el sector Sur (1973 - 2009)

En el “Anejo 3: Balances Hídricos Anuales” se muestran las tablas correspondientes al balance hídrico anual por sectores y global de la Plana de Oropesa - Torreblanca desde 1973 hasta 2009. Los tres sectores diferenciados son: sector Norte, sector Central y sector Sur (Figura 90). En el periodo de máxima intrusión (agosto de 1986) se observa que los tres sectores presentan zonas afectadas por intrusión con diferentes grados de intensidad. El sector menos afectado es el Norte (zona de Alcocebre) con un caudal medio de entrada de agua de

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

mar de $0.25 \text{ hm}^3/\text{año}$. En el sector Central existen dos zonas afectadas por este proceso, una situada al sur del Prat de Cabanes y la otra situada entre el núcleo urbano de Torreblanca y la costa. Este sector sufre una intrusión de $0.44 \text{ hm}^3/\text{año}$. Y finalmente el sector Sur es el más castigado por este proceso con una intrusión que alcanza los $0.98 \text{ hm}^3/\text{año}$.

A partir de 1994 el proceso va remitiendo hasta que a finales de la simulación se reduce a $0 \text{ hm}^3/\text{año}$ en el sector Sur, existiendo únicamente en los sectores Norte y Central, donde la intrusión es de 0.15 y $0.19 \text{ hm}^3/\text{año}$, respectivamente. A diferencia de los sectores Norte y Central, el sector Sur sufre un claro déficit de flujo lateral.

5. Modelo transitorio y tridimensional de la formación hidrogeológica

6. Conclusiones y líneas de investigación futuras

Una vez desarrollados los contenidos y objetivos previstos en el presente trabajo se presentan las conclusiones y, dado que se trata de un trabajo de investigación, algunas de las futuras líneas de investigación de más interés en relación con los objetivos de este TFM.

6.1. Síntesis y Conclusiones

En el presente trabajo se expone la realización del primer modelo tridimensional, en estado transitorio, y en condiciones de densidad variable, de la Plana de Oropesa - Torreblanca. Para ello se analizó toda la información existente sobre la geología, hidrogeología, precipitaciones y recargas, bombeos y recargas procedentes de riegos, información acerca del Prat de Cabanes, así como todos los modelos previos de la zona. A partir de este análisis de las mediciones disponibles, se formula un modelo conceptual que sirve de base para la construcción del modelo matemático. Este difiere de anteriores modelos en el hecho de que es el primer modelo realizado teniendo en cuenta la densidad variable, es decir la mezcla de agua salada y agua dulce, es el primero que se representa tridimensionalmente, y tiene una mayor resolución y parametrización en zonas de la masa de agua subterránea. Otras diferencias en la distribución de los parámetros hidrodinámicos se han ido concluyendo durante el proceso de calibración.

En principio, todo modelo de una masa de agua subterránea costera debería ser de densidad variable. Esto es debido a que el modelo de densidad constante únicamente considera flujo salino del mar a la masa de agua subterránea cuando haya gradiente de alturas piezométricas que implique un flujo neto del mar a la masa subterránea. Esta es una de las razones que hace que el modelo realizado constituya una representación más plausible de la realidad que los anteriores modelos.

Analizadas las posibilidades existentes y modelos acordes con el actual estado del arte, se optó por el uso de un modelo de flujo de densidad variable para caracterizar la interfaz salina en un acuífero costero (SEAWAT, *Guo Weixing and Langevin CD (2002)*) que implementa el método de diferencias finitas para la resolución del flujo, y el método híbrido de las características para la resolución de la componente advectiva del transporte. Este modelo reproduce la influencia de la interacción entre el agua dulce y el agua salada en el flujo subterráneo que es influido por la distribución y cambios en la concentración de las sales.

6. Conclusiones y líneas de investigación futuras

Se llevaron a cabo dos calibraciones consecutivas y complementarias. La primera considerando únicamente el problema del flujo (sin efectos de la densidad, mediante MODFLOW y PEST, *Doherty J, Brebber L and Whyte P (1994)*) y otra teniendo en cuenta tanto el flujo como el transporte (con efectos de la densidad variable, mediante SEAWAT y PEST) para conocer las diferencias entre ambas. A parte de conocer las diferencias, la primera calibración sirvió de punto de partida para la segunda.

De la comparativa con alturas piezométricas y salinidades observadas se concluye que la calibración del modelo es buena, existiendo un ajuste satisfactorio de las mediciones disponibles, aunque con las diferencias lógicas debidas a las limitaciones de la resolución temporal y espacial del modelo, y a la no inclusión en el modelo de otros fenómenos y/o acciones externas apenas conocidos y cuya influencia a la escala del modelo no se considera relevante. Por ejemplo, los datos de control de calidad (cloruros) incluyen cloro cuyo origen procede del riego de campos de cultivo, además del correspondiente a la intrusión salina.

Comparando los resultados obtenidos de infiltración, flujo lateral, bombeos, etc. en ambas calibraciones con los del modelo realizado por Renau (2013), observamos que todos los resultados obtenidos son mayores que los de su modelo. Esto es debido a la utilización de la masa de agua subterránea 080.110, masa de agua que es mayor que la del modelo de Renau (2013), por lo que la superficie de contacto con los acuíferos de borde es mayor que la de dicho modelo, la longitud de la costa es mayor, cuanto más superficie más infiltración y bombeos que antes se situaban fuera de la masa de agua, en este modelo se encuentran dentro de ella, a la utilización de una mayor discretización vertical y horizontal de la formación, siendo los resultados de los flujos más precisos y a que este modelo considera el flujo y el transporte a diferencia del de Renau (2013) que únicamente considera el flujo. Podemos concluir que los datos del modelo de Renau (2013), tanto de recargas, bombeos y entradas laterales, deberían ser sometidos a un nuevo estudio a la vista de los resultados de este trabajo fin de master y el análisis de sensibilidad realizado. Centrándonos en la comparación entre ambas calibraciones, se observa que la resolución del flujo y transporte, con densidad variable, produce cambios en el flujo, aumentando valores como la intrusión y los flujos del dren, y disminuyendo otros como los flujos laterales y las salidas al mar por la costa. El aumento de la intrusión se produce por la diferencia de salinidades entre las celdas de la costa y las contiguas. Al producirse mayor entrada de agua por intrusión, el balance debe recalibrarse con menor entra de flujo lateral y menor salida de agua al mar, siendo la intrusión media de $1 \text{ hm}^3/\text{año}$ en el modelo calibrado considerando el flujo sin efectos de densidad, y de

1.67 hm³/año en el caso del modelo calibrado considerando el flujo y el transporte con efectos de densidad y los flujos laterales de 37.26 hm³/año y 33.42 hm³/año, respectivamente. Estos valores son superiores a los obtenidos por Renau (2013), alcanzándose 0.65 hm³/año de intrusión y 27.37 hm³/año de entrada por flujo lateral.

Como se indicaba, el análisis de sensibilidad del modelo, que ha incluido la conductividad hidráulica y acciones (recarga y flujos laterales), concluye que el modelo es poco sensible a la conductividad hidráulica y a los flujos laterales. Sin embargo, su sensibilidad a la variación de la recarga si es apreciable aunque de forma localizada.

Tras el estudio y realización del modelo cabe destacar que la evolución de los cloruros pone de manifiesto que el proceso se ha estabilizado y que incluso parece apreciarse una ligera recuperación en los últimos cinco años. Esta evolución es coherente con el progresivo descenso de los bombeos debido a la reconversión de los sistemas de riego y al progresivo abandono de las superficies de cultivo.

Brevemente, las conclusiones principales del presente trabajo de investigación son:

- Existen numerosos estudios geológicos e hidrogeológicos acerca de la provincia de Castellón. Atendiendo exclusivamente a la Plana de Oropesa - Torreblanca, ésta es una formación hidrogeológica estudiada desde hace cerca de 30 años, primero con el estudio de ésta por parte de Morell (1985) en su tesis, y después con la realización de dos modelos de ésta (*IGME-UJI, 2009* y *Renau, 2013*).
- Pese a que la formación hidrogeológica ha sido estudiada desde hace décadas, esta investigación concluye con la necesidad de considerar una mayor variabilidad de parámetros hidrodinámicos (conductividades y conductancias), que representen la heterogeneidad de la litología presente. En este modelo se alcanzan transmisividades altas como los 200 m²/d en lecho del río San Miguel, similares a las del modelo de Renau (2013). En otras zonas, como los manantiales costeros de Alcocebre, el nuevo modelo se calibra con valores de 125 m²/d, mientras que en el anterior de Renau (2013) se estiman valores de 60 m²/d. La mayor divergencia se observa en el Prat de Cabanes. El nuevo modelo se ajusta con una zonificación de la conductividad de valores 1, 50 y 90 m²/d, mientras que en el de Renau (2013) son de 5 y 60 m²/d.
- Los modelos previos (*IGME-UJI, 2009* y *Renau, 2013*) se desarrollaron en el marco de las Directivas 2000/60/CE (*UE - DMA, 2000*) y 2006/118/CE (*UE, 2006*). El primero (modelo estacionario de densidad constante) fue realizado para el cálculo de

6. Conclusiones y líneas de investigación futuras

los volúmenes ambientales de descarga al mar para la contención de la intrusión marina y el mantenimiento de los ecosistemas asociados, mientras que el segundo (transitorio de densidad constante) se desarrolló para la obtención de diferentes volúmenes ecológicos de remediación en la Plana (tesis de Renau, 2013).

- Aun siendo el último modelo (*Renau, 2013*) en estado transitorio, este modelo tiene una geometría diferente a la real, lo cual implica que los flujos de entrada y salida de la masa serán menores a los reales. Su resolución de 500x500m no permite representar bien la topografía, permeabilidades, transmisividades, profundidades del acuífero, etc., existiendo una gran incertidumbre.
- Según las directivas europeas mencionadas el riesgo de no alcanzar los objetivos medioambientales por intrusión marina en 2015 es SEGURO, así que en 2015 no se habrá prevenido el deterioro, mejorado y restaurado el estado de las masas de agua superficiales, logrado que estén en buen estado químico y ecológico, y reducido la contaminación debida a los vertidos y emisiones de sustancias peligrosas; y/o protegido, mejorado y restaurado la situación de las aguas subterráneas, prevenido su contaminación y deterioro y garantizado un equilibrio entre su captación y su renovación; y/o preservado las zonas protegidas.
- La intrusión marina en la Plana de Oropesa - Torreblanca es patente desde hace más de cuatro décadas y que ha ido progresando hasta afectar a la totalidad del acuífero. Sin embargo, existen evidencias de que el proceso debe encontrarse en situación estacionaria e incluso en regresión en algunos sectores ya que la modernización de los sistemas de riego, que incluye el cambio de sistema de riego de inundación a goteo, el progresivo abandono de las tierras de cultivo por la presión urbanística y el estancamiento del turismo han reducido notablemente los volúmenes de bombeo, especialmente en la mitad sur del acuífero.
- La calibración de un modelo de flujo y transporte, con densidad variable, aporta una mayor plausibilidad a los resultados del modelo, pudiendo el gradiente de concentración de salinidad variar el flujo producido por el gradiente de alturas piezométricas.
- El modelo construido, debido a su mayor resolución y parametrización en zonas, reproduce con mayor realismo que los modelos anteriores las variables que definen el modelo (conductividad, conductancia...).

6. Conclusiones y líneas de investigación futuras

- Caracteriza mejor la formación hidrogeológica permitiendo realizar mejores simulaciones de los flujos consiguiendo mejores calibraciones, y por tanto un modelo más realista y preciso que los anteriores.
- Caracteriza el fenómeno de la intrusión salina mejor que modelos anteriores debido a la resolución simultánea del problema de transporte y de flujo; así, en este modelo se tiene en cuenta como los gradientes de las alturas piezométricas y las concentraciones de la salinidad influyen en las entradas y salidas de la Plana, a diferencia de los dos modelos existentes, en los que la intrusión se manifiesta únicamente por gradiente de alturas piezométricas.
- La tridimensionalidad del modelo permite reproducir de forma más realista lo que ocurre en la zona o franja litoral que tiene una gran influencia en todo el acuífero.
- Reproduce las tendencias de las alturas piezométricas y salinidades observadas mejor, en ambas calibraciones, que en el modelo de Renau (2013).
- Los resultados del modelo verifican la evolución futura de la intrusión hacia la estabilización del proceso de intrusión. Esto no quiere decir que no hay intrusión, sino que la cuña salina no avanza respecto de su localización actual.
- Los flujos laterales son la variable más determinante en el modelo, dependiendo de su mayor o menor valor, la intrusión salina en la Plana. Es la variable con mayor incertidumbre ya que depende de la relación entre el potencial hidráulico en el límite y las precipitaciones. A parte es una variable que necesita de una mayor investigación siendo los únicos valores referencia los 29.74 hm³/año (CHJ, 2007) y los calculados en los modelos anteriores.
- La intrusión en el modelo calibrado considerando el flujo y el transporte, es de 1.67 hm³/año alcanzándose los 6 hm³ en 1986. Las salidas al mar se cuantifican en 9.24 hm³/año, siendo su máximo valor alcanzado en la simulación, los 17.43 hm³ en 2008. Por lo que respecta a los flujos laterales, éstos son de 33.42 hm³/año y alcanzándose los 43 hm³ en 1989. La infiltración es de 9.23 hm³/año, llegando a ser de 18 hm³ en 1989 mientras que las salidas por el dren son de 1.68 hm³/año y de 3.53 hm³ en 2008. Y por último, los bombeos son 32.9 de hm³/año siendo su máximo de 45.65 hm³ alcanzado entre 1985-90. En estos valores se comprueba la relación existente entre los flujos laterales y la infiltración, y las salidas al mar y por el dren, siendo sus máximos alcanzados en los mismos años. Comparando estos valores con los calculados en los modelos anteriores, observamos que en el primer modelo (IGME-UJI, 2009), la

6. Conclusiones y líneas de investigación futuras

intrusión, los flujos laterales, las salidas por el dren y los bombeos, son mayores que en este modelo alcanzando los 2.2 hm³/año, 38 hm³/año, 3.5 hm³/año y 39 hm³/año, respectivamente y las salidas al mar y la infiltración menores con 4.5 hm³/año y 6.8 hm³/año, respectivamente. Por lo que respecta al segundo modelo (*Renau, 2013*), todas las variables son menores que en este modelo, alcanzando los 0.65 hm³/año de intrusión, 27.37 de flujos laterales, 9.04 hm³/año de salidas al mar, 1.28 hm³/año de salidas por el dren, 6.5 hm³/año de infiltración y 23.74 hm³/año de bombeo.

- Podemos concluir que los datos del modelo de Renau (2013), tanto de recargas, bombeos y entradas laterales, deberían ser sometidos a un nuevo estudio a la vista de los resultados de este trabajo fin de master y el análisis de sensibilidad realizado.

6.2. Líneas de investigación futuras

El presente trabajo de investigación deja y plantea para futuras investigaciones diversas cuestiones como las siguientes:

- Se sabe de la dificultad y limitaciones de los modelos actuales para reproducir las observaciones de la forma adoptada por la intrusión salina en la dimensión vertical. El modelo actual podría mejorarse mediante una discretización vertical de más resolución, una variación de las conductividades hidráulicas que tuviera en cuenta las distancias al mar, y unas salinidades en la vertical que fueran incrementándose (en las celdas de condición de nivel constante). El modelo construido ha simplificado considerablemente la realidad física, como ocurre generalmente en este tipo de modelos, aunque supone un avance considerable con respecto a los anteriores modelos basados solo en la modelación del flujo.
- La utilización de una mayor resolución de la discretización, apoyada por metodologías de modelación inversa avanzadas - en esta investigación se ha utilizado el conocido PEST, Doherty J, Brebber L and Whyte P (1994) - permitiría mejorar la calibración del modelo, y abordar el análisis de incertidumbre correspondiente a las acciones externas.
- La mayor investigación de las zonas de Oropesa y sus alrededores y del norte de la Plana permitiría mejorar los valores de conductividades y de cotas de techo. También permitiría conocer mejor el muro de la Plana, la investigación de éste en el borde la misma.
- Puede mejorarse la caracterización de los flujos laterales realizando una mayor división de éstos en grupos dependiendo de la precipitación. Esto permitiría una mayor variación del nivel de altura piezométrica en el borde a lo largo de la simulación. A parte sería interesante realizar una mayor investigación de estos flujos, ya que únicamente existen datos de un estudio de la CHJ (2007), de los dos modelos anteriores (*IGME-UJI, 2009* y *Renau, 2013*) y de este modelo.
- Puede mejorarse la caracterización del Prat de Cabanes gracias a un mejor conocimiento de los parámetros (muro, conductancias, etc.) que determinan el funcionamiento de esta zona. También puede mejorarse la caracterización de la recarga introduciendo datos históricos de AEMET.

6. Conclusiones y líneas de investigación futuras

- Es de interés analizar la respuesta del acuífero a futuros escenarios hidrológicos de cambio climático que, combinados con las variaciones de la explotación y posibles cambios en el nivel del mar, sin duda tendrán un impacto considerable en el estado del acuífero.

7. Bibliografía

- Albuixech, J. (1986). Flora del Desierto de las Palmas y sus alrededores. Col.lecció Universitària. Diputació de Castelló
- Antón - Pacheco, C.; Ballesteros, B.J.; Mejías, M.; Gumiel, J.C.; Gómez, J.A.; Callejo, P. (2007). Identificación y cartografía de surgencias costeras en el acuífero kárstico de el Maestrazgo (Castellón) mediante técnicas de teledetección aeroportada en el infrarrojo térmico. Boletín Geológico y Minero, 118: 649-670
- Aragonés, J. M.; Pulido, J.; Sanz, C. (1976). Estudio hidrogeológico de la Plana de Oropesa - Torreblanca (Castellón). I Simposio Nacional de Hidrogeología. I: 470-490. Valencia
- Canerot, J. (1974). Recherches géologiques aux confins des Chaînes Iberiques et Catalanes. Espagne. Université Paul Sabatier. Toulouse.
- Canerot, J.; Faure, Ph.; Rahal, M. (1985a). Massif du Desierto de las Palmas (Castellón). Strata, 2 (2): 85-100.
- Canerot, J.; Goy A. (1985b). Le Jurassique des Iberides Orientales (Espagne). Actes du laboratoire de Géologie Sédimentaire et Paléontologie de l'Université Paul Sabatier. Toulouse. Série 2: Mémoires. Generalites Livret d'Excursion. Vol.2.
- Carmona, P.; Ruiz, J. M. (2009). Cambios geomorfológicos ambientales en el litoral de Torre la Sal durante el Holoceno. In: Torre la Sal (Ribera de Cabanes, Castellón). Evolución del paisaje antrópico desde la prehistoria hasta el medioevo. Coordinador E. Flors. Monografies de Prehistòria y Arqueologia Castellonenques, nº 8.
- Confederación hidrográfica del Júcar (CHJ) www.chj.es
- Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ, 2005). Informe para la Comisión Europea sobre los artículos 5 y 6 de la Directiva Marco del Agua. Confederación Hidrográfica del Júcar. 528 pp.
- Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ, 2007). Balances hídricos y evaluación del riesgo conforme al estado cuantitativo de las masas de agua subterránea de la Confederación Hidrográfica del Júcar. Informe interno. 66 pp.

7. Bibliografía

- Consellería de Obras Públicas, Urbanismo y Transporte (COPUT, 1990). Estudio de identificación de las descargas al mar del acuífero del Maestrazgo en la zona del litoral entre Alcocebre y Peñíscola. Inédito.
- Consellería de Obras Públicas, Urbanismo y Transporte (COPUT, 1992). Estudio de identificación de las descargas del agua subterránea en la Sierra de Irta. Mancomunidad del Baix Maestrat (Castellón). Inédito.
- Dane J.H & Guven O, Oostrom M., Hayworth JS, Leijnse A. (1994). Dense aqueous phase contaminant plume behaviour in porous media near the groundwater table. *Future Groundwater Resources at Risk*, Publicación 222, 333 - 340.
- Diersch, H., & Kolditz, O. (2002). High density flow and transport in porous media: approaches and challenges. *Advances in Water Resources*, Volumen 25, 899 - 944.
- Doblas, J. C. (1976). Hidrología del Maestrazgo. I Simposio Nacional de Hidrogeología. I: 553- 571.Valencia.
- Doblas, J. C (1983). Modelo matemático de flujo de la Plana de Oropesa - Torreblanca (Castellón). III Simposio Nacional de Hidrogeología IX: 149-161.Madrid.
- Durán - Valsero, J. J.; García de Domingo, A.; Robledo Ardila, P. (2009). Propuesta de clasificación genético-geológica de humedales. Aplicación a los humedales españoles incluidos en el Convenio de Ramsar. *Boletín Geológico y Minero*, 120 (3): 335-346.
- Empresa Nacional ADARO de Investigaciones Mineras S. A. (ADARO, 1973a). Mapa geológico y minero de España 1/50000. Hoja Cuevas de Vinromá (593(30-23)), 2ª serie, 1ª Edición. IGME. Servicio de publicaciones Ministerio de industria. Madrid.
- Empresa Nacional ADARO de Investigaciones Mineras S. A. (ADARO, 1973b). Mapa Geológico y minero de España 1/50000. Hoja Villafamés (616(30-24)), 2ª serie, 1ª Edición. IGME. Servicio de publicaciones Ministerio de industria. Madrid.
- ENADINSA (1973). Mapa geológico y minero de España 1/50000. Hoja Alcalá de Chivert (594(31-23)), 2ª serie, 1ª Edición. IGME. Servicio de publicaciones Ministerio de industria. Madrid.

- EPTISA (1975a). Proyecto de investigación hidrogeológica de la Cuenca media y baja del Júcar. Informe técnico número 4. Hidrogeología del sistema nº55. Sistema acuífero de Javalambre, sistema acuífero del Maestrazgo. Memoria. Ed. IGME e IRYDA.
- EPTISA (1975b). Proyecto de investigación hidrogeológica de la Cuenca media y baja del Júcar. Informe técnico número 4. Hidrogeología del sistema nº55. Sistema acuífero de Javalambre, sistema acuífero del Maestrazgo. Planos. Ed. IGME e IRYDA.
- Fan Y, Kahawita R, Tessier J.C. (1994). Numerical study of the effects of a variable density contaminant plume in an unconfined aquifer. Transactions on ecology and the environment, Vol 5.
- Fetter, C. (1999). Contaminant hidrogeology. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- Fetter, C.W. (2001). Applied hydrogeology. Prentice Hall, Fourth Edition.
- Fidalgo, A.; Ferrer, J.; Estrela, T; Escuer, J. (2007). Caracterización de la intrusión marina en las aguas subterráneas de la franja litoral de la cuenca del río Júcar y propuestas metodológicas para la aplicación de las directivas europeas 2000/60/CE y 2006/118/CE. Boletín Geológico y Minero, 118 (Núm. Especial): 725-744.
- García - Orellana, J.; García - Solsona, E.; Ballesteros, B.; López, J.; Mejías, M.; Marina, M. (2006). Evaluación de la descarga de un manantial costero mediante isótopos de radio: las Fuentes de Alcossebre (Castellón). Congreso internacional sobre el Agua Subterránea en los Países Mediterráneos (AQUA in Med-06). Málaga.
- Generalitat Valenciana (1990). Apéndice a la guía de la naturaleza de la Comunidad Valenciana: Parques y paisajes naturales. 43. Paraje natural del Desert de les Palmes. Levante - El Mercantil Valenciano.
- Giménez, E. (1994). Caracterización hidrogeoquímica de los procesos de salinización en el acuífero detrítico costero de la Plana de Castellón (España). Tesis Doctoral. Universidad de Granada. Granada.
- Giménez, E.; Fidelibus, M.D.; Morell, I. (1995). Metodología de análisis de facies hidroquímicas aplicada al estudio de la intrusión marina en acuíferos detríticos costeros. Aplicación a la Plana de Oropesa (Castellón). Hidrogeología 11.

7. Bibliografía

- Giménez, E.; Morell, I. (1997). Hidrogeochemical analysis of salinization processes in the coastal aquifer of Oropesa (Castellón, Spain). *Environmental Geology*.
- Gómez - Serrano, M. A.; Calabuig, J.D.; Mayoral, O. (1999). Vegetación litoral y cambios en el paisaje de la provincia de Castellón. Ayuntamiento de Castellón de la Plana. Castellón de la Plana.
- González - Hidalgo J. C. (2008). Proyecto Cambio Climático: base de datos de precipitaciones, análisis de tendencias e impactos en los sistemas naturales. Ministerio de Ciencia e Innovación CGL2008-05112-C02-01/CLI.
- González - Hidalgo J. C., Brunetti M., de Luis M. (2010) A new tool for monthly precipitation analysis in Spain: MOPREDAS database (Monthly precipitation trends December 1945- November 2005). *International Journal of Climatology*, DOI: 10.1002/joc. 2115.
- Guo Weixing, Langevin Christian D. (2002). User's guide to SEAWAT: A computer program for simulation of three-dimensional variable-density groundwater flow. USGS techniques of water resources investigations Book 6 Chapter A7.
- Harbaugh A.W, E.R Banta, MC Hill y M.G McDonald (2000). MODFLOW 2000, the US Geological Survey modular ground-water model: User guide to modularization concepts and the ground-water flow process. USGS Open File Report 00-92. USGS.
- Hayworth JS. (1993). A physical and numerical study of three - dimensional behavior of dense aqueous phase contaminant plumes in porous media. Auburn University, Alabama: PhD dissertation, Dep of Civil Engineering.
- Herbert A, Jackson C, Lever D. (1988). Coupled groundwater flow and solute transport with fluid density strongly dependent upon concentration. *Water Resources Research* Vol 24 No.10, 1781-1795.
- Herrera - Carvajal, S.; Villalba - Atondo, I.; Molinar - Tabares, E. (2007). Modelación hidrogeológica y evaluación de la sustentabilidad del acuífero transfronterizo del Río San Pedro en Sonora, México. *Revista latinoamericana de Recursos Naturales*, 3(1):21-30.

- Holzbecher, E. (1998). Modeling density-driven flow in porous media: principles, numerics, software. Berlin Heidelberg - Germany: Springer-Verlag.
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME, 1975). Hidrogeología de la Plana Oropesa - Torreblanca. Proyecto de Investigación Hidrogeológica de la Cuenca Media y Baja del Júcar. Ministerio de Industria. Madrid.
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME, 1977). Evolución de niveles piezométricos en los Sistemas Acuíferos Cuenca Media y baja del Júcar. Servicio de publicaciones. Ministerio de Industria. Madrid.
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME, 2000). Estado de la intrusión de agua de mar en los acuíferos costeros españoles. Vol.II: Cuencas mediterráneas I: Segura, Júcar y Baleares. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.
- Instituto Geológico y Minero de España; Universitat Jaume I de Castelló (IGME - UJI, 2009a). Propuesta de indicador de estado de intrusión marina. Aplicación a las masas de agua subterránea de la provincia de Castellón. Instituto Geológico y Minero de España y Dirección General del Agua. Madrid.
- Instituto Geológico y Minero de España; Universitat Jaume I de Castelló (IGME - UJI, 2009b). Descargas ambientales al mar en las masas de agua subterránea costeras de la provincia de Castellón (Cuenca del Júcar). Instituto Geológico y Minero de España y Dirección General del Agua. Madrid.
- Instituto Nacional de Estadística (INE, 2011). www.ine.es
- Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario (IRYDA, 1983). Estudio geomorfológico del marjal de Cabanes - Torreblanca. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Inédito. Madrid.
- Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE, 1989). Estudio hidrogeológico del Maestrazgo. Castellón. Informe interno.
- Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA). www.ivia.es.
- Johannsen, K., Kinzelbach, W., Oswald, S., & Wittum, G. (2002). The saltpool benchmark problem - numerical simulation of saltwater upconing in a porous medium. Advances in water resources Vol 25, 335-348.

7. Bibliografía

- Júnior, R. F.; Fernández - Rubio, R.; Baquero - Úbeda, J.C.; Lorca - Fernández D.; Verdejo - Serrano, J. (2003). Acuífero detrítico costero de Ponta da Madeira (Maranhao, Brasil). Modelización hidrogeológica preliminar. Tecnología de la intrusión de mar en acuíferos costeros: Países mediterráneos. IGME. Madrid. ISBN: 84-7840-470-8.
- Koch, M., y Zhang, G. (1992). Numerical simulation of the effects of variable density in a contaminante plume. *Ground Water*, Vol 30 (5), 731 - 742.
- Konikow LF, Sanford WE, Campbell PJ. (1997). Constant concentration boundary condition: Lessons from the HYDROCOIN variable-density groundwater benchmark problem. *Water Resources Research*, Vol 33 No.10, pg 2253-2261.
- Konikow, L. (2002). Uso de modelos numericos para simular el flujo y transporte subterraneo. En *Isotopos ambientales en el ciclo hidrológico* (págs. 533 - 558). Madrid: Instituto minero y geológico de España - IGME.
- Langevin Christian D, Guo Weixing. (2006). MODFLOW/MT3DMS Based simulation fo variable-density ground water flow and transport. *Groundwater*, Vol 44 No.3 pg 339 - 351.
- Langevin, Christian D; Shoemaker, W. Barclay; Guo, Weixing. (2003). MODFLOW 2000, the US Geological Survey Modular Groundwater Model - documentation of the SEAWAT 2000 version with the Variable - density flow process (VDF) and the integrated MT3DMS Transport process (IMT). Florida: USGS techniques of water resources investigations. Report 43 - 426.
- Liu HH, Dane JH. (1997). A numerical study on gravitational instabilities of dense aqueous phase plumes in three -dimensional porous media. *Journal of Hydrology*, Volumen 194, 126 - 142.
- Liu, H., & Dane, J. (1996). A criterion for gravitational instability in miscible dense plumes. *Journal of Contaminant Hydrology*, Volumen 23, 233 - 243.
- Llopis-Albert, C., & Capilla, J. E. (2009). Gradual conditioning of non-Gaussian transmissivity fields to flow and mass transport data: 3. Application to the Macrodispersion Experiment (MADE-2) site, on Columbus Air Force Base in Mississippi (USA). *Journal of Hydrology*, 371, 75-84.

