

Trabajo Fin de Máster

***MODELACIÓN AVANZADA DE LOS
EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN
EL ACUÍFERO LITORAL DE LA PLANA DE
OROPESA – TORREBLANCA***

Intensificación: *RECURSOS HIDRICOS*

Autor:

MONICA JAIMES BORDA

Director:

DR. JOSÉ E. CAPILLA ROMÁ

Fecha: 05, 2015



**UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA**

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma



Resumen del Trabajo de Fin de Máster

Datos del proyecto

Título: MODELACIÓN AVANZADA DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL ACUÍFERO LITORAL DE LA PLANA DE OROPESA – TORREBLANCA.

Alumno: MONICA JAIMES BORDA.

Director: DR. JOSÉ E. CAPILLA ROMÁ

Codirector/es:

Fecha de Lectura: 05, 2015

Resumen

En castellano (máximo 2000 palabras)

Resumen

La intrusión salina en el acuífero litoral de La Plana de Oropesa – Torreblanca es un problema inevitable y difícil de remediar debido a su sobreexplotación; para su estudio se han desarrollado diversos modelos que caracterizan el comportamiento de este acuífero, sin embargo se ha observado que estos presentan dificultad para representar de una manera más realista la forma adoptada de la intrusión salina, afectando con ello la estimación de los resultados del modelo, lo cual puede llegar a ser crítico para la planificación y gestión de los recursos de este acuífero. En el presente trabajo se describe un modelo con mayor resolución vertical que los anteriores y que además considera los efectos de cambio climático. El modelo avanzado parte de los datos del modelo de Sanz (2013), presenta un número mayor de capas y una variación de las conductividades hidráulicas correspondientes a las celdas más próximas a la costa, consiguiendo con ello reproducir adecuadamente la evolución de la interfaz salina. Los resultados muestran que el valor de la intrusión salina media anual (1.65 hm³/año) es similar al valor obtenido por Sanz (2013) mientras que las salidas al mar, descargas a la zona húmeda y las entradas laterales muestran una disminución.

Para evaluar el impacto del cambio climático sobre el acuífero La Plana de Oropesa – Torreblanca, se consideró una disminución de las recargas de un -18.7% (Osma, 2010) y un incremento del nivel del mar de +4.2 mm/año (Spada, G. y Galassi, G., 2014), dentro del escenario A1B y el periodo futuro 2015 – 2052. Los resultados de la simulación mostraron que se prevé un incremento considerable de la intrusión salina (aproximadamente un incremento de la mitad del valor obtenido con el modelo avanzado), como consecuencia se prevé que el acuífero presentara pérdidas anuales en sus recursos. La mayor resolución vertical, los nuevos resultados del modelo avanzado y las proyecciones a futuro del comportamiento del acuífero son importantes contribuciones para el manejo y planificación sostenible de sus recursos.

En valenciano (máximo 2000 palabras)

Resum

La intrusió salina a l'aqüífer litoral de La Plana Oropesa – Torreblanca és un problema inevitable i difícil de remeiar degut a la seua sobreexplotació; per al seu estudi s'han desenvolupat diversos models que caracteritzen el comportament d'aquest aquífer, no obstant això s'ha observat que aquests presenten dificultats per representar d'una manera més realista la forma adoptada de la intrusió salina, afectant amb això l'estimació dels resultats del model, la qual cosa pot arribar a ser crític per a la planificació i gestió dels recursos d'aquest aquífer. El present treball descriu un model amb major resolució vertical que els anteriors i que a més considera els efectes de canvi climàtic. El model avançat parteix de les dades del model de Sanz (2013), presenta una major quantitat de capes i una variació de les conductivitats hidràuliques corresponents a les cel més properes a la costa, aconseguint reproduir adequadament l'evolució de la interfície salina. Els resultats mostren que el valor de la intrusió salina mitjana anual (1.65 hm³/any) és similar al valor obtingut per Sanz (2013), i les sortides al mar, descàrregues a la zona humida i les entrades laterals mostren una disminució.

Per avaluar l'impacte del canvi climàtic sobre l'aqüífer La Plana Oropesa – Torreblanca, es va considerar una disminució de les recarregues d'un -18.7% (*Osma, 2010) i un increment del nivell del mar de +4.2 mm/any (*Spada, G. i *Galassi, G., 2014), dins de l'escenari A1B i el període futur 2015 – 2052. Els resultats de la simulació van mostrar que es preveu un increment considerable de la intrusió salina (aproximadament un increment de la meitat del valor obtingut amb el model avançat), com a conseqüència es preveu que l'aqüífer presentarà pèrdues anuals en els seus recursos. La major resolució vertical, els nous resultats del model actual i les projeccions a futur del seu comportament són importants contribucions per al maneig i planificació sostenible dels recursos d'aquest aquífer.

En inglés (máximo 2000 palabras)

Summary

The salt water intrusion in coastal aquifer of La Plana de Oropesa - Torreblanca is an inevitable and difficult problem to overcome due to overexploitation; for study they have developed various models that characterize the behavior of this aquifer, however it has been observed that these have difficulty represent more realistically the adopted form of saltwater intrusion, thereby affecting the estimation of the model

results , which can be critical for planning and management of the resources of this aquifer. This paper describes a model with higher vertical resolution and also considers the effects of climate change. Advanced model get information from the Sanz's model, presents a greater number of layers and a variation corresponding to the most nearshore hydraulic conductivities cells, thereby achieving adequately reproduce the evolution of the saline interface. The results show that the average annual value of saltwater intrusion (1.65 million m³ / year) is similar to the value obtained by Sanz (2013) while going to sea, discharges to the wetland and side entries show a decline.

To assess the impact of climate change on aquifer Plana Oropesa - Torreblanca, a decrease of -18.7% recharge (Osma, 2010) and a sea level rise of +4.2 mm / year (Spada, it considered G. and Galassi, G., 2014) under the A1B scenario and the future period 2015 - 2052. The simulation results showed that for a substantial increase in saltwater intrusion (an increase of approximately half of the value obtained with the model Advanced), therefore it is anticipated that the aquifer submit annual losses in resources. The higher vertical resolution, new advanced model results and future projections aquifer behavior are important contributions to the sustainable management and planning of resources

Palabras clave (máximo 5): Salinizacion, intrusion, acuífero, cambio climatico

A Dios, mi familia y mis amigos.

"No hay vida sin agua."

Albert Szent-Gyorgyi.

Agradecimientos

Quería agradecer al profesor José E. Capilla por la guía y apoyo para la realización del trabajo final de master, agradecer también al Gobierno de mi País por la beca otorgada, a mi familia y amigos que siempre están conmigo.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	8
1.1. Introducción	8
1.2. Objetivos	9
1.3. Justificación	9
1.4. Localización geográfica	10
2. HIDROGEOLOGÍA	12
2.1. Introducción	12
2.2. Antecedentes	12
2.3. La masa de agua subterránea 080.110: Plana de Oropesa-Torreblanca ..	12
2.3.1. Situación y naturaleza	12
2.3.2. Geometría y límites	14
2.3.3. Parámetros hidrodinámicos	15
2.3.4. Rasgos hidroquímicos básicos	15
2.3.5. Marco hidrológico	16
2.3.6. Marco socioeconómico de la Plana Oropesa – Torreblanca	17
2.3.7. Importancia ambiental del Prat de Cabanes	18
2.4. La masa de agua subterránea 080.008: Maestrazgo Oriental	19
2.4.1. Caracterización hidrogeológica	19
2.4.2. Balance hídrico	21
2.4.3. Hidroquímica general	22
3. MODELOS MATEMÁTICOS PREVIOS DE LA MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA OROPESA - TORREBLANCA	23
3.1. Antecedentes de modelos matemáticos	23
3.2. Síntesis y conclusiones	30
4. ESTADO DEL ARTE DEL FENÓMENO DE UPCONING	32
4.1. Introducción	32
4.2. Descripción de upconing	32
4.3. Métodos de análisis	34
4.3.1. Interfase marcada	34
4.3.2. Densidad dependiente del transporte de solutos	37

4.3.3.	Relaciones entre el ascenso de la interfase y la salinidad del agua bombeada.....	41
4.4.	Síntesis y Conclusiones	42
5.	ESTADO DEL ARTE DEL CAMBIO CLIMATICO.....	43
5.1.	Introducción cambio climático.....	43
5.2.	Modelos de circulación general acoplados océano-atmósfera.....	44
5.3.	Definición de escenarios.....	44
5.4.	Modelos regionales	48
5.4.1.	Introducción	48
5.4.2.	Concepto de regionalización	48
5.4.3.	Modelos climáticos regionales para Europa y el Mediterráneo	49
5.5.	Escenarios climáticos para la comunidad valenciana.....	53
6.	MODELO AVANZADO TRANSITORIO Y TRIDIMENSIONAL DEL ACUÍFERO LITORAL DE LA PLANA DE OROPESA – TORREBLANCA.....	55
6.1.	Descripción de los datos disponibles.....	55
6.1.1.	Caracterización de las zonas hidrogeológicas	55
6.1.2.	Topografía y Muro de la formación hidrogeológica Plana Oropesa - Torreblanca	55
6.1.3.	Muro de la zona Cretácica	56
6.1.4.	Prat de Cabanes	56
6.1.5.	Parámetros Hidrogeológicos.....	57
6.1.6.	Recarga	58
6.1.7.	Bombeos	59
6.1.8.	Piezometría y puntos de Control de Calidad.....	62
6.1.9.	Flujo lateral	64
6.2.	Modelo matemático	65
6.2.1.	Calibración del modelo de flujo y transporte con efectos de la densidad variable (SEAWAT)	68
6.2.2.	Resultados del modelo	71
6.2.3.	Análisis de sensibilidad.....	84
6.2.4.	Efectos del fenómeno upconing en los puntos de control de calidad..	86

6.3. Efectos del cambio climático en el nivel del mar y el acuífero costero Plana de Castellón	89
6.3.1. Selección de escenario climático	89
6.3.2. Simulación del modelo con afección por el cambio climático	89
6.3.3. Resultados de la simulación en el acuífero	90
6.3.4. Análisis de sensibilidad.....	92
7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	95
7.1. Síntesis y Conclusiones	95
7.2. Líneas de investigación futuras.....	95
8. BIBLIOGRAFÍA	98
ANEJO 1: BALANCES HIDRICOS ANUALES	102

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización geográfica de la masa de agua subterránea Oropesa – Torreblanca (080.110) (Renau, 2013).	11
Figura 2. A la derecha topografía y a la izquierda geometría de la Plana (Sanz, 2013)	14
Figura 3. Sistemas de explotación en la cuenca del Júcar (Cabezas et al., 2008)	16
Figura 4. Red de drenaje de la Plana Oropesa – Torreblanca (Sanz, 2013)	17
Figura 5. Localización de las principales poblaciones y municipios existentes en la Plana de Oropesa – Torreblanca.	17
Figura 6. Piezometría general del acuífero del Maestrazgo Oriental (Renau-Pruñonosa, 2013)	20
Figura 7. Estructura del flujo en la Sierra de Irta. 1- Miocuaternario; 2- Cretácico; 3-Jurásico; 4- Manantiales costeros; 5- Direcciones preferenciales de flujo (Renau-Pruñonosa, 2013)	21
Figura 8. Mallado del modelo de la Plana de Oropesa Torreblanca (IGME - UJI, 2009).	25
Figura 9. Modelo matemático para el acuífero Plana Oropesa – Torreblanca (Renau, 2013).	27
Figura 10. Diagrama simplificado de un entorno acuífero libre costero, que muestra (a) cuña de agua de mar, (b) la circulación de la densidad impulsada en la zona de agua de mar, (c) upconing de agua de mar debido al bombeo de pozos, (d) los procesos de franja costera, como cara de las mareas filtraciones y la zona superior de recirculación de agua de mar, (e) afloramiento de aguas subterráneas (Adrián D. Werner, et. al, 2013).	33
Figura 11. Upconing del agua salina subyacente debido al bombeo de un pozo (K. I. Hamza, 2006).	34
Figura 12. Ascenso de la interfase marcada, por debajo de un pozo de bombeo	36
Figura 13. Salinidad del agua bombeada, en función de la salinidad media del agua intruida por encima de la profundidad crítica.	41
Figura 14. Escenarios de emisiones de GEI (IPCC, 2007).	47
Figura 15. Sectorización por zonas (Sanz, 2013)	55
Figura 16. Perfil de la topografía y muro del acuífero Oropesa – Torreblanca (Sanz, 2013).	56
Figura 17. Conductancia del Prat de Cabanes (Sanz, 2013)	57
Figura 18. Conductividad hidráulica para el acuífero Pliocuaternario (izquierda) y acuífero cretácico (izquierda) (Sanz, 2013).	58
Figura 19. Evolución de las precipitaciones para el periodo 1973 a 2009 (Sanz, 2013)	59
Figura 20. Evolución de la infiltración a lo largo del periodo 1973 a 2009 (Sanz, 2013)	59
Figura 21. Evolución anual de los bombeos (Sanz, 2013)	60
Figura 22. Pozos de bombeo en el acuífero Plana Oropesa – Torreblanca (Sanz, 2013)	61
Figura 23. Localización de los piezómetros y puntos de control de calidad (Sanz, 2013)	64
Figura 24. Flujos laterales	65
Figura 25. Discretización vertical	66
Figura 26. Celdas activas de la capa 1, 2,3 y 4 (referidas a la malla de 250x250)	67
Figura 27. Celdas activas de la capa 2, 3,4 y 5 (referidas a la malla de 250x250)	67
Figura 28. Celdas activas de la capa 9, 10, y 11 (referidas a la malla de 250x250)	68