- Marina, M. (2006). Caracterización hidrogeológica de formaciones acuíferas profundas. Aplicación al acuífero regional jurásico de la unidad hidrogeológica 08.07 (el Maestrazgo). Boletín Geológico y Minero. Vol. 117: 605-6011.
- Martín, J. D. (1998). Geologia i mineralogia de les lutites permotriàsiques de la Serra de Vilafamés (Castelló). Tesis de Licenciatura. Universitat Autònoma de Barcelona. Barcelona.
- Mateu, J.F. (1982). El norte del País Valenciano. Geomorfología litoral y prelitoral. Tesis Doctoral. Universidad de Valencia. Valencia.
- McDonald M.G.; Harbaugh A. W. (1984). A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model: U.S. Geological Survey. Open-File. Report 83-875, 528 p.
- McDonald M. G.; Harbaugh A. W. (1988). Chapter A1. A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model. Book 6. Modeling Techniques. USGS. (<http://pubs.usgs.gov/twri/twri6a1/pdf/>).
- McNeil J.D., Oldenborger G.A., Schincariol R.A. (2006). Quantitative imaging of contaminant distributions in heterogeneous porous media laboratory experiments. Journal of Contaminant Hydrology, Vol. 84. Pag 36 - 54.
- Mejías, M.; García - Orellana, J.; Plata, J.L.; Marina, M.; García - Solsona E.; Ballesteros, B.; Masqué, P.; López. J.; Fernández - Arrojo, C. (2007). Methodology of hydrogeological characterization of deep carbonate aquifers as potential reservoirs of groundwater: Case of study: the jurassic aquifer of El Maestrazgo (Castellón, Spain). Environmental Geology DOI. 10.1007/S00254-007-0845-0.
- Ministerio de Medio Ambiente (MIMAM, 1996). Guía oficial de las playas de España: las Playas de Levante, de Castellón a Murcia. Madrid.
- Ministerio de Medio Ambiente (MIMAM, 2005). Estudio inicial para la identificación y caracterización de las masas de agua subterránea de las cuencas intercomunitarias. Dirección General del Agua. Ministerio de Medio Ambiente.
- Molina, J.A.; Casemiro, M.A.; Pertiñez, C.; Moreno, P.S. (2000). Relación suelo-vegetación en un ecosistema litoral mediterráneo. El parque natural del Prat de Cabanes - Torreblanca (Castellón). Fundación Dávalos-Fletcher.

7. Bibliografía

- Morell, I. (1985). Caracterización hidroquímica de la intrusión marina en la Plana de Oropesa- Torreblanca (prov. Castellón). Tesis Doctoral. Universidad de Granada. Granada.
- Morell, I.; Pulido - Bosch, A. (1986). Study of the freshwater - saltwater interface in the coastal aquifer of Oropesa - Torreblanca, Castellón, Spain. Proc. 9th SWIM, pp: 61 - 72. Delft.
- Morell, I. (1988). Intrusión marina y salinización en la Comunidad Valenciana. Jornadas del Agua. Factor: el Desarrollo Valenciano. Valencia.
- Morell I. (1989). Salinización por intrusión marina. Aplicación a los acuíferos costeros de la provincia de Castellón. Col.lecció Universitària. . Ed. Excma. Diputación de Castellón. ISBN 84-8695-07-3.
- Morell, I. (1992). Manantiales de la provincia de Castellón. Col.leccio Universitaria. Ed. Excma. Diputación de Castellón.
- Morell I. (2008). Actualización del inventario de puntos de agua de la Plana de Oropesa - Torreblanca. Informe inédito.
- Morell, I. (2010). Funcionamiento hidrogeológico de la zona húmeda denominada Prat de Cabanes (Torreblanca). Origen del agua y de la salinidad. Procesos implicados. Informe técnico. Instituto Universitario de Plaguicidas y Aguas (IUPA). Castellón.
- Ostrom M, Hayworth JS, Dane JH, Guven O. (1992). Behavior of dense aqueous phase leachate plumes in homogeneous porous media. Water Resources Research, Vol 28 (8), 2123 - 2134.
- Oyarzún L., R. (2007). Transporte de contaminantes en aguas subterráneas. Recuperado el 2009, de Geología, Botánica & Medioambiente (GBM). Aula2pontonet: un portal de cursos y documentos on-line.: http://www.aulados.net/Temas_ambientales/Contaminantes_aguas_subterraneas/Transporte_contaminantes.pdf
- Peaceman, D.W. (1977). Fundamentals of numerical reservoir simulation. Elsevier.
- Pérez M. A. (2005). Modelo distribuido de simulación del ciclo hidrológico y calidad del agua, integrado en sistemas de información geográfica, para grandes cuencas.

- Aportación al análisis de presiones e impactos de la Directiva Marco del Agua. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia.
- Pisinaras, V.; Petalas C.; Tsihrintzis; V. A.; Zegana, E. (2007). A groundwater flow model for water resources Management in the Ismarida plain, North Greece. *Environmental Modeling and Assessment* . Springer. Pp: 75-89.
- Prickett, T. A.; C. G. Lonquist (1971). *Selected Digital Computer Techniques for Groundwater Resources Evaluation*. State Water Survey, Urbana, Ill., Bull. 55.
- Reeve, A. S.; Warzocha, J.; Glaser, P. H.; Siegel, D. I. (2000). Regional ground-water flow modeling of the Glaciar Lake Agassiz Peatlands, Minnesota. *Journal of Hydrology*. Elsevier.
- Renau - Llorens, E. A. (2010). Elementos minoritarios y traza en la masa de agua subterránea 080.021 (Plana de Castelló). Origen y procesos asociados. Tesis Doctoral. Universitat Jaume I. Castellón de la Plana.
- Renau - Pruñonosa, A. (2008). Estudio hidrogeológico del sector meridional de la Plana de Oropesa - Torreblanca (Castellón). Trabajo fin de posgrado. Curso Internacional de Hidrogeología Subterránea. FCIHS y Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.
- Renau - Pruñonosa, A. (2009). Cálculo de volúmenes ambientales de descarga al mar en situación de explotación sostenible. Aplicación a la Plana de Oropesa - Torreblanca (prov. Castellón). Trabajo de Investigación (DEA). Universitat Jaume I. Castellón de la Plana.
- Renau - Pruñonosa, A. (2013). Nueva herramienta para la gestión de las aguas subterráneas en acuíferos costeros. Volumen ecológico de remediación (ver). Metodología y aplicación a la Plana de Oropesa - Torreblanca (Masa de agua subterránea 080.110). Tesis doctoral. Universitat Jaume I. Castellón de la Plana.
- Salamon, P., Fernández-García, D., & Gómez, J. (2006). A review and numerical assessment of the random walk particle tracking method. *Contaminant Hydrology* 87, 277 - 305.
- Sanchis, E.; Rodríguez, T.; Morell, I. (1989). La naturaleza de la Comunidad Valenciana. El medio físico, Geología. Institución Valenciana de Estudios e Investigación. Edicions Alfons el Magnànim.

7. Bibliografía

- Schäfer, W. (s.f.). Dr.-Ing. Wolfgang Schäfer - Groundwassermodellierung. Recuperado el 9 de Octubre de 2009, de http://www.schaefer-gwm.de/downloads/transport_modelling.pdf
- Schincariol R, Schwartz F. (1990). An experimental investigation of variable density flow and mixing in homogeneous and heterogeneous media. *Water Resources Research*, Vol 26 (10), 2317 - 2329.
- Schincariol R, Schwartz F, Mendoza C. (1994). On the generation of instabilities in variable density flow. *Water Resources Research*, Vol 30 (4), 913 - 927.
- Senger, R., & Fogg, G. (1990). Stream functions and equivalent freshwater heads for modeling regional flow of variable-density groundwater. *Review of theory and verification. Water Resources Research* 26, No. 9 pg 2089-2096.
- Serrano, V.; Toca, A.; Pérez, A.; Nieto, M.; Ortiz, S.; Capilla, J. (1995). Estudio de investigación de las descargas de aguas subterráneas al mar por la Sierra de Irta (U.H. 08.07: Maestrazgo). Mancomunidad del Baix Maestrat, Castellón. IV Simposio Hidrogeología. Tomo XIX: 679 - 697.
- Servicio Geológico de Obras Públicas (SGOP, 1975). Estudio hidrogeológico de la Plana de Oropesa-Torreblanca para mejorar el abastecimiento a Oropesa del Mar. Ministerio de Obras públicas y Urbanismo. Madrid.
- Servicio Geológico de Obras Pública (SGOP, 1977). Estudio hidrogeológico de la Plana de Castellón. Ministerio de Obras públicas y Urbanismo. Madrid.
- Shincariol R, Schwartz F, Mendoza C. (1997). Instabilities in variable density flows: stability and sensitivity analyses for homogeneous and heterogeneous media. *Water Resources Reserach*, Vol 33 (1), 31 - 41.
- Simmons CT, Pierini ML, Hutson JL. (2002). Laboratory Investigation of Variable-Density Flow and Solute Transport in Unsaturated-Saturated Porous Media. *Transport in Porous Media*, Volumen 47, 215 - 244.
- Simmons, C. T. (2005). Variable density groundwater flow: From current challenges to future possibilities. *Hydrogeology Journal*, Volumen 13 , 116 - 119.

- Simmons, C., Fenstemaker, T., & Sharp, J. J. (2001). Variable density groundwater flow and solute transport in heterogeneous porous media: approaches, resolutions and future challenges. *Journal of Contaminant Hydrology*, Volumen 52, 245 -275.
- Témez, J.R. (1977). Modelo matemático de transformación precipitación aportación. ASINEL.
- Tuñón, J. (2000). Determinación experimental del balance hídrico del suelo y evaluación de la contaminación asociada a las prácticas agrícolas. Tesis Doctoral. Universitat Jaume I, Castellón de la Plana.
- Unión Europea (UE - DMA, 2000). Directiva Marco del Agua, “Directiva 2000 / 60 / CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de Octubre de 2000”. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas* de 22/12/2000. L 327/1-327/32.
- Unión Europea (UE, 2006). Directiva 2006/118/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 12 de diciembre de 2006. *Diario Oficial de la Unión Europea* de 27/12/2006. L 372/19 - 372/31.
- Wooding R, Tyler, Scott, White, Anderson. (1997). Convection in groundwater below an evaporating salt lake. *Water Resources Research*, Vol 33, 1219 - 1228.
- Woumeni RS, Vauclin M. (2006). A field study of the coupled effects of aquifer stratification, fluid density, and groundwater fluctuations on dispersivity assesmentes. *Advances in Water Resources*, Volumen 29, 1037 - 1055.
- Zheng, Chunmiao; Bennett, Gordon D. (2002). *Applied contaminant transport modeling*. New York: Wiley-Interscience.
- Zheng, Chunmiao; Wang, Patrick. (1999). *MT3DMS: a modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion, and chemical reactions of contaminants in groundwater systems. Documentation and User's Guide*. Washington DC: U.S. Army Corps of Engineers.

7. Bibliografía

Anejo 1

Definición de la geometría del modelo

- 1. INTRODUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LA FORMACIÓN HIDROGEOLÓGICA** **2**

- 2. INTRODUCCIÓN DE LA MALLA PARA LA DISCRETIZACIÓN DE LA FORMACIÓN HIDROGEOLÓGICA** **3**

- 3. DIVISIÓN DE LA FORMACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN LOS DIFERENTES MUNICIPIOS QUE ABARCA** **6**

- 4. CARACTERIZACIÓN DE LOS BARRANCOS PRINCIPALES Y SECUNDARIOS DENTRO DE LA FORMACIÓN HIDROGEOLÓGICA** **6**

- 5. CARACTERIZACIÓN TANTO DE LA GEOLOGÍA DEL PRAT DE CABANES COMO DE LA FORMACIÓN HIDROGEOLÓGICA** **6**

**6. OBTENCIÓN DE LA TOPOGRAFÍA DE LA FORMACIÓN
HIDROGEOLÓGICA 7**

**7. REALIZACIÓN DEL MURO DE LA FORMACIÓN
HIDROGEOLÓGICA 8**

8. REALIZACIÓN DEL MURO DEL ACUÍFERO CRETÁCICO 8

**9. CARACTERIZAR LOS BOMBEO EN LA PLANA DE OROPESA -
TORREBLANCA 9**

**10. CARACTERIZAR LOS PIEZÓMETROS Y PUNTOS DE CONTROL
DE CALIDAD EN LA PLANA DE OROPESA - TORREBLANCA 10**

**11. REALIZAR EL MAPA PIEZOMÉTRICO DE LA PLANA DE
OROPESA - TORREBLANCA Y DEL MAESTRAZGO ORIENTAL 10**

**12. REALIZAR EL MAPA DE CONCENTRACIONES DE LA
SALINIDAD DE LA PLANA DE OROPESA - TORREBLANCA Y DEL
MAESTRAZGO ORIENTAL 11**

En el presente anejo se profundizará acerca de la metodología empleada para la definición de la geometría del modelo.

La metodología se resume en los siguientes apartados:

1. Introducir la geometría de la formación hidrogeológica
2. Introducir la malla para la discretización de la formación hidrogeológica
3. Dividir la formación hidrogeológica en los diferentes municipios que abarca
4. Caracterizar tanto los barrancos principales como los secundarios dentro de la masa de agua
5. Caracterizar tanto la geología del Prat de Cabanes como de la formación hidrogeológica
6. Obtener la topografía de la formación hidrogeológica
7. Realizar el muro de la formación hidrogeológica
8. Realizar el muro del acuífero cretácico
9. Caracterizar los bombeos en la Plana de Oropesa - Torreblanca
10. Caracterizar los piezómetros y puntos de control de calidad
11. Realizar el mapa piezométrico de la Plana de Oropesa - Torreblanca y del Maestrazgo Oriental
12. Realizar el mapa de concentraciones de la salinidad de la Plana de Oropesa - Torreblanca y del Maestrazgo Oriental

1. Introducción de la geometría de la formación hidrogeológica

La introducción de la geometría de la formación hidrogeológica es muy sencilla, únicamente deberemos añadir el archivo “shape” *MasasAguaSubterraneaPHJ-EpTI_ETRS89* obtenido de la web de la Confederación Hidrográfica del Júcar (www.chj.es) siguiendo la siguiente ruta: *Confederación Hidrográfica del Júcar* → *Agua* → *Sistemas de información* → *Cartografía y datos*. En este archivo se encuentra 90 masas de agua subterránea y 26 masas de agua impermeables o acuíferos de interés local.

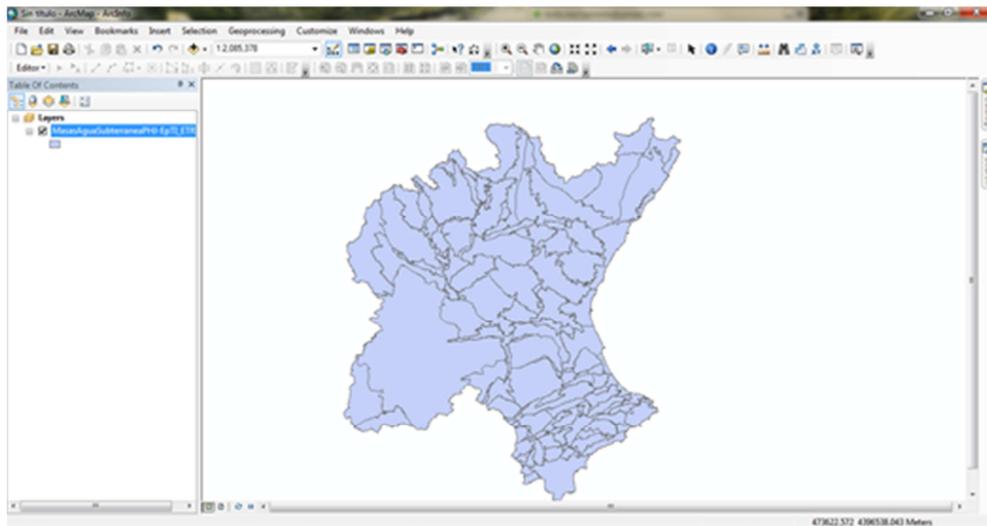


Figura 1. Shape *MasasAguaSubterraneaPHJ-EpTI_ETRS89*

Una vez introducidas las masas de agua, creamos un nuevo archivo “shape” que únicamente contenga la formación hidrogeológica. Para ello seleccionamos la Plana de Oropesa - Torreblanca entre las 90 masas de agua y la exportamos.

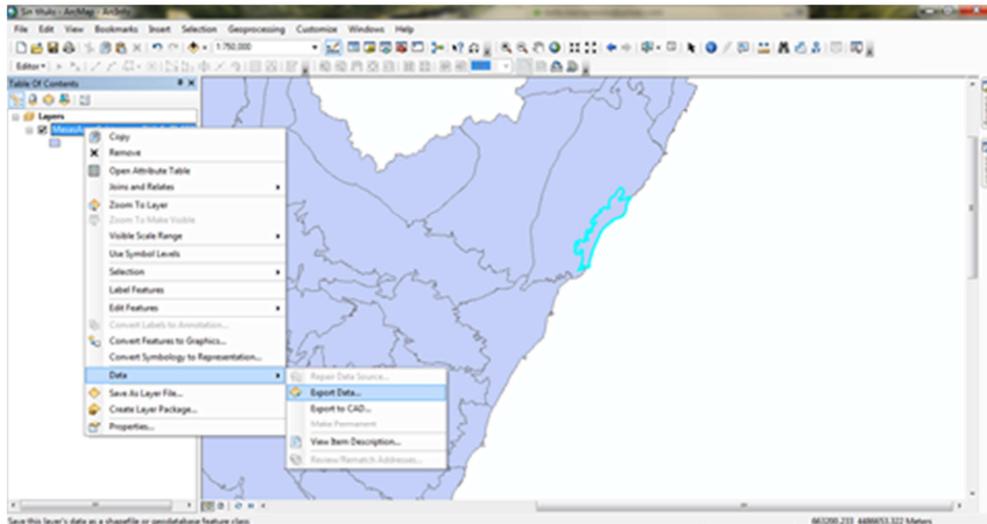


Figura 2. *Export Data...*

De esta forma tendremos un archivo “shape” donde visualizaremos la Plana de Oropesa - Torreblanca.

2. Introducción de la malla para la discretización de la formación hidrogeológica

La malla de 250x250 m., utilizada para la discretización de la formación hidrogeológica, fue realizada en *AutoCAD* y posteriormente visualizada en *ArcGIS*. Para su realización primero creamos a partir del archivo anteriormente creado (MAS_OT) el archivo MAS_OT.dwg.

Una vez obtenido el archivo “dwg”, lo abrimos con *AutoCAD*, y creamos una línea recta colindante con la costa para conocer la dirección de la malla, creamos un cuadrado de 250x250 m y lo copiamos tantas veces como sea necesario para que la malla abarque toda la formación hidrogeológica y guardamos el archivo en formato “dxf”, ya que este formato es el más común que lee *ArcGIS*.

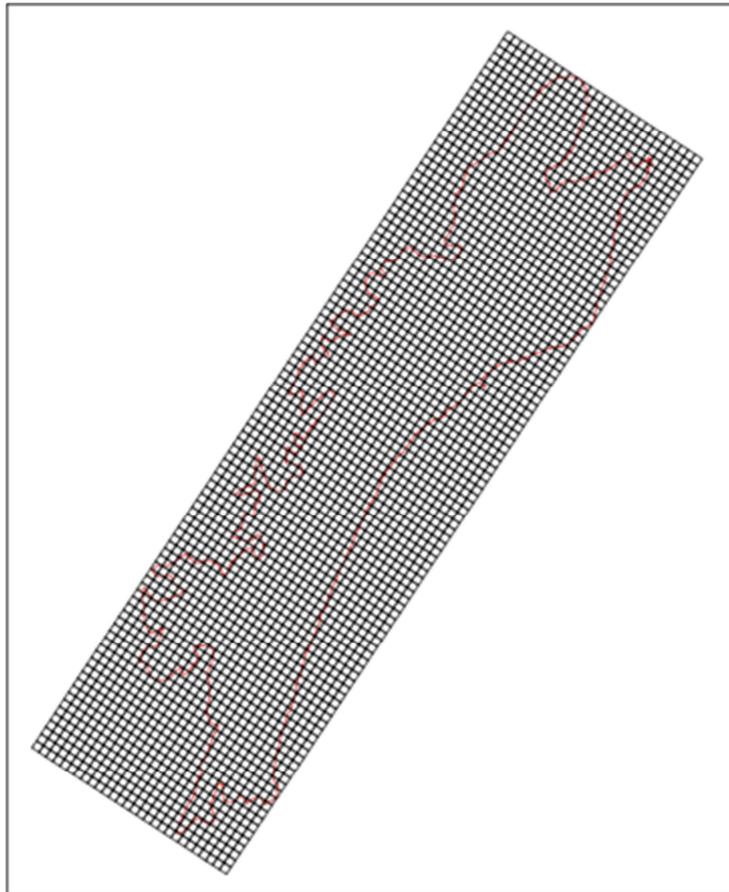


Figura 3. Malla sobre la formación hidrogeológica

Abrimos *ArcGIS* y añadimos la malla de la misma forma que añadimos el archivo “shape” *MasasAguaSubterraneaPHJ-EpTI_ETRS89*, pero en esta ocasión el archivo “dxf” y la exportamos para crear un “shape” llamado MALLA que podamos modificar.

Ahora bien, esta malla es más grande que la propia formación hidrogeológica. Para seleccionar únicamente las celdas que se sitúan sobre la formación hidrogeológica seleccionamos todas las celdas y utilizamos la herramienta *Select by Location*.

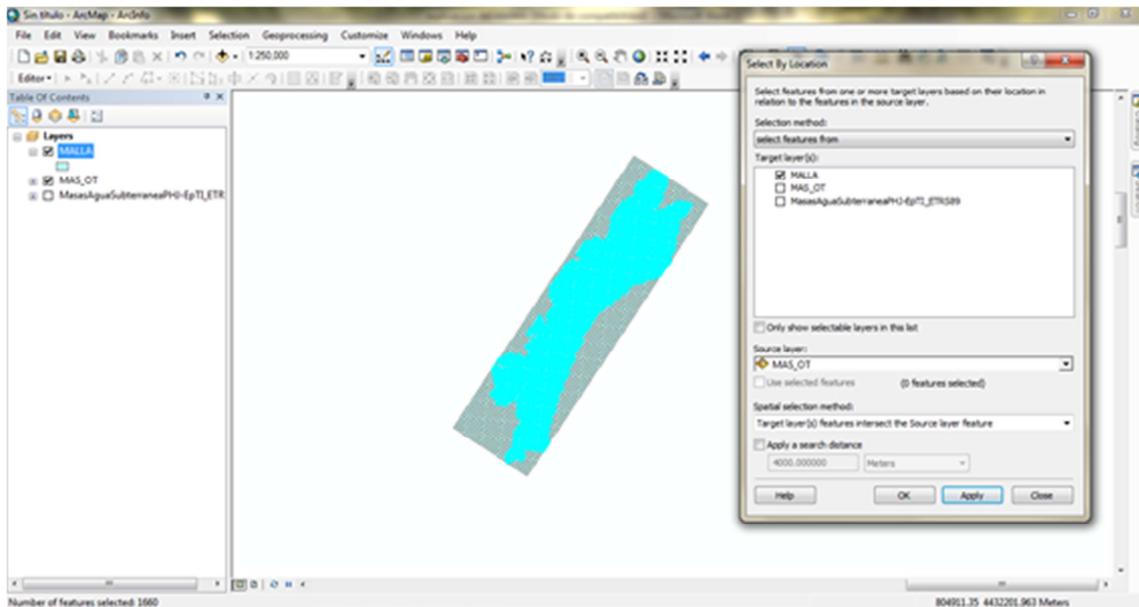


Figura 4. Selección malla que abarca la formación hidrogeológica

De esta forma tendremos seleccionadas las celdas que abarca la formación hidrogeológica. Ahora repetiremos los pasos descritos para la creación de un nuevo archivo “shape” y de esta forma tendremos un archivo “shape” donde visualizaremos la malla que abarca la Plana de Oropesa - Torreblanca. Este nuevo archivo “shape” tendrá el nombre de MALLA_MAS_OT. Éste tiene 1659 celdas mientras que el archivo MALLA tiene 2912.

3. División de la formación hidrogeológica en los diferentes municipios que abarca

Para realizar esta operación primero deberemos obtener un mapa político de la provincia de Castellón donde se encuentren diferenciados los municipios de la provincia. Este mapa se obtuvo de la página web del Instituto Nacional de Estadística (www.ine.es). Deberemos cargar el archivo “shape” y utilizar la herramienta *Clip*. Tras estas operaciones ya tenemos un archivo “shape” donde se distinguen en la formación hidrogeológica los diferentes municipios entre los que se encuentra.

4. Caracterización de los barrancos principales y secundarios dentro de la formación hidrogeológica

La caracterización del río San Miguel o Cuevas, el barranco de Chichilla y la rambla de Seguer dentro de la formación hidrogeológica es fácil una vez se han obtenido las masas de agua superficiales de la web de la Confederación Hidrográfica del Júcar (www.chj.es) siguiendo la siguiente ruta: *Confederación Hidrográfica del Júcar* → *Agua* → *Sistemas de información* → *Cartografía y datos*. Una vez obtenidas, se carga el archivo “shape” y se seleccionará y creará un nuevo archivo “shape” (RIOS) que contenga la información pertinente igual que se explicó anteriormente.

5. Caracterización tanto de la geología del Prat de Cabanes como de la formación hidrogeológica

Utilizando un mapa geológico de la zona obtenido del Instituto Geológico y Minero de España, se copió la geometría de la formación hidrogeológica y se añadió una nueva zona correspondiente a la marjalería, ya que únicamente se distinguen en superficie dos geologías (marjalería y pliocuaternario). La introducción del Prat de Cabanes se realizó mediante el archivo “shape” de la CHJ, *HumedalesRamsar_ETRS89*. En ambos casos se creó un nuevo archivo “shape” que únicamente contiene la información dicha (GEOLOGIA_MAS_OT y PRAT).

6. Obtención de la topografía de la formación hidrogeológica

Para la obtención de la topografía primero se trasladó el mapa de la topografía de la formación hidrogeológica (CHJ, 2009) a *AutoCAD*. Una vez se tienen las isolíneas perfiladas con numerosos puntos, mediante el comando *DATAEXTRACTION* se extrajeron las coordenadas en las cuales se encuentra cada punto.

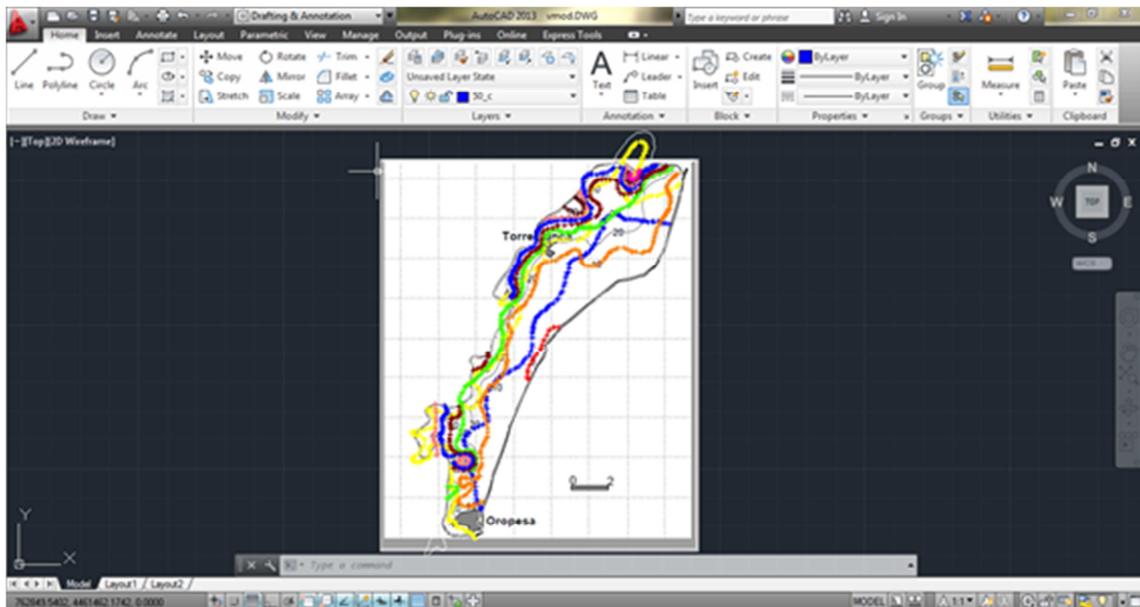


Figura 5. Isolíneas perfiladas

Gracias a este comando se pasó la información a *Excel* y ahora se pondrá introducir ésta en el programa *Surfer*. En *Surfer* se introdujo la información de los puntos para la interpolación mediante *kriging* linear de la superficie topográfica. Con todo esto tendremos la topografía de la formación hidrogeológica en formato *Excel*.

Anejo 1: Definición de la geometría del modelo

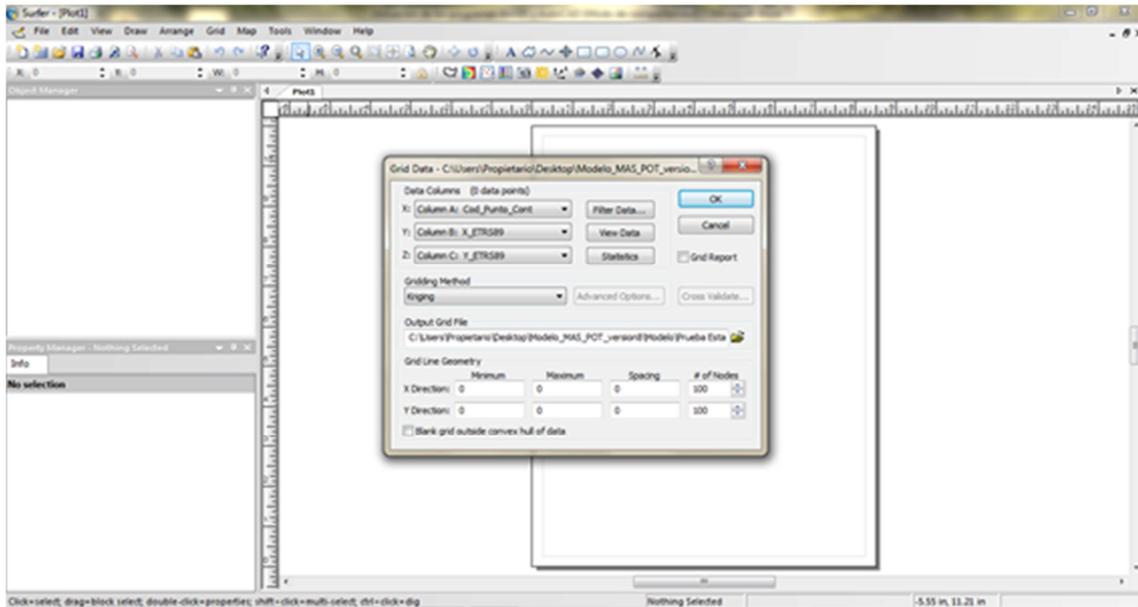


Figura 6. Grid Data

Para su mejor visualización se recurrió al programa *ArcGIS*. Primero deberemos generar el archivo “shape” que contenga los centroides de cada de las celdas de la malla realizada previamente (MALLA) mediante la herramienta *X Coordinate of Centroid* para el eje X y *Y Coordinate of Centroid* para el Y.

A continuación se pasó la información de *Excel* a formato *hoja de cálculo Open Office* (hoja de cálculo que recoge la información de cada archivo “shape”) y en *ArcGIS* se realizó el mapa de topografía de la Plana de Oropesa - Torreblanca.

7. Realización del muro de la formación hidrogeológica

Para la realización del muro se siguieron los mismos pasos que en la realización de la topografía pero en este caso a partir del mapa del muro de la plana (*CHJ, 2009*).

8. Realización del muro del acuífero cretácico

Teniendo como referencia el muro de la formación hidrogeológica se creó el muro del acuífero cretácico.

Primero deberemos visualizar 6 polilíneas en *AutoCAD* paralelas entre sí, para de esta forma tener el mapa en formato “dwg” y “dxf”. Para la visualización del mapa en *ArcGIS*, y

posterior generación del archivo “shape” ISOPACAS, se seguirán los pasos enumerados en la incorporación de la malla de *AutoCAD* a *ArcGIS*.

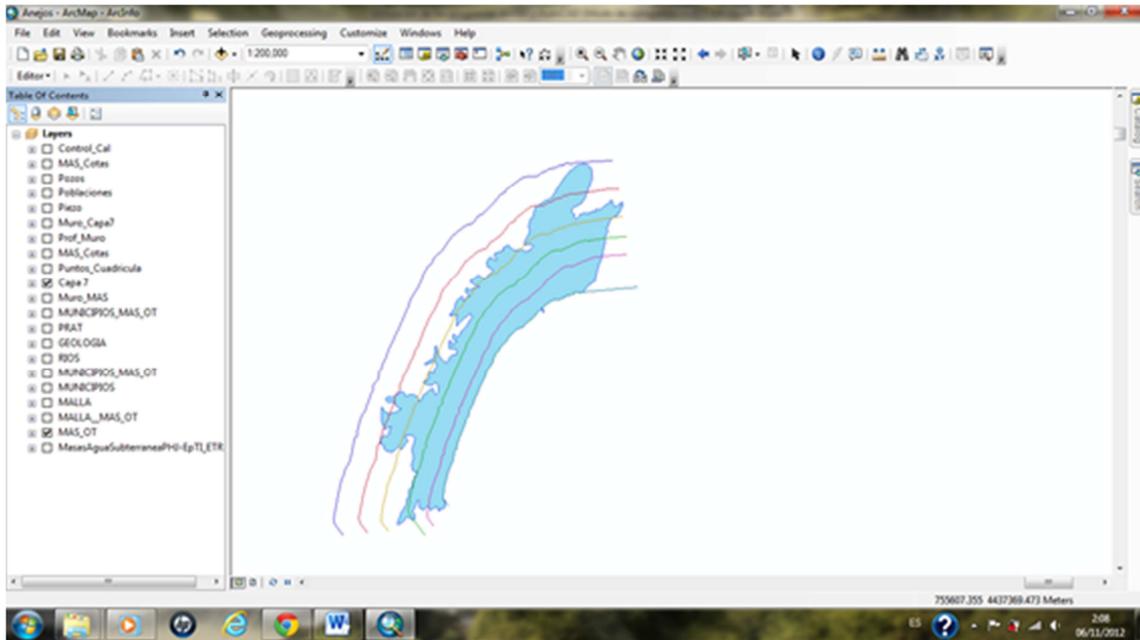


Figura 7. Isopacas del acuífero cretácico

Una vez las tengamos en *ArcGIS* se editaron para que la pendiente del muro fuese constante y su potencia media respecto del muro de la formación hidrogeológica sea de 200 m. Por último obtendremos un archivo “shape” que contiene los valores del muro del acuífero cretácico en cada punto.

9. Caracterizar los bombeos en la Plana de Oropesa - Torreblanca

La caracterización de los puntos de bombeo en la Plana de Oropesa - Torreblanca se compone de los siguientes pasos:

1. Añadir en el shape MALLA una nueva columna (BOMBEOS) y escribir en la ventana “0”.
2. A partir de un archivo *excel*, introducir los puntos donde se sitúan.
3. Seleccionar, del “shape” MALLA, aquellas celdas donde se sitúan los puntos.
4. Seleccionar la columna BOMBEOS y escribir en la ventana “1”.

Siguiendo estos pasos tendremos situados en la malla las celdas donde se sitúan los pozos.

10. Caracterizar los piezómetros y puntos de control de calidad en la Plana de Oropesa - Torreblanca

La caracterización de los piezómetros y puntos de control de calidad en la Plana de Oropesa - Torreblanca se realiza siendo los pasos enumerados en el apartado anterior.

11. Realizar el mapa piezométrico de la Plana de Oropesa - Torreblanca y del Maestrazgo Oriental

Para la realización de ambos mapas se utilizó el programa *Surfer*. Los datos de piezometría utilizados para su realización son los que se encuentran disponibles en la página web de la web de la Confederación Hidrográfica del Júcar (www.chj.es). En ambos casos se utilizó la interpolación *kriging* linear para conocer la piezometría en toda la masa de agua. En el caso de la Plana de Oropesa - Torreblanca se utilizaron los datos correspondientes a 10 piezómetros en el instante temporal “enero de 1974” ya que no es el primer instante temporal que tiene todos los piezómetros utilizados. El caso del Maestrazgo Oriental es más fácil ya que únicamente se elevaron las alturas obtenidas anteriormente progresivamente (en las zonas cercanas al mar la elevación es inferior a la de las zonas interiores) para que las alturas piezométricas en el cretácico fueran superiores a las del pliocuaternario.

No hay otra solución, para obtener éste último mapa, ya que el dato más antiguo que se tiene en esta masa data del 2004 (esto es porque la antigua masa de agua Maestrazgo se dividió en el 2004 en las actuales Maestrazgo Oriental y Maestrazgo Occidental).

De este modo obtenemos los mapas que fueron modificados en el proceso de calibración del flujo. Tras este proceso se obtuvieron los mapas utilizados como alturas iniciales en el modelo.

Para su visualización en *ArcGIS* se introdujeron crearon 2 nuevos campos en la *shape* “MALLA” con los nombres “Altura piezométrica pliocuaternario” y “Altura piezométrica cretácico”. Gracias a transformaciones realizadas en *Excel* se ordenaron los datos acorde con la numeración seguida por la *hoja de cálculo Open Office* de “MALLA” y se pudo representar ambos mapas.

12. Realizar el mapa de concentraciones de la salinidad de la Plana de Oropesa - Torreblanca y del Maestrazgo Oriental

El mapa de concentraciones de salinidad se realizó aumentando progresivamente las concentraciones en la masa de agua a medida que ésta es más profunda. Estos mapas, cuyos valores en costa son constantes, fueron utilizados en primera instancia como concentraciones iniciales pero tras el proceso de calibración del flujo y transporte, se obtuvieron los mapas utilizados como concentraciones iniciales en el modelo. Como los datos de control de calidad de la CHJ son en términos de cloruros, estos valores fueron convertidos a salinidad mediante la siguiente relación:

$$\text{Salinidad} = \text{Clorividad} * 1.80655 / 1000$$

Para su visualización en *ArcGIS* se siguieron los pasos explicados en el apartado anterior.

Anejo 1: Definición de la geometría del modelo

Anejo 2

Datos de entrada (inputs) del modelo matemático

<u>1. PRECIPITACIONES MENSUALES (1973 – 2009)</u>	<u>1</u>
<u>2. RECARGA. INFILTRACIÓN POR PRECIPITACIÓN (PP) Y RETORNO DE RIEGO (RR) (1973 – 2009).</u>	<u>4</u>
<u>3. PUNTOS DE OBSERVACIÓN</u>	<u>8</u>
3.1. Niveles piezométricos _____	8
3.2. Concentraciones cloruros _____	12
<u>4. BOMBEOS</u>	<u>16</u>
4.1. Bombeos en Alcocebre _____	16

4.2.	Bombes en Cabanes _____	19
4.3.	Bombes en Oropesa _____	24
4.4.	Bombes en Torreblanca _____	27
4.5.	Bombes virtuales _____	35
4.6.	Bombes para el abastecimiento urbano _____	38

1. Precipitaciones mensuales (1973 – 2009)

Los datos mensuales de precipitación comprendido entre 1973 y 2005 (ambos inclusive) se han obtenido de los estudios realizados por González - Hidalgo (2008 y 2010), la estación meteorológica utilizada en dichos estudios está ubicada en un área próxima, situada en las cercanías del polígono industrial del Campaner, en la Asociación de Viveristas de Ágrios (AVASA), término municipal de Alcalà de Xivert (Tablas 1 y 2).

Los datos mensuales de precipitación correspondientes al periodo 2006 – 2009, se han obtenido de la red de control de datos agroclimáticas perteneciente al Sistema de Información Agroclimático para el Regadío (SIAR) del Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA), perteneciente a la Consellería de Agricultura, Pesca y Alimentación (IVIA, www.ivia.es). La estación Agroclimática seleccionada es la ubicada en la Ribera de Cabanes (Tablas 1 y 2).

Anejo 2: Datos de entrada (inputs) del modelo matemático

AÑO	MESES												TOTAL (mm.)
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
1973	6.2	2.9	11.1	25.3	13	51.3	40.3	49.1	37.3	37.8	10.7	46.8	331.8
1974	1.4	9.6	119.9	114.8	47.7	16	14.8	49	18.1	18.6	2.5	3	415.4
1975	3.1	111	63.2	14	116.4	49.9	5.8	32.4	98.1	41.8	22.8	115.3	673.8
1976	2	25.9	7.8	68.3	35.7	19.5	52.1	74.9	24	55.8	4.7	118	488.7
1977	138.7	9.5	13.2	46.5	144.7	59.9	49.2	19	72.1	42.6	74.2	95.9	765.5
1978	9.3	17.5	22.8	35.1	46.5	15.6	3.3	7.4	34.6	33	50.2	21.9	297.2
1979	123.3	5.3	13.2	24.3	22	17.4	6.6	16.4	47.4	68.5	6.6	1.3	352.3
1980	32.4	90.5	12.4	49	76.4	19.2	14.8	34.7	7.5	5.2	42.9	0.9	385.9
1981	1.6	77.4	8.5	227.8	15.2	122.6	34.7	72.8	29.5	11.1	0.1	2.6	603.9
1982	148.2	68.7	118.2	43.5	50.3	1.6	30.4	72.3	109.4	221.2	26.1	4	893.9
1983	0.1	9.4	16.8	0.7	10.8	32.6	0.2	92.1	0.2	11.2	192.7	5.3	372.1
1984	0.3	50.1	18.6	36	109.8	4.1	0.1	17.4	21.3	16.9	141.4	0.4	416.4
1985	15.6	12	11.6	18.8	47.2	1.9	0.1	1.4	92.2	53.7	105.1	16.4	376
1986	0.5	5.5	15.9	23.3	10.6	0.3	21.6	4.1	107.2	150.4	77	9.2	425.6
1987	152.7	30.4	9.6	0.1	15.6	3.6	45.4	14.3	11.1	222.7	137.3	40.5	683.3
1988	98	1.9	1.8	186.9	79.7	75.4	1	2.1	29.1	40.5	177.5	0.1	694
1989	32.3	56.8	153.1	42.4	50	25.9	9.6	44.8	308.1	19.9	171.4	198	1112.3
1990	97.1	0.2	21.3	34.1	13.6	64.6	9.1	25.6	92.9	353.1	14.6	18.1	744.3
1991	62.9	182.6	76.1	88.4	24.1	18.6	14.1	1.7	49.7	39.7	79.9	187.5	825.3
1992	32.6	52.2	3.6	20.3	39.6	69.4	13.6	11.6	20.1	45.2	0.2	118.2	426.6
1993	0.3	89.4	45.8	18.2	19.5	0.1	1.9	2.2	101.6	64.6	56.2	0.1	399.9
1994	0.1	20.8	2.3	34.4	12.3	4.4	8.1	35.1	55.7	157.2	78.9	20.9	430.2
1995	1.5	15.6	2.6	26.8	7.9	6.6	12.9	23.9	61.6	48.9	31.3	124	363.6
1996	132.1	93.4	9.5	24.6	31.4	3	6.2	33.4	66.5	13.2	27.6	119.6	560.5
1997	81	0.3	0.1	78.1	13.1	29.1	15.7	34.3	40.1	14.2	24.1	78.2	408.3

Tabla 1. Precipitaciones mensuales (1973 - 1986)

AÑO	MESES												TOTAL (mm.)
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
1998	168.8	12.7	0.1	20.1	39	0.1	0.1	22.1	36.4	18.1	18.1	164.4	500
1999	47.8	4.3	69	75.8	6.8	10.4	25.6	5.1	82.8	84.9	28.6	0.1	441.2
2000	54.4	0.1	25.8	26.5	38.2	47.7	29.5	0.1	18.7	283.5	17	30.7	572.2
2001	24.4	21.1	15.4	27.6	42.4	2.9	18.9	1.5	54.6	36.3	56.1	41.4	342.6
2002	60.8	0.1	26.3	77.3	186.8	16.2	11.9	67.9	74.7	16.8	25.6	17.1	581.5
2003	0.1	34.3	49.4	102.4	127.3	9.3	6.8	82.1	15.4	96.3	269.5	33.3	826.2
2004	0.1	74.4	126.5	104.2	123.1	29.9	5.1	65.8	33.2	18.8	5.8	29.1	616
2005	0.1	123.6	9.3	30.6	27.2	0.1	0.1	49.6	35.8	52.3	174.1	11	513.8
2006	137.4	86.2	7.2	5.4	62.6	4	0.2	1.8	102.4	30.2	83.2	4.4	525
2007	39.8	42.4	52.2	237	19.6	11.4	0	0	94.6	121	0	94.6	712.6
2008	0	56	14	5	142	26	58	21	79	114	36.8	56	607.8
2009	56	9	49	31.6	5.6	0	9	19.4	233	10	3	47	472.6

Tabla 2. Precipitaciones mensuales (1987 - 2009)

2. Recarga. Infiltración por precipitación (Pp) y retorno de riego (Rr) (1973 – 2009).

En la Plana de Oropesa – Torreblanca se pueden diferenciar tres zonas de recarga:

A. Zona recarga 0 mm (zona morada y roja)

Durante todo el periodo la recarga es nula. Esta zona engloba núcleos urbanos como Torreblanca y Oropesa del Mar y celdas que se han considerado activas a efectos de introducir condiciones de contorno pero que no se deben contabilizar en la recarga total del acuífero (celdas que representan el mar).

B. Zona recarga sólo infiltración de precipitación (Pp) (zona azul, amarilla y naranja)

Durante todo el periodo, la recarga que reciben estas celdas proviene exclusivamente de la infiltración de la precipitación. Esta característica se observa en la el Prat de Cabanes y en los alrededores del núcleo urbano de Oropesa del Mar.

C. Zona de recarga por infiltración de las precipitaciones (Pp) y retorno de riego (Rr) (zona verde).

Esta zona se caracteriza por presentar durante toda la simulación infiltración procedente de las precipitaciones (Pp) y, en algún momento de la simulación, retorno de riego (Rr) de los cultivos.

En la tabla 3 se muestra en qué periodo de tiempo hay Rr.

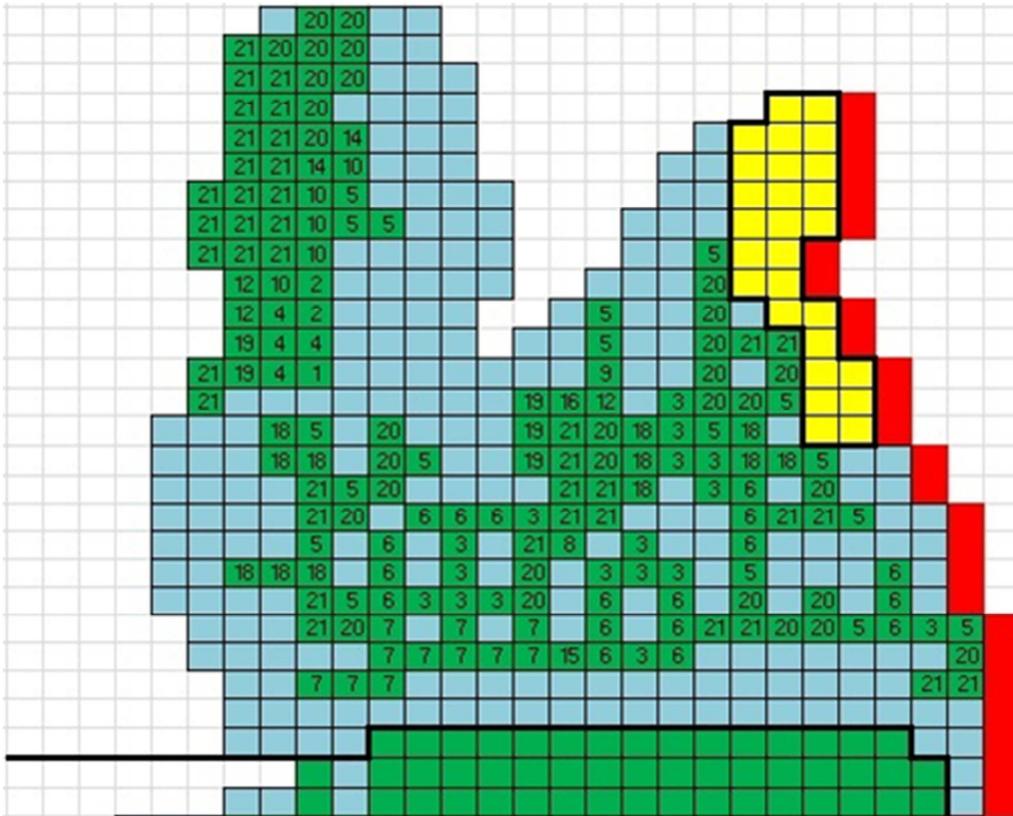


Figura 1. Zonas de recarga correspondientes a Alcocebre (1973 – 2009)

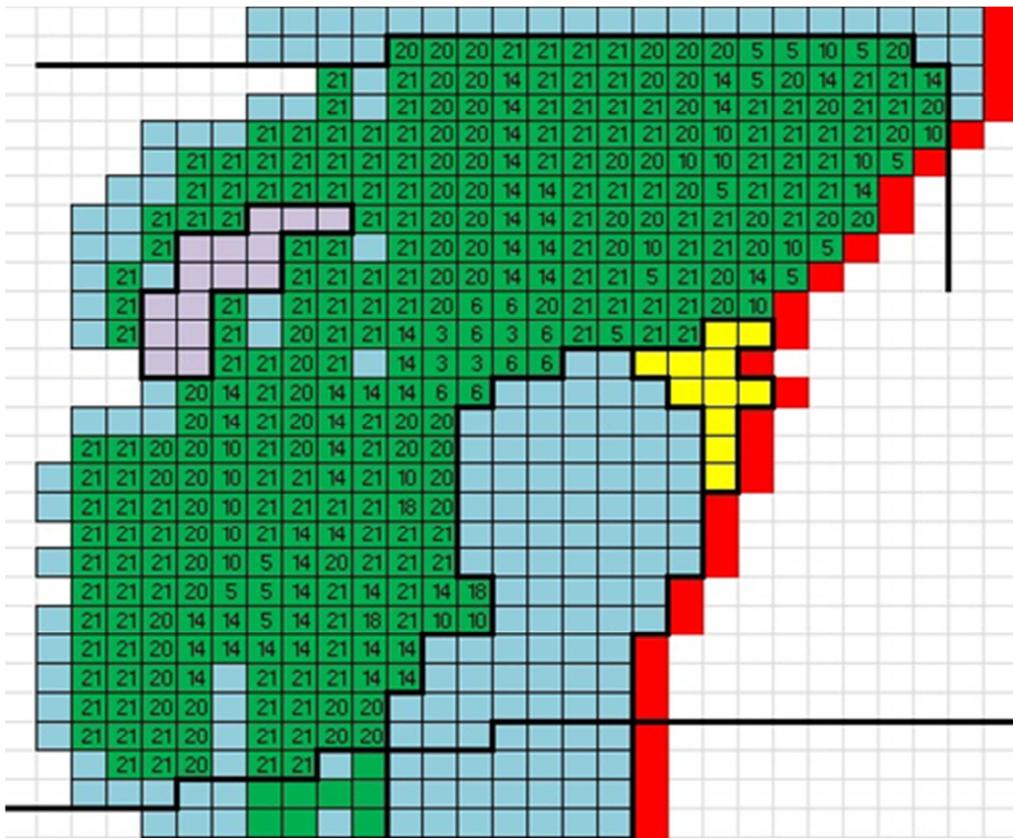


Figura 2. Zonas de recarga correspondientes a Torreblanca (1973 – 2009)

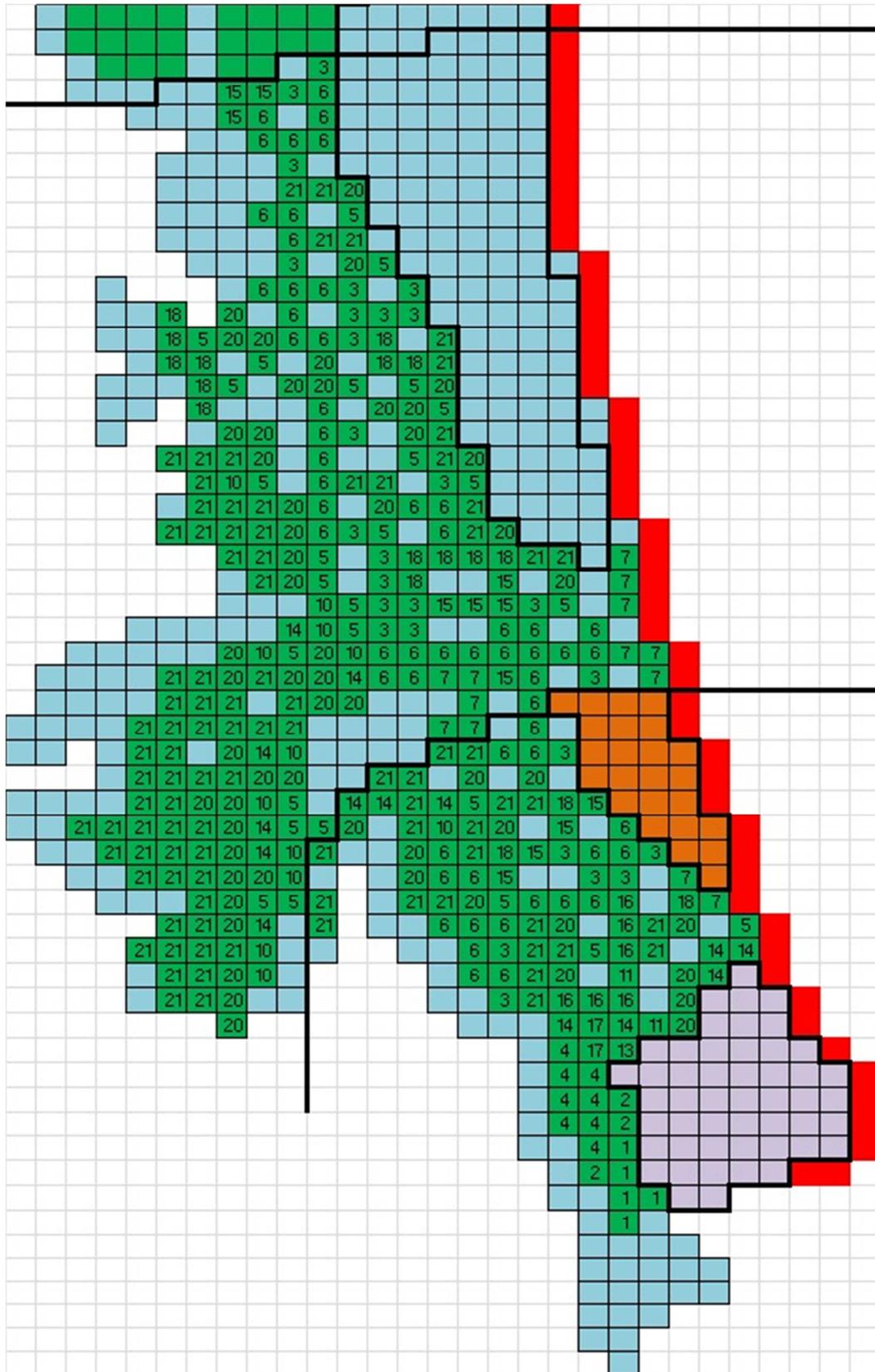


Figura 3. Zonas de recarga correspondientes a Cabanes y Oropesa (1973 – 2009)

Anejo 2: Datos de entrada (inputs) del modelo matemático

Zonas	Infiltración
1	Pp + Rr (1980)
2	Pp + Rr (1976 - 94)
3	Pp + Rr (1995 - 03)
4	Pp + Rr (1973 - 94)
5	Pp + Rr (1980 - 03)
6	Pp + Rr (1995- 05)
7	Pp + Rr (2004 - 09)
8	Pp + Rr (1973 y 1980 - 03)
9	Pp + Rr (1976 - 03)
10	Pp + Rr (1980 - 05)
11	Pp + Rr (1973 - 03)
12	Pp + Rr (1976 - 05)
13	Pp + Rr (1976 - 94 y 2004 - 09)
14	Pp + Rr (1980 - 07)
15	Pp + Rr (1995 - 09)
16	Pp + Rr (1973 - 05)
17	Pp + Rr (1973 - 94 y 2004 - 09)
18	Pp + Rr (1980 - 09)
19	Pp + Rr (1973 - 07)
20	Pp + Rr (1976 - 09)
21	Pp + Rr (1973 - 09)
22	Recarga 0 mm.
23	Recarga 0 mm.
24	100% Pp (1973 - 09)
25	100% Pp (1973 - 79), 50% Pp (1980 - 03) y 0% Pp (2004 - 09)
26	100% Pp (1973 - 94), 50% Pp (1995 - 03) y 0% Pp (2004 - 09)

Tabla 3. Zonas de recarga de la Plana de Oropesa – Torreblanca

3. Puntos de observación

Los puntos de observación utilizados en este trabajo forman parte de la red de control de piezometría, calidad e intrusión de la Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ, www.chj.es).