Figura 29. Concentración de salinidad en la capa 1, capa 2 y capa 3.	69
Figura 30. Concentración de salinidad en la capa 4, capa 5 y capa 6.	69
Figura 31. Concentración de salinidad en la capa 7, capa 8 y capa 9.	70
Figura 32. Concentración de salinidad en la capa 10 y capa 11.	70
Figura 33. Conductividad en el acuífero Pliocuaternario (izquierda) y en el acuífero cretácico (derecha).	71
Figura 34. Ubicación de los puntos de control de salinidad y piezometría	72
Figura 35. Altura piezométrica Obs vs Calc (punto 312360002, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)	73
Figura 36. Altura piezométrica Obs vs Calc (punto 312360009, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)	73
Figura 37. Altura piezométrica Obs vs Calc (punto 312350024, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)	74
Figura 38. Altura piezométrica Obs vs Calc (punto 312350025, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)	74
Figura 39. Altura piezométrica Obs vs Calc (punto 312410013, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)	75
Figura 40. Altura piezométrica Obs vs Calc (punto 312410017, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)	76
Figura 41. Altura piezométrica Obs vs Calc (punto 312410019, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)	76
Figura 42. Altura piezométrica Obs vs Calc (punto 312410020, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)	77
Figura 43. Altura piezométrica Obs vs Calc (punto 302440027, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)	77
Figura 44. Altura piezométrica Obs vs Calc (punto 29, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)	78
Figura 45. Concentración salinidad Obs vs Calc (punto 302440005, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)	79
Figura 46. Concentración salinidad Obs vs Calc (punto 46, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)	79
Figura 47. Concentración salinidad Obs vs Calc (punto 312350029, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)	80
Figura 48. Concentración salinidad Obs vs Calc (punto 312360002, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)	80
Figura 49. Concentración salinidad Obs vs Calc (punto 302440027, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)	81

Figura 50. Concentración salinidad Obs vs Calc (punto 312350017, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)	81
Figura 51. Concentración salinidad Obs vs Calc (punto 312310019, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)	82
Figura 52. Concentración salinidad Obs vs Calc (punto 312310016, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)	82
Figura 53. Balance hídrico anual	83
Figura 54. Altura piezométrica Obs vs Calc (punto 312350025)	85
Figura 55. Concentración de salinidad Obs vs Calc (punto 312350029)	85
Figura 56. Altura piezométrica Obs vs Calc (punto 312360002, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)	87
Figura 57. Concentración salinidad Obs vs Calc (punto 312360002, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)	88
Figura 58. Mapa de las curvas piezométricas del acuífero Plana Oropesa – Torreblanca y mapa de ubicación de puntos de control y piezometría.	89
Figura 59. Balance hídrico anual del modelo avanzado con afección por el cambio climático	91
Figura 60. Intrusión y salidas al mar del modelo avanzado Vs el modelo avanzado con efectos del cambio climático	92
Figura 61. Análisis de sensibilidad en el punto de altura piezométrica 312350025	94
Figura 62. Análisis de sensibilidad en el punto de concentración de salinidad 312350029	94

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. BALANCE HÍDRICO DEL ACUÍFERO DEL MAESTRAZGO ORIENTAL (CHJ, 2005 Y 2007).	22
TABLA 2. BALANCE HÍDRICO SEGÚN IGME – UJI (2009).	25
TABLA 3. BALANCE HÍDRICO (RENAU, 2013).....	28
TABLA 4. RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL MODELO MATEMÁTICO DE IGME – UJI (2009) VS RENAU (2013) VS SANZ (2013).	29
TABLA 5. COMPARACIÓN DE BALANCE HÍDRICO DE LOS MODELOS DE IGNACIO SANZ, 2013 VS RENAU, 2013, VS IGME, 2009.	30
TABLA 6. RELACIÓN DE CENTROS Y MODELOS REGIONALES EN EL PROYECTO PRUDENCE, CON LAS CONFIGURACIONES DE MALLA Y LAS CONDICIONES DE CONTORNO LATERALES USADAS POR CADA MODELO (FUENTE: MIMAM, 2008).....	49
TABLA 7. PROYECCIONES PARA EL NIVEL DEL MAR PARA 2040 – 2050 ATREVES DE LA SUB CUENCA DEL MEDITERRÁNEO. EL AUMENTO TOTAL DEL NIVEL DEL MAR PARA ESCENARIOS MIN50 Y MAX50 (FUENTE: SPADA, G. Y GALASSI, G. 2014).....	52
TABLA 8. VARIACIÓN TOTAL DEL NIVEL RELATIVO DEL MAR Y SUS RANGOS PARA 2040 – 2050 CONFORME A LOS ESCENARIOS MIN50 Y MAX50, EN LOS SEIS MAREÓGRAFOS CONSIDERADOS ES ESE ESTUDIO. LA COLUMNA DE EXTRAPOLACIÓN MUESTRA EL AUMENTO DEL NIVEL DEL MAR QUE PODRÍA SER OBSERVADO ASUMIENDO RANGOS SEculares DE LA ANTERIOR TABLA Y LAS SIGUIENTES COLUMNAS SON LAS TENDENCIAS FUTURAS. (FUENTE: SPADA, G. Y GALASSI, G. 2014).	52
TABLA 9. POZOS UBICADOS EN LA PLANA OROPESA – TORREBLANCA I (RENAU – PRUÑONOSA, 2013) .	61
TABLA 10. POZOS UBICADOS EN LA PLANA OROPESA – TORREBLANCA II (RENAU – PRUÑONOSA, 2013)	61
TABLA 11. POZOS UBICADOS EN LA PLANA OROPESA – TORREBLANCA III (RENAU – PRUÑONOSA, 2013)	62
TABLA 12. COORDENADAS DE PIEZÓMETROS Y PUNTOS DE CONTROL	63
TABLA 13. CELDAS ACTIVAS POR CAPA.....	66
TABLA 14. COMPARACIÓN DE LOS BALANCES HÍDRICOS MEDIOS CALCULADOS PARA EL MODELO	84
TABLA 15. BALANCE HÍDRICO MEDIO (ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD)	84
TABLA 16. TABLA CLASIFICANDO LOS PUNTOS DE CONTROL SEGÚN SU USO	86
TABLA 17. BALANCE HÍDRICO CALCULADO PARA MODELO CON CAMBIO CLIMÁTICO.....	91
TABLA 18. TABLA DE ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO AVANZADO CON EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO.	93
TABLA 19. BALANCE HÍDRICO ANUAL DEL MODELO AVANZADO	102
TABLA 20. BALANCE HÍDRICO ANUAL DEL MODELO AVANZADO CON REDUCCIÓN DE LA PRECIPITACIÓN, DE LOS FLUJOS LATERALES E INCREMENTO DEL NIVEL DEL MAR.	103

INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

Los acuíferos almacenan volúmenes de agua subterránea y constituyen un importante recurso de agua dulce accesible y vital para la población mundial. De este recurso depende el suministro a grandes ciudades y zonas rurales, actividades industriales y más de la tercera parte del riego. Aunque su utilización viene de tiempo atrás, su aprovechamiento ha ido en aumento en las últimas décadas y ha sido un factor clave para el desarrollo en algunos países.

España es un país con gran potencial hidrogeológico y el uso de agua subterránea se ha incrementado en los últimos años, y según la confederación hidrográfica del Júcar (2013) en la actualidad los volúmenes consumidos de agua subterránea en el sistema de explotación de Cenia - Maestrazgo (donde se ubica el acuífero Plana Oropesa – Torreblanca) es de 89.9% considerablemente mayor al volumen consumido de agua superficial que solo es de 9.7%.

Las aguas subterráneas son un recurso natural importante para los ecosistemas de agua y tierra, para la producción industrial y agrícola y para el abastecimiento de agua potable, pero amenazado en su calidad por problemas de contaminación. Según el informe de caracterización inicial requerido por la Directiva Marco del Agua (DMA, 2006), los principales problemas medioambientales que afectan a mayor número de acuíferos (masas de agua subterránea) son la contaminación difusa por nitratos y la salinización por intrusión salina.

La intrusión salina es un problema muy frecuente 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.

Para el presente siglo se prevé una significativa disminución de las recargas a los acuíferos costeros producto del cambio climático (provocado por el calentamiento global). En zonas costeras mediterráneas ya se han detectado cambios, tales como el aumento de las

temperaturas medias, la disminución de las precipitaciones anuales y el aumento del nivel medio del mar. Como consecuencia los acuíferos costeros se verán afectados, disminuirán las recargas y presentaran mayor grado de afección a la calidad de sus aguas a causa de una demanda más intensa al constituir la principal fuente de recurso hídrico en zonas con precipitaciones escasas y de poca intensidad.

Por todo lo expuesto, el propósito de este trabajo de investigación es simular el acuífero costero Plana Oropesa – Torreblanca con mayor resolución vertical a partir de los datos del modelo de Sanz (2013), que además considero los efectos del cambio climático.

1.2. Objetivos

Los objetivos primordiales de este trabajo son:

Simular la interfaz salina con mayor precisión, para ello mejoraremos la resolución vertical del modelo de Sanz (2013), y como consecuencia conoceremos con mayor precisión la evolución de la salinidad en el acuífero.

Simular el comportamiento del acuífero en un escenario climático seleccionado teniendo en cuenta las variaciones en la recarga, flujos laterales y el incremento del nivel del mar.

1.3. Justificación

En los últimos años es de vital importancia conocer en profundidad el funcionamiento de los sistemas hídricos, para poder hacer un manejo adecuado de su distribución manteniendo su sostenibilidad. Las poblaciones de Oropesa del Mar, Torreblanca y Alcocebre, se favorecen con la explotación del acuífero Plana Oropesa Castellón, siendo esta la principal fuente de agua para el sector agrícola.

Al mejorar la resolución vertical, aumentamos el número de capas que afectara a la precisión del modelo, con lo cual podremos reproducir adecuadamente la forma adoptada de la interfaz salina, también nos permitirá conocer con mayor precisión el balance hídrico, el impacto hidrogeológico a la zona húmeda de alto valor ambiental “Prat de Cabanes” que recibe aportes del acuífero, y podremos analizar incertidumbres del fenómeno upconing en los datos observados.

Según la Confederación Hidrográfica del Júcar en su memoria de presiones (2013) menciona que el acuífero Plana Oropesa – Torreblanca presenta una presión significativa por intrusión salina y un impacto significativo por avance de la cuña salina desde el mar, por lo que es importante conocer con mayor precisión el balance hídrico y las proyecciones a futuro de este acuífero.

En la actualidad ningún modelo disponible se enfocó en conocer los impactos que este acuífero y la zona húmeda (El Prat de Cabanes) podrían sufrir en los siguientes años por causa del cambio climático, por lo cual el presente trabajo nos dará una idea cuantitativa de los posibles impactos que pueda sufrir este acuífero.

1.4. Localización geográfica

La Plana Oropesa Torreblanca es un acuífero costero de forma alargada que se extiende a lo largo de la costa con una longitud aproximada de 25 km, una anchura variable de 2.5 a 6 km, y superficie aproximada de 90km² (Renau, 2013).

Este acuífero se encuentra ubicado en la parte sur de la comarca de la Plana Alta y la parte norte a la comarca de Baix Maestrat en la provincia de Castellón, en la comunidad Valenciana (Figura 1). El acuífero limita al sur con la sierra de Oropesa y el macizo de Desert de Palmes, al norte con la población de Alcocebre y Sierra de Irta, al este con el mar Mediterráneo y al oeste con el Maestrazgo Oriental (Figura 1).

En el sector superficial del área de estudio se asientan las poblaciones de Oropesa del Mar, Torreblanca y Alcocebre. También existen poblaciones más pequeñas y dispersas como son Torre la Sal, el Broseral Torrenosta y Rivera de Cabanes.