3.1. Niveles piezométricos

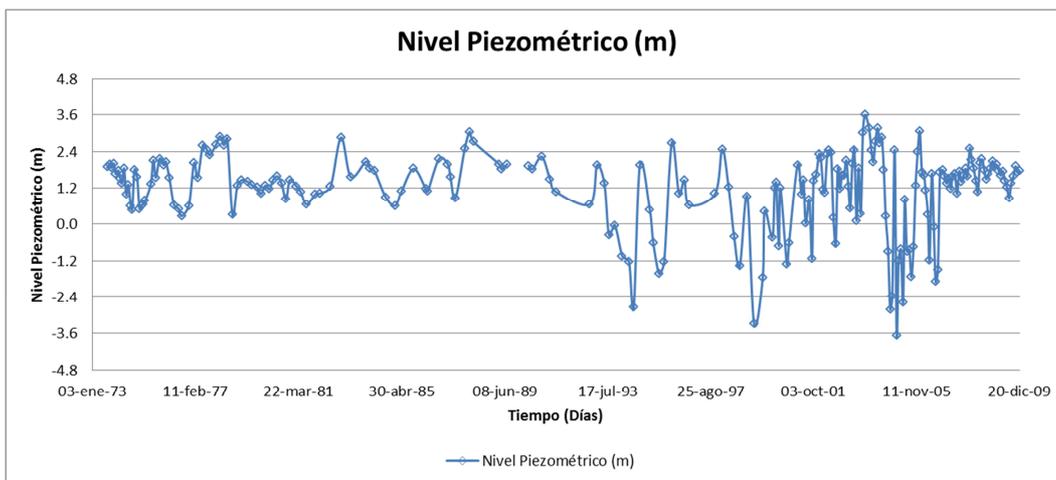


Figura 4. Evolución de la piezometría en el punto de observación 08.11.006

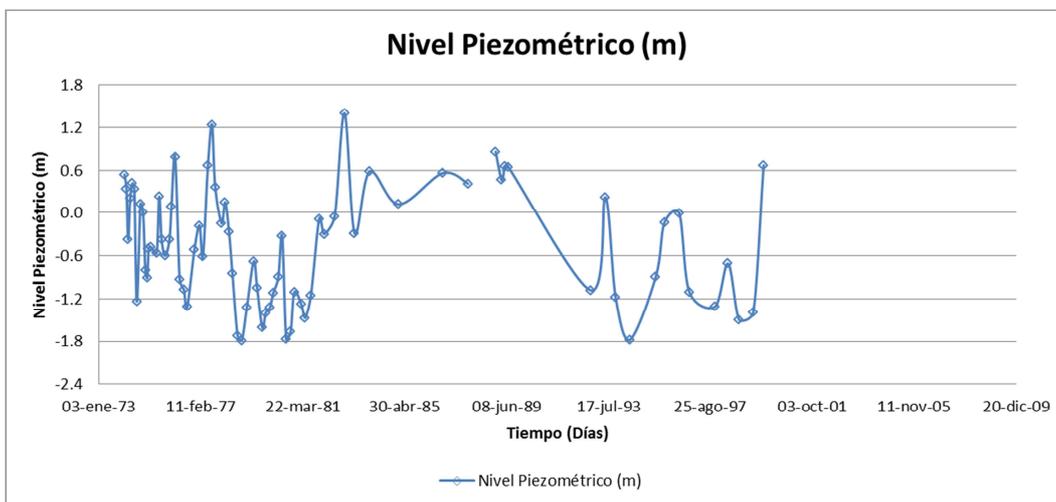


Figura 5. Evolución de la piezometría en el punto de observación 08.11.009

Anejo 2: Datos de entrada (inputs) del modelo matemático

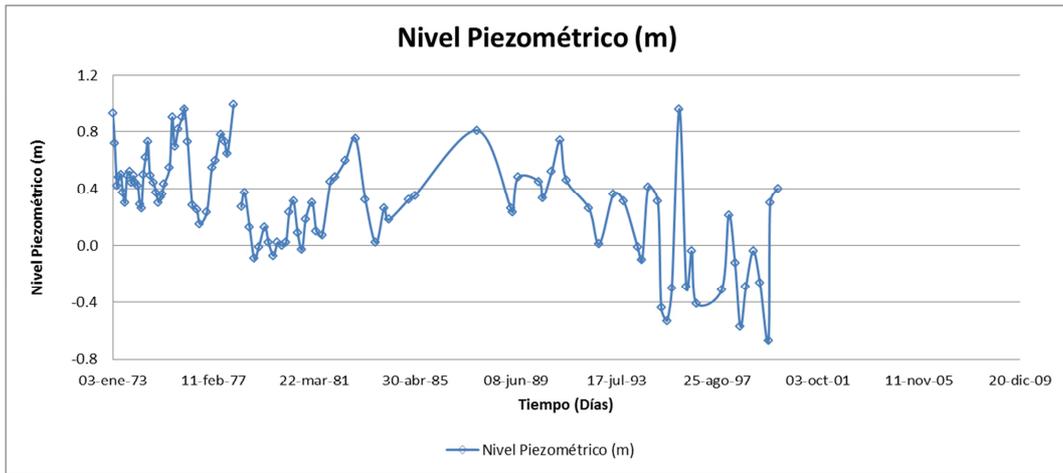


Figura 6. Evolución de la piezometría en el punto de observación 08.11.013

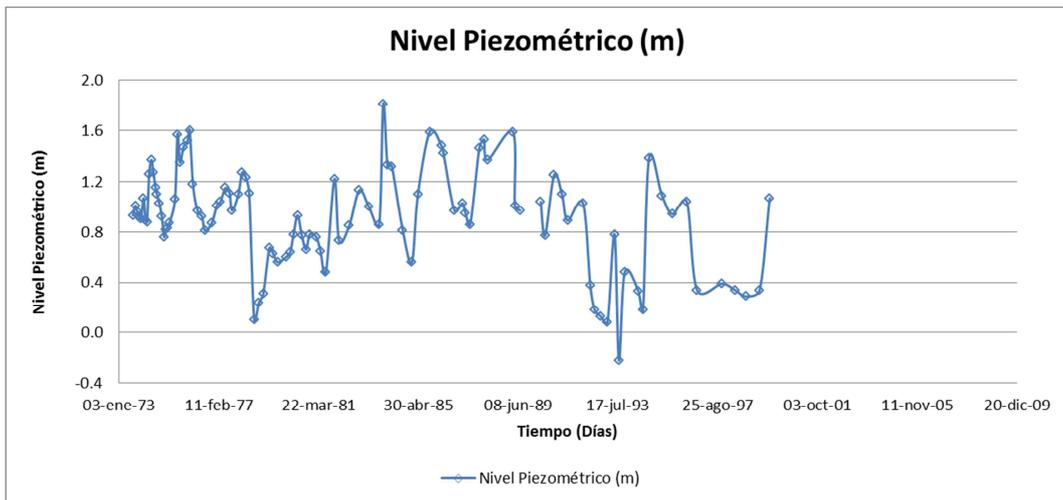


Figura 7. Evolución de la piezometría en el punto de observación 08.11.014

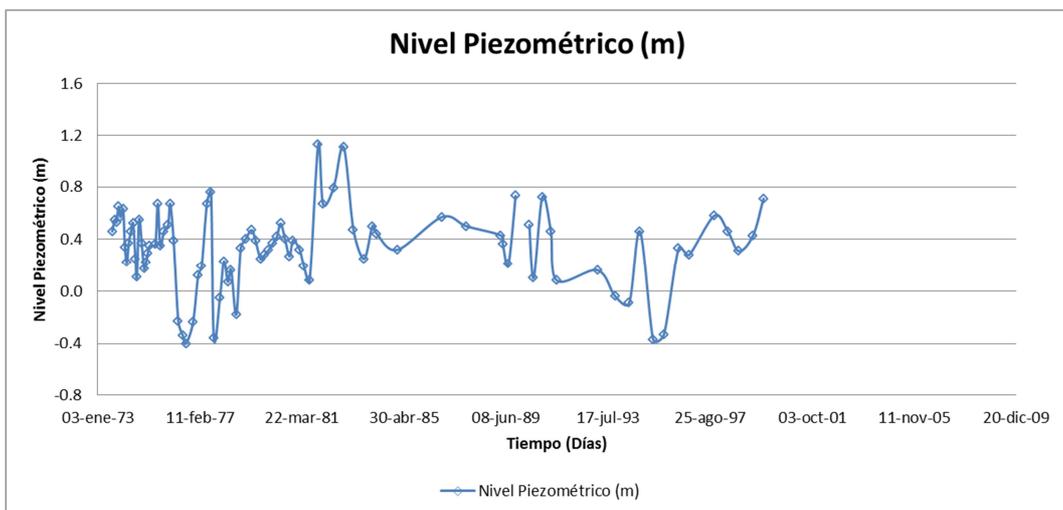


Figura 8. Evolución de la piezometría en el punto de observación 08.11.018

Anejo 2: Datos de entrada (inputs) del modelo matemático

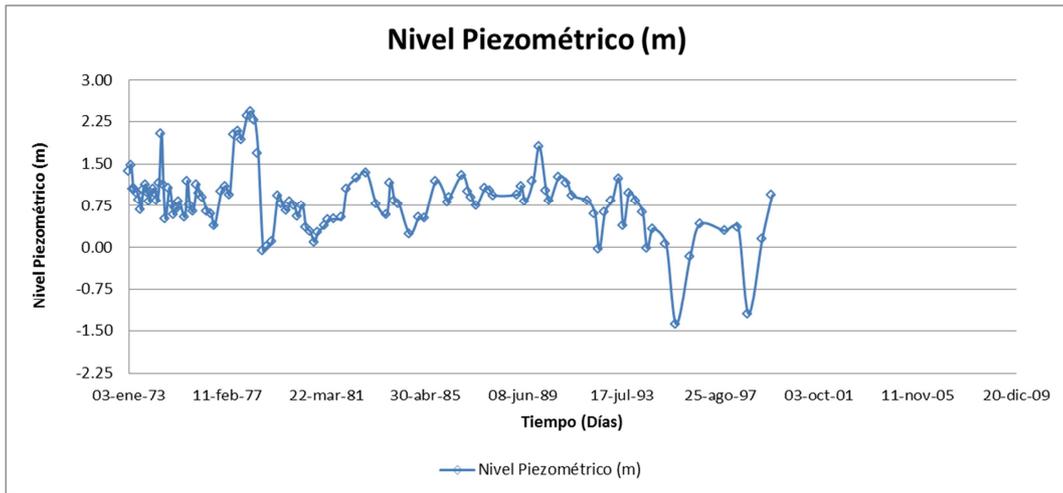


Figura 9. Evolución de la piezometría en el punto de observación 08.11.023

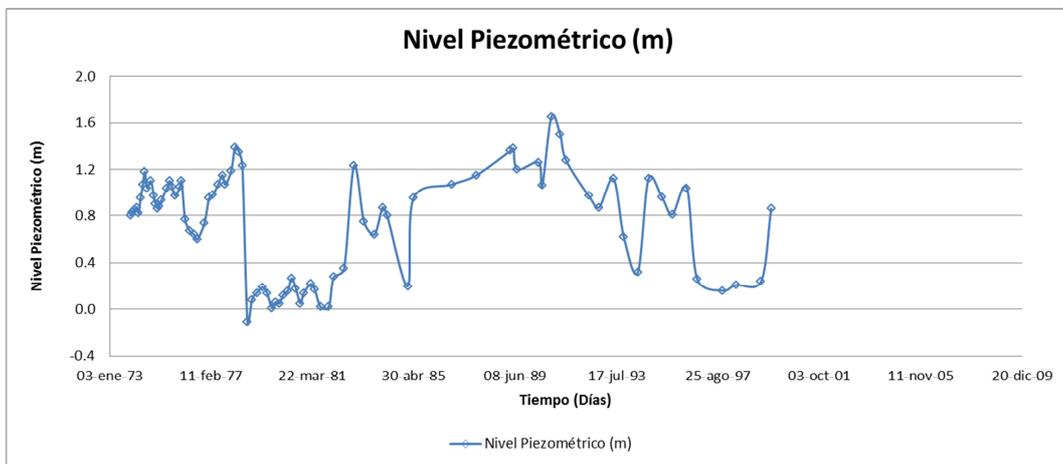


Figura 10. Evolución de la piezometría en el punto de observación 08.11.024

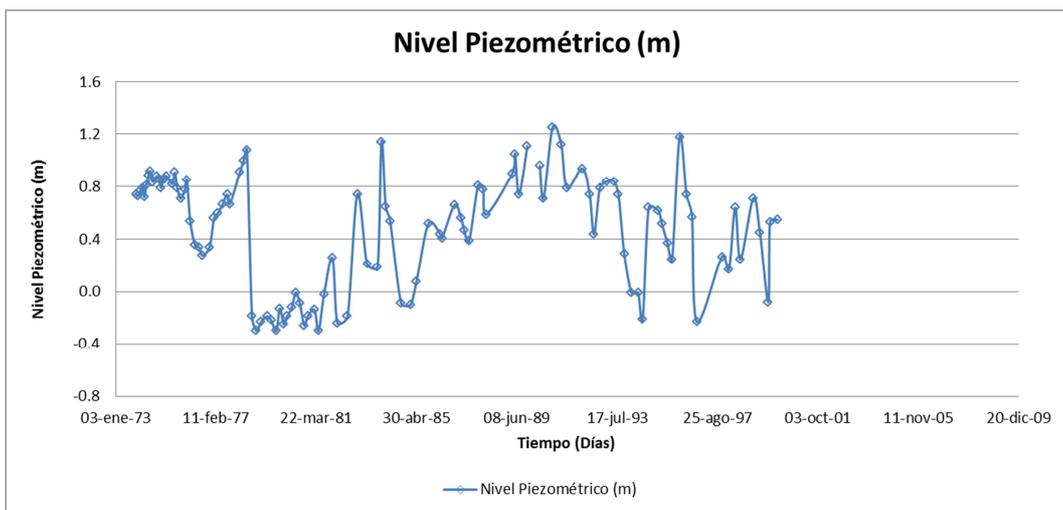


Figura 11. Evolución de la piezometría en el punto de observación 08.11.025

Anejo 2: Datos de entrada (inputs) del modelo matemático

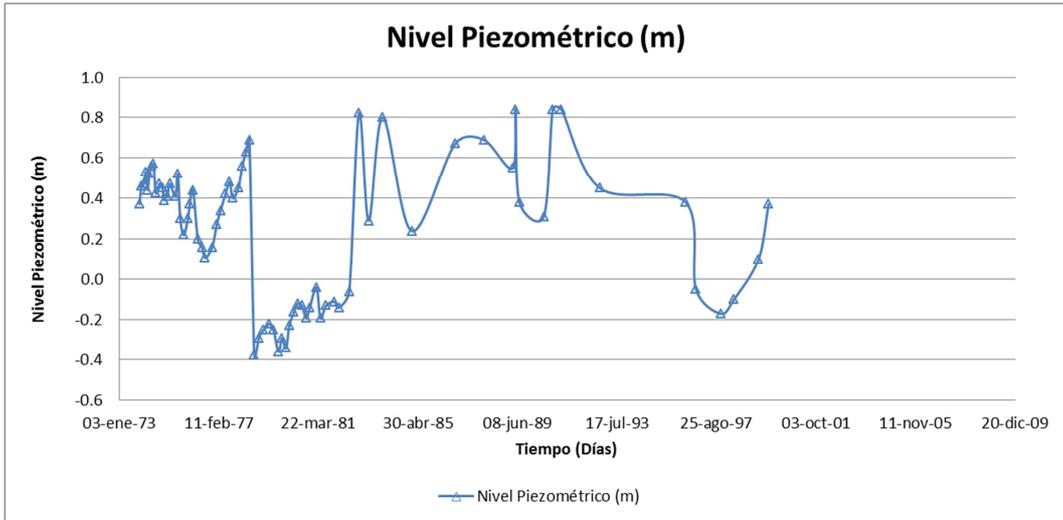


Figura 12. Evolución de la piezometría en el punto de observación 08.11.026

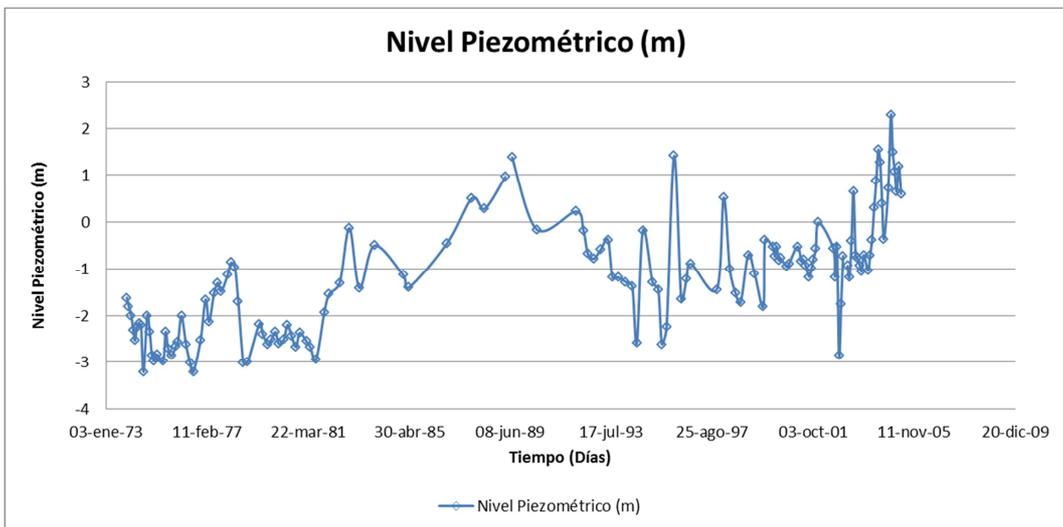


Figura 13. Evolución de la piezometría en el punto de observación 08.11.029

3.2. Concentraciones cloruros

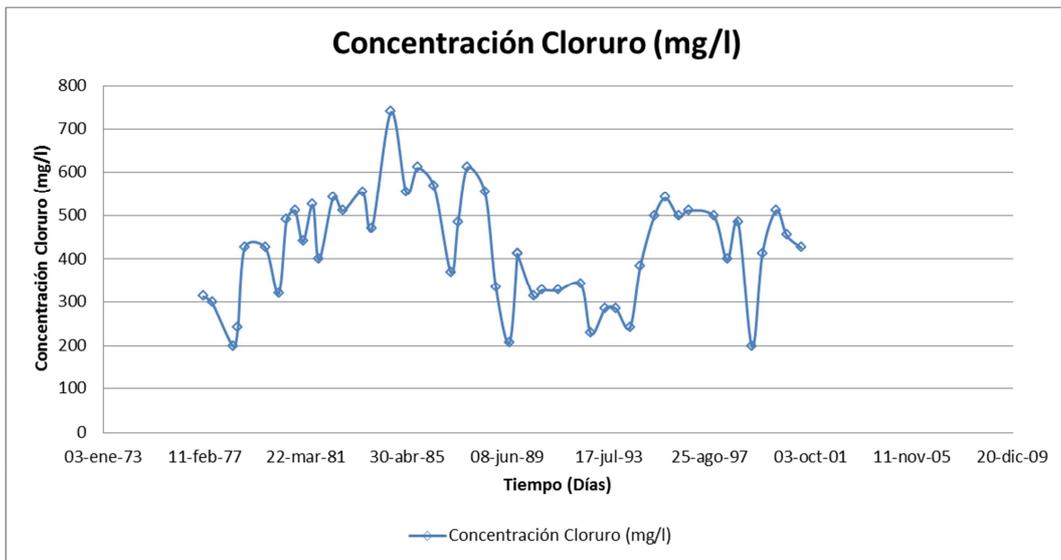


Figura 14. Evolución de la piezometría en el punto de observación 08.07.012

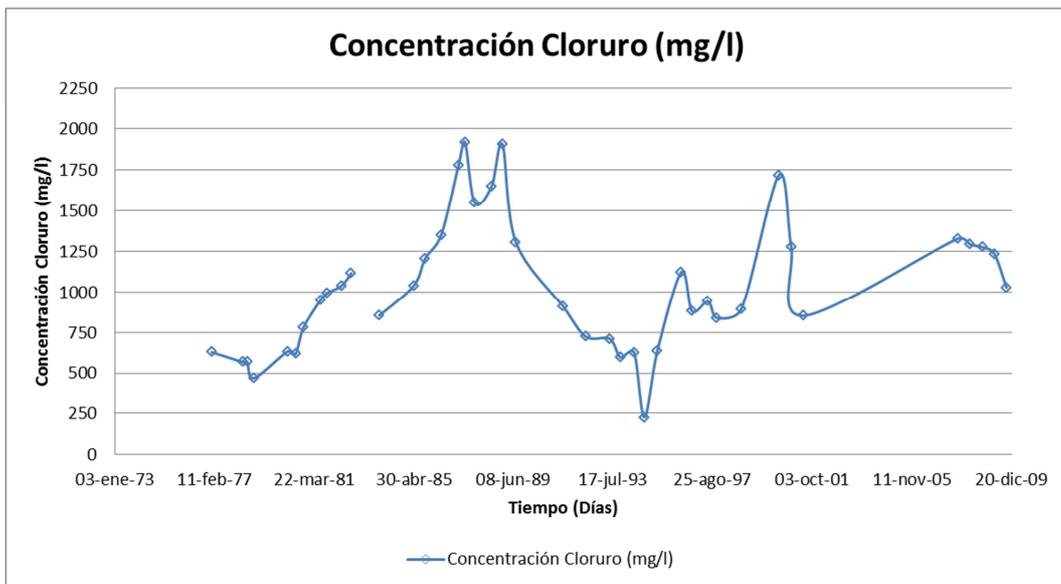


Figura 15. Evolución de la piezometría en el punto de observación 08.11.006

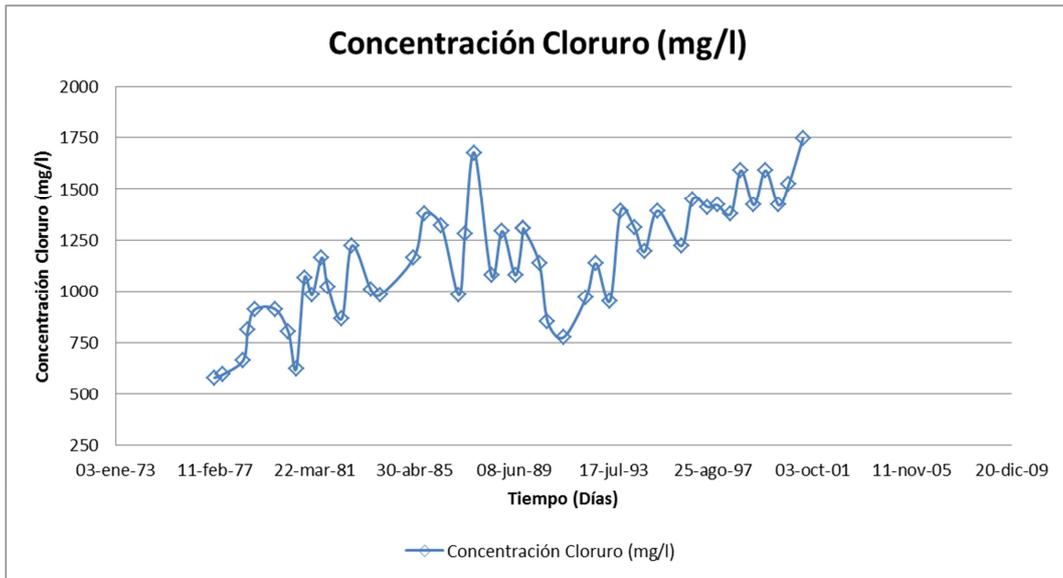


Figura 16. Evolución de la piezometría en el punto de observación 08.11.009

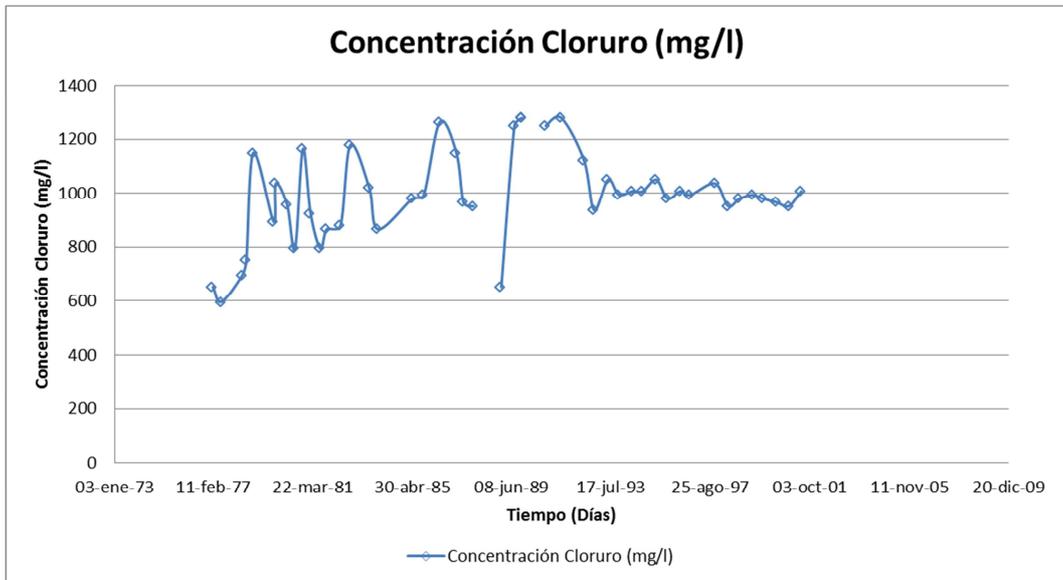


Figura 17. Evolución de la piezometría en el punto de observación 08.11.012

Anejo 2: Datos de entrada (inputs) del modelo matemático

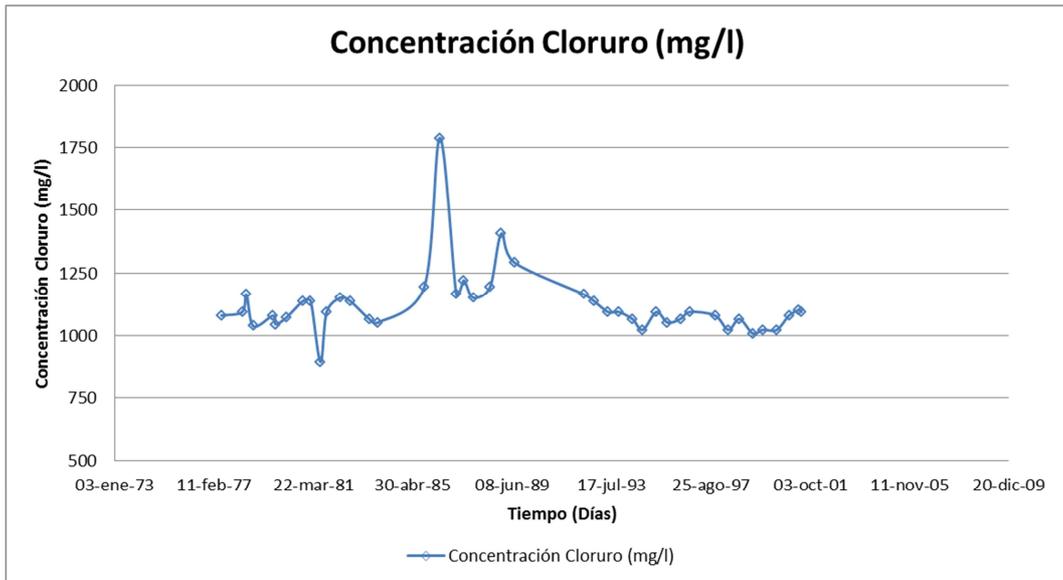


Figura 18. Evolución de la piezometría en el punto de observación 08.11.016

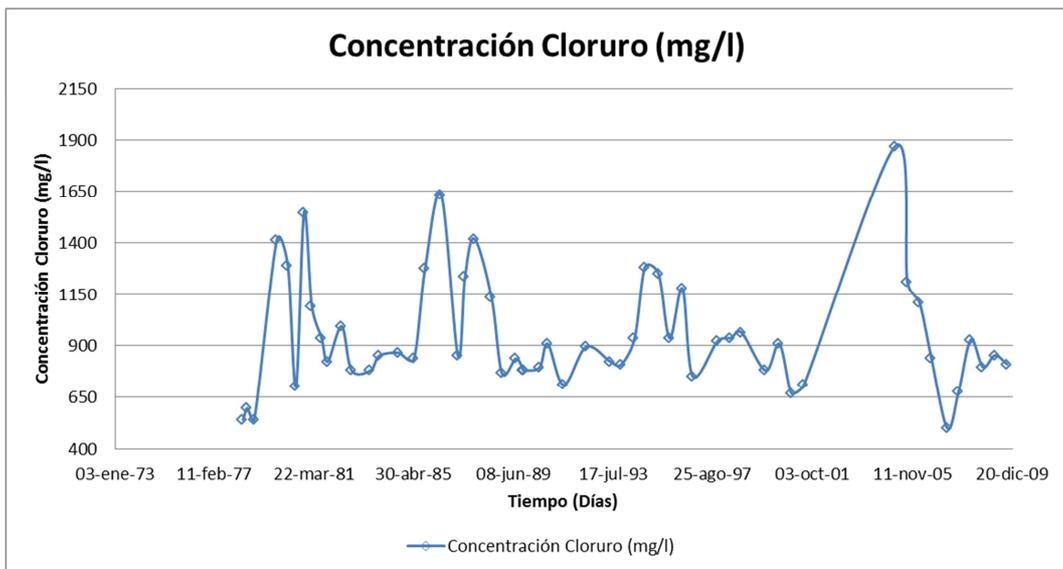


Figura 19. Evolución de la piezometría en el punto de observación 08.11.025

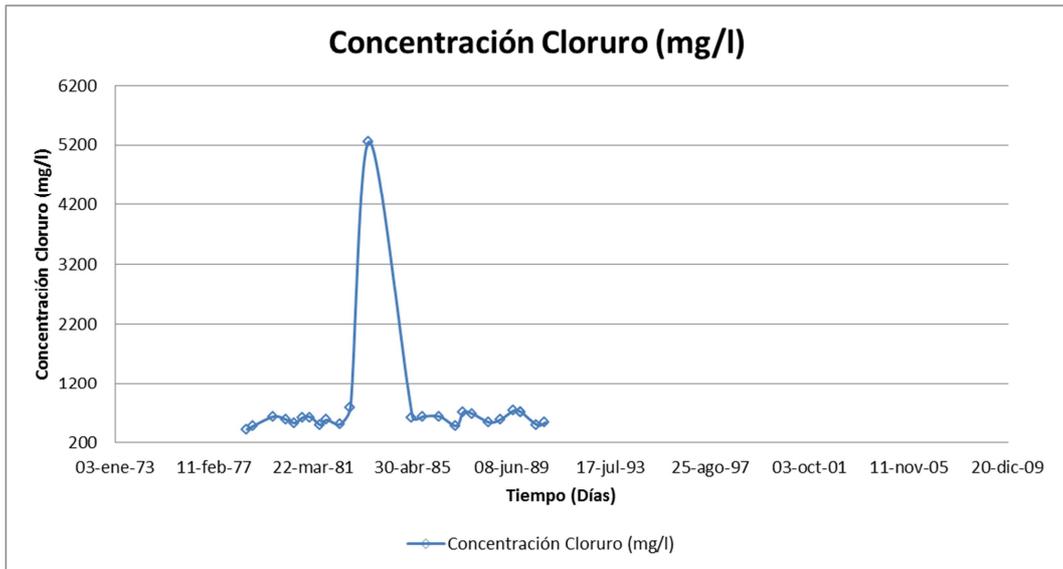


Figura 20. Evolución de la piezometría en el punto de observación 08.11.039

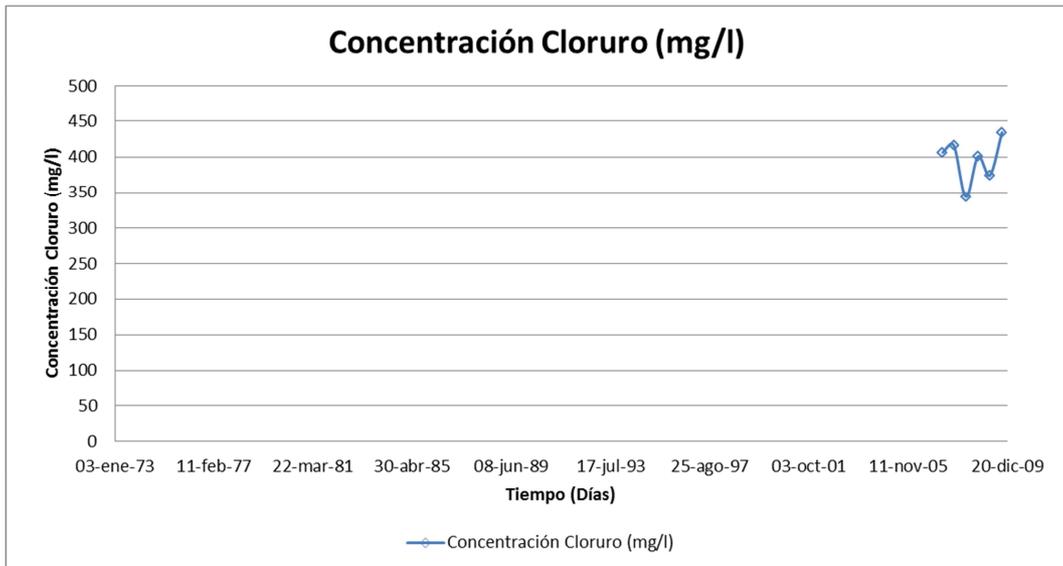


Figura 21. Evolución de la piezometría en el punto de observación 08.11.046

4. Bombeos

Los bombeos utilizados en este trabajo fueron facilitados por la doctora Arianna Renau Pruñonosa.