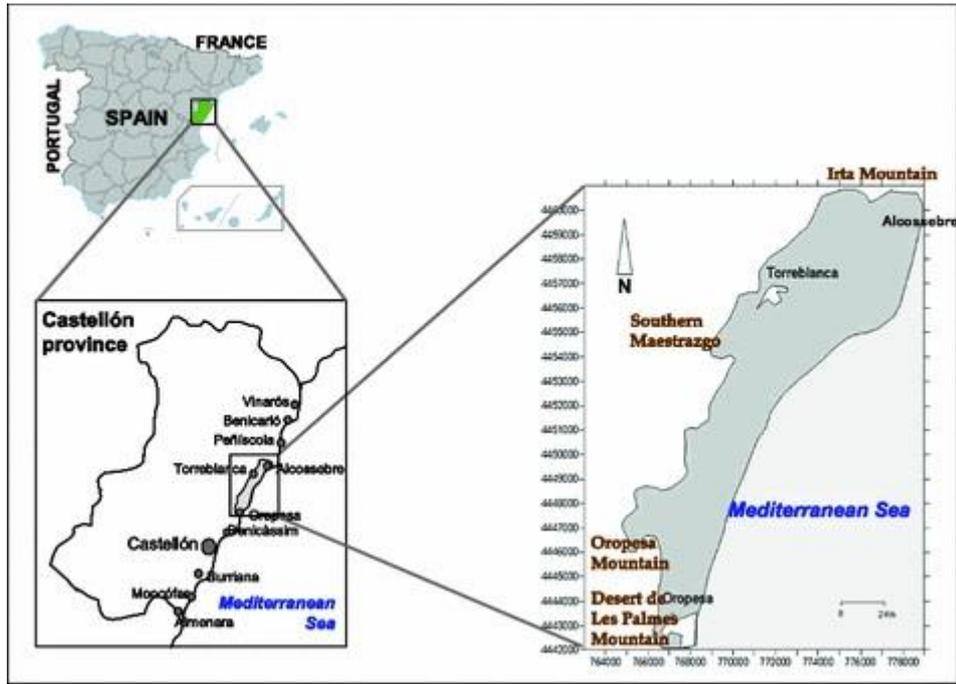


Figura 1. Localización geográfica de la masa de agua subterránea Oropesa – Torreblanca (080.110) (Renau, 2013).

2. HIDROGEOLOGÍA

2.1. Introducción

Los estudios hidrogeológicos son imprescindibles para la caracterización de un acuífero, ya que mediante estos podemos conocer sus características geológicas, hidrológicas y climáticas, que son de especial interés para un manejo adecuado de los recursos hídricos.

En este capítulo expondremos información disponibles de los antecedentes de estudios hidrogeológicos, y las características de las masas de agua subterránea de la Plana Oropesa – Torreblanca y Maestrazgo, este ultimo de especial interés por las descargas laterales que realiza al acuífero Plana Oropesa – Torreblanca. También expondremos información acerca del Prat de Cabanes (zona húmeda protegida), la cual recibe aportes del acuífero Plana Oropesa – Torreblanca.

2.2. Antecedentes

El acuífero Plana Oropesa – Torreblanca viene siendo estudiado desde los setenta. El primer estudio fue realizado por el Servicio Geológico de Obras Públicas (EPTISA, 1975a y 1975b; SGOP 1975), el cual se basó en la delimitación de los acuíferos de borde y sus posibles interconexiones con la Plana Oropesa – Torreblanca. Luego Morell en 1985 aborda la problemática de la intrusión marina y actualiza los conocimientos de la hidrogeología del acuífero Plana Oropesa – Torreblanca, años siguientes Morell y Jiménez siguen estudiando la hidroquímica de la zona.

Acerca del Prat de Cabanes (zona húmeda) existen varias publicaciones sobre la flora, la fauna, el paisaje e itinerarios didácticos de historia (MIMAM, 1996; Gómez - Serrano 1999 y 2001; Molina, 2000; Carmona y Ruiz, 2009), y según Renau “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)”.

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

2.3.1. Situación y naturaleza

La Plana Oropesa – Torreblanca se extiende paralela al litoral en dirección NE – SO, con una longitud de 25Km y una anchura variable de 2.5 y 6 Km. La masa de agua subterránea

se emplaza en una llanura de derrame fluviotorrencial de origen árido. Se pueden diferenciar una llanura costera sensiblemente horizontal y una rampa de erosión hacia los bordes de los macizos calcáreos circundantes (Renau, 2013).

La masa de agua subterránea se extiende de forma paralela a la costa, desde Oropesa hasta Alcocebre en la Provincia de Castellón. Al norte y sur limita con la Sierra de Irta y la Sierra de Oropesa respectivamente, al este limita con el mar Mediterráneo y al oeste con la zona oriental del Maestrazgo.

Según ENADIMSA (2013) “La composición de los materiales que componen el acuífero son de naturaleza detrítica básicamente y 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”.

Diferentes sondeos determinan que el acuífero se encuentra emplazado en una depresión tectónica, que en una primera fase se depositaron materiales margoarcillosos y en una segunda fase suprayacente se tiene una serie de conglomerados alternantes con lentejones dispersos de arenas gruesas, limos y arcillas, sobre este depósito se encuentran conos de deyección, aluviones de cauces de ramblas, dunas costeras etc. (Sanz, 2013).

Las unidades litológicas que limitan al acuífero, en mayor o menor medida, presentan interconexiones hidráulicas con el acuífero Pliocuaternalio, dando lugar a recarga lateral subterránea (Sanz, 2013).

La zona húmeda denominada el Prat de Cabanes se ubica en el sector central de la Plana, y está compuesto por limos y margas de color pardo y negro, donde se reconoce un nivel de turba de 3 a 4 m de espesor, el cual se explota económicamente. El Prat de Cabanes se presenta de forma alargada, con un ancho medio de 1,5 Km y una longitud aproximada de 9 km. Su orientación es paralela a la costa, dirección catalánide, con una superficie de 9 km². Está limitado por una barra costera compuesta por cantos rodados, bien clasificados, con tamaños que oscilan entre 1 y 20 cm, con una longitud de 8 km y 20 m de ancho y 3 m de altura (ADARO, 1973a).

2.3.2. Geometría y límites

El acuífero Plana Oropesa – Torreblanca presenta una geometría en forma de cuña, donde los espesores menores se encuentran en la zona continental y van aumentando considerablemente hacia la costa (el espesor medio en conjunto es de 40 m) (Renau, 2013).

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, 1975^a y 1975b; SGOP, 1975; Morell, 1985).

De las siguientes figuras podemos observar que la topografía de Plana alcanza valores de hasta 131 msnm. Y que la profundidad de la formación geológica llega a profundidades de hasta 125 m.

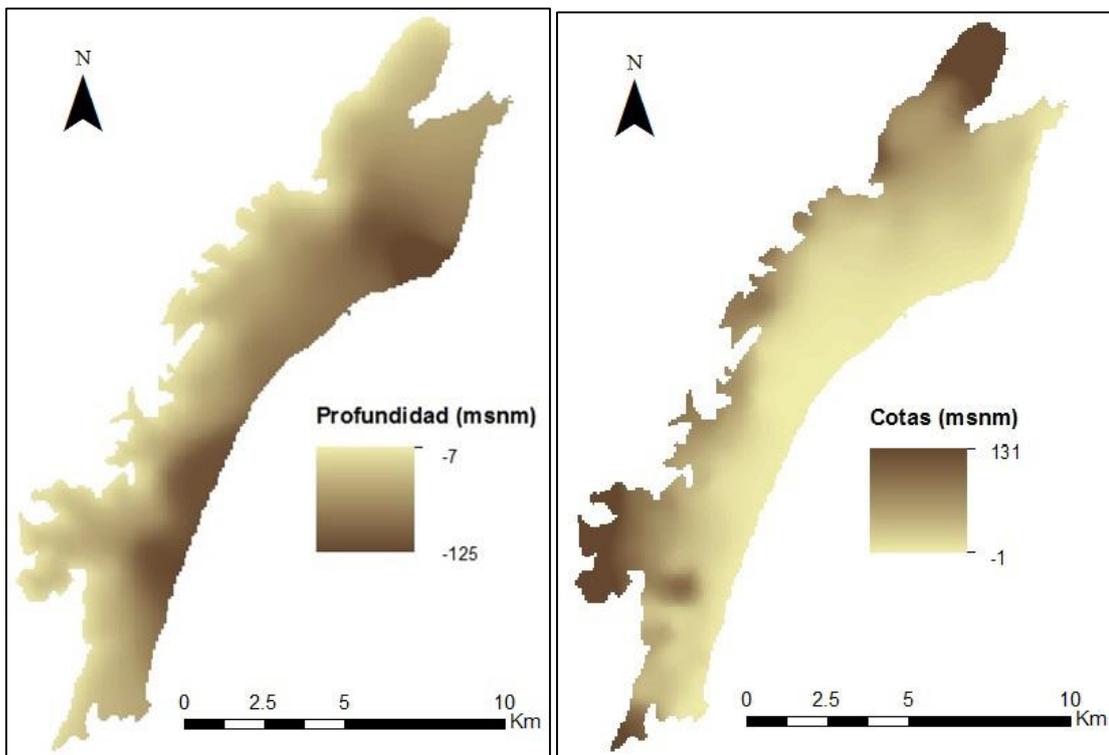


Figura 2. A la derecha topografía y a la izquierda geometría de la Plana (Sanz, 2013)

2.3.3. Parámetros hidrodinámicos

Según Morell (1985) y Giménez (1994) las transmisividades se pueden enmarcar dentro de un amplio rango de valores que van desde los 100 m²/día hasta los 5000 m²/día. Los valores más bajos de transmisividades se encuentran en los alrededores de Torre la sal y los valores más altos se obtienen en el área norte de Oropesa y en el sector central, y en inmediaciones del río San Miguel las transmisividades se incrementan hacia la costa.

Según Renau – Pruñonosa (2009) “el valor de las porosidades útiles están comprendidos entre 2% a 12%, encontrándose los valores más elevados en la zona cercana a la línea de la costa”.

La dirección general del flujo subterráneo es de NO hacia el SE, siendo casi perpendicular a la línea de la costa. En zonas como: al este de Torreblanca y sectores como el Barranco de Chinchilla el sentido del flujo se puede invertir, esto es consecuencia de una intensa explotación de los recursos subterráneos provocando con ello una intrusión salina.

2.3.4. Rasgos hidroquímicos básicos

Según Renau (2013) los acuíferos de la Plana presentan una predominante facie clorurada cálcica. Esto es consecuencia de la mezcla que ocurre entre las aguas procedentes de los acuíferos de borde que son en su mayoría de naturaleza carbonática y las aguas que se encuentran en el acuífero, estas últimas en su mayoría presentan facies cloruradas como consecuencia de la mezcla con agua de mar.

Además se han encontrado concentraciones elevadas del ion nitrato, procedentes de abonos con contenido de nitrógeno utilizados en la agricultura (Giménez, 1994).

Según Renau (2013) “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”

2.3.5. Marco hidrológico

La masa de agua subterránea Plana Oropesa – Torreblanca pertenece a la cuenca hidrográfica del Júcar (CHJ), su sistema de explotación es Cenia Maestrazgo y según la CHJ el código que le corresponde es el 080.110.

Según la CHJ (2013) en el sistema de explotación Cenia Maestrazgo el consumo de agua subterráneas representan el 89%, y el consumo de agua superficial representa 9.7%



Figura 3. Sistemas de explotación en la cuenca del Júcar (Cabezas et al., 2008)

La red hidrográfica está conformada por dos cauces importantes y son: el Barranco Chinchilla que desemboca en la población de Oropesa y el río Cuevas o San Miguel que desemboca al norte de Torrenostra, y otros cauces de menor interés y son: los barrancos de Perchets y Campello y las ramblas de Mañes y Estopet. Ninguno de los cauces es permanente y ni estacional.

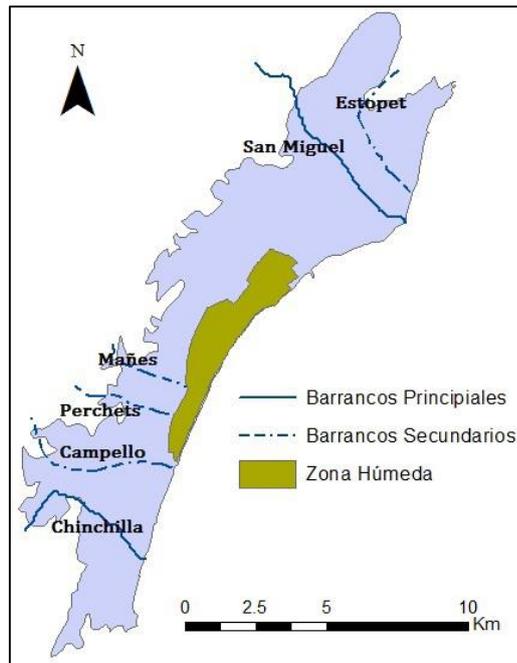


Figura 4. Red de drenaje de la Plana Oropesa – Torreblanca (Sanz, 2013)

2.3.6. Marco socioeconómico de la Plana Oropesa – Torreblanca

La Plana Oropesa – Torreblanca posee un clima mediterráneo caracterizado por veranos cálidos y secos e inviernos suaves y húmedos, con precipitaciones irregulares tanto espacial como temporal, que tienen una media de 500 mm - 600 mm. En la zona de estudio se encuentran poblaciones como Oropesa del Mar, Alcocebre, Terranostra y Torre la Sal

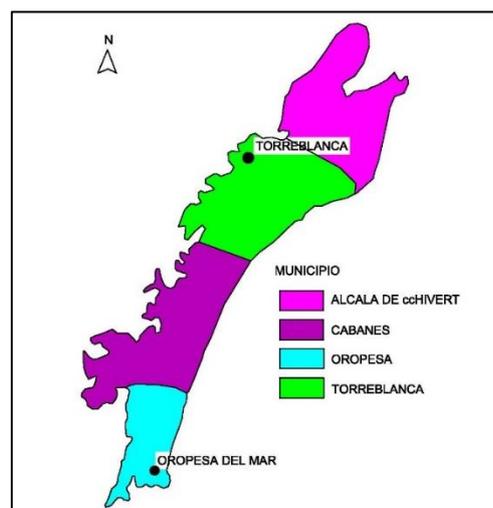


Figura 5. Localización de las principales poblaciones y municipios existentes en la Plana de Oropesa – Torreblanca.