4.1. Bombeos en Alcocebre

Termino Municipal: Alcalà de Xivert				
Pozo: Anna				
Actualidad: SI				
Periodo	Tipo de Riego	Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraido (m3/año)	Retorno riego (mm/año)
73-75	Manta	33	292500	72
76-79	Manta	49	438750	72
Sup.màx reg. 80-84	Manta	65	585000	72
85- 90	Manta	65	585000	72
91- 92	Manta	65	585000	72
93- 94	Manta	65	585000	72
95- 96	Manta	65	585000	72
97- 98	Manta	65	585000	72
99- 03	Manta	65	585000	72
04- 05	Manta	65	585000	72
06- 07	Manta	65	585000	72
08- 09	Manta	65	585000	72
Obs: RIEGA SIEMPRE A MANTA				
Dot. Riego MANTA:		9000	m3/ha/año	

Figura 22. Pozo Anna

Anejo 2: Datos de entrada (inputs) del modelo matemático

Termino Municipal: Alcalá de Xivert		Pozo: Racó-Vale		Actualidad: NO		
Sup.máx reg.	Periodo	Tipo de Riego		Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraido (m3/año)	Retorno riego (mm/año)
	73-75	Manta		25	225000	72
	76-79	Manta		38	337500	72
	80-84	Manta		50	450000	72
	85- 90	Manta		50	450000	72
	91- 92	Manta		50	450000	72
		Manta	Goteo			
	93- 94	100%	0%	50	450000	72
	95- 96	50%	50%	50	397858	46
	97- 98	0%	100%	50	397858	20
	99- 03	0%	100%	50	397858	20
	04- 05	0%	70%	30	337500	20
	06- 07	0%	40%	16	180000	20
	Obs:					
Dot. Riego MANTA:		9000		m3/ha/año		
Dot. Riego GOTE0:		5000		m3/ha/año		

Figura 23. Pozo Racó-Vale

Termino Municipal: Alcalá Xivert		Pozo: Tossalet1		Actualidad: NO		
Sup.máx reg.	Periodo	Tipo de Riego		Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraido (m3/año)	Retorno riego (mm/año)
	73-75	Manta		21	189000	72
	76-79	Manta		32	283500	72
	80-84	Manta		42	378000	72
	85- 90	Manta		42	378000	72
Obs:						
Dot. Riego MANTA:		9000		m3/ha/año		

Figura 24. Pozo Tossalet1

Anejo 2: Datos de entrada (inputs) del modelo matemático

Termino Municipal: Alcalá Xvert					
Pozo: Tossalet2					
Actualidad: SI					
Sup.máx reg.	Periodo	Tipo de Riego	Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraido (m3/año)	Retorno riego (mm/año)
	73-75	Goteo	21	105000	20
	76-79	Goteo	32	157500	20
	80-84	Goteo	42	210000	20
	85- 90	Goteo	42	210000	20
	91- 92	Goteo	42	210000	20
	93- 94	Goteo	42	210000	20
	95- 96	Goteo	42	210000	20
	97- 98	Goteo	42	210000	20
	99- 03	Goteo	42	210000	20
	04- 05	Goteo	38	189000	20
	06- 07	Goteo	20	100000	20
	08- 09	Goteo	10	50000	20
Obs:					
Dot. Riego GOTE0:		5000	m3/ha/año		

Figura 25. Pozo Tossalet2

Termino Municipal: Alcalá de Xvert						
Pozo: Palaba-Estopet-VE. Fuera						
Actualidad: SI						
Sup.máx reg.	Periodo	Tipo de Riego		Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraido (m3/año)	Retorno riego (mm/año)
	73-75	Manta		113	1012500	72
	76-79	Manta		169	1518750	72
	80-84	Manta		225	2025000	72
	85- 90	Manta		225	2025000	72
	91- 92	Manta		225	2025000	72
	93- 94	Manta	Goteo	225	2025000	72
		100%	0%			
	95- 96	50%	50%	225	2025000	46
	97- 98	0%	100%	225	2025000	20
	99- 03	0%	100%	225	2025000	20
	04- 05	0%	50%	203	1012500	20
	06- 07	0%	44%	180	900000	20
	08- 09	0%	42%	169	843750	20
	Obs:					
Dot. Riego MANTA:		9000	m3/ha/año			
Dot. Riego GOTE0:		5000	m3/ha/año			

Figura 26. Pozo Palaba-Estopet

4.2. Bombeos en Cabanes

Termino Municipal: Cabanes						
Pozo: Diluvio						
Actualidad: SI						
Sup. máx reg.	Periodo	Tipo de Riego		Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraido (m3/año)	Retorno riego (mm/año)
	73-75	Manta		44	396000	72
	76-79	Manta		66	594000	72
	80-84	Manta		88	792000	72
	85- 90	Manta		88	792000	72
	91- 92	Manta		88	792000	72
		Manta	Goteo			
	93- 94	100%	0%	88	792000	72
	95- 96	50%	50%	88	616000	46
	97- 98	0%	100%	88	440000	20
	99- 03	0%	100%	88	440000	20
	04- 05	0%	90%	79	396000	20
	06- 07	0%	80%	70	352000	20
	08- 09	0%	75%	66	330000	20
Obs:						
Dot. Riego MANTA:		9000		m3/ha/año		
Dot. Riego GOTEO:		5000		m3/ha/año		

Figura 27. Pozo Diluvio

Termino Municipal: Cabanes						
Pozo: Hidraulica						
Actualidad: SI						
Sup. máx reg.	Periodo	Tipo de Riego		Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraido (m3/año)	Retorno riego (mm/año)
	73-75	Manta		18	162000	72
	76-79	Manta		27	243000	72
	80-84	Manta		36	324000	72
	85- 90	Manta		36	324000	72
	91- 92	Manta		36	324000	72
		Manta	Goteo			
	93- 94	100%	0%	36	324000	72
	95- 96	50%	50%	36	252000	46
	97- 98	0%	100%	36	180000	20
	99- 03	0%	100%	36	180000	20
	04- 05	0%	90%	32	162000	20
	06- 07	0%	80%	29	144000	20
	08- 09	0%	75%	27	135000	20
Obs:						
Dot. Riego MANTA:		9000		m3/ha/año		
Dot. Riego GOTEO:		5000		m3/ha/año		

Figura 28. Pozo Hidráulica

Anejo 2: Datos de entrada (inputs) del modelo matemático

Termino Municipal: Cabanes						
Pozo: Laguna						
Actualidad: SI						
Sup. máx reg.	Periodo	Tipo de Riego		Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraido (m3/año)	Retorno riego (mm/año)
	73-75	Manta		50	450000	72
	76-79	Manta		75	675000	72
	80-84	Manta		100	900000	72
	85- 90	Manta		100	900000	72
	91- 92	Manta		100	900000	72
		Manta	Goteo			
	93- 94	100%	0%	100	900000	72
	95- 96	50%	50%	100	700000	46
	97- 98	0%	100%	100	500000	20
	99- 03	0%	100%	100	500000	20
	04- 05	0%	90%	90	450000	20
	06- 07	0%	80%	80	400000	20
	08- 09	0%	75%	75	375000	20
Obs:						
Dot. Riego MANTA:		9000		m3/ha/año		
Dot. Riego GOTEO:		5000		m3/ha/año		

Figura 29. Pozo Laguna

Termino Municipal: Cabanes						
Pozo: Polido						
Actualidad: SI						
Sup. máx reg.	Periodo	Tipo de Riego		Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraido (m3/año)	Retorno riego (mm/año)
	73-75	Manta		12	106200	72
	76-79	Manta		18	159300	72
	80-84	Manta		24	212400	72
	85- 90	Manta		24	212400	72
	91- 92	Manta		24	212400	72
		Manta	Goteo			
	93- 94	100%	0%	24	212400	72
	95- 96	50%	50%	24	165200	46
	97- 98	0%	100%	24	118000	20
	99- 03	0%	100%	24	118000	20
	04- 05	0%	90%	21	106200	20
	06- 07	0%	80%	19	94400	20
	08- 09	0%	75%	18	88500	20
Obs:						
Dot. Riego MANTA:		9000		m3/ha/año		
Dot. Riego GOTEO:		5000		m3/ha/año		

Figura 30. Pozo Polido

Anejo 2: Datos de entrada (inputs) del modelo matemático

Termino Municipal: Cabanes						
Pozo: Progreso						
Actualidad: SI						
Sup.máx reg.	Periodo	Tipo de Riego		Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraido (m3/año)	Retorno riego (mm/año)
	73-75	Manta		57	513000	72
	76-79	Manta		86	769500	72
	80-84	Manta		114	1026000	72
	85- 90	Manta		114	1026000	72
	91- 92	Manta		114	1026000	72
		Manta	Goteo			
	93- 94	100%	0%	114	1026000	72
	95- 96	50%	50%	114	798000	46
	97- 98	0%	100%	114	570000	20
	99- 03	0%	100%	114	570000	20
	04- 05	0%	90%	103	513000	20
	06- 07	0%	80%	91	456000	20
	08- 09	0%	75%	86	427500	20
Obs:						
Dot. Riego MANTA:		9000		m3/ha/año		
Dot. Riego GOTEO:		5000		m3/ha/año		

Figura 31. Pozo Progreso

Termino Municipal: Cabanes						
Pozo: R Cabanes						
Actualidad: SI						
Sup.máx reg.	Periodo	Tipo de Riego		Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraido (m3/año)	Retorno riego (mm/año)
	73-75	Manta		55	493200	72
	76-79	Manta		82	739800	72
	80-84	Manta		110	986400	72
	85- 90	Manta		110	986400	72
	91- 92	Manta		110	986400	72
		Manta	Goteo			
	93- 94	100%	0%	110	986400	72
	95- 96	50%	50%	110	767200	46
	97- 98	0%	100%	110	548000	20
	99- 03	0%	100%	110	548000	20
	04- 05	0%	90%	99	493200	20
	06- 07	0%	80%	88	438400	20
	08- 09	0%	75%	82	411000	20
Obs:						
Dot. Riego MANTA:		9000		m3/ha/año		
Dot. Riego GOTEO:		5000		m3/ha/año		

Figura 32. Pozo R. Cabanes

Anejo 2: Datos de entrada (inputs) del modelo matemático

Termino Municipal: Cabanes						
Pozo: R.Localizados						
Actualidad: SI						
Sup.máx reg.	Periodo	Tipo de Riego		Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraido (m3/año)	Retorno riego (mm/año)
	73-75	Manta		54	486000	72
	76-79	Manta		81	729000	72
	80-84	Manta		108	972000	72
	85- 90	Manta		108	972000	72
	91- 92	Manta		108	972000	72
		Manta	Goteo			
	93- 94	100%	0%	108	972000	72
	95- 96	50%	50%	108	756000	46
	97- 98	0%	100%	108	540000	20
	99- 03	0%	100%	108	540000	20
	04- 05	0%	90%	97.2	486000	20
	06- 07	0%	80%	86.4	432000	20
	08- 09	0%	75%	81	405000	20
Obs:						
Dot. Riego MANTA:		9000		m3/ha/año		
Dot. Riego GOTEO:		5000		m3/ha/año		

Figura 33. Pozo R. Localizados

Termino Municipal: Cabanes						
Pozo: Soquets						
Actualidad: SI						
Sup.máx reg.	Periodo	Tipo de Riego		Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraido (m3/año)	Retorno riego (mm/año)
	73-75	Manta		22	201600	72
	76-79	Manta		34	302400	72
	80-84	Manta		45	403200	72
	85- 90	Manta		45	403200	72
	91- 92	Manta		45	403200	72
		Manta	Goteo			
	93- 94	100%	0%	45	403200	72
	95- 96	50%	50%	45	313600	46
	97- 98	0%	100%	45	224000	20
	99- 03	0%	100%	45	224000	20
	04- 05	0%	90%	40	201600	20
	06- 07	0%	80%	36	179200	20
	08- 09	0%	75%	34	168000	20
Obs:						
Dot. Riego MANTA:		9000		m3/ha/año		
Dot. Riego GOTEO:		5000		m3/ha/año		

Figura 34. Pozo Soquets

Anejo 2: Datos de entrada (inputs) del modelo matemático

Termino Municipal: Cabanes						
Pozo: San Isidro						
Actualidad: SI						
Sup.máx reg.	Periodo	Tipo de Riego		Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraido (m3/año)	Retorno riego (mm/año)
	73-75	Manta		31	308340	80
	76-79	Manta		47	462510	80
	80-84	Manta		62	616680	80
	85- 90	Manta		62	616680	80
	91- 92	Manta		62	616680	80
		Manta	Goteo			
	93- 94	100%	0%	62	616680	80
	95- 96	50%	50%	62	477927	51
	97- 98	0%	100%	62	339174	22
	99- 03	0%	100%	62	339174	22
	04- 05	0%	90%	56	305257	22
	06- 07	0%	80%	50	271339	22
	08- 09	0%	75%	47	254381	22
	Obs:					
Dot. Riego MANTA:		9946		m3/ha/año		
Dot. Riego GOTEO:		5471		m3/ha/año		

Figura 35. Pozo S. Isidro

4.3. Bombeos en Oropesa

Termino Municipal: Oropesa					
Pozo Diluvio1					
Actualidad: NO					
	Periodo	Tipo de Riego	Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraido (m3/año)	Retorno riego (mm/año)
Sup.máx reg.	73-75	Manta	44	396000	72
	76-79	Manta	66	594000	72
	80-84	Manta	88	792000	72
Obs:					
Dot. Riego MANTA:		9000	m3/ha/año		

Figura 36. Pozo Diluvio1

Termino Municipal: Oropesa						
Pozo Porvenir						
Actualidad: SI						
	Periodo	Tipo de Riego	Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraido (m3/año)	Retorno riego (mm/año)	
Sup.máx reg.	73-75	Manta	25	223200	72	
	76-79	Manta	37	334800	72	
	80-84	Manta	50	446400	72	
	85- 90	Manta	50	446400	72	
	91- 92	Manta	50	446400	72	
		Manta	Goteo			
	93- 94	100%	0%	50	446400	72
	95- 96	50%	50%	50	347200	46
	97- 98	0%	100%	50	248000	20
	99- 03	0%	100%	50	248000	20
04- 05	0%	90%	45	223200	20	
06- 07	0%	80%	40	198400	20	
08- 09	0%	75%	37	186000	20	
Obs:						
Dot. Riego MANTA:		9000	m3/ha/año			
Dot. Riego GOTEO:		5000	m3/ha/año			

Figura 37. Pozo Porvenir

Anejo 2: Datos de entrada (inputs) del modelo matemático

Termino Municipal: Oropesa					
Pozo: Progreso viejo+2					
Actualidad NO					
	Periodo	Tipo de Riego	Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraido (m3/año)	Retorno riego (mm/año)
	73-75	Manta	57	511200	72
	76-79	Manta	85	766800	72
Sup.máx reg.	80-84	Manta	114	1022400	72
Obs:					
Dot. Riego MANTA:		9000	m3/ha/año		

Figura 38. Pozo Progreso-viejo 2

Termino Municipal: Oropesa						
Pozo: Riegos_Fuera						
Actualidad: SI						
	Periodo	Tipo de Riego	Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraido (m3/año)	Retorno riego (mm/año)	
	73-75	Manta	16	144000	72	
	76-79	Manta	24	216000	72	
Sup.máx reg.	80-84	Manta	32	288000	72	
	85- 90	Manta	32	288000	72	
	91- 92	Manta	32	288000	72	
		Manta	Goteo			
	93- 94	100%	0%	32	288000	72
	95- 96	50%	50%	32	224000	46
	97- 98	0%	100%	32	160000	20
	99- 03	0%	100%	32	160000	20
	04- 05	0%	100%	32	160000	20
	06- 07	0%	100%	32	160000	20
	08- 09	0%	75%	24	120000	20
Obs:						
Dot. Riego MANTA:		9000	m3/ha/año			
Dot. Riego GOTEO:		5000	m3/ha/año			

Figura 39. Pozo Riegos_Fuera

Anejo 2: Datos de entrada (inputs) del modelo matemático

Termino Municipal: Oropesa						
Pozo: 29						
Actualidad: SI						
Sup.máx reg.	Periodo	Tipo de Riego		Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraído (m3/año)	Retorno riego (mm/año)
	73-75	Manta		16	167099	72
	76-79	Manta		24	250648	72
	80-84	Manta		32	334197	72
	85- 90	Manta		32	334197	72
	91- 92	Manta		32	334197	72
		Manta	Goteo			
	93- 94	100%	0%	32	334197	72
	95- 96	50%	50%	32	259931	46
	97- 98	0%	100%	32	185665	20
	99- 03	0%	100%	32	185665	20
	04- 05	0%	100%	32	185665	20
	06- 07	0%	100%	32	185665	20
08- 09	0%	75%	24	139249	20	
Obs:						
Dot. Riego MANTA:		9000		m3/ha/año		
Dot. Riego GOTEO:		5000		m3/ha/año		

Figura 40. Pozo 29

4.4. Bombeos en Torreblanca

Termino Municipal: Torreblanca						
Pozo: 149						
Actualidad: SI						
Sup.máx reg.	Periodo	Tipo de Riego		Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraído (m3/año)	Retorno riego (mm/año)
	73-75	Manta		33	292500	72
	76-79	Manta		49	438750	72
	80-84	Manta		65	585000	72
	85- 90	Manta		65	585000	72
	91- 92	Manta		65	585000	72
		Manta	Goteo			
	93- 94	100%	0%	65	585000	72
	95- 96	50%	50%	65	455000	46
	97- 98	0%	100%	65	325000	20
	99- 03	0%	100%	65	325000	20
	04- 05	0%	90%	59	292500	20
	06- 07	0%	80%	52	260000	20
	08- 09	0%	75%	49	243750	20
Obs:						
Dot. Riego MANTA:		9000		m3/ha/año		
Dot. Riego GOTEO:		5000		m3/ha/año		

Figura 41. Pozo 149

Termino Municipal: Torreblanca						
Pozo: 890						
Actualidad: SI						
Sup.máx reg.	Periodo	Tipo de Riego		Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraído (m3/año)	Retorno riego (mm/año)
	73-75	Manta		21	191250	72
	76-79	Manta		32	286875	72
	80-84	Manta		43	382500	72
	85- 90	Manta		43	382500	72
	91- 92	Manta		43	382500	72
		Manta	Goteo			
	93- 94	100%	0%	43	382500	72
	95- 96	50%	50%	43	297500	46
	97- 98	0%	100%	43	212500	20
	99- 03	0%	100%	43	212500	20
	04- 05	0%	90%	38	191250	20
	06- 07	0%	80%	34	170000	20
	08- 09	0%	75%	32	159375	20
Obs:						
Dot. Riego MANTA:		9000		m3/ha/año		
Dot. Riego GOTEO:		5000		m3/ha/año		

Figura 42. Pozo 890

Anejo 2: Datos de entrada (inputs) del modelo matemático

Termino Municipal: Torreblanca						
Pozo: 2076						
Actualidad: SI						
Sup.máx reg.	Periodo	Tipo de Riego		Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraido (m3/año)	Retorno riego (mm/año)
	73-75	Manta		31	281250	72
	76-79	Manta		47	421875	72
	80-84	Manta		63	562500	72
	85- 90	Manta		63	562500	72
	91- 92	Manta		63	562500	72
		Manta	Goteo			
	93- 94	100%	0%	63	562500	72
	95- 96	50%	50%	63	437500	46
	97- 98	0%	100%	63	312500	20
	99- 03	0%	100%	63	312500	20
	04- 05	0%	90%	56	281250	20
	06- 07	0%	80%	50	250000	20
	08- 09	0%	75%	47	234375	20
Obs:						
Dot. Riego MANTA:		9000		m3/ha/año		
Dot. Riego GOTEIO:		5000		m3/ha/año		

Figura 43. Pozo 2076

Termino Municipal: Torreblanca						
Pozo: 2499						
Actualidad: SI						
Sup.máx reg.	Periodo	Tipo de Riego		Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraido (m3/año)	Retorno riego (mm/año)
	73-75	Manta		29	258750	72
	76-79	Manta		43	388125	72
	80-84	Manta		58	517500	72
	85- 90	Manta		58	517500	72
	91- 92	Manta		58	517500	72
		Manta	Goteo			
	93- 94	100%	0%	58	517500	72
	95- 96	50%	50%	58	402500	46
	97- 98	0%	100%	58	287500	20
	99- 03	0%	100%	58	287500	20
	04- 05	0%	90%	52	258750	20
	06- 07	0%	80%	46	230000	20
	08- 09	0%	75%	43	215625	20
Obs:						
Dot. Riego MANTA:		9000		m3/ha/año		
Dot. Riego GOTEIO:		5000		m3/ha/año		

Figura 44. Pozo 2499

Anejo 2: Datos de entrada (inputs) del modelo matemático

Termino Municipal: Torreblanca						
Pozo: 2945						
Actualidad: SI						
Sup.máx reg.	Periodo	Tipo de Riego		Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraído (m3/año)	Retorno riego (mm/año)
	73-75	Manta		50	490909	79
	76-79	Manta		75	736364	79
	80-84	Manta		100	981818	79
	85- 90	Manta		100	981818	79
	91- 92	Manta		100	981818	79
		Manta	Goteo			
	93- 94	100%	0%	100	981818	79
	95- 96	50%	50%	100	760909	50
	97- 98	0%	100%	100	540000	22
	99- 03	0%	100%	100	540000	22
	04- 05	0%	90%	90	486000	22
	06- 07	0%	80%	80	432000	22
	08- 09	0%	75%	75	405000	22
	Obs:					
Dot. Riego MANTA:		9818.182		m3/ha/año		
Dot. Riego GOTEO:		5400		m3/ha/año		

Figura 45. Pozo 2945

Termino Municipal: Torreblanca						
Pozo: 3948						
Actualidad: SI						
Sup.máx reg.	Periodo	Tipo de Riego		Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraído (m3/año)	Retorno riego (mm/año)
	73-75	Manta		90	810000	72
	76-79	Manta		135	1215000	72
	80-84	Manta		180	1620000	72
	85- 90	Manta		180	1620000	72
	91- 92	Manta		180	1620000	72
		Manta	Goteo			
	93- 94	100%	0%	180	1620000	72
	95- 96	50%	50%	180	1260000	46
	97- 98	0%	100%	180	900000	20
	99- 03	0%	100%	180	900000	20
	04- 05	0%	90%	162	810000	20
	06- 07	0%	80%	144	720000	20
	08- 09	0%	75%	135	675000	20
	Obs:					
Dot. Riego MANTA:		9000		m3/ha/año		
Dot. Riego GOTEO:		5000		m3/ha/año		

Figura 46. Pozo 3948

Anejo 2: Datos de entrada (inputs) del modelo matemático

		Termino Municipal: Torreblanca				
		Pozo: 4412				
		Actualidad: SI				
Sup.máx reg.	Periodo	Tipo de Riego		Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraído (m3/año)	Retorno riego (mm/año)
	73-75	Manta		30	270000	72
	76-79	Manta		45	405000	72
	80-84	Manta		60	540000	72
	85- 90	Manta		60	540000	72
	91- 92	Manta		60	540000	72
		Manta	Goteo			
	93- 94	100%	0%	60	540000	72
	95- 96	50%	50%	60	420000	46
	97- 98	0%	100%	60	300000	20
	99- 03	0%	100%	60	300000	20
	04- 05	0%	90%	54	270000	20
	06- 07	0%	80%	48	240000	20
	08- 09	0%	75%	45	225000	20
	Obs:					
Dot. Riego MANTA:		9000		m3/ha/año		
Dot. Riego GOTEO:		5000		m3/ha/año		

Figura 47. Pozo 4412

		Termino Municipal: Torreblanca				
		Pozo: 7586				
		Actualidad: SI				
Sup.máx reg.	Periodo	Tipo de Riego		Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraído (m3/año)	Retorno riego (mm/año)
	73-75	Manta		26	236250	72
	76-79	Manta		39	354375	72
	80-84	Manta		53	472500	72
	85- 90	Manta		53	472500	72
	91- 92	Manta		53	472500	72
		Manta	Goteo			
	93- 94	100%	0%	53	472500	72
	95- 96	50%	50%	53	367500	46
	97- 98	0%	100%	53	262500	20
	99- 03	0%	100%	53	262500	20
	04- 05	0%	90%	47	236250	20
	06- 07	0%	80%	42	210000	20
	08- 09	0%	75%	39	196875	20
	Obs:					
Dot. Riego MANTA:		9000		m3/ha/año		
Dot. Riego GOTEO:		5000		m3/ha/año		

Figura 48. Pozo 7586

Anejo 2: Datos de entrada (inputs) del modelo matemático

Termino Municipal: Torreblanca						
Pozo: 8135						
Actualidad: SI						
Sup.máx reg.	Periodo	Tipo de Riego		Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraído (m3/año)	Retorno riego (mm/año)
	73-75	Manta		133	1192500	72
	76-79	Manta		199	1788750	72
	80-84	Manta		265	2385000	72
	85- 90	Manta		265	2385000	72
	91- 92	Manta		265	2385000	72
		Manta	Goteo			
	93- 94	100%	0%	265	2385000	72
	95- 96	50%	50%	265	1855000	46
	97- 98	0%	100%	265	1325000	20
	99- 03	0%	100%	265	1325000	20
	04- 05	0%	90%	239	1192500	20
	06- 07	0%	80%	212	1060000	20
	08- 09	0%	75%	199	993750	20
Obs:						
Dot. Riego MANTA:		9000		m3/ha/año		
Dot. Riego GOTEO:		5000		m3/ha/año		

Figura 49. Pozo 8135

Termino Municipal: Torreblanca						
Pozo: 8136						
Actualidad: SI						
Sup.máx reg.	Periodo	Tipo de Riego		Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraído (m3/año)	Retorno riego (mm/año)
	73-75	Manta		54	483750	72
	76-79	Manta		81	725625	72
	80-84	Manta		108	967500	72
	85- 90	Manta		108	967500	72
	91- 92	Manta		108	967500	72
		Manta	Goteo			
	93- 94	100%	0%	108	967500	72
	95- 96	50%	50%	108	752500	46
	97- 98	0%	100%	108	537500	20
	99- 03	0%	100%	108	537500	20
	04- 05	0%	90%	97	483750	20
	06- 07	0%	80%	86	430000	20
	08- 09	0%	75%	81	403125	20
Obs:						
Dot. Riego MANTA:		9000		m3/ha/año		
Dot. Riego GOTEO:		5000		m3/ha/año		

Figura 50. Pozo 8136

Anejo 2: Datos de entrada (inputs) del modelo matemático

Termino Municipal: Torreblanca						
Pozo: 8391						
Actualidad: SI						
Sup. máx reg.	Periodo	Tipo de Riego		Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraido (m3/año)	Retorno riego (mm/año)
	73-75	Manta		13	117143	75
	76-79	Manta		19	175715	75
	80-84	Manta		25	234287	75
	85- 90	Manta		25	234287	75
	91- 92	Manta		25	234287	75
		Manta	Goteo			
	93- 94	100%	0%	25	234287	75
	95- 96	50%	50%	25	181572	48
	97- 98	0%	100%	25	128858	21
	99- 03	0%	100%	25	128858	21
	04- 05	0%	90%	23	115972	21
	06- 07	0%	80%	20	103086	21
	08- 09	0%	75%	19	96643	21
	Obs:					
Dot. Riego MANTA:		9371		m3/ha/año		
Dot. Riego GOTEO:		5154		m3/ha/año		

Figura 51. Pozo 8391

Termino Municipal: Torreblanca						
Pozo: 8443						
Actualidad: SI						
Sup. máx reg.	Periodo	Tipo de Riego		Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraido (m3/año)	Retorno riego (mm/año)
	73-75	Manta		20	180000	72
	76-79	Manta		30	270000	72
	80-84	Manta		40	360000	72
	85- 90	Manta		40	360000	72
	91- 92	Manta		40	360000	72
		Manta	Goteo			
	93- 94	100%	0%	40	360000	72
	95- 96	50%	50%	40	280000	46
	97- 98	0%	100%	40	200000	20
	99- 03	0%	100%	40	200000	20
	04- 05	0%	90%	36	180000	20
	06- 07	0%	80%	32	160000	20
	08- 09	0%	75%	30	150000	20
	Obs:					
Dot. Riego MANTA:		9000		m3/ha/año		
Dot. Riego GOTEO:		5000		m3/ha/año		

Figura 52. Pozo 8443

Anejo 2: Datos de entrada (inputs) del modelo matemático

		Termino Municipal: Torreblanca				
		Pozo: 513_Fuera				
		Actualidad: SI				
Sup.máx reg.	Periodo	Tipo de Riego		Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraido (m3/año)	Retorno riego (mm/año)
	73-75	Manta		80	720000	72
	76-79	Manta		120	1080000	72
	80-84	Manta		160	1440000	72
	85- 90	Manta		160	1440000	72
	91- 92	Manta		160	1440000	72
		Manta	Goteo			
	93- 94	100%	0%	160	1440000	72
	95- 96	50%	50%	160	1120000	46
	97- 98	0%	100%	160	800000	20
	99- 03	0%	100%	160	800000	20
	04- 05	0%	90%	160	800000	20
	06- 07	0%	80%	160	800000	20
	08- 09	0%	75%	120	600000	20
Obs:						
Dot. Riego MANTA:		9000		m3/ha/año		
Dot. Riego GOTEO:		5000		m3/ha/año		

Figura 53. Pozo 513_Fuera

		Termino Municipal: Torreblanca				
		Pozo: 6919_Fuera				
		Actualidad: SI				
Sup.máx reg.	Periodo	Tipo de Riego		Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraido (m3/año)	Retorno riego (mm/año)
	73-75	Manta		250	2250000	72
	76-79	Manta		375	3375000	72
	80-84	Manta		500	4500000	72
	85- 90	Manta		500	4500000	72
	91- 92	Manta		500	4500000	72
		Manta	Goteo			
	93- 94	100%	0%	500	4500000	72
	95- 96	50%	50%	500	3500000	46
	97- 98	0%	100%	500	2500000	20
	99- 03	0%	100%	500	2500000	20
	04- 05	0%	90%	500	2500000	20
	06- 07	0%	80%	500	2500000	20
	08- 09	0%	75%	375	1875000	20
Obs:						
Dot. Riego MANTA:		9000		m3/ha/año		
Dot. Riego GOTEO:		5000		m3/ha/año		

Figura 54. Pozo 6919_Fuera

Anejo 2: Datos de entrada (inputs) del modelo matemático

		Termino Municipal: Torreblanca				
		Pozo: 258_Fuera				
		Actualidad: SI				
Sup.máx reg.	Periodo	Tipo de Riego		Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraido (m3/año)	Retorno riego (mm/año)
	73-75	Manta		50	450000	72
	76-79	Manta		75	675000	72
	80-84	Manta		100	900000	72
	85- 90	Manta		100	900000	72
	91- 92	Manta		100	900000	72
		Manta	Goteo			
	93- 94	100%	0%	100	900000	72
	95- 96	50%	50%	100	700000	46
	97- 98	0%	100%	100	500000	20
	99- 03	0%	100%	100	500000	20
	04- 05	0%	90%	100	500000	20
	06- 07	0%	80%	100	500000	20
	08- 09	0%	75%	75	375000	20
	Obs:					
Dot. Riego MANTA:		9000		m3/ha/año		
Dot. Riego GOTEO:		5000		m3/ha/año		

Figura 55. Pozo 258_Fuera

		Termino Municipal: Torreblanca				
		Pozo: 3896_Fuera				
		Actualidad: SI				
Sup.máx reg.	Periodo	Tipo de Riego		Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraido (m3/año)	Retorno riego (mm/año)
	73-75	Manta		70	630000	72
	76-79	Manta		105	945000	72
	80-84	Manta		140	1260000	72
	85- 90	Manta		140	1260000	72
	91- 92	Manta		140	1260000	72
		Manta	Goteo			
	93- 94	100%	0%	140	1260000	72
	95- 96	50%	50%	140	980000	46
	97- 98	0%	100%	140	700000	20
	99- 03	0%	100%	140	700000	20
	04- 05	0%	90%	140	700000	20
	06- 07	0%	80%	140	700000	20
	08- 09	0%	75%	105	525000	20
	Obs:					
Dot. Riego MANTA:		9000		m3/ha/año		
Dot. Riego GOTEO:		5000		m3/ha/año		

Figura 56. Pozo 3896_Fuera

4.5. Bombeos virtuales

Termino Municipal: Torreblanca						
Pozo: P1						
Actualidad: SI						
Sup.máx reg.	Periodo	Tipo de Riego		Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraido (m3/año)	Retorno riego (mm/año)
	73-75	Manta		10	180000	72
	76-79	Manta		15	180000	72
	80-84	Manta		20	180000	72
	85- 90	Manta		20	180000	72
	91- 92	Manta		20	180000	72
		Manta	Goteo			
	93- 94	100%	0%	20	180000	72
	95- 96	50%	50%	20	100000	46
	97- 98	0%	100%	20	100000	20
	99- 03	0%	100%	20	100000	20
	04- 05	0%	90%	18	100000	20
	06- 07	0%	80%	16	100000	20
	08- 09	0%	75%	15	100000	20
	Obs:					
Dot. Riego MANTA:		9000		m3/ha/año		
Dot. Riego GOTEO:		5000		m3/ha/año		

Figura 57. Pozo Virtual 1

Termino Municipal: Torreblanca						
Pozo: P2						
Actualidad: SI						
Sup.máx reg.	Periodo	Tipo de Riego		Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraido (m3/año)	Retorno riego (mm/año)
	76-79	Manta		15	180000	72
	80-84	Manta		20	180000	72
	85- 90	Manta		20	180000	72
	91- 92	Manta		20	180000	72
		Manta	Goteo			
	93- 94	100%	0%	20	180000	72
	95- 96	50%	50%	20	100000	46
	97- 98	0%	100%	20	100000	20
	99- 03	0%	100%	20	100000	20
	04- 05	0%	90%	18	100000	20
	06- 07	0%	80%	16	100000	20
	08- 09	0%	75%	15	100000	20
	Obs:					
	Dot. Riego MANTA:		9000		m3/ha/año	
Dot. Riego GOTEO:		5000		m3/ha/año		

Figura 58. Pozo Virtual 2

Anejo 2: Datos de entrada (inputs) del modelo matemático

Termino Municipal: Torreblanca						
Pozo: P3						
Actualidad: SI						
Sup.máx reg.	Periodo	Tipo de Riego		Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraido (m3/año)	Retorno riego (mm/año)
	80-84	Manta		20	180000	72
	85- 90	Manta		20	180000	72
	91- 92	Manta		20	180000	72
		Manta	Goteo			
	93- 94	100%	0%	20	180000	72
	95- 96	50%	50%	20	100000	46
	97- 98	0%	100%	20	100000	20
	99- 03	0%	100%	20	100000	20
	04- 05	0%	90%	18	100000	20
	06- 07	0%	80%	16	100000	20
	08- 09	0%	75%	15	100000	20
Obs:						
Dot. Riego MANTA:		9000		m3/ha/año		
Dot. Riego GOTEO:		5000		m3/ha/año		

Figura 59. Pozo Virtual 3

Termino Municipal: Torreblanca						
Pozo: P4						
Actualidad: SI						
Sup.máx reg.	Periodo	Tipo de Riego		Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraido (m3/año)	Retorno riego (mm/año)
	85- 90	Manta		20	180000	72
	91- 92	Manta		20	180000	72
		Manta	Goteo			
	93- 94	100%	0%	20	180000	72
	95- 96	50%	50%	20	100000	46
	97- 98	0%	100%	20	100000	20
	99- 03	0%	100%	20	100000	20
	Obs:					
	Dot. Riego MANTA:		9000		m3/ha/año	
Dot. Riego GOTEO:		5000		m3/ha/año		

Figura 60. Pozo Virtual 4

Anejo 2: Datos de entrada (inputs) del modelo matemático

Termino Municipal: Torreblanca						
Pozo: P5						
Actualidad: SI						
Sup. máx reg.	Periodo	Tipo de Riego		Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraido (m3/año)	Retorno riego (mm/año)
	85- 90	Manta		20	180000	72
	91- 92	Manta		20	180000	72
		Manta	Goteo			
	93- 94	100%	0%	20	180000	72
	95- 96	50%	50%	20	100000	46
	97- 98	0%	100%	20	100000	20
	99- 03	0%	100%	20	100000	20
	04- 05	0%	90%	18	100000	20
	Obs:					
Dot. Riego MANTA:		9000		m3/ha/año		
Dot. Riego GOTEO:		5000		m3/ha/año		

Figura 61. Pozo Virtual 5

Termino Municipal: Torreblanca						
Pozo: P6						
Actualidad: SI						
Sup. máx reg.	Periodo	Tipo de Riego		Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraido (m3/año)	Retorno riego (mm/año)
	85- 90	Manta		20	180000	72
	91- 92	Manta		20	180000	72
		Manta	Goteo			
	93- 94	100%	0%	20	180000	72
	95- 96	50%	50%	20	100000	46
	97- 98	0%	100%	20	100000	20
	99- 03	0%	100%	20	100000	20
	04- 05	0%	90%	18	100000	20
	06- 07	0%	80%	16	100000	20
Obs:						
Dot. Riego MANTA:		9000		m3/ha/año		
Dot. Riego GOTEO:		5000		m3/ha/año		

Figura 62. Pozo Virtual 6

Anejo 2: Datos de entrada (inputs) del modelo matemático

Termino Municipal: Torreblanca						
Pozo: P7						
Actualidad: SI						
	Periodo	Tipo de Riego		Sup. de Riego (ha.)	Volumen extraido (m3/año)	Retorno riego (mm/año)
Sup.máx reg.	04- 05	0%	90%	18	100000	20
	06- 07	0%	80%	16	100000	20
	08- 09	0%	75%	15	100000	20
Obs:						
Dot. Riego MANTA:			9000	m3/ha/año		
Dot. Riego GOTEIO:			5000	m3/ha/año		

Figura 63. Pozo Virtual 7

4.6. Bombeos para el abastecimiento urbano

Termino Municipal: Torreblanca		Termino Municipal: Torreblanca	
Pozo: S VICENTE		Pozo: PU1	
Actualidad: SI		Actualidad: NO	
Periodo	Volumen extraido (m3/año)	Periodo	Volumen extraido (m3/año)
73-09	2300000	73-90	2453500

Figura 64. Pozos para el abastecimiento urbano

Anejo 3

Balances Hídricos Anuales

<u>1. BALANCE HÍDRICO ANUAL DEL MODELO DE FLUJO CALIBRADO (MODFLOW)</u>	<u>1</u>
<u>2. BALANCE HÍDRICO ANUAL DEL MODELO DE FLUJO Y TRANSPORTE CALIBRADO (SEAWAT)</u>	<u>2</u>
<u>3. BALANCE HÍDRICO ANUAL DEL MODELO DE FLUJO Y TRANSPORTE CALIBRADO EN EL SECTOR NORTE</u>	<u>3</u>
<u>4. BALANCE HÍDRICO ANUAL DEL MODELO DE FLUJO Y TRANSPORTE CALIBRADO EN EL SECTOR CENTRAL</u>	<u>4</u>

5. BALANCE HÍDRICO ANUAL DEL MODELO DE FLUJO Y
TRANSPORTE CALIBRADO EN EL SECTOR SUR _____ 5

1. Balance Hídrico Anual del modelo de flujo calibrado (*MODFLOW*)

AÑO	Entradas (hm ³ /año)			Salidas (hm ³ /año)		
	Recarga	FL	Intrusión	Sal al Mar	Dren	Pozos
1973	5.79	34.64	0.27	11.64	0.85	23.14
1974	6.97	32.94	0.12	15.13	1.49	23.14
1975	10.57	38.53	0.05	19.04	2.1	23.14
1976	8.68	33.55	0.11	14.54	1.6	31.7
1977	12.53	40.19	0.06	16.06	1.82	31.7
1978	5.99	34.33	0.42	12.29	1.26	31.7
1979	6.75	35.16	0.91	10.84	1.01	31.7
1980	7.97	36.82	2.08	8.8	0.79	40.27
1981	10.97	42.93	1.45	10.71	1.09	40.27
1982	15.01	47.54	0.17	15.56	1.94	40.27
1983	7.8	35.86	1.42	10.29	1.07	40.27
1984	8.42	37.21	2.39	8.18	0.7	40.27
1985	7.86	37.86	4.74	5.63	0.24	45.65
1986	8.55	38.01	4.94	5.44	0.2	45.65
1987	12.07	43.42	3.33	8.41	0.55	45.65
1988	12.2	42.3	2.29	10.38	0.86	45.65
1989	18.01	47.7	1.34	13.89	1.46	45.65
1990	12.92	41.11	1.35	12.8	1.3	45.65
1991	14.07	47.24	0.61	13.82	1.35	42.82
1992	8.55	35.39	1.42	9.11	0.67	42.82
1993	8.19	37.03	2.7	6.19	0.26	42.82
1994	8.59	37.37	3.19	5.66	0.21	42.82
1995	6.91	35.77	0.67	8.41	0.51	31.48
1996	9.62	34.67	0.16	11.62	0.92	31.48
1997	6.43	33.73	0.12	12.19	0.96	26.2
1998	7.72	33.4	0.1	13.17	1.12	26.2
1999	6.9	33.25	0.06	13.54	1.16	26.2
2000	8.69	33.3	0.07	13.65	1.2	26.2
2001	5.56	33.41	0.07	12.76	1.06	26.2
2002	8.84	33.09	0.03	14.29	1.27	26.2
2003	12.16	44.54	0.02	20.33	2.25	26.2
2004	8.97	36.84	0.02	21.77	2.46	25
2005	7.64	32.1	0.1	15.99	1.47	25
2006	7.7	32.21	0.02	17.42	1.6	20.74
2007	10.18	37.82	0.01	21.15	2.2	20.74
2008	8.69	36.66	0.01	23.18	2.5	18.87
2009	6.89	30.78	0.01	20.27	2.01	18.87

Tabla 1. Balance hídrico anual del modelo de flujo calibrado (*MODFLOW*)

2. Balance Hídrico Anual del modelo de flujo y transporte calibrado (SEAWAT)

AÑO	Entradas (hm ³ /año)			Salidas (hm ³ /año)		
	Recarga	FL	Intrusión	Sal al Mar	Dren	Pozos
1973	5.79	31.3	1.32	7.01	1.02	23.14
1974	6.97	29.24	0.56	10.76	1.98	23.14
1975	10.57	34.28	0.36	13.57	2.8	23.14
1976	8.68	29.71	0.64	11.17	2.12	31.7
1977	12.53	35.97	0.58	11.59	2.29	31.7
1978	5.99	30.57	1.06	9.19	1.68	31.7
1979	6.75	31.48	1.63	7.74	1.35	31.7
1980	7.97	33.21	2.75	6.22	1.07	40.27
1981	10.97	38.96	2.34	7.1	1.33	40.27
1982	15.01	43.07	0.93	10.55	2.26	40.27
1983	7.8	32.24	2.01	7.45	1.4	40.27
1984	8.42	33.69	3.2	5.6	0.96	40.27
1985	7.86	34.46	5.47	3.63	0.46	45.65
1986	8.55	34.75	6.04	3.23	0.38	45.65
1987	12.07	39.69	4.45	5.05	0.76	45.65
1988	12.2	38.47	3.11	6.74	1.13	45.65
1989	18.01	43.37	2.06	8.96	1.76	45.65
1990	12.92	37.12	1.8	8.94	1.67	45.65
1991	14.07	42.78	1.22	9.23	1.7	42.82
1992	8.55	31.84	2.14	6.5	1.01	42.82
1993	8.19	33.6	3.79	4.06	0.51	42.82
1994	8.59	34.04	4.44	3.45	0.41	42.82
1995	6.91	32.4	2.12	5.24	0.77	31.48
1996	9.62	31.1	0.89	7.91	1.26	31.48
1997	6.43	30.07	0.8	8.43	1.38	26.2
1998	7.72	29.67	0.73	9.29	1.6	26.2
1999	6.9	29.51	0.68	9.71	1.66	26.2
2000	8.69	29.56	0.69	9.7	1.69	26.2
2001	5.56	29.64	0.72	9.23	1.55	26.2
2002	8.84	29.34	0.62	10.3	1.79	26.2
2003	12.16	39.85	0.38	14.25	2.98	26.2
2004	8.97	32.51	0.29	16.48	3.44	25
2005	7.64	28.26	0.54	12.04	2.14	25
2006	7.7	28.38	0.46	12.95	2.28	20.74
2007	10.18	33.49	0.32	15.61	3.05	20.74
2008	8.69	32.27	0.26	17.43	3.53	18.87
2009	6.89	26.8	0.34	15.72	2.94	18.87

Tabla 2. Balance hídrico anual del modelo de flujo y transporte calibrado (SEAWAT)

3. Balance Hídrico Anual del modelo de flujo y transporte calibrado en el Sector Norte

AÑO	Entradas (hm ³ /año)			Salidas (hm ³ /año)		
	Recarga	FL	Intrusión	Sal al Mar	Dren	Pozos
1973	1.38	8.07	0.24	3.27	0	3.08
1974	1.69	7.66	0.17	4.55	0	3.08
1975	2.64	8.95	0.13	5.38	0	3.08
1976	2.08	7.56	0.19	4.65	0	4.72
1977	3.1	9.09	0.18	4.81	0	4.72
1978	1.38	7.73	0.23	4.03	0	4.72
1979	1.57	7.91	0.26	3.53	0	4.72
1980	1.8	8.13	0.3	2.95	0	6.17
1981	2.58	9.58	0.27	3.3	0	6.17
1982	3.62	10.73	0.19	4.5	0	6.17
1983	1.76	7.96	0.27	3.43	0	6.17
1984	1.92	8.21	0.32	2.72	0	6.17
1985	1.77	8.43	0.43	1.84	0	7.79
1986	1.95	8.5	0.46	1.64	0	7.79
1987	2.86	9.8	0.34	2.4	0	7.79
1988	2.89	9.56	0.27	3.1	0	7.79
1989	4.4	10.83	0.22	3.93	0	7.79
1990	3.08	9.28	0.22	3.99	0	7.79
1991	3.38	10.73	0.22	4.07	0	7.41
1992	1.95	7.99	0.3	3.02	0	7.41
1993	1.86	8.33	0.4	2.06	0	7.41
1994	1.96	8.43	0.44	1.77	0	7.41
1995	1.64	8.28	0.32	2.51	0	5.52
1996	2.35	8.08	0.26	3.31	0	5.52
1997	1.63	8.06	0.26	3.24	0	5.52
1998	1.96	8.03	0.24	3.39	0	5.52
1999	1.74	8	0.23	3.5	0	5.52
2000	2.22	8.01	0.23	3.49	0	5.52
2001	1.4	8.03	0.24	3.35	0	5.52
2002	2.25	7.96	0.22	3.67	0	5.52
2003	3.11	10.67	0.16	4.73	0	5.52
2004	2.25	8.86	0.13	5.49	0	4.52
2005	1.91	7.61	0.19	4.42	0	4.52
2006	1.93	7.61	0.18	4.58	0	3.56
2007	2.56	8.94	0.14	5.27	0	3.56
2008	2.2	8.77	0.12	5.78	0	3.28
2009	1.74	7.36	0.15	5.33	0	3.28

Tabla 3. Balance hídrico anual del modelo de flujo y transporte calibrado en el Sector Norte

4. Balance Hídrico Anual del modelo de flujo y transporte calibrado en el Sector Central

AÑO	Entradas (hm ³ /año)			Salidas (hm ³ /año)		
	Recarga	FL	Intrusión	Sal al Mar	Dren	Pozos
1973	2.99	17.31	0.4	3.66	1.02	12.09
1974	3.57	15.87	0.23	5.66	1.98	12.09
1975	5.32	18.67	0.17	6.86	2.79	12.09
1976	4.47	16.44	0.24	5.81	2.12	16.9
1977	6.36	20.02	0.22	6.05	2.29	16.9
1978	3.16	16.98	0.32	4.91	1.68	16.9
1979	3.53	17.55	0.39	4.19	1.35	16.9
1980	4.21	18.83	0.54	3.26	1.07	21.89
1981	5.68	22.06	0.46	3.79	1.33	21.89
1982	7.67	24.26	0.25	5.68	2.26	21.89
1983	4.13	18.21	0.43	3.96	1.4	21.89
1984	4.44	19.15	0.63	2.88	0.96	21.89
1985	4.16	19.67	1.1	1.79	0.46	24.95
1986	4.5	19.86	1.26	1.59	0.38	24.95
1987	6.23	22.59	0.79	2.65	0.76	24.95
1988	6.29	21.82	0.51	3.63	1.13	24.95
1989	9.14	24.54	0.35	4.91	1.76	24.95
1990	6.64	21.01	0.35	4.84	1.67	24.95
1991	7.21	24.41	0.33	4.93	1.7	24.95
1992	4.5	18.35	0.6	3.36	1.01	24.95
1993	4.32	19.49	1	2	0.51	24.95
1994	4.52	19.74	1.18	1.68	0.41	24.95
1995	3.6	18.46	0.72	2.64	0.77	18.67
1996	4.94	17.62	0.41	3.91	1.26	18.67
1997	3.25	16.71	0.4	4.24	1.38	14.87
1998	3.88	16.41	0.36	4.67	1.6	14.87
1999	3.48	16.31	0.34	4.81	1.66	14.87
2000	4.36	16.34	0.35	4.83	1.69	14.87
2001	2.82	16.39	0.37	4.58	1.55	14.87
2002	4.44	16.21	0.32	5.05	1.79	14.87
2003	6.09	22.06	0.2	6.7	2.98	14.87
2004	4.57	17.86	0.16	7.49	3.44	14.3
2005	3.89	15.62	0.28	5.81	2.13	14.3
2006	3.93	15.74	0.25	6.01	2.28	12.44
2007	5.18	18.58	0.18	7.06	3.05	12.44
2008	4.41	17.68	0.14	7.71	3.53	11.2
2009	3.51	14.62	0.19	6.99	2.94	11.2

Tabla 4. Balance hídrico anual del modelo de flujo y transporte calibrado en el Sector Central

5. Balance Hídrico Anual del modelo de flujo y transporte calibrado en el Sector Sur

AÑO	Entradas (hm ³ /año)			Salidas (hm ³ /año)		
	Recarga	FL	Intrusión	Sal al Mar	Dren	Pozos
1973	1.42	5.91	0.69	0.07	0	7.96
1974	1.72	5.7	0.16	0.55	0	7.96
1975	2.61	6.65	0.06	1.33	0	7.96
1976	2.12	5.7	0.21	0.7	0	10.09
1977	3.08	6.85	0.18	0.72	0	10.09
1978	1.46	5.85	0.5	0.25	0	10.09
1979	1.64	6.02	0.98	0.02	0	10.09
1980	1.96	6.24	1.92	0	0	12.21
1981	2.71	7.3	1.61	0	0	12.21
1982	3.72	8.08	0.49	0.38	0	12.21
1983	1.91	6.07	1.31	0.06	0	12.21
1984	2.07	6.32	2.25	0	0	12.21
1985	1.93	6.36	3.94	0	0	12.92
1986	2.1	6.38	4.31	0	0	12.92
1987	2.98	7.3	3.33	0	0	12.92
1988	3.01	7.08	2.34	0	0	12.92
1989	4.47	7.99	1.5	0.12	0	12.92
1990	3.19	6.83	1.23	0.1	0	12.92
1991	3.48	7.64	0.68	0.23	0	10.46
1992	2.1	5.5	1.24	0.11	0	10.46
1993	2.01	5.78	2.39	0	0	10.46
1994	2.11	5.87	2.82	0	0	10.46
1995	1.67	5.66	1.08	0.09	0	7.3
1996	2.33	5.4	0.23	0.69	0	7.3
1997	1.56	5.3	0.15	0.96	0	5.81
1998	1.88	5.23	0.12	1.23	0	5.81
1999	1.67	5.2	0.1	1.4	0	5.81
2000	2.11	5.21	0.11	1.37	0	5.81
2001	1.34	5.22	0.11	1.29	0	5.81
2002	2.15	5.17	0.08	1.59	0	5.81
2003	2.96	7.12	0.02	2.81	0	5.81
2004	2.16	5.78	0	3.5	0	6.18
2005	1.84	5.02	0.07	1.82	0	6.18
2006	1.84	5.03	0.02	2.35	0	4.74
2007	2.44	5.97	0.01	3.28	0	4.74
2008	2.08	5.82	0	3.95	0	4.39
2009	1.64	4.82	0	3.39	0	4.39

Tabla 5. Balance hídrico anual del modelo de flujo y transporte calibrado en el Sector Sur

Anejo 4

Análisis de Sensibilidad

1. COMPARACIÓN DE LOS DIFERENTES RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD RESPECTO DEL OBSERVADO Y EL MODELO CALIBRADO PARA LOS DIFERENTES PUNTOS PIEZOMÉTRICOS **1**

2. COMPARACIÓN DE LOS DIFERENTES RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD RESPECTO DEL OBSERVADO Y EL MODELO CALIBRADO PARA LOS DIFERENTES PUNTOS DE CONTROL DE CALIDAD **6**

3. BALANCE HÍDRICO ANUAL DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD**10**

3.1. Balance Hídrico Anual aumentando 25% el flujo lateral _____ 10

3.2.	Balance Hídrico Anual disminuyendo 25% el flujo lateral _____	11
3.3.	Balance Hídrico Anual aumentando 25% las conductividades _____	12
3.4.	Balance Hídrico Anual disminuyendo 25% las conductividades _____	13
3.5.	Balance Hídrico Anual aumentando 25% la recarga _____	14
3.6.	Balance Hídrico Anual disminuyendo 25% la recarga _____	15

1. Comparación de los diferentes resultados del análisis de sensibilidad respecto del observado y el modelo calibrado para los diferentes puntos piezométricos

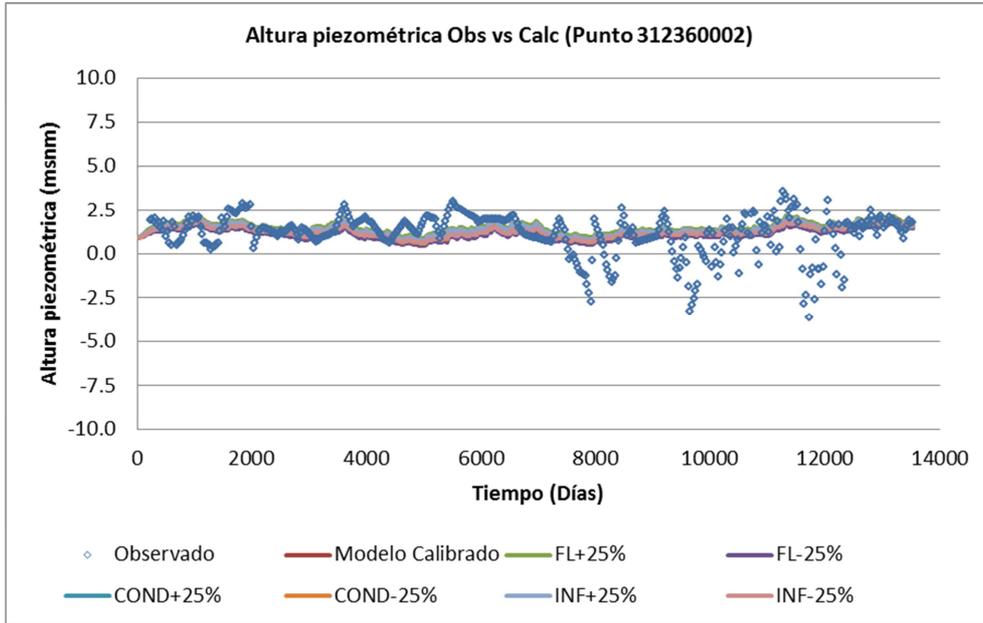


Figura 1. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312360002)

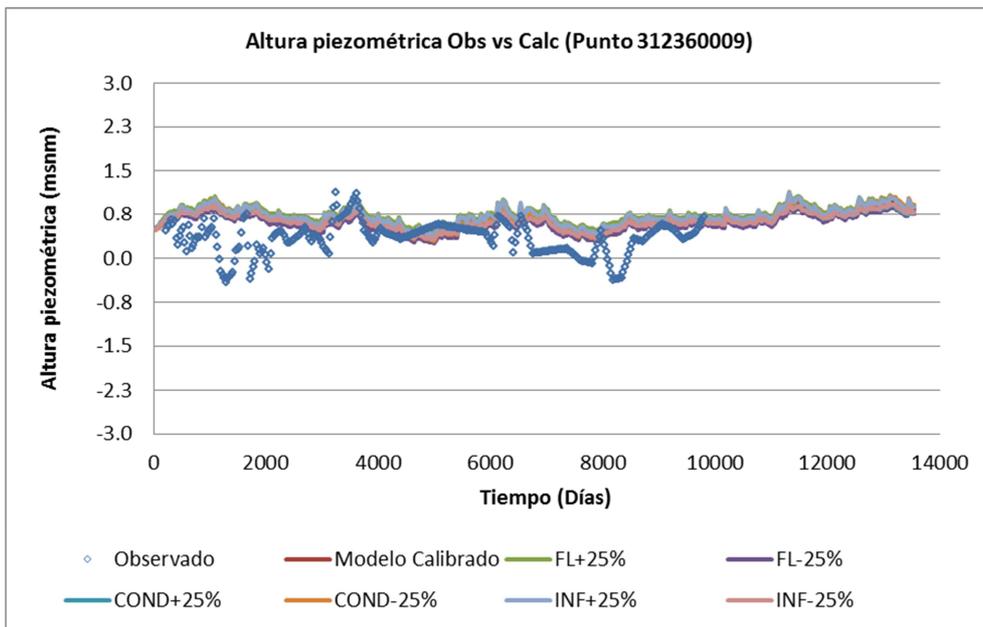


Figura 2. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312360009)

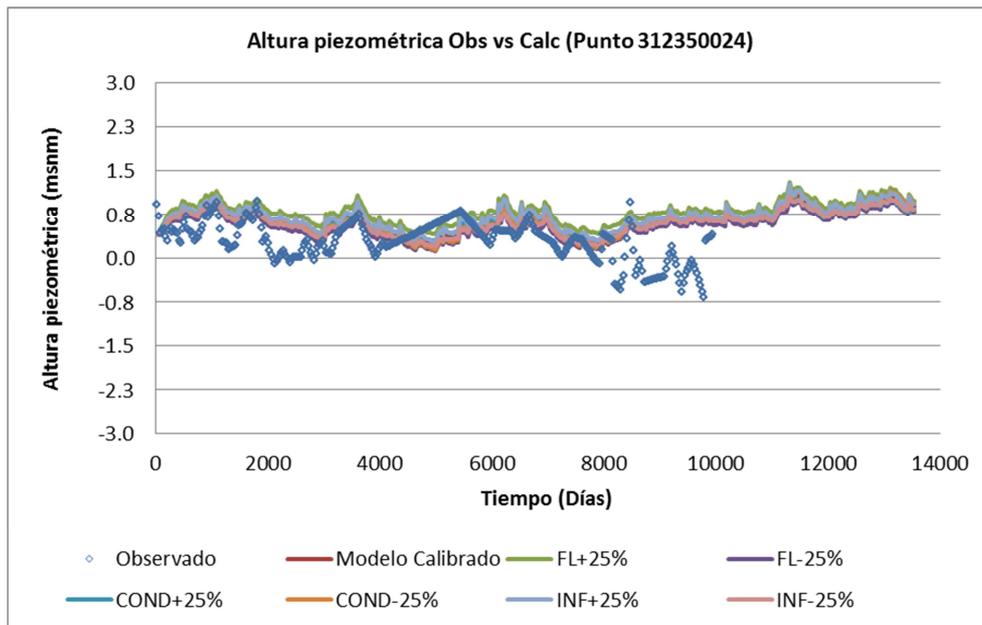


Figura 3. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312350024)