Los diferentes municipios que se encuentran en la parte superficial del acuífero Plana Oropesa – Torreblanca muestran economías diversas y son:

La agricultura es el pilar económico de casi toda la población, siendo sus principales productos las almendras, naranjas, aceitunas, uvas de mesa, cereales y leguminosas

La industria está compuesta por la construcción de muebles, tejidos, prendas de vestir y otros.

El turismo está compuesto por el Prat de Cabanes y Oropesa del Mar, las cuales forman parte del complejo turístico Marina d'Or, también las playas de Torrenostra (ubicadas en Torreblanca) en la actualidad están mostrando un desarrollo turístico.

La ganadería está compuesta de granjas porcinas, avícolas, vacuno, lanar y cabrío.

De las actividades como la agricultura, la industria, el turismo y la ganadería, la que mayor demanda hídrica tiene es la agricultura. Las dotaciones para la agricultura depende del origen del agua, si la fuente es superficial es de 7500 m³/ha/año y si la fuente es subterránea es 5100 m³/ha/año y 6500 m³/ha/año. Los bombeos para uso agrícola son de 32.5 hm³/año y para el consumo humano son de 3.35 hm³/año haciendo un total de 35.85 hm³/año (IGME, 2009)

2.3.7. Importancia ambiental del Prat de Cabanes

El Prat de Cabanes fue declarado en un régimen especial de protección de valores naturales por la Generalitat Valenciana, esta declaración contempla la ordenación de las actividades que se desarrollan en el área. Según Sanz (2013) “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”.

La convención sobre zonas húmedas de importancia como hábitat para las aves acuáticas (RAMSAR) incluyó al Prat de Cabanes como zona húmeda de especial importancia, por propuesta del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. También está declarado como Zona de Especial Protección para las Aves (Zona ZEPA) de acuerdo a la Directiva 79/409/CEE.

Además el Prat de Cabanes dispone de un Plan de Ordenación de los Recursos Naturales y Rector de Uso y Gestión del Parque, el cual fue aprobado por el decreto 4/2003. (Sanz, 2013).

Caracterización del Prat de Cabanes

El Prat de Cabanes – Torreblanca está formado por depósitos cuaternarios (depósito de cantos calizos con potentes intercalaciones arcillosas), es una franja de terreno de marismas y pantanos propios de una zona húmeda litoral, separada del mar por un cordón de gravas. Se trata de una antigua albufera cerrada por un cordón litoral de gravas y cantos.

El Prat de Cabanes es una zona húmeda, que está compuesta por una lámina de agua permanente y estacional por sectores. La inundación de determinados sectores tiene lugar cuando el nivel freático alcanza la cota topográfica de las zonas deprimidas. Los cursos fluviales que atraviesan el Prat, ninguno es de régimen continuo, aunque si se encuentran manantiales de agua dulce que ayudan a mantener zonas inundadas durante todo el año. (Renau, 2013).

El Prat de Cabanes (zona húmeda) se puede clasificar como una zona húmeda del ámbito costero mediterráneo dominado por la dinámica litoral (Durán et al., 2009), este dominio litoral se debe al cierre de una bahía mediante el crecimiento de una barra litoral que la separa total o parcialmente del mar.

2.4. La masa de agua subterránea 080.008: Maestrazgo Oriental

2.4.1. Caracterización hidrogeológica

Según el informe denominado “Estudio inicial para la identificación y caracterización de las masas de agua subterránea de las cuencas intercomunitarias” elaborado por el Ministerio de Medio ambiente (MIMAM, 2005) y los estudios elaborados por la Confederación Hidrográfica del Júcar (2005) denominado “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 subterránea Maestrazgo Oriental (080.008) tiene una superficie de 2248 km² y se localiza en la comarca del Maestrazgo, en la provincia de Castellón (Renau, 2013).

Este acuífero 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).

El material de los acuíferos está formado principalmente por calizas dolomíticas y dolomías, separadas por una serie margosa.

Según Renau (2013) “el acuífero se encuentra principalmente constituido por materiales carbonatados Jurásico - Cretácico inferior, se encuentra plegado y fracturado lo que posibilita la conexión hidráulica de sus niveles permeables. El constituyente impermeable de base está constituido por margas del triásico superior. Suprayaciendo a los materiales mesozoicos se encuentran rellenos cuaternarios, aluviales y glacia; y en menor proporción calizas, margas y lutitas miocénicas”.

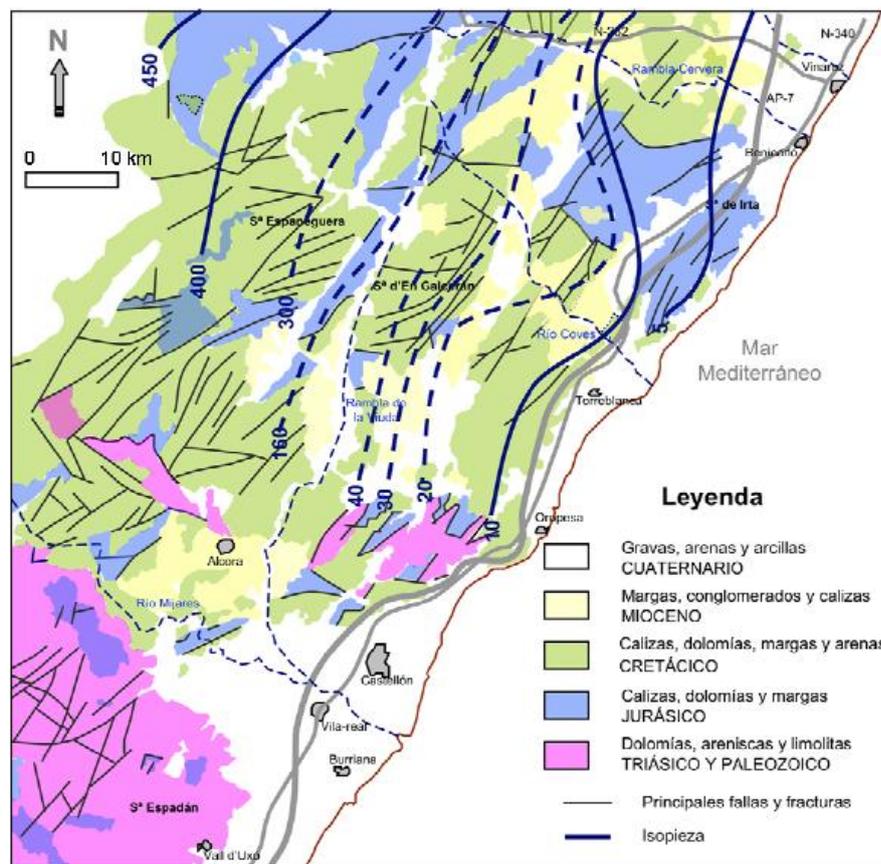


Figura 6. Piezometría general del acuífero del Maestrazgo Oriental (Renau-Pruñonosa, 2013)

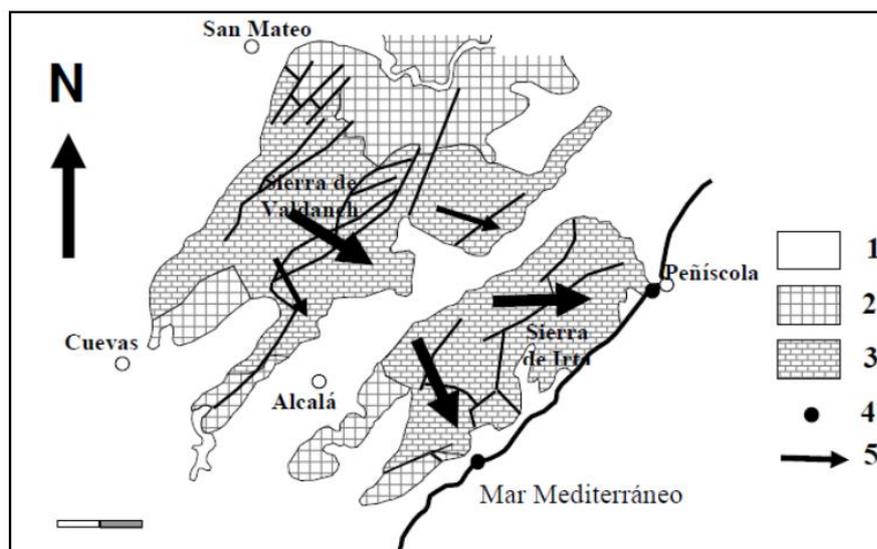


Figura 7. Estructura del flujo en la Sierra de Irta. 1- Miocuatnario; 2- Cretácico; 3- Jurásico; 4- Manantiales costeros; 5- Direcciones preferenciales de flujo (Renau-Pruñonosa, 2013)

2.4.2. Balance hídrico

Las fuentes de la recarga son: la infiltración de las precipitaciones y los posibles aportes laterales de las masas de agua subterránea de Javalambre y Maestrazgo Occidental.

Según la CHJ (2005, 2007) los recursos renovables son de 292 hm³/año, esto está compuesto por la infiltración de lluvia y ríos (270 hm³/año), retornos riego (15 hm³/año) y el 80% de las entradas laterales (8 hm³/año). Luego podemos calcular los recursos disponibles, la que es igual a los recursos renovables menos el volumen medioambiental (el que garantiza un buen estado ecológico de la masa de agua), en este caso el volumen ambiental sería 80% de las descargas laterales que para este acuífero sería 111 hm³/año, por consiguiente los recursos disponibles serían 181 hm³/año (CHJ, 2007).

Los bombeos del sistema son de 36.5 hm³/año y la descarga lateral es de 138.7 hm³/año. El índice de explotación de masa de agua subterránea es el cociente entre los bombeos y los recursos disponibles. En la siguiente tabla se tiene el balance hídrico calculado por la CHJ (2005, 2007) utilizando el programa PATRICAL (Pérez M.A., 2005).

Entradas (hm ³ /año)		Salidas (hm ³ /año)	
Infiltración de Lluvia y cauces	296.6	Bombeos	36.5
Retorno de riegos	15.5	Descarga lateral	138.7
Recarga lateral	9.5	Salidas al mar y zonas húmedas	0
Total	294.6	Total	175.2

Tabla 1. Balance hídrico del acuífero del Maestrazgo Oriental (CHJ, 2005 y 2007).

En el balance hídrico se muestra una variación de la reserva de 118.9 hm³/año. Esto se debe a que los valores calculados fueron estimados con las salidas al mar nulo. Las descargas al mar podrían producirse a través de la Sierra de Irta o también podría ser bajo las Planas de Oropesa – Torreblanca y Vinaroz (Renau, 2013).

Las descargas directas al mar por medio de la Sierra de Irta es difícil de estimar. El ITGE (1989) hace un cálculo de 80 hm³/año, el indica que las salidas al mar son a través de manantiales costeros (Prat de Peñiscola, Las fuentes de Alcocebre y Torre Badum), luego Serrano (1995) hace una estimación de 64 hm³/año. (Renau, 2013).

Hidroquímica general

El agua es de tipo bicarbonatada cálcico – magnésica esto debido a que el acuífero se encuentra emplazado en materiales como la caliza y dolomías. Se han encontrado salmueras (donde el flujo es reducido) en algunos sectores podrían estar relacionadas con trampas de petróleo.

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).

Según Renau (2013) “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”.

3. MODELOS MATEMÁTICOS PREVIOS DE LA MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA OROPESA - TORREBLANCA

El Acuífero Plana Oropesa – Torreblanca viene siendo estudiado desde los setenta, primero con estudios hidrogeológicos que consistieron en la delimitación y la caracterización hidrogeológica del acuífero, y solo en los últimos años se presentaron modelos matemáticos. En el siguiente capítulo expondremos un resumen de modelos matemáticos recientes y disponibles, con el objetivo de precisar las incertidumbres que pudiesen existir en estos.

3.1. Antecedentes de modelos matemáticos

Los modelos matemáticos son una herramienta que nos permite representar procesos físicos y cambios cuantitativos en el sistema modelado. Uno de los programas más utilizados en la actualidad para el modelamiento de aguas subterráneas es el MODFLOW, este programa resuelve la ecuación del flujo mediante el método de diferencias finitas, el cual fue desarrollado por el Servicio geológico de los Estados Unidos (USGS). MODFLOW puede simular un fluido en estado transitorio y estacionario, combinando tipos de capas y de acuíferos. También se puede hacer el modelamiento de transporte de contaminantes. A continuación presentaremos de manera resumida los modelos matemáticos disponibles para el acuífero Plana Oropesa – Torreblanca.