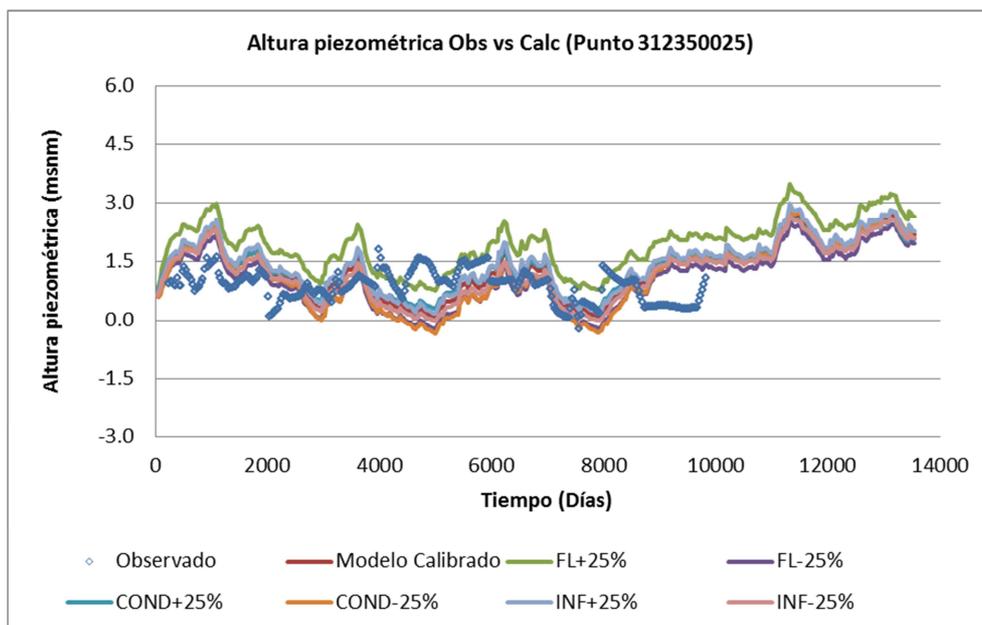


Figura 4. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312350025)

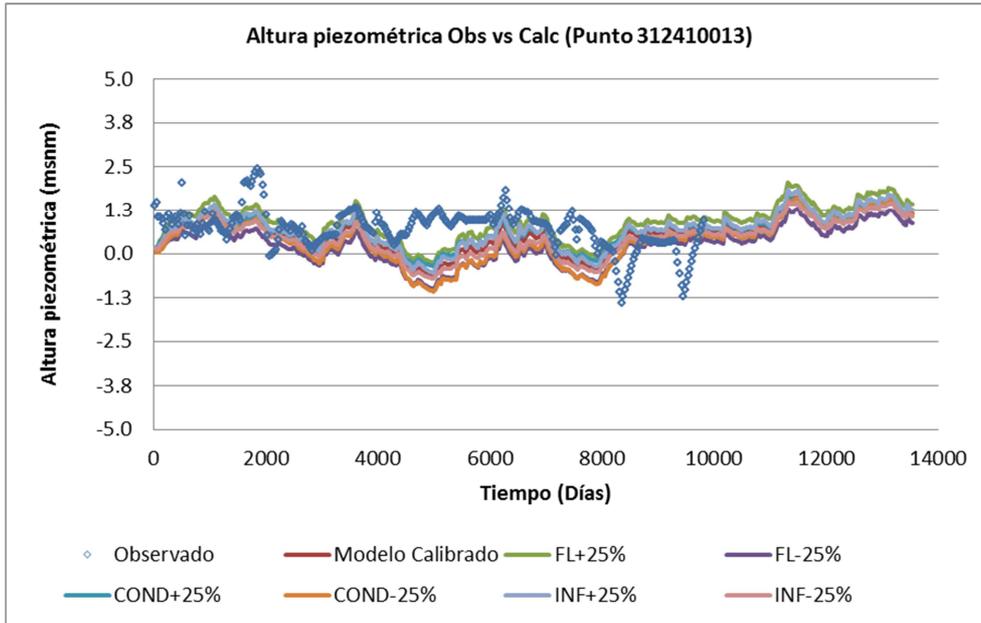


Figura 5. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312410013)

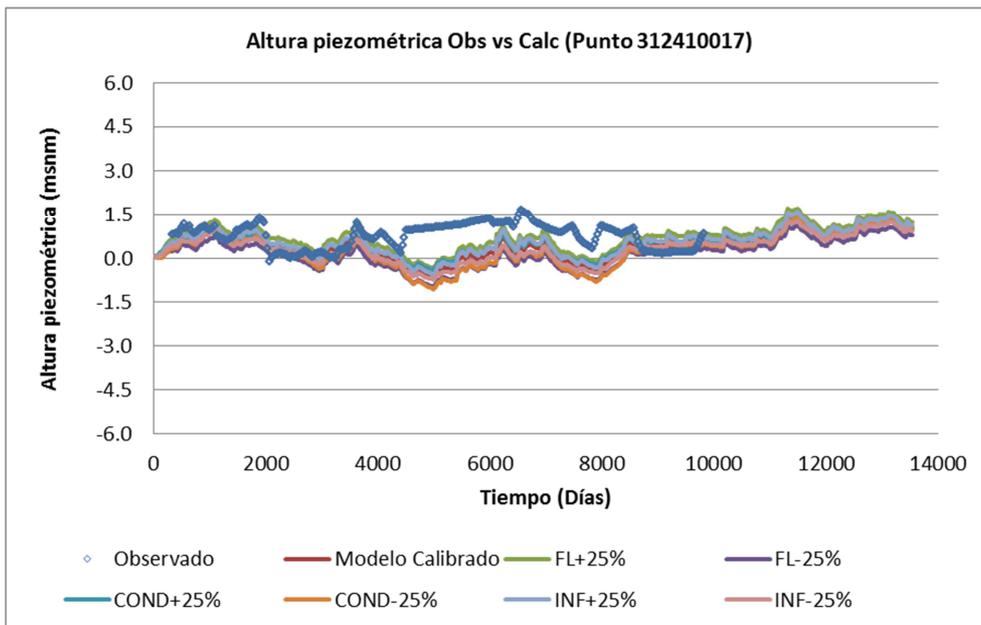


Figura 6. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312410017)

Anejo 4: Análisis de Sensibilidad

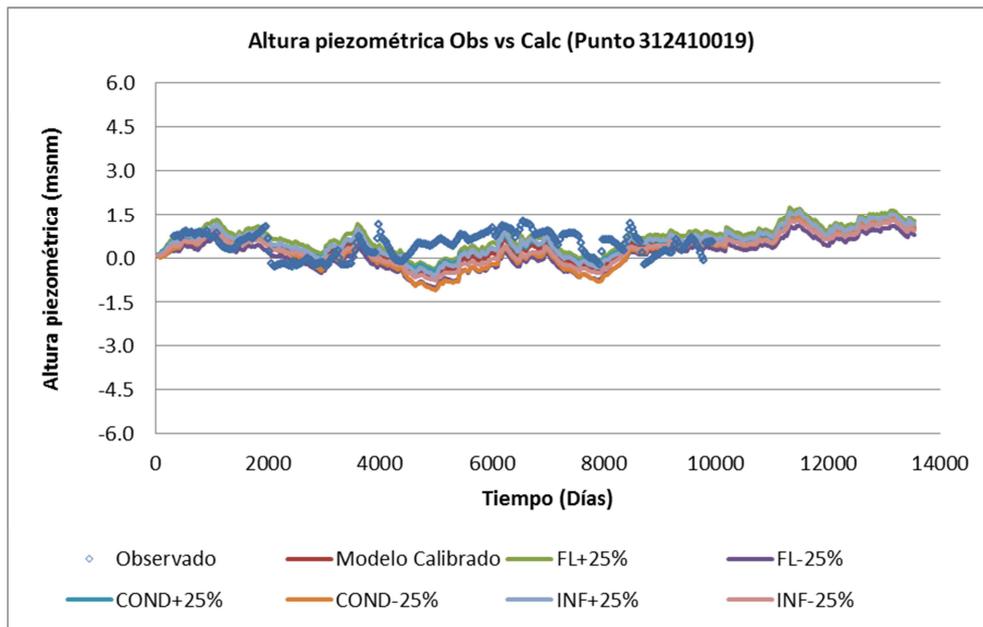


Figura 7. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312410019)

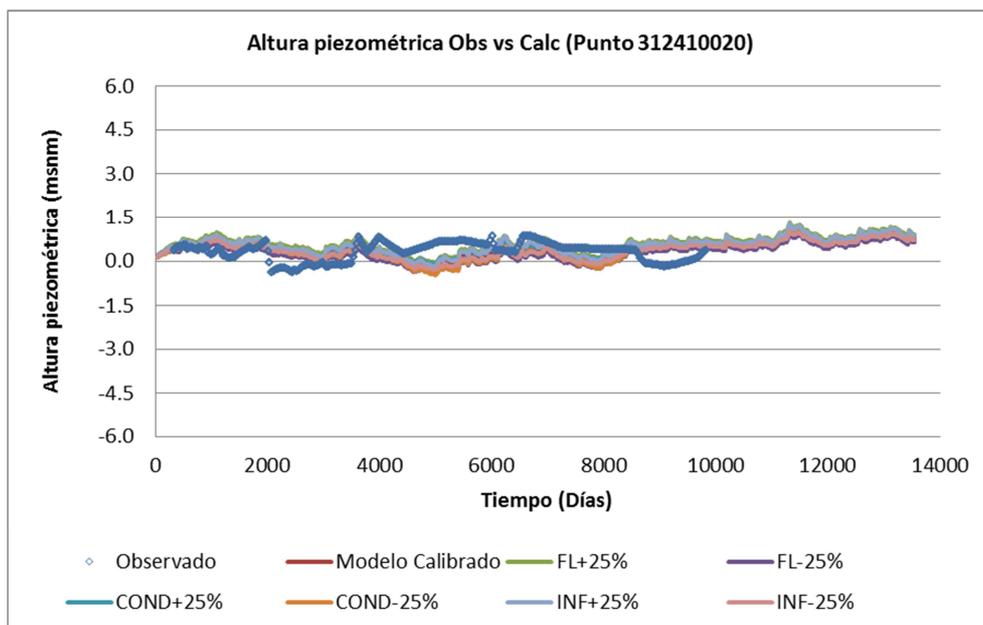


Figura 8. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312410020)

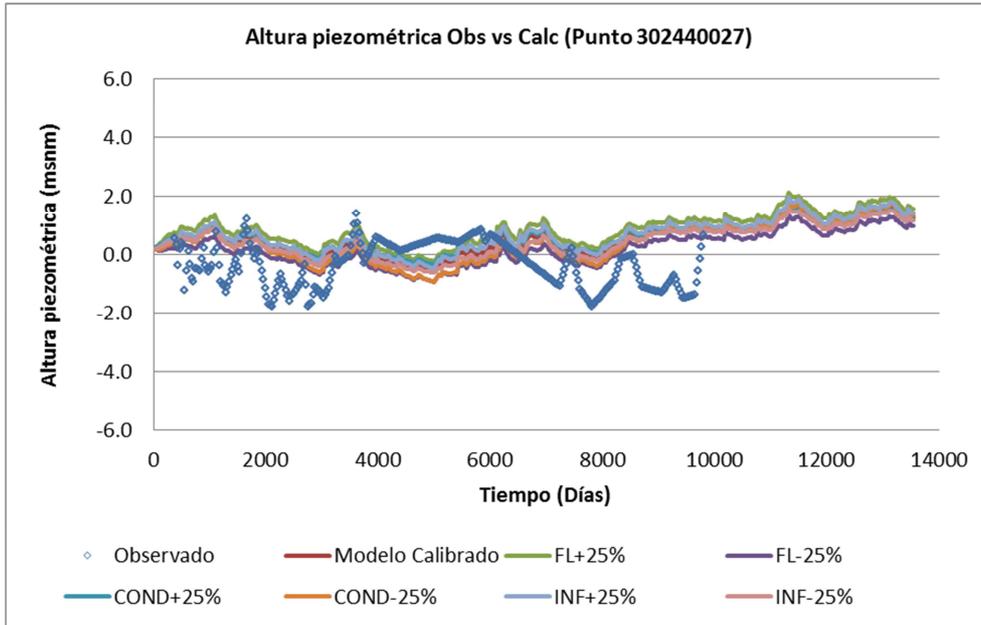


Figura 9. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 312440027)

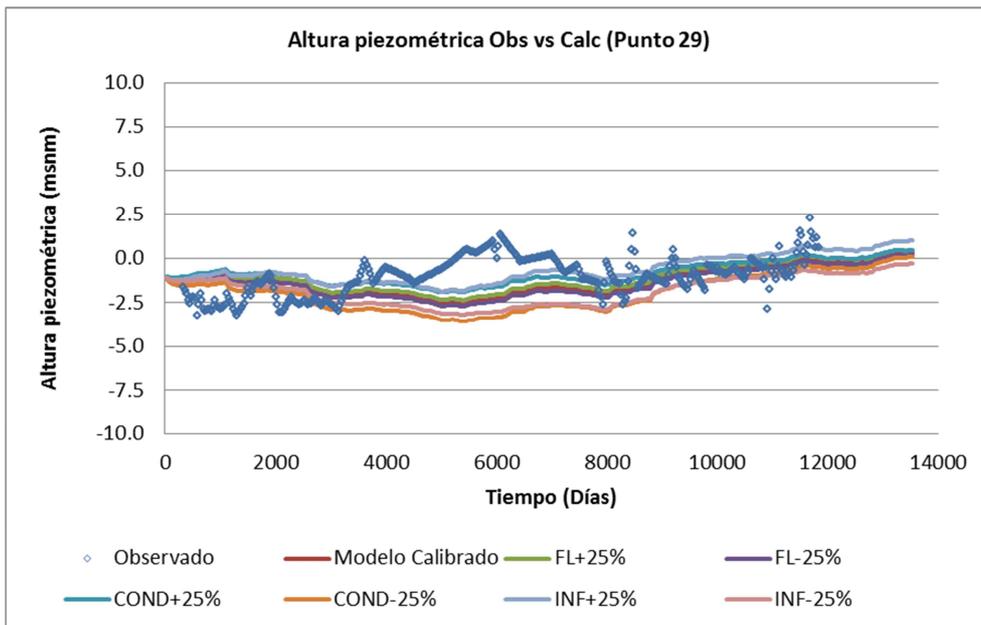


Figura 10. Altura piezométrica Obs vs Calc (Punto 29)

2. Comparación de los diferentes resultados del análisis de sensibilidad respecto del observado y el modelo calibrado para los diferentes puntos de control de calidad

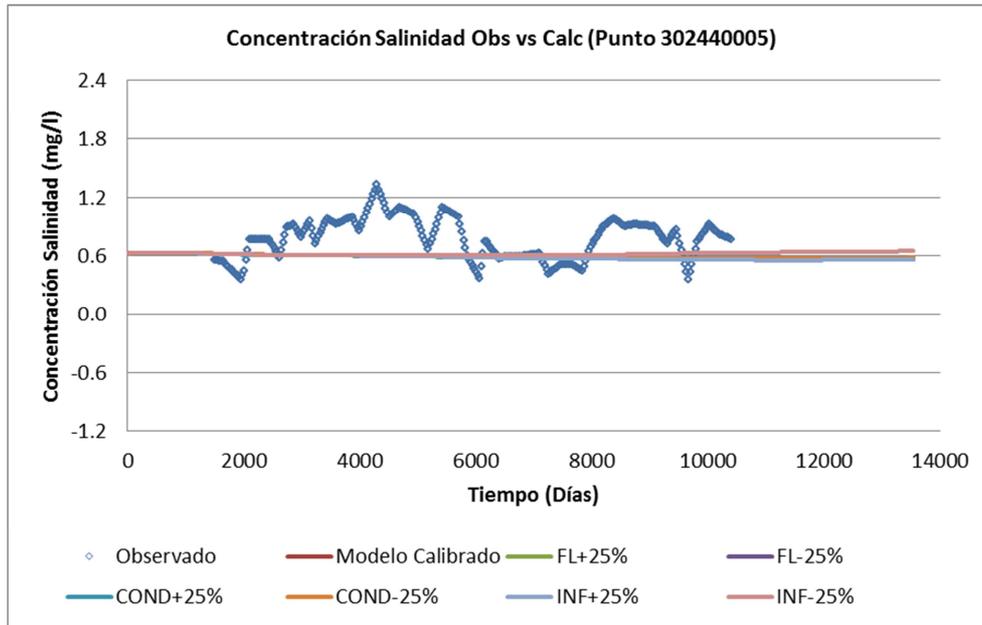


Figura 11. Concentración salinidad Obs vs Calc (Punto 302440005)

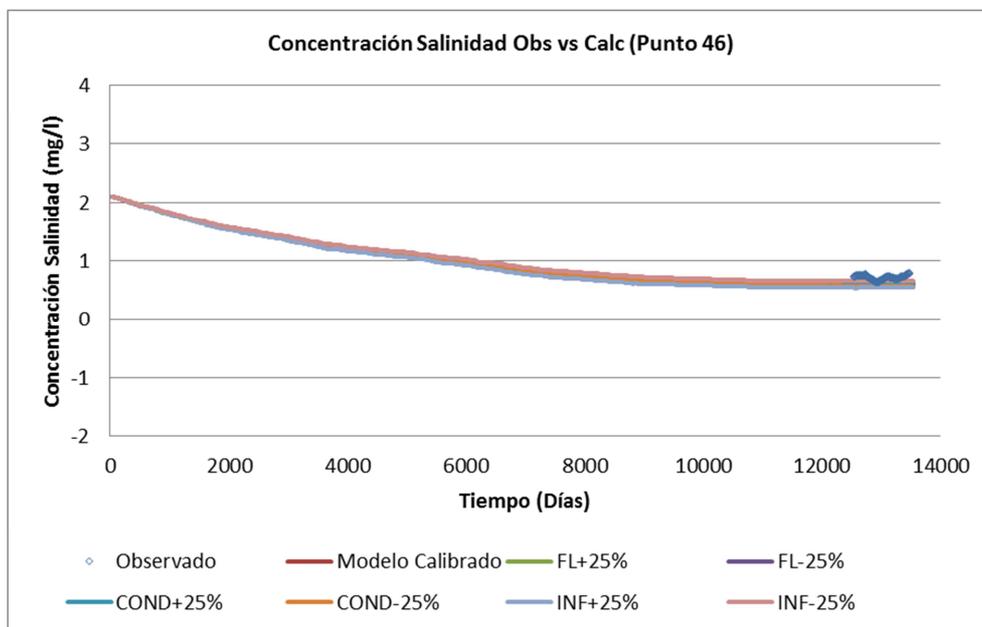


Figura 12. Concentración salinidad Obs vs Calc (Punto 46)

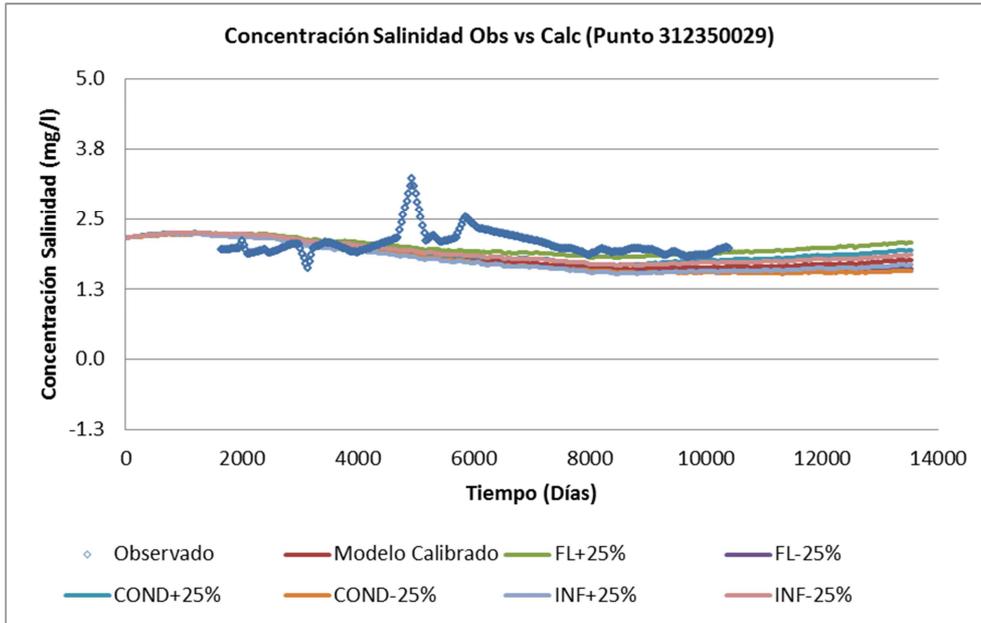


Figura 13. Concentración salinidad Obs vs Calc (Punto 312350029)

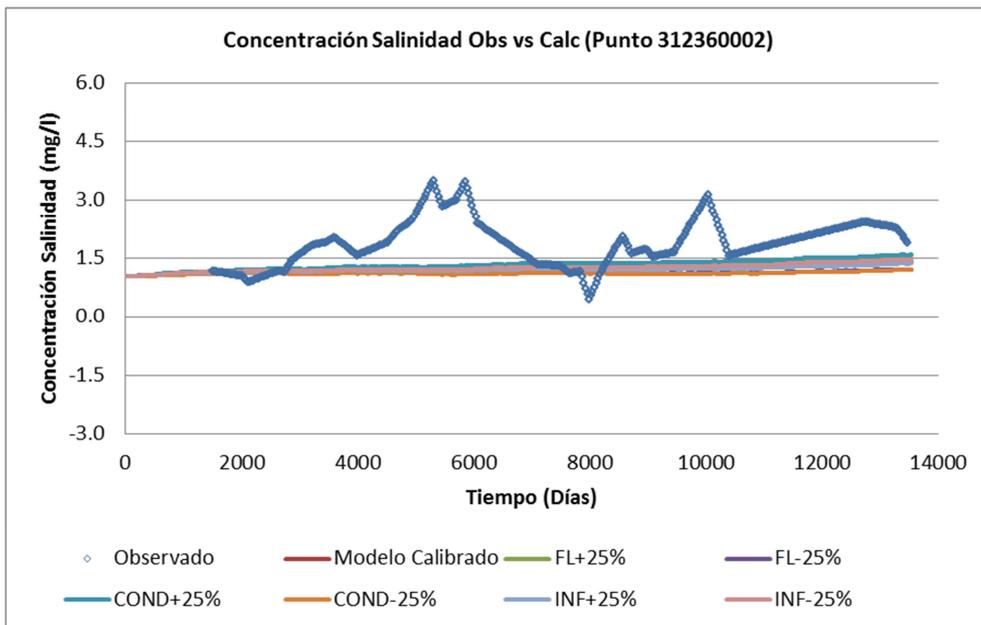


Figura 14. Concentración salinidad Obs vs Calc (Punto 312360002)

Anejo 4: Análisis de Sensibilidad

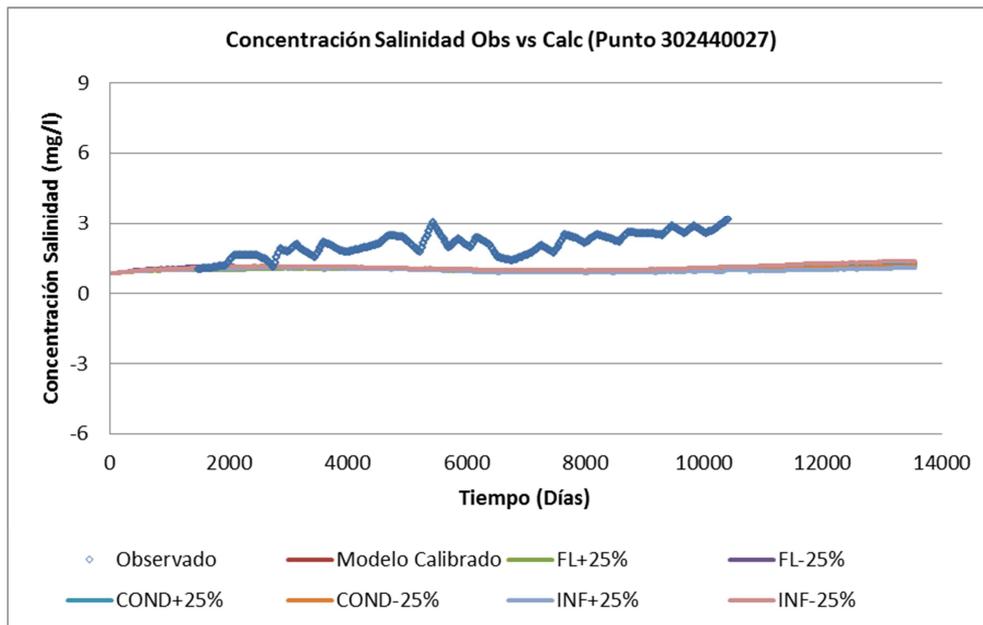


Figura 15. Concentración salinidad Obs vs Calc (Punto 302440027)

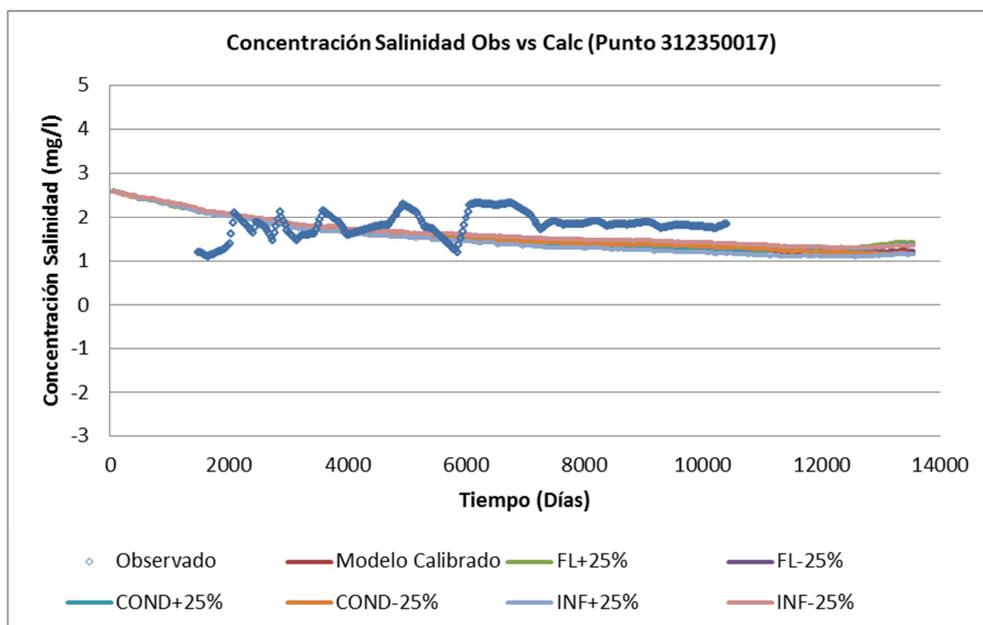


Figura 16. Concentración salinidad Obs vs Calc (Punto 312350017)

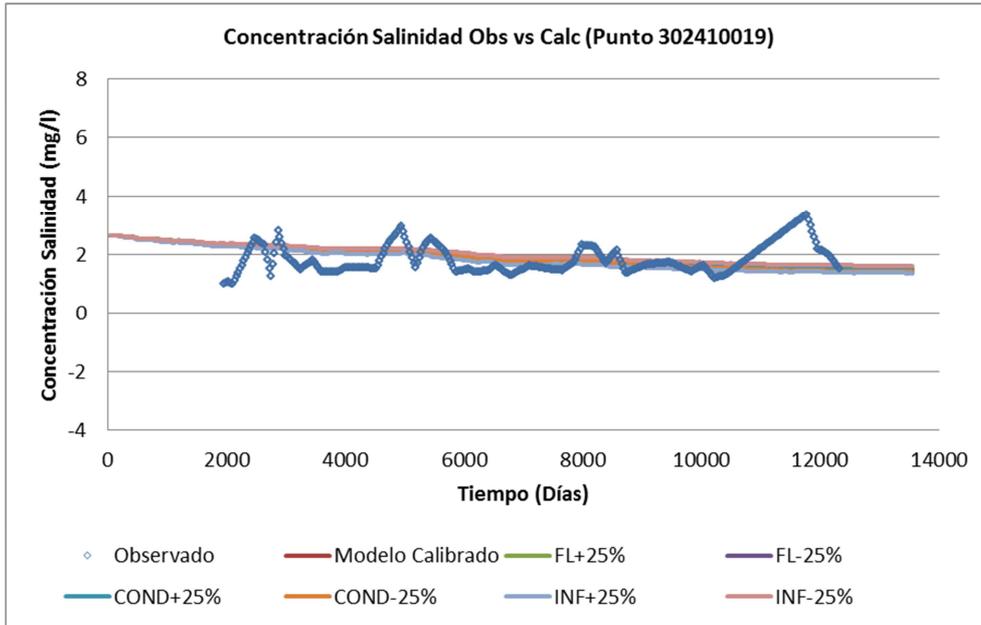


Figura 17. Concentración salinidad Obs vs Calc (Punto 312410019)

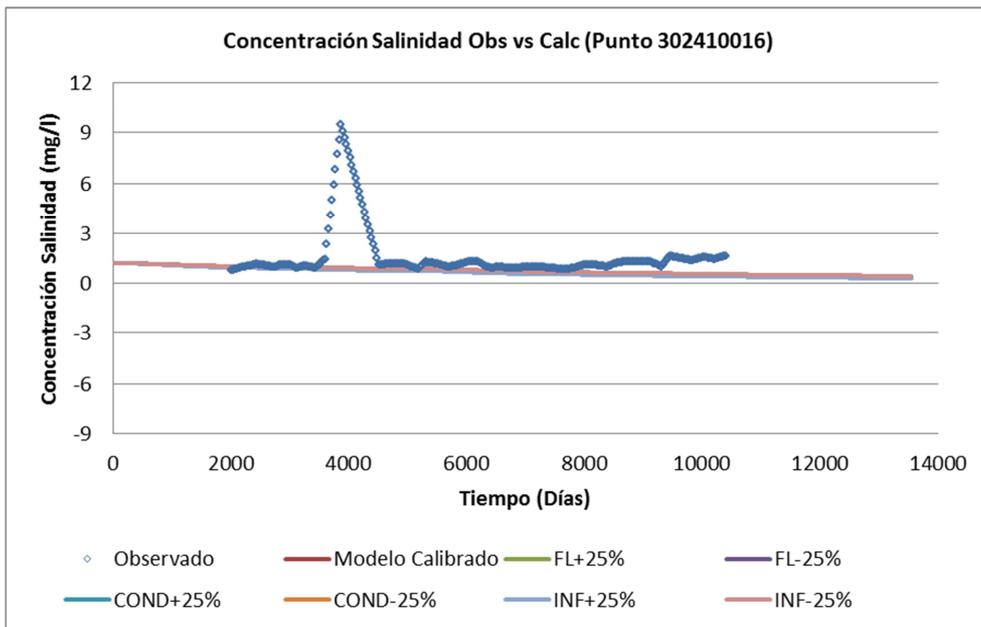


Figura 18. Concentración salinidad Obs vs Calc (Punto 312410016)