El estudio piloto para el cálculo de descargas ambientales al mar en las masas de agua subterráneas costeras de la provincia de Castellón

Este estudio fue elaborado en el 2009, por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y la Universitat Jaume I (UJI), se simuló bajo el programa modular de MODFLOW (versión 3.1.0.). Este estudio se elaboró mediante un modelo de flujo de densidad constante en régimen estacionario. A continuación se resume el balance hídrico elaborado para este modelo.

Entradas

Las entradas en la Plana Oropesa – Torreblanca son básicamente: la infiltración de las precipitaciones, retorno de riego y la recarga lateral subterránea que proviene de los acuíferos limítrofes.

Infiltración de lluvia (lluvia útil).- Los datos de precipitación se obtuvieron a partir de la información disponible de la estación meteorológica de la Plana de Castellón, por su proximidad geográfica. La precipitación media del periodo simulado es de 386.8 mm. Según Tuñón (2000) en la Plana de Castellón la tasa de infiltración de la lluvia es del orden del 14%, este valor puede ser también aceptable para la Plana Oropesa – Torreblanca, por su proximidad geográfica y su similitud climática.

Retorno de riego, su cálculo se ha realizado según las dotaciones de riego en cada zona y la superficie afectada por la agricultura. Las dotaciones de riego consideradas son de 6500 m³/ha/año. Y la tasa de infiltración debida a los retornos de riego será el 8% (Tuñón, 2000).

Entradas laterales subterráneas.- Según el modelo conceptual todo el límite interno se ha considerado abierto. Las transferencias laterales subterráneas procedentes de los acuíferos de borde, estos valores fueron estimados para calibrar el modelo de flujo.

Las salidas

Las salidas de la Plana son básicamente las extracciones de las captaciones, la alimentación a la zona húmeda y las salidas subterráneas al mar.

Los bombeos del acuífero, en su totalidad, son para satisfacer la demanda agrícola, por lo cual existen dos tipos de pozos. Los primeros pozos situados en sector meridional se han obtenido de la actualización del inventario de pozos (Morell, 2008). Los segundos los pozos virtuales los cuales han sido calculados considerando la superficie real de riego y las dotaciones de riego asignadas a dicha superficie, ello corresponde a los municipios de Torreblanca y Alcalá de Xivert.

Las salidas a las zonas húmedas, se simularon mediante la condición de dren (Sanz, 2013).

Las salidas subterráneas al mar se reparten de manera poco uniforme a lo largo de la costa, debido a las características del acuífero y a la distribución heterogénea de las extracciones.

Modelo matemático

Para el diseño de la malla se tomó una superficie de 87 km² para representar el acuífero Plana Oropesa - Torreblanca, la discretización espacial fue en celdillas cuadradas de 500 metros de lado. Se han introducido 34 columnas y 40 filas, obteniéndose 356 celdillas.

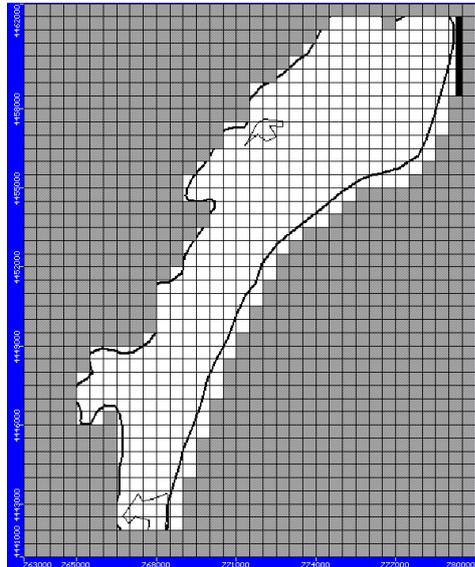


Figura 8. Mallado del modelo de la Plana de Oropesa Torreblanca (IGME - UJI, 2009).

Resultados del modelo

En el escenario simulado (periodo 1995 – 2000) el caudal ambiental de descarga es de 7,9 hm³/año, que corresponde a la suma de 4.5 hm³/año de salidas al mar y 3.4 hm³/año de alimentación a la zona húmeda (IGME - UJI, 2009). A continuación presentamos también el balance hídrico según IGME – UJI (2009).

Entradas (hm³/año)		Salidas (hm³/año)	
Intrusión	2.2	Salidas al mar	4.5
Entradas laterales	38	Bombeos	39
Infiltración	6.8	Zona húmeda	3.5
Total	47	Total	47

Tabla 2. Balance hídrico según IGME – UJI (2009).

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)

En el 2013, la doctora Arianna Renau Pruñonosa desarrolló un modelo bidimensional transitorio de la Plana Oropesa – Torreblanca, de la misma resolución que el anterior modelo y de densidad constante, pero cuyo objetivo fue la propuesta de una metodología para el cálculo del VER (volumen ecológico de remediación) en la zona.

Balance hídrico

El balance hídrico tiene entradas como son: la infiltración de las precipitaciones, retorno de riego, flujos laterales e intrusión marina. Y salidas como: bombeos, drenes y salidas subterráneas al mar.

Modelo matemático

Para representar el acuífero Plana Oropesa – Torreblanca, ellos estimaron una longitud aproximada de 21 km y una anchura variable entre 2.5 y 6 km. La Discretización fue en celdas cuadradas de 500 m cada lado. El modelo es tridimensional formado por 16 columnas, 45 filas y 2 capas (La primera capa para representar el acuífero Plana Oropesa – Torreblanca y la segunda capa representa el acuífero Cretácico Superior). El periodo de calibración del acuífero fue de 37 años desde enero de 1973 a diciembre de 2009.

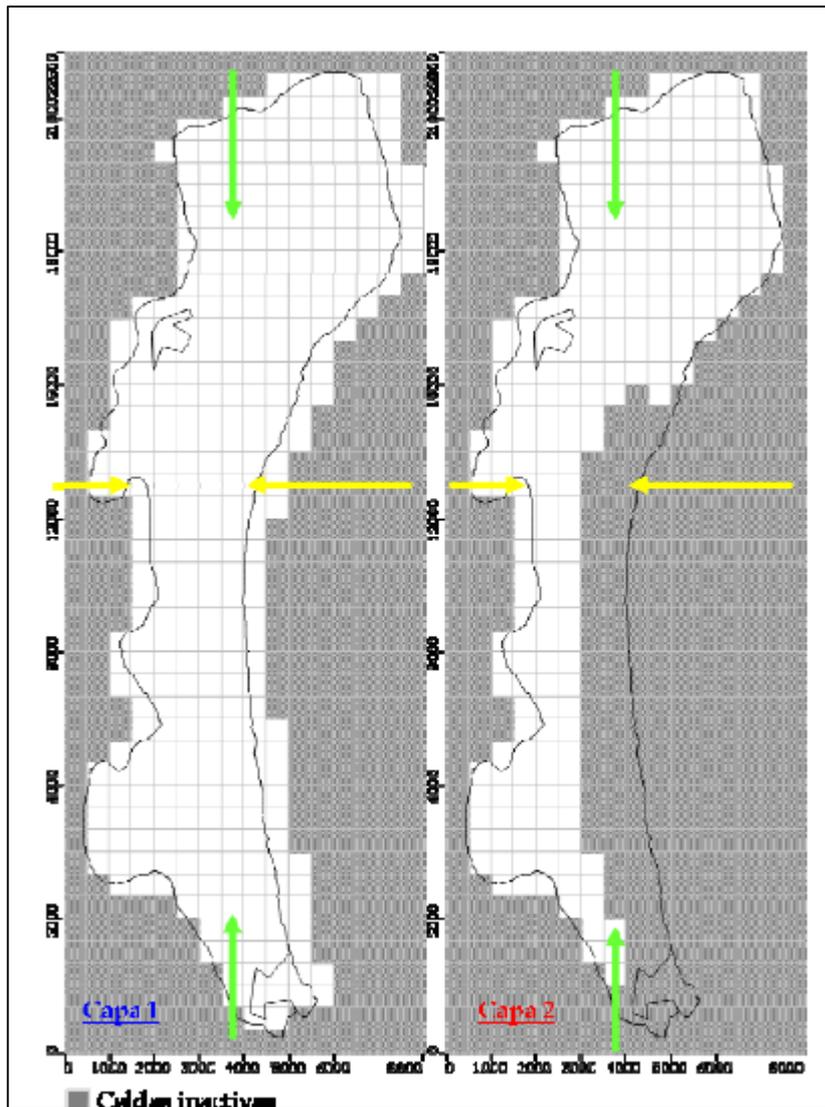


Figura 9. Modelo matemático para el acuífero Plana Oropesa – Torreblanca (Renau, 2013).

Resultados del modelo

El modelo de Renau (2013) tuvo como objetivo principal calcular el volumen ecológico de remediación (VER) de la intrusión marina y los cálculos de balance hídrico elaborado por ella se muestra en la siguiente tabla.

Entradas (hm ³ /año)		Salidas (hm ³ /año)	
	Renau- Pruñonosa,2013		Renau- Pruñonosa,2013
Intrusión	0.65	Salidas al mar	9.04
Entradas laterales	27.37	Bombeos	23.74
Infiltración	6.5	Zona húmeda	1.28
Total	34.52	Total	34.05

Tabla 3. Balance hídrico (Renau, 2013)

Modelación transitoria tridimensional y con densidad variable de la interfaz salina del acuífero litoral de la Plana de Oropesa-Torreblanca (Castellón, España)

En el 2013, Ignacio Sanz elaboro un modelo matemático, transitorio, tridimensional que introduce la densidad variable mediante el código SEAWAT del programa modular MODFLOW. Al introducir la densidad variable, la simulación en acuíferos costeros es más realista.

En la siguiente tabla se resume el modelo de IGME – UJI (2009) vs Renau (2013) vs el modelo de Sanz (2013), en la que podemos observar las características que los diferencian.

	IGME - UJI, 2009	Renau- Pruñonosa,2013	Ignacio Sanz, 2013
Malla	17000 x 20000 m.	8000 x 22500 m.	7250 x 26000 m.
Geometría del modelo	340000000 m ²	180000000 m ²	188500000 m ²
Medidas de una celda	500 x 500 m.	500 x 500 m.	250x250 m.
Área de cada celda	250000m ²	250000m ²	62500 m ²
Discretización	34 columnas, 40 filas	16 columnas, 45 filas	104filas y 29 columnas
Información de los acuíferos	Un acuífero Pliocuaternario	Un acuífero Pliocuaternario y un acuífero cretácico	Un acuífero Pliocuaternario y un acuífero cretácico
Discretización vertical	1 capa	2 capas	7 capas

Discretización temporal	1995 – 2000	El periodo seleccionado es de 37 años desde enero de 1973 a diciembre del 2009	El periodo seleccionado es de 37 años desde enero de 1973 a diciembre del 2009
Modelo matemático	MODFLOW, densidad constante, estacionario	MODFLOW, de densidad constante, transitorio	MODFLOW, de densidad variable, transitorio
Calibración del modelo	Se calibró el modelo para reproducir niveles piezométricos	Renau (2013) calibró el modelo para reproducir niveles piezométricos	Sanz (2013) calibró el modelo para reproducir niveles piezométricos y concentraciones de salinidad. También realizó una mayor sectorización de las conductividades

Tabla 4. Resumen de las características del modelo matemático de IGME – UJI (2009) vs Renau (2013) vs Sanz (2013).

Por lo que respecta al balance hídrico medio (ver tabla 5) se observan grandes diferencias entre los resultados del modelo de IGME – UJI (2009), Renau (2013) y el modelo de Sanz (2013), estas diferencias son debidas a la geometría utilizada en cada caso, a la calibración y al tipo de modelamiento (de densidad constante o variable), siendo el último modelo (Sanz, 2013) el que introduce la densidad variable (necesario para la simulación en acuíferos costeros), este también presenta una mayor discretización vertical y horizontal de la formación, siendo los resultados de los flujos más precisos.

En la tabla 5 se observa que la intrusión obtenida en los tres modelos difiere una de otra sustancialmente, siendo el modelo de Sanz (2013) el que reproduce un valor casi intermedio, de similar forma ocurre con las entradas laterales. Otra diferencia significativa se observa en los valores de salidas al mar y dren, donde Renau (2013) y Sanz (2013) reproducen valores similares (considerando que el modelo de Sanz (2013)

es geométricamente mayor que el modelo de Renau, 2013), mientras que IGME – UJI (2009) reproduce valores significativamente menores que los otros dos modelos anteriormente mencionados. Estas estimaciones nos dan un grado de incertidumbre, pero nos permiten tener una idea de la magnitud de cada componente del balance hídrico. Siendo los resultado de Sanz (2013) los de mayor plausibilidad.

Entradas (hm³/año)				Salidas (hm³/año)			
	IGME-UJI,2009	Renau-Pruñonos a,2013	Ignacio Sanz, 2013		IGME-UJI,2009	Renau-Pruñonos a,2013	Ignacio Sanz 2013
Intrusión	2.2	0.65	1.67	Salidas al mar	4.5	9.04	9.24
Entradas laterales	38	27.37	33.42	Bombeos	39	23.74	32.93
Infiltración	6.8	6.5	9.23	Zona húmeda	3.5	1.28	1.68
Total	47	34.52	44.32	Total	47	34.05	43.85

Tabla 5. Comparación de balance hídrico de los modelos de Ignacio Sanz, 2013 Vs Renau, 2013, Vs IGME, 2009.

3.2. Síntesis y conclusiones

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 hidrogeológico por parte de Morell (1985) en su tesis doctoral, y después con la realización de tres modelos de este acuífero. El primer modelo de IGME-UJI (2009), modelo estacionario de densidad constante que 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, luego el segundo modelo de Renau (2013), modelo transitorio de densidad constante para la obtención de diferentes volúmenes ecológicos de remediación en la Plana y por último el tercer modelo elaborado por Sanz (2013), modelo transitorio tridimensional y con densidad variable de la interfaz salina del acuífero litoral de La Plana de Oropesa-Torreblanca (Castellón, España).

Se decidió hacer el análisis de los datos del modelo de Sanz (2013), tomando en consideración que es el único modelo que introduce la calibración de un modelo de flujo y transporte con densidad variable (necesaria para el modelamiento de acuíferos costeros) y el que presenta mayor plausibilidad en sus resultados.

Al analizar el modelo elaborado por Sanz (2013) y la documentación existente al respecto observamos que este modelo tiene dificultades y limitaciones para reproducir las observaciones de la forma adoptada por la intrusión salina en la dimensión vertical. Por lo que sería recomendable hacer una mayor discretización vertical para resolver de forma realista el problema de flujo y transporte, con ello lograríamos darle mayor realismo a la forma adoptada de la intrusión salina y mejoraríamos la caracterización del Prat de Cabanes. Por otra parte es de interés analizar la respuesta del acuífero a futuros escenarios climático. En conclusión, partiendo de los últimos progresos en el conocimiento de la formación hidrogeológica, se detecta la necesidad de que el nuevo modelo reúna las siguientes características:

- Transitorio
- Tridimensional
- De densidad variable
- De mayor resolución vertical, lo cual permitiría reproducir con mayor realismo la forma adoptada de la intrusión salina en la dimensión vertical y abordaríamos el análisis de incertidumbres como lo es el fenómeno de upconing en la observación de datos.
- Realizar la simulación del modelo considerando los efectos del cambio climático.

4. ESTADO DEL ARTE DEL FENÓMENO DE UPCONING

4.1. Introducción

La sobre explotación de agua subterránea llega a ser muy común en las zonas cercanas a la costa, lo cual ejerce una fuerte presión en acuíferos costeros, uno de los procesos de contaminación más frecuente es la salinización de sus aguas por el avance de la cuña salina tierra adentro a este fenómeno se le conoce como intrusión marina, esta invasión continental de agua de mar tiene dos mecanismos distintos: avance de la interfase en la horizontal, cuando la explotación cubre una grande área y ascenso vertical (fenómeno upconing) de la interfase, bajo puntos de bombeo intensivo (Morell, 2000).

4.2. Descripción de upconing

En la naturaleza, se encuentra en equilibrio la interfaz de agua dulce - agua salada, un bombeo en la zona de agua dulce puede perturbar ese equilibrio, y bajo ciertas condiciones se puede alcanzar un nuevo equilibrio con la formación de un cono estable, el cual se desarrolla en la parte inferior de un pozo de bombeo y el pozo aún podría descargar agua dulce, bajo otras condiciones la formación del cono podría ser inestable y la interfase se desarrollaría abruptamente en forma de una cúspide, causando con ello que la descarga sea salada. Predicciones del comportamiento de upconing de agua salada es determinante para mantener un suministro a largo plazo de agua de buena calidad en la gestión de las aguas subterráneas.

El cono que se forma en la parte inferior del pozo, no es más que la interfaz de agua dulce – agua salada moviéndose verticalmente hacia arriba en respuesta de un bombeo en el pozo, en la zona de agua dulce (ver figura 11). Hay una elevación de cono crítico de aproximadamente 0.3 a 0.5 de la distancia desde el fondo del pozo a la interfaz inicial de agua salada – agua dulce, por encima del cual el cono se vuelve inestable (Bear y Dagan, 1964), y la salinización en el pozo es inevitable.

La sobreexplotación de agua subterránea puede dejar la calidad del agua deteriorada por este movimiento vertical de la capa inferior de agua salada. La concentración de salinidad del agua bombeada incrementa, debido a la intrusión salina. Así que para el manejo a largo plazo, es necesario evaluar la respuesta del upconing de agua salada.

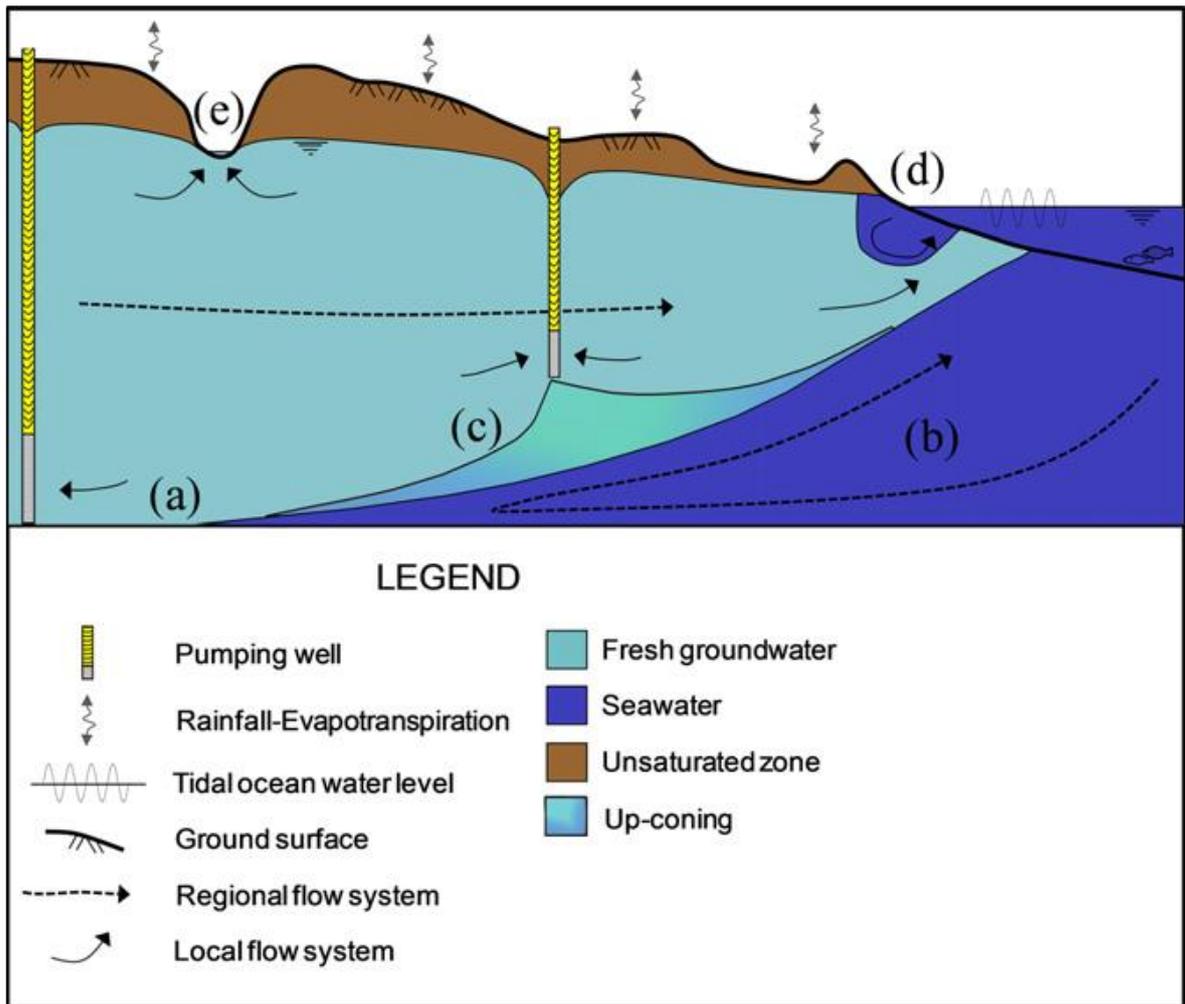


Figura 10. Diagrama simplificado de un entorno acuífero libre costero, que muestra (a) cuña de agua de mar, (b) la circulación de la densidad impulsada en la zona de agua de mar, (c) upconing de agua de mar debido al bombeo de pozos, (d) los procesos de franja costera, como cara de las mareas filtraciones y la zona superior de recirculación de agua de mar, (e) afloramiento de aguas subterráneas (Adrián D. Werner, et. al, 2013).

La velocidad y extensión de “upconing de agua salada” es contralada por un numero de factores incluyendo las propiedades hidráulicas de un acuífero, la velocidad y duración de la extracción del agua subterránea, la penetración de los pozos de bombeo relativos a la interfase de agua dulce – agua salada, la diferencia de densidad de los fluidos y otro factor es el efecto de la dispersión salina, recarga de acuíferos y la geometría del acuífero.

En la figura 12, se muestra el cambio en la posición del cono de agua salada en función del rango de bombeo y parámetros del acuífero. Con el continuo bombeo la interfaz se eleva a niveles sucesivamente más altos hasta que eventualmente este puede llegar al pozo. Esto generalmente ocasiona que el pozo tenga que cerrarse por la influencia

degradante del agua salina. Cuando el bombeo termina, el agua salina más densa tiende a establecerse hacia abajo y retornar a su posición precedente. Determinar el rango de bombeo crítico o rango de bombeo en el cual el cono llega a ser inestable, es un problema de mucho interés práctico en términos de si el agua salada entrara en el bombeo del pozo (K. I. Hamza, 2006).

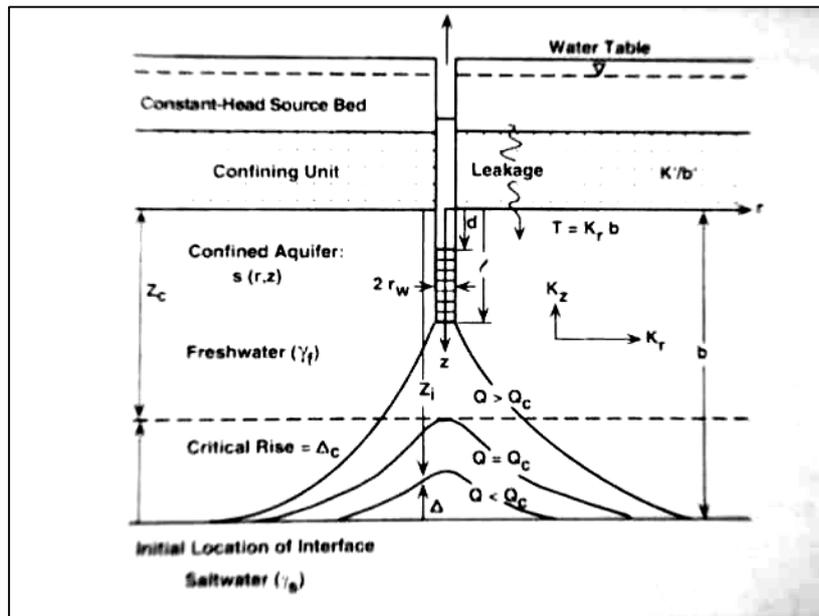


Figura 11. Upconing del agua salina subyacente debido al bombeo de un pozo (K. I. Hamza, 2006).

4.3. Métodos de análisis

Ahora existen dos enfoques generales del problema de upconing que son empleados: Primer enfoque una Interfase marcada que asume que el agua salada y el agua dulce son fluidos inmiscibles (e.g. Haubold, 1975), en la cual, no se considera la zona de transición entre el agua salada y el agua dulce. El segundo enfoque es la Densidad dependiente del transporte de solutos que asume que el agua salada y el agua dulce son fluidos miscibles (e.g. Bower et al., 1999), y se considerada una zona de transición provocada por la dispersión hidrodinámica. La técnica de interfase marcada es considerada una aproximación apropiada si el ancho de la zona de transición es relativamente pequeño comparándolo con el ancho del acuífero.

4.3.1. Interfase marcada

Este método de análisis asume que el sistema agua salada - agua dulce está compuesta de dos fluidos completamente inmiscibles. Así, el problema puede ser formulado en términos de dos distintos problemas, en el campo de flujo de agua dulce y en el campo de flujo de agua salada. Estos dos sistemas son acoplados a través de su común límite.