3. Balance hídrico anual del análisis de sensibilidad

3.1. Balance Hídrico Anual aumentando 25% el flujo lateral

AÑO	Entradas (hm ³ /año)			Salidas (hm ³ /año)		
	Recarga	FL	Intrusión	Sal al Mar	Dren	Pozos
1973	5.79	36.18	1.02	8.28	1.51	23.14
1974	6.97	33.02	0.34	13.2	2.9	23.14
1975	10.57	38.87	0.24	16.46	3.97	23.14
1976	8.68	33.45	0.4	13.85	3.06	31.7
1977	12.53	40.77	0.36	14.56	3.41	31.7
1978	5.99	34.37	0.61	11.88	2.57	31.7
1979	6.75	35.5	0.87	10.1	2.13	31.7
1980	7.97	37.47	1.56	8.29	1.75	40.27
1981	10.97	44.07	1.21	9.67	2.26	40.27
1982	15.01	48.78	0.42	14.07	3.63	40.27
1983	7.8	36.08	1.01	10.09	2.25	40.27
1984	8.42	37.93	1.85	7.71	1.63	40.27
1985	7.86	38.79	3.83	5.58	1.02	45.65
1986	8.55	39.07	4.29	5.18	0.93	45.65
1987	12.07	44.83	2.86	7.4	1.57	45.65
1988	12.2	43.35	1.66	9.26	2.07	45.65
1989	18.01	49.08	0.96	12.03	3.02	45.65
1990	12.92	41.75	0.85	11.89	2.74	45.65
1991	14.07	48.47	0.55	12.6	2.9	42.82
1992	8.55	35.61	1.13	9.17	1.79	42.82
1993	8.19	37.82	2.25	6.05	1.07	42.82
1994	8.59	38.29	2.79	5.42	0.96	42.82
1995	6.91	36.38	1.14	7.79	1.46	31.48
1996	9.62	34.98	0.59	10.85	2.05	31.48
1997	6.43	33.84	0.56	11.27	2.21	26.2
1998	7.72	33.44	0.51	12.02	2.45	26.2
1999	6.9	33.26	0.47	12.4	2.51	26.2
2000	8.69	33.31	0.48	12.39	2.54	26.2
2001	5.56	33.43	0.5	11.9	2.36	26.2
2002	8.84	33.06	0.43	12.98	2.66	26.2
2003	12.16	45.34	0.27	17.5	4.33	26.2
2004	8.97	36.62	0.22	19.66	4.71	25
2005	7.64	31.76	0.37	14.78	3.07	25
2006	7.7	32.01	0.34	15.57	3.19	20.74
2007	10.18	37.98	0.24	18.49	4.21	20.74
2008	8.69	36.48	0.2	20.4	4.76	18.87
2009	6.89	30.14	0.26	18.37	3.91	18.87

Tabla 1. Balance hídrico anual aumentado 25% el flujo lateral

3.2. Balance Hídrico Anual disminuyendo 25% el flujo lateral

AÑO	Entradas (hm ³ /año)			Salidas (hm ³ /año)		
	Recarga	FL	Intrusión	Sal al Mar	Dren	Pozos
1973	5.79	27.4	1.85	6.13	0.89	23.14
1974	6.97	25.97	1.18	8.79	1.66	23.14
1975	10.57	30.42	0.73	10.95	2.34	23.14
1976	8.68	26.5	1.33	8.92	1.76	31.7
1977	12.53	31.97	1.28	9.12	1.87	31.7
1978	5.99	27.31	2.2	7.21	1.37	31.7
1979	6.75	28.08	3	6.04	1.09	31.7
1980	7.97	29.62	4.28	4.62	0.83	40.27
1981	10.97	34.7	3.98	5.23	1.03	40.27
1982	15.01	38.35	2.28	7.98	1.79	40.27
1983	7.8	28.91	3.62	5.5	1.1	40.27
1984	8.42	30.1	4.88	3.96	0.72	40.27
1985	7.86	30.79	7.45	2.24	0.29	45.65
1986	8.55	31.07	8.18	1.93	0.22	45.65
1987	12.07	35.38	6.43	3.32	0.51	45.65
1988	12.2	34.35	4.94	4.77	0.82	45.65
1989	18.01	38.63	3.79	6.65	1.33	45.65
1990	12.92	33.18	3.45	6.74	1.28	45.65
1991	14.07	38.1	2.76	6.81	1.3	42.82
1992	8.55	28.6	3.78	4.57	0.74	42.82
1993	8.19	30.07	5.63	2.6	0.33	42.82
1994	8.59	30.47	6.45	2.1	0.25	42.82
1995	6.91	29.02	3.72	3.54	0.54	31.48
1996	9.62	27.82	1.65	5.56	0.99	31.48
1997	6.43	26.87	1.34	5.97	1.1	26.2
1998	7.72	26.48	1.14	6.81	1.3	26.2
1999	6.9	26.33	1	7.17	1.35	26.2
2000	8.69	26.37	1.05	7.19	1.39	26.2
2001	5.56	26.44	1.08	6.73	1.27	26.2
2002	8.84	26.18	0.9	7.73	1.47	26.2
2003	12.16	35.35	0.59	11.12	2.47	26.2
2004	8.97	29	0.42	13.35	2.9	25
2005	7.64	25.26	0.8	9.39	1.77	25
2006	7.7	25.32	0.66	10.42	1.91	20.74
2007	10.18	29.78	0.46	12.82	2.59	20.74
2008	8.69	28.73	0.36	14.49	3.02	18.87
2009	6.89	23.94	0.47	13.09	2.52	18.87

Tabla 2. Balance hídrico anual disminuyendo 25% el flujo lateral

3.3. Balance Hídrico Anual aumentando 25% las conductividades

AÑO	Entradas (hm ³ /año)			Salidas (hm ³ /año)		
	Recarga	FL	Intrusión	Sal al Mar	Dren	Pozos
1973	5.79	33.28	1.37	9.15	1.14	23.14
1974	6.97	31.44	0.69	13.35	2.03	23.14
1975	10.57	36.92	0.49	16.65	2.85	23.14
1976	8.68	32.05	0.83	13.33	2.07	31.7
1977	12.53	38.53	0.73	14.29	2.33	31.7
1978	5.99	32.81	1.2	11.23	1.68	31.7
1979	6.75	33.61	1.6	9.55	1.38	31.7
1980	7.97	35.23	2.72	7.71	1.1	40.27
1981	10.97	41.23	2.1	9.14	1.42	40.27
1982	15.01	45.79	0.9	13.6	2.37	40.27
1983	7.8	34.37	2.01	9.16	1.4	40.27
1984	8.42	35.63	3.13	7.09	1	40.27
1985	7.86	36.33	5.41	4.96	0.54	45.65
1986	8.55	36.55	5.83	4.61	0.48	45.65
1987	12.07	41.85	4.03	6.95	0.9	45.65
1988	12.2	40.77	2.71	8.77	1.24	45.65
1989	18.01	46.07	1.71	11.62	1.9	45.65
1990	12.92	39.63	1.64	11.18	1.73	45.65
1991	14.07	45.61	1.1	11.97	1.81	42.82
1992	8.55	34.03	2.09	8.2	1.05	42.82
1993	8.19	35.59	3.62	5.42	0.58	42.82
1994	8.59	35.94	4.17	4.83	0.51	42.82
1995	6.91	34.33	1.86	7.2	0.88	31.48
1996	9.62	33.18	0.98	10.28	1.34	31.48
1997	6.43	32.25	0.93	10.84	1.45	26.2
1998	7.72	31.93	0.86	11.69	1.64	26.2
1999	6.9	31.78	0.81	12.12	1.69	26.2
2000	8.69	31.82	0.82	12.1	1.72	26.2
2001	5.56	31.93	0.86	11.52	1.58	26.2
2002	8.84	31.61	0.75	12.77	1.81	26.2
2003	12.16	42.86	0.46	17.73	3.08	26.2
2004	8.97	35.4	0.39	19.66	3.39	25
2005	7.64	30.73	0.68	14.41	2.07	25
2006	7.7	30.76	0.58	15.53	2.23	20.74
2007	10.18	36.25	0.42	18.75	3.04	20.74
2008	8.69	35.16	0.35	20.66	3.48	18.87
2009	6.89	29.38	0.46	18.33	2.81	18.87

Tabla 3. Balance hídrico anual aumentando 25% las conductividades

3.4. Balance Hídrico Anual disminuyendo 25% las conductividades

AÑO	Entradas (hm ³ /año)			Salidas (hm ³ /año)		
	Recarga	FL	Intrusión	Sal al Mar	Dren	Pozos
1973	5.79	28.78	1.34	4.85	0.84	23.14
1974	6.97	26.53	0.56	7.86	1.79	23.14
1975	10.57	31.02	0.3	10.06	2.57	23.14
1976	8.68	26.8	0.53	8.61	2.06	31.7
1977	12.53	32.77	0.55	8.6	2.13	31.7
1978	5.99	27.78	1.11	6.94	1.58	31.7
1979	6.75	28.83	1.82	5.75	1.24	31.7
1980	7.97	30.66	2.86	4.54	0.98	40.27
1981	10.97	36.13	2.73	4.91	1.15	40.27
1982	15.01	39.73	1.31	7.34	1.99	40.27
1983	7.8	29.62	2.19	5.46	1.3	40.27
1984	8.42	31.26	3.36	3.91	0.86	40.27
1985	7.86	32.11	5.68	2.26	0.34	45.65
1986	8.55	32.51	6.5	1.86	0.24	45.65
1987	12.07	37.03	5.11	3.02	0.54	45.65
1988	12.2	35.67	3.74	4.41	0.89	45.65
1989	18.01	40.05	2.73	6.06	1.46	45.65
1990	12.92	34.04	2.27	6.41	1.46	45.65
1991	14.07	39.28	1.78	6.4	1.45	42.82
1992	8.55	29.14	2.46	4.57	0.87	42.82
1993	8.19	31.1	4.14	2.61	0.38	42.82
1994	8.59	31.68	4.98	2.05	0.27	42.82
1995	6.91	30.05	2.74	3.2	0.56	31.48
1996	9.62	28.58	1	5.22	1.07	31.48
1997	6.43	27.4	0.79	5.65	1.19	26.2
1998	7.72	26.9	0.65	6.48	1.43	26.2
1999	6.9	26.7	0.58	6.87	1.51	26.2
2000	8.69	26.74	0.59	6.87	1.55	26.2
2001	5.56	26.81	0.62	6.53	1.41	26.2
2002	8.84	26.52	0.53	7.41	1.65	26.2
2003	12.16	36.1	0.33	10.26	2.67	26.2
2004	8.97	28.94	0.21	12.64	3.28	25
2005	7.64	25.17	0.42	9.21	2.08	25
2006	7.7	25.42	0.36	9.92	2.2	20.74
2007	10.18	30.07	0.25	11.97	2.9	20.74
2008	8.69	28.68	0.19	13.61	3.4	18.87
2009	6.89	23.6	0.24	12.57	2.93	18.87

Tabla 4. Balance hídrico anual disminuyendo 25% las conductividades

3.5. Balance Hídrico Anual aumentando 25% la recarga

AÑO	Entradas (hm ³ /año)			Salidas (hm ³ /año)		
	Recarga	FL	Intrusión	Sal al Mar	Dren	Pozos
1973	7.24	31.14	1.2	7.46	1.11	23.14
1974	8.72	28.88	0.46	11.77	2.21	23.14
1975	13.21	33.87	0.3	14.86	3.12	23.14
1976	10.84	29.27	0.51	12.41	2.39	31.7
1977	15.66	35.39	0.44	13.31	2.69	31.7
1978	7.49	30.14	0.84	10.3	1.89	31.7
1979	8.44	31.1	1.27	8.58	1.53	31.7
1980	9.96	32.8	2.24	7.03	1.23	40.27
1981	13.71	38.43	1.74	8.23	1.59	40.27
1982	18.76	42.43	0.63	12.39	2.7	40.27
1983	9.75	31.77	1.53	8.47	1.6	40.27
1984	10.53	33.21	2.57	6.51	1.14	40.27
1985	9.82	34.04	4.82	4.36	0.58	45.65
1986	10.69	34.31	5.34	3.97	0.51	45.65
1987	15.09	39.13	3.67	6.16	0.99	45.65
1988	15.25	37.81	2.26	8.07	1.43	45.65
1989	22.52	42.65	1.4	10.75	2.22	45.65
1990	16.15	36.35	1.16	10.77	2.09	45.65
1991	17.59	42.06	0.78	11.17	2.11	42.82
1992	10.68	31.28	1.6	7.76	1.24	42.82
1993	10.24	33.12	3.06	4.93	0.66	42.82
1994	10.73	33.62	3.76	4.2	0.54	42.82
1995	8.64	32	1.68	6.13	0.92	31.48
1996	12.03	30.61	0.75	9.41	1.52	31.48
1997	8.04	29.67	0.73	9.66	1.59	26.2
1998	9.65	29.31	0.67	10.45	1.83	26.2
1999	8.62	29.12	0.61	10.92	1.9	26.2
2000	10.86	29.18	0.63	10.9	1.94	26.2
2001	6.95	29.3	0.66	10.3	1.75	26.2
2002	11.06	28.91	0.55	11.64	2.07	26.2
2003	15.2	39.39	0.35	15.8	3.39	26.2
2004	11.21	31.95	0.26	18.2	3.89	25
2005	9.55	27.89	0.48	13.18	2.4	25
2006	9.62	27.96	0.41	14.25	2.58	20.74
2007	12.73	33.05	0.3	17.05	3.43	20.74
2008	10.86	31.84	0.25	18.8	3.9	18.87
2009	8.61	26.42	0.32	16.91	3.24	18.87

Tabla 5. Balance hídrico anual aumentando 25% la recarga

3.6. Balance Hídrico Anual disminuyendo 25% la recarga

AÑO	Entradas (hm ³ /año)			Salidas (hm ³ /año)		
	Recarga	FL	Intrusión	Sal al Mar	Dren	Pozos
1973	4.34	31.46	1.46	6.6	0.94	23.14
1974	5.23	29.59	0.7	9.79	1.76	23.14
1975	7.92	34.69	0.45	12.31	2.48	23.14
1976	6.51	30.14	0.83	9.97	1.87	31.7
1977	9.4	36.54	0.84	9.97	1.92	31.7
1978	4.49	31	1.4	8.2	1.48	31.7
1979	5.06	31.87	2.08	6.96	1.19	31.7
1980	5.98	33.61	3.29	5.44	0.92	40.27
1981	8.23	39.49	3.01	6.03	1.1	40.27
1982	11.26	43.72	1.44	8.9	1.87	40.27
1983	5.85	32.72	2.56	6.48	1.21	40.27
1984	6.32	34.16	3.87	4.71	0.79	40.27
1985	5.89	34.88	6.16	2.94	0.35	45.65
1986	6.41	35.18	6.8	2.55	0.27	45.65
1987	9.05	40.26	5.29	4	0.56	45.65
1988	9.15	39.14	4	5.44	0.86	45.65
1989	13.51	44.1	2.9	7.32	1.35	45.65
1990	9.69	37.89	2.68	7.31	1.29	45.65
1991	10.55	43.51	1.96	7.54	1.34	42.82
1992	6.41	32.4	2.83	5.36	0.8	42.82
1993	6.14	34.08	4.56	3.23	0.38	42.82
1994	6.44	34.47	5.17	2.74	0.3	42.82
1995	5.18	32.8	2.63	4.43	0.62	31.48
1996	7.22	31.6	1.15	6.52	1.03	31.48
1997	4.82	30.47	0.91	7.23	1.19	26.2
1998	5.79	30.04	0.79	8.13	1.39	26.2
1999	5.17	29.9	0.74	8.48	1.44	26.2
2000	6.52	29.93	0.75	8.48	1.46	26.2
2001	4.17	29.99	0.78	8.14	1.37	26.2
2002	6.63	29.76	0.7	8.94	1.53	26.2
2003	9.12	40.32	0.42	12.69	2.59	26.2
2004	6.73	33.07	0.32	14.75	3	25
2005	5.73	28.62	0.59	10.9	1.89	25
2006	5.77	28.81	0.51	11.65	1.98	20.74
2007	7.64	33.94	0.35	14.18	2.69	20.74
2008	6.52	32.7	0.28	16.06	3.17	18.87
2009	5.16	27.19	0.36	14.52	2.64	18.87

Tabla 6. Balance hídrico anual disminuyendo 25% la recarga

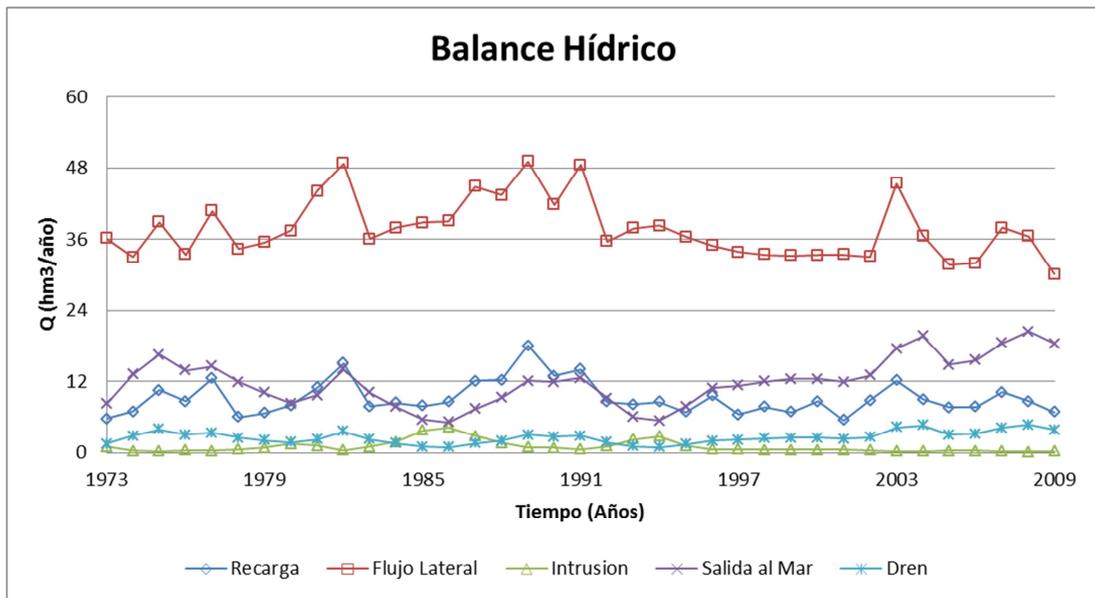


Figura 19. Balance hídrico calculado (FL+25%)

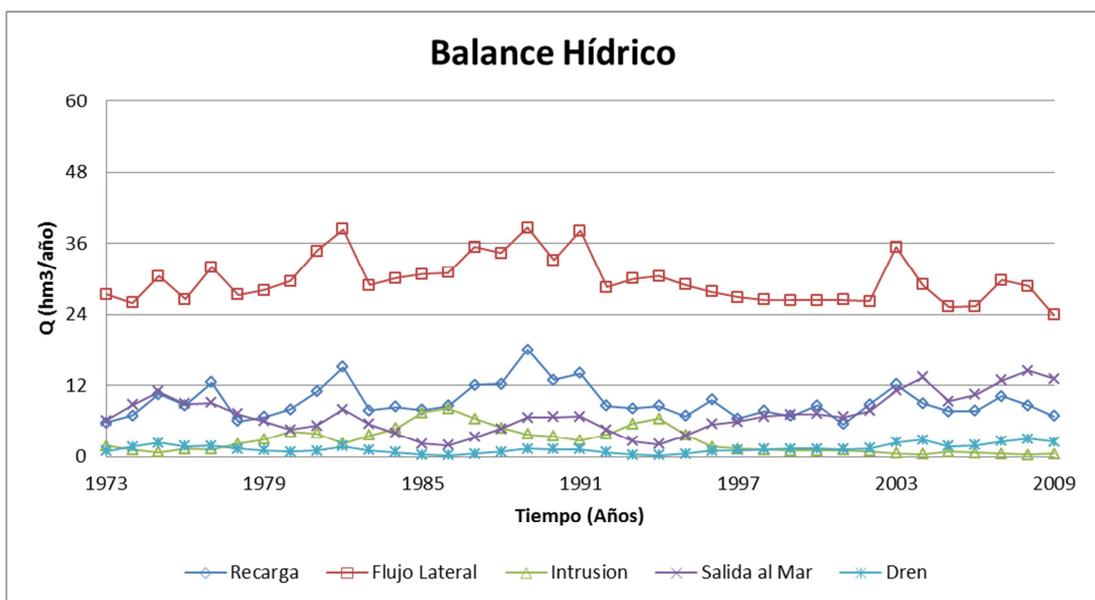


Figura 20. Balance hídrico calculado (FL-25%)

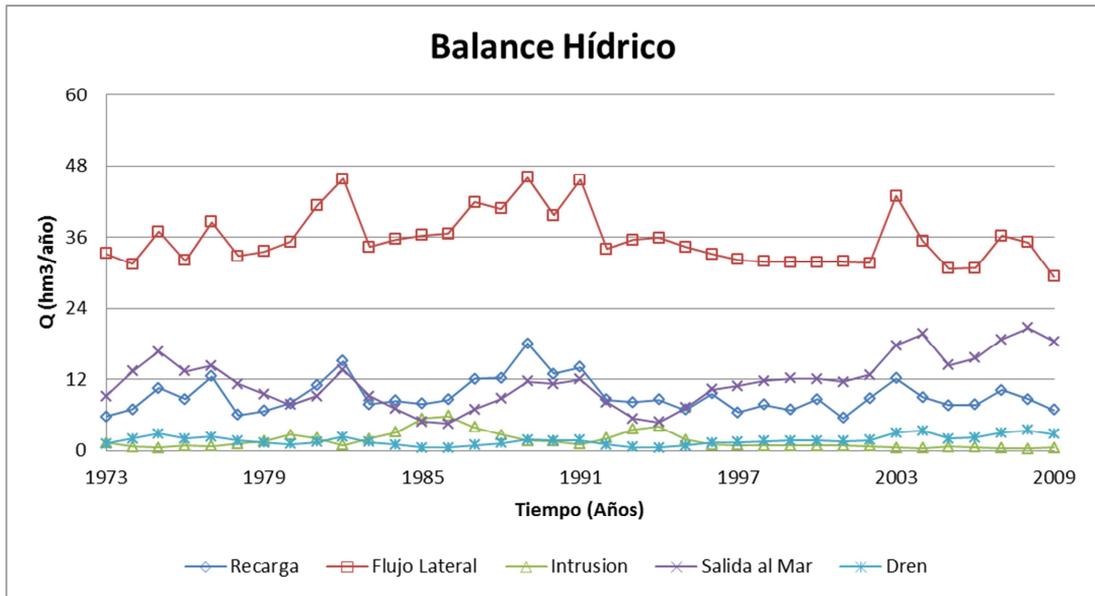


Figura 21. Balance hídrico calculado (Cond+25%)

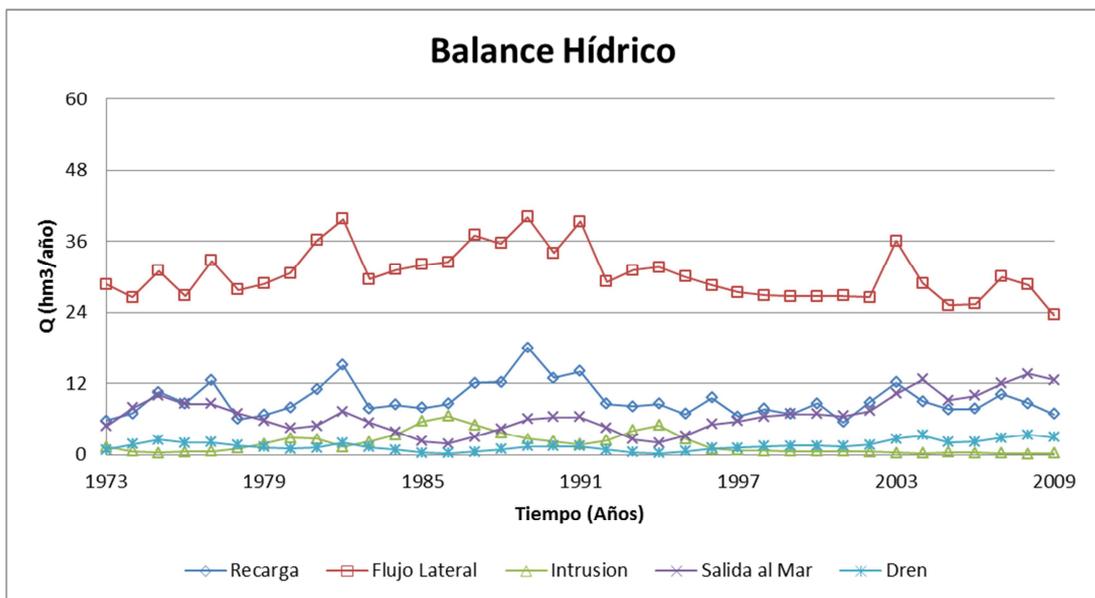


Figura 22. Balance hídrico calculado (Cond-25%)

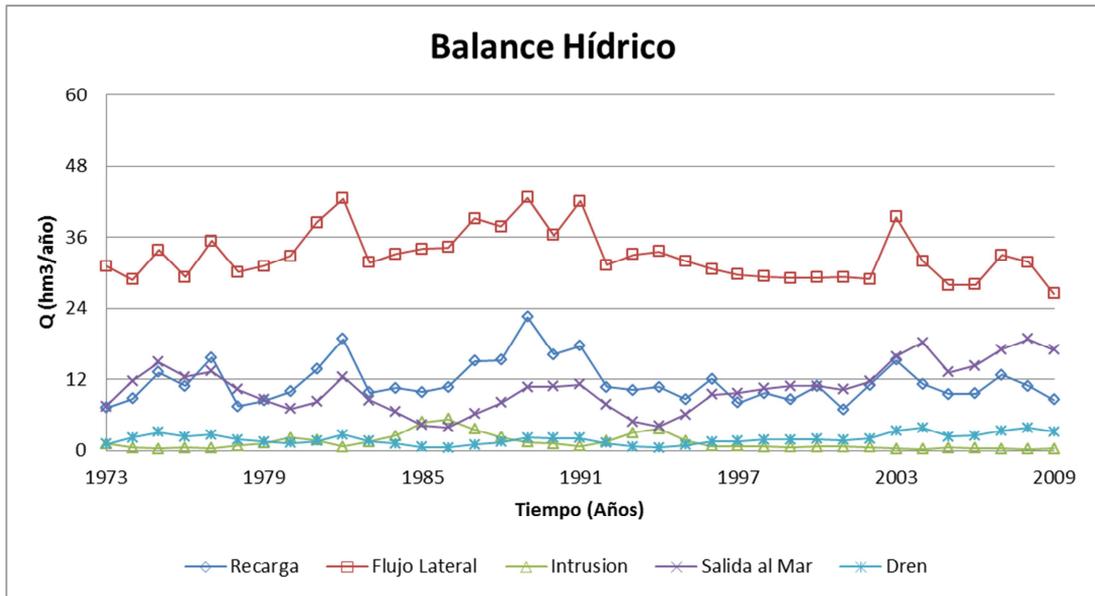


Figura 23. Balance hídrico calculado (Inf+25%)

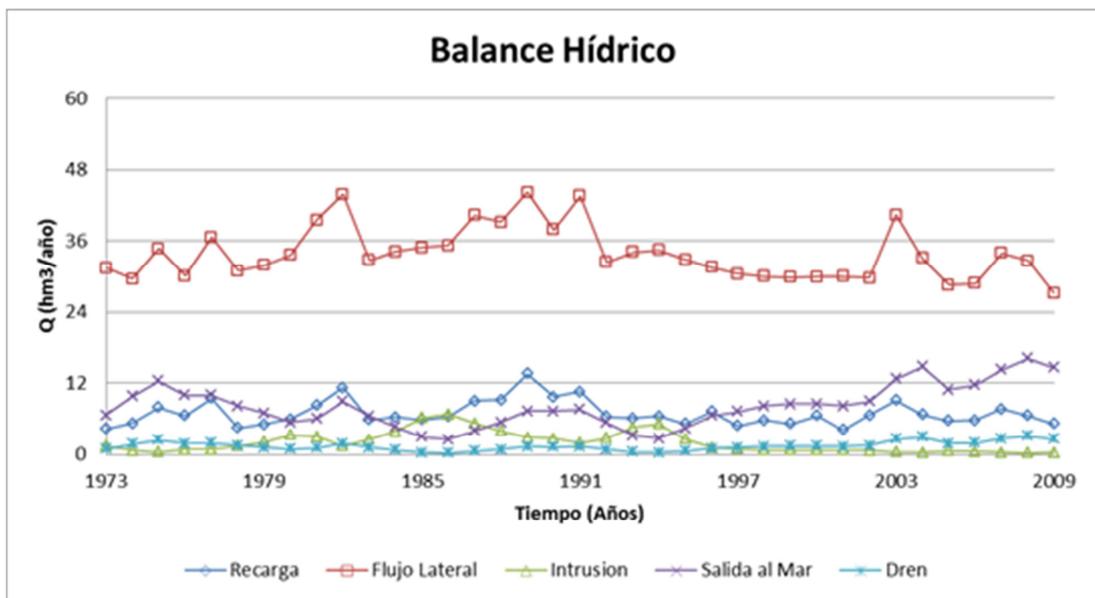


Figura 24. Balance hídrico calculado (Inf-25%)