En algunos estudios de upconing, Muskat y Wyckoff (1935) usaron el método de la interfase marcada en estos análisis de conos de salmueras debajo de pozos de petróleo. Métodos de interfase marcada están siendo usados para el análisis de agua salada y agua dulce por Bennet et.al (1968), Sahni (1972, 1973), Haubold (1975), Bear y Dagan (1968) y Wirojanagud y Charbeneau (1985).

Formulación matemática

Bear y Dagan (1968) han obtenido, para el caso de un ascenso de la interfase, por debajo de un pozo de bombeo, parcialmente penetrante, en un acuífero relativamente potente (Figura 18), la siguiente expresión, que refleja el ascenso de dicha interfase, por debajo del pozo, en función del tiempo.

$$Z(t)_{r=0} = \frac{Q}{2\pi \left(\frac{\Delta\gamma}{\gamma}\right) k_x d} \left(1 - \frac{1}{1 + \tau'}\right)$$

Donde τ' es un parámetro adimensional del tiempo, que viene dado por:

$$\tau' = \frac{\left(\frac{\Delta\gamma}{\gamma}\right) K_z}{2nd} t$$

En estas dos ecuaciones:

Z es la altura de la interfase con respecto a su posición inicial

Q es el caudal de bombeo del pozo

$\frac{\Delta\gamma}{\gamma}$ Diferencia adimensional entre las densidades del agua de mar y dulce

- d es la distancia entre el fondo del pozo (Figura6) y la presumible posición de la interfase inicial ($t=0$)
- n es la porosidad del acuífero
- K_z, k_x Permeabilidad vertical y horizontal respectivamente
- t tiempo transcurrido desde que empezó el bombeo

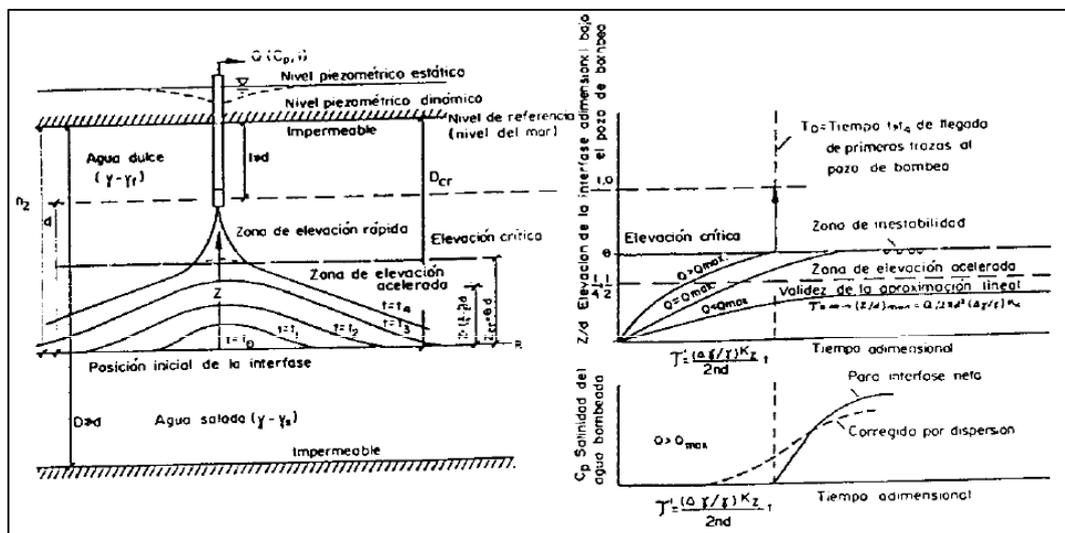


Figura 12. Ascenso de la interfase marcada, por debajo de un pozo de bombeo (Schmorak y Mercado, 1960).

La ecuación anterior se puede simplificar para $t \rightarrow \infty$, quedando:

$$Z(t)_{r=0} ; t \rightarrow \infty = \frac{Q}{2\pi \left(\frac{\Delta\gamma}{\gamma}\right) k_x d}$$

Siendo Z la altura final de la interfase, en el nuevo equilibrio. En la formula se ve que Z es directamente proporcional al caudal de bombeo Q.

Esta relación lineal entre Z y Q está limitada, hasta una cierta altura crítica Z_{cr} , debido a la aproximación lineal, que se hace para las condiciones de contorno, de potencial no lineal (Bear y Dagan, 1968).

Estudios realizados mediante modelos indican que para $Z/d > 1/3 - 1/2$, el ascenso se acelera (figura 18), y la altura crítica $Z_{cr} = \Theta d$, alcanza el fondo del pozo de bombeo, mediante un salto brusco.

De acuerdo con MUSKAT (1937), el ascenso rápido se obtiene para valores de $Z/d > 0.48$ y la altura crítica está dentro de los límites: $0.60 < Z/d < 0.75$, con una sensibilidad relativamente baja a la penetración de los pozos de bombeo.

De acuerdo con las pruebas de campo, llevadas a cabo por Schmorak y Mercado (1969) la altura crítica se encuentra entre los límites: $0.4 < Z_{cr}/d < 0.6$, lo cual coincide, bastante bien, tanto con la aproximación teórica y los experimentos en laboratorio de Muskat (1937), como con los de Bear y Dagan (1968).

Asumiendo una interfase marcada, la salinización del pozo de bombeo aparece solo para $Z > Z_{cr} = d$, el máximo caudal permitido que asegura la ausencia de salinización viene dado por:

$$Q_{max} \leq 2\pi d Z_{max} \left(\frac{\Delta\gamma}{\gamma} \right) Kx$$

O por

$$Q_{max} \leq 2\pi\theta d^2 Z_{max} \left(\frac{\Delta\gamma}{\gamma} \right) Kx$$

Debemos resaltar que Q_{max} es proporcional al cuadrado de la distancia inicial d . de esta manera, al aumentar d al doble, será posible aumentar la descarga permisible cuatro veces. Esta relación nos demuestra la importancia que tiene la perforación de pozos costeros, tan superficiales como lo permita la litología del acuífero y sus parámetros hidrológicos, por encima de la interfase.

4.3.2. Densidad dependiente del transporte de solutos

El segundo enfoque es la Densidad dependiente del transporte de solutos que asume que el agua salada y el agua dulce son fluidos miscibles (e.g. Bower et al., 1999).

El análisis de la densidad dependiente del flujo de agua subterránea y transporte de solutos requiere la solución de dos ecuaciones simultáneas de diferenciales parcialmente no

lineales que expresan la conservación de masa de fluido y conservación de masa de sal. Como un análisis puede ser complejo y computacionalmente costoso.

Conservación de masa del fluido

El balance de masa del fluido es expresado como la suma de balances de masas de agua pura y soluto puro para una matriz sólida en la cual hay movimiento despreciable neto como:

$$\frac{d(\varepsilon\delta)}{dt} = -\nabla \cdot (\varepsilon\delta v) + Q_p$$

Donde $\varepsilon(x, y, z)$ es porosidad, el volumen de vacíos por el volumen total (sin unidades), $\delta(x, y, t)$ es la densidad del fluido (MLT⁻³), $Q_p(x, y, t)$ es la fuente de masa fluida (M(L³T)⁻¹), $v(x, y, t)$ es el promedio de la velocidad del fluido (LT⁻¹), $\nabla = (d/dx)i + (d/dy)j$, x, y, z son coordenadas variables (L), y t es el tiempo (T).

El término en la izquierda es el total de cambio contenido en la masa del fluido en espacios vacíos con el tiempo. El término involucrado de ∇ representa contribuciones para un cambio de masa fluida local debido al exceso de fluidos entrantes por encima de las salidas en un punto. El término de fuente de fluido-masa Q_p , considerada para adiciones externas de fluido.

La ecuación de balance de masa es la forma más fundamental de la conservación de masa fluida. El promedio de la velocidad de fluido, sin embargo, depende de la presión del fluido como se describe por la ley de Darcy:

$$v = -(k/\varepsilon\mu) \cdot (\nabla p - \delta g)$$

Donde $k(x, y)$ es la matriz sólida de la permeabilidad, un tensor de 2 X 2 (L²), $\mu(x, y, t)$ es la viscosidad del fluido (M (LT)⁻¹), $p(x, y, t)$ es la presión del fluido (M (LT²)⁻¹), y g es la aceleración de la gravedad, vector gravedad (LT⁻²).

Para ayudar a entender esta fórmula densidad- dependiente de la ley de Darcy, es útil examinar en un poco más de detalle.

El vector de la gravedad es definido en relación a la dirección en el cual la elevación vertical es medida.

$$g = -|g|\nabla(\text{elevación})$$

Donde $|g|$ es el vector de la magnitud de la aceleración de la gravedad.

Si la densidad del fluido es constante (ya no es un problema de densidad – dependiente) luego las ecuaciones pueden ser reordenadas como:

$$v = \frac{-k\delta|g|}{\varepsilon\mu} * \left[\nabla\left(\frac{p}{\delta|g|}\right) + \nabla(\text{elevación}) \right]$$

La conductividad hidráulica, $K(x, y, t)$ (LT-1), puede ser identificada en la ecuación como $K = \frac{-k\delta|g|}{\mu}$; la carga hidráulica, $hp(x, y, t)$ (L), es $hp = P(\delta|g|)$; y la carga hidráulica o nivel piezómetro, $h(x, y, t)$ (L), es $h = hp + \text{elevación}$. Así, para la constante de densidad de flujo saturado:

$$v = - \left(\frac{K}{\varepsilon} \right) \nabla h$$

En la cual la ley de Darcy (dividida por la porosidad para obtener la velocidad del fluido) en términos de un fluido de densidad constante.

Sustituyendo la forma de densidad constante de la ley de darcy dentro del balance de masa de fluido se tiene a ecuación:

$$\frac{d(\varepsilon\delta)}{dt} = +\nabla * \left[\left(\frac{\varepsilon\delta k}{\mu} \right) * (\nabla p - \delta g) \right] + Qp$$

Al lado izquierdo de la ecuación, el cual representa el cambio total en la masa del fluido contenida en los espacios vacíos con el tiempo, puede también ser desglosado en más procesos básicos dependientes a las dos variables primarias dependientes p (presión) y C (concentración). El almacenamiento del acuífero bajo condiciones de completa saturación es relacionada con $d(\varepsilon\delta)/dp$ por Voss (1984).

$$\frac{d(\varepsilon\delta)}{dp} = \delta S_{op}$$

Donde $S_{op} = (1 - \varepsilon)\alpha + \varepsilon\beta$, $S_{op}(x, y)$ es la presión del almacenamiento específico ((LT2) M-1), α es la matriz de compresibilidad de poros ((LT2) M-1), y β es la compresibilidad del fluido ((LT2) M-1).

Expandiendo el lado izquierdo

$$\frac{d(\varepsilon\delta)}{dt} = \frac{d(\varepsilon\delta)}{dp} \frac{dp}{dt} + \frac{d(\varepsilon\delta)}{dC} \frac{dC}{dt}$$

Donde C es la fracción de masa de soluto fluido, o concentración de soluto ($M_s M^{-1}$), y sustituyendo en la relación para $\frac{d(\varepsilon\delta)}{dp}$ nos da:

$$\frac{d(\varepsilon\delta)}{dt} = \delta[(1 - \varepsilon)\alpha + \varepsilon\beta] \frac{dp}{dt} + \varepsilon \frac{d\delta}{dC} \frac{dC}{dt}$$

Sustituyendo dentro de la ecuación de balance de masa nos da la ecuación final en términos de presión y concentración como:

$$(\delta S_{op}) \frac{dp}{dt} = \left(\varepsilon \frac{d\delta}{dC} \right) \frac{dC}{dt} - \nabla * \left[\left(\frac{\varepsilon\delta k}{\mu} \right) * (\nabla p - \delta g) \right] = Qp$$

Conservación de masa de sal

El balance de masa de soluto para una especie simple almacenada es expresada como (Voss, 1984):

$$\frac{d(\varepsilon\delta C)}{dt} = -\nabla * (\varepsilon\delta v C) + \nabla * [\varepsilon\delta(D_m I + D)] + QpC^*$$

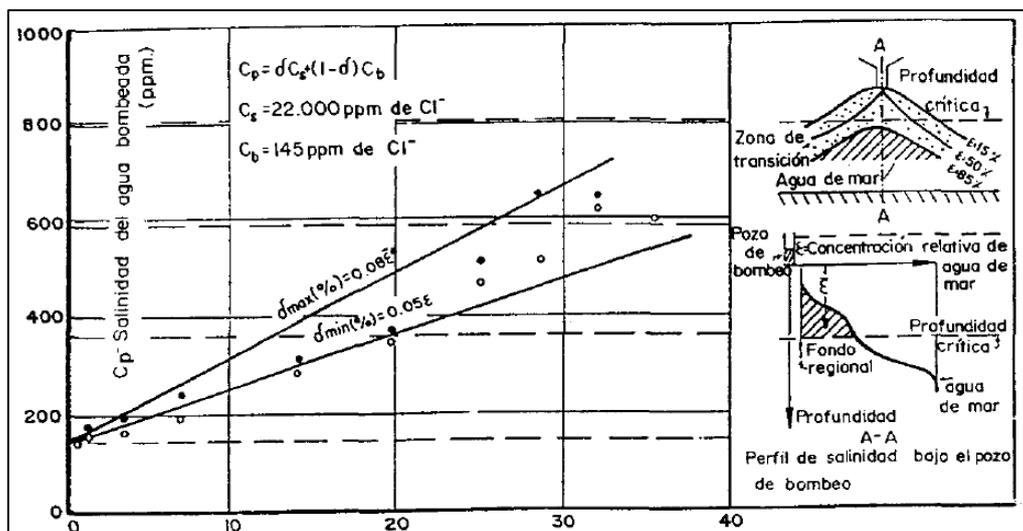
Donde D_m es el aparente difusor molecular de solutos en solución en un poro mediano incluyendo efectos de tortuosidad (L2T-1), I es el tensor de identidad, D es el tensor de dispersión (L2T-1), C^* es la concentración de soluto de fuentes de fluido, fracción de masa ($M_s M^{-1}$), y C es la fracción de masa del fluido de solutos, masa de solutos por masa total de fluidos ($M_s M^{-1}$), la derivación del tiempo al lado izquierdo de la ecuación representa el cambio total en la masa de solutos con el tiempo en un volumen. El termino involucra la velocidad del fluido, v , representa la advección promedio de la masa de solutos dentro o fuera del volumen local. El termino involucra la difusividad del soluto (D_m) y la dispersividad D , expresa la contribución de la difusión de solutos y la dispersión para los cambios locales en la masa de solutos. La contribución de difusión es basada en un verdadero proceso físico, frecuentemente despreciable en la escala de tiempo. La contribución de difusión es una aproximación del efecto de la advección de solutos y mezcla en flujos irregulares, los cuales no están representados por los solutos advectados

por la velocidad promedio. El último término representado por la disolución de masa de solutos adicional por una fuente de fluidos con contracción C^* .

4.3.3. Relaciones entre el ascenso de la interfase y la salinidad del agua bombeada

El aumento adicional de la salinidad del agua bombeada se encontró que era aproximadamente 5% a 8% de la salinidad media del agua salina que intruye por encima de la profundidad crítica (Figura 14). Este valor empírico debe ser considerado como el orden de magnitud solo del fenómeno de mezcla arriba de la profundidad crítica. Este fenómeno exige mayor investigación analítico y experimental (Schmorak y Mercado, 1969).

Los resultados obtenidos por Schmorak y Mercado (1969) durante este estudio son extrapolados para otros casos y son presentados en forma de nomogramas y procedimientos analíticos. En la actualidad los resultados obtenidos por Schmorak y Mercado vienen siendo utilizados y citados en varios artículos de investigación del fenómeno upconing.



$\varepsilon^* \rightarrow$ concentración relativa media de agua de mar sobre la profundidad crítica en $T \rightarrow 2\%$ (Schmorak y Mercado, 1960).

Figura 13. Salinidad del agua bombeada, en función de la salinidad media del agua intruida por encima de la profundidad crítica.

4.4. Síntesis y Conclusiones

El fenómeno upconing es el movimiento vertical de la interfaz agua dulce – agua salada en la parte inferior de un pozo, en respuesta de un bombeo. Este movimiento vertical llega a equilibrarse y puede formar un cono estable o una cúspide, dependiendo del comportamiento (forma) de upconing, la descarga de un pozo de bombeo será dulce (forma de un cono estable) o salada (forma de cúspide). El efecto upconing solo se presenta en pozos de bombeo o zonas contiguas a estos.

Existen dos formas de análisis matemático de este fenómeno, uno es asumiendo que la interfaz de agua salada – agua dulce son dos fluidos inmiscibles y es analizados bajo el enfoque de interfase marcada, otro es asumir que son dos fluidos miscibles y existe una zona de mezcla la cual es analizada mediante el enfoque de densidad dependiente del transporte de solutos.

Según Schmorak y Mercado (1969) el aumento adicional por el fenómeno de upconing de la salinidad del agua bombeada se encontró que era aproximadamente 5% a 8% de la salinidad media del agua salina que intruye por encima de la profundidad crítica (Figura 14). Este valor empírico debe ser considerado como el orden de magnitud solo del fenómeno de mezcla arriba de la profundidad crítica. Este fenómeno exige mayor investigación analítica y experimental

5. ESTADO DEL ARTE DEL CAMBIO CLIMATICO

5.1. Introducción cambio climático

La Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC) define el cambio climático como: “el cambio del clima atribuido directa o indirectamente a actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera mundial, y que vienen a añadirse a la variabilidad natural del clima observado durante periodos de tiempo comparables” (IPCC 2001).

En la segunda mitad del siglo XX se han incrementado actividades humanas que tienen influencia en la evaluación del cambio climático, y la comunidad científica estima que estas actividades son responsables del calentamiento de la superficie de la tierra, comúnmente llamado efecto invernadero, este efecto ha ido aumentando por la emisión de sustancias conocidas como gases de efecto invernadero, la manifestación clara de este efecto, es el aumento de la temperatura.

Existe una variedad de gases de efecto invernadero (GEI) que componen la atmósfera terrestre como son: vapor de agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), ozono (O_3), óxido nítrico (NO_2) y algunos compuestos halogenados (CFC). Estos gases intervienen en balances energéticos, que definen algunas características de los climas terrestres, en ausencia de estos gases la temperatura media global de la atmósfera próxima a la superficie sería aproximadamente de $-18^{\circ}C$, el valor actual de la temperatura media global es de $15^{\circ}C$. El efecto natural de calentamiento de la atmósfera terrestre, hace posible la vida en el planeta y es denominado efecto invernadero.

Es conocido que el aumento medio de la temperatura sobre la superficie terrestre desde los cincuenta ha sido de unos $0.8^{\circ}C$, siendo las emisiones de gases de efecto invernadero, y en particular el CO_2 (principal gas de efecto invernadero antropógeno) la principal responsable de este aumento y que afecta al balance de energía del sistema tierra – atmósfera.

El CO_2 es el gas que se toma como referencia para cuantificar valores de los gases de efecto invernadero, principalmente porque presenta una permanencia relativamente larga en el sistema climático (aproximadamente un siglo o más, IPCC 2001a), mientras que la permanencia de otros gases en el sistema climático es menor.

El sistema climático terrestre está compuesto por la atmósfera, la hidrosfera, la criosfera, la superficie terrestre, la biosfera y la interacción entre ellos. El sistema climático evoluciona con el tiempo influenciado por su propia dinámica o también por acciones inducidas por el ser humano, como son cambios en la composición atmosférica y en el uso de la tierra (IPCC, 1997). El clima es un estado característico del sistema climático, el cual está determinado por variables atmosféricas como: la temperatura, la velocidad del viento, la radiación y otros.

5.2. Modelos de circulación general acoplados océano-atmósfera.

En la actualidad los modelos de circulación general (MCG) representan de forma aproximada los procesos físicos que ocurren en la atmósfera y sus interacciones con otros componentes del medio ambiente en espacio y tiempo, por lo cual es una herramienta confiable para la investigación del clima. (IPCC, 1997) Estos modelos están constituidos por un sistema de ecuaciones que expresan las leyes físicas que gobiernan el sistema climático y son: la conservación del momento, la conservación de la masa, la ecuación de estado de los gases, la conservación de la energía y la conservación de vapor de agua, respectivamente (Sordo C. 2006). En la actualidad, los MCG incorporan modelos de funcionamiento de los océanos, a estos modelos se les denomina modelos de circulación general acoplados océano atmósfera. (MCGAO-A).

En los últimos años los sistemas informáticos tienen la capacidad de procesar diversos métodos de cálculo numérico y así obtener soluciones aproximadas para un sistema de ecuaciones de un MCGAO-A. En general los resultados de estos modelos muestran un incremento en las concentraciones de GEI (CO₂ y otros).

Los modelos MCGAO-A muestran incertidumbre en algunos resultados, los que están asociados a insuficiencia en la parametrización de algunos procesos físicos que determinan el clima, como son la relación entre la precipitación y la formación de las nubes, la termoclina en los océanos, la dinámica de los hielos marinos, los intercambios bioquímicos en el sistema climático y otros (IPCC 2001a). Además muestra deficiencia en la resolución espacial, ya que muestra limitaciones al reproducir detalles orográficos y costeros, estos detalles geomorfológicos son preponderantes para la determinación del clima local y regional.

5.3. Definición de escenarios

Un escenario se define como una representación plausible del futuro (caracterizado por variables como el crecimiento de la población mundial, actividades industriales, emisión de CO₂, nivel del mar, precipitación y temperatura etc.), que puede ser construido sobre la base de diferentes supuestos o sobre la evolución de las tendencias climáticas pasadas.

Debido a que existe numerosas incertidumbres relacionadas al comportamiento del sistema climático futuro es recomendable crear una gama de proyecciones (escenarios) a largo plazo que cubran un amplio espectro de incertidumbres.

Tipos de escenarios para estudios de cambio climático

A continuación se describen brevemente los tipos de escenarios que se utilizan para estudios de cambio climático según sea el área de interés de aplicación de los mismos. Y son:

Escenarios socioeconómicos: Este tipo de escenario describe los futuros cambios socioeconómicos.

Escenarios de cambio en el uso de la tierra y la cobertura vegetal: Estos escenarios influyen en los flujos de carbono y las emisiones de gases de efecto invernadero que alteran directamente la composición atmosférica. Estos escenarios toman en cuenta las características de la superficie terrestre debida a una posible conversión de la cobertura vegetal que pudieran alterar las propiedades de los ecosistemas y su vulnerabilidad al cambio climático.

Escenarios ambientales: Este escenario expone cambios en los factores ambientales en el futuro, por ejemplo la composición atmosférica del dióxido de carbono (CO₂) y la disponibilidad de agua (en su uso y calidad) (IPCC 2001a).

Escenarios de emisión del IPCC

Los escenarios de emisión del panel intergubernamental de cambio climático (IPCC) proporcionan el contexto socioeconómico y ambiental para los próximos 100 años y permiten conocer la evolución futura de diversas variables (entre ellas las emisiones de CO₂), lo que constituye la información de partida de los modelos de circulación general acoplados océano –atmósfera (MCGAO-A), que a su vez proporcionan los escenarios climáticos que indican entre otras cosas los incrementos futuros de las temperaturas y de

las precipitaciones. Los escenarios de emisiones desarrollados por el IPCC son: SRES/IE-EE publicados en el IPCC (2001)

Escenario SRES del IPCC

El IPCC en el 2001 finalizó su informe especial sobre escenarios de emisión (IE – EE), en el cual presenta escenarios denominados SRES (Informe especial sobre escenarios de Emisión) e incluye supuestos económicos (como la población mundial y el producto bruto interno), que examina el periodo de 1990 a 2100.

A partir de la acumulación global de las emisiones de CO₂ se han desarrollado 40 escenarios SRES, clasificados en cuatro líneas evolutivas cuantitativas denominadas “familias” y son: A1, A2, B1 y B2 (IPCC, 2002). Y a continuación se describirán estas familias.

La línea evolutiva y familia de escenarios A1

Este escenario describe un rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza un valor máximo hasta mediados del siglo y luego un descenso, y una introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Esta familia desarrolla tres grupos y se diferencian en su orientación tecnológica: “utilización intensiva de combustibles de origen fósil (A1FI), utilización de fuentes de energía no de origen fósil (A1T), o utilización equilibrada de todo tipo de fuentes (A1B) (al utilizar el término “equilibrado” indica que no se dependerá excesivamente de un tipo de fuente de energía, en el supuesto de que todas las fuentes de suministro de energía y todas las tecnologías de uso final experimenten mejoras similares)”, (IPCC, 2000).

La familia de líneas evolutivas y escenarios A2

Este escenario describe un mundo heterogéneo. Determina un crecimiento continuo de la población mundial, el desarrollo económico es principalmente orientado a las regiones, la economía por habitante crece, la tecnología cambia y está más fragmentados y es más lentos que en otras líneas evolutivas (IPCC, 2000).

La familia de líneas evolutivas y escenarios B1

Este escenario describe un mundo con una misma población mundial que alcanza un crecimiento hasta mediados del siglo y luego desciende, este escenario es similar al escenario A1 pero con cambios de las estructuras económicas orientados a una economía de servicios y de información, acompañado de una reducción de los materiales y la introducción de nuevas tecnologías limpias para el aprovechamiento eficaz de los recursos.” En ella se da preponderancia a las soluciones de orden mundial encaminadas a la sostenibilidad económica, social y medioambiental, así como a una mayor igualdad, pero en ausencia de iniciativas adicionales en relación con el clima.” (IPCC, 2000).

La familia de líneas evolutivas y escenarios B2

En este escenario la población crece progresivamente pero a un ritmo menor que en el escenario A2, se describe unos niveles de desarrollo económico intermedios, y con cambios tecnológicos menos rápidos y con mayor variedad que en las líneas evolutivas B1 y A1. Este escenario está orientado a la protección del medio ambiente e igualdad social, se centra principalmente en los niveles locales y regionales (IPCC, 2000)

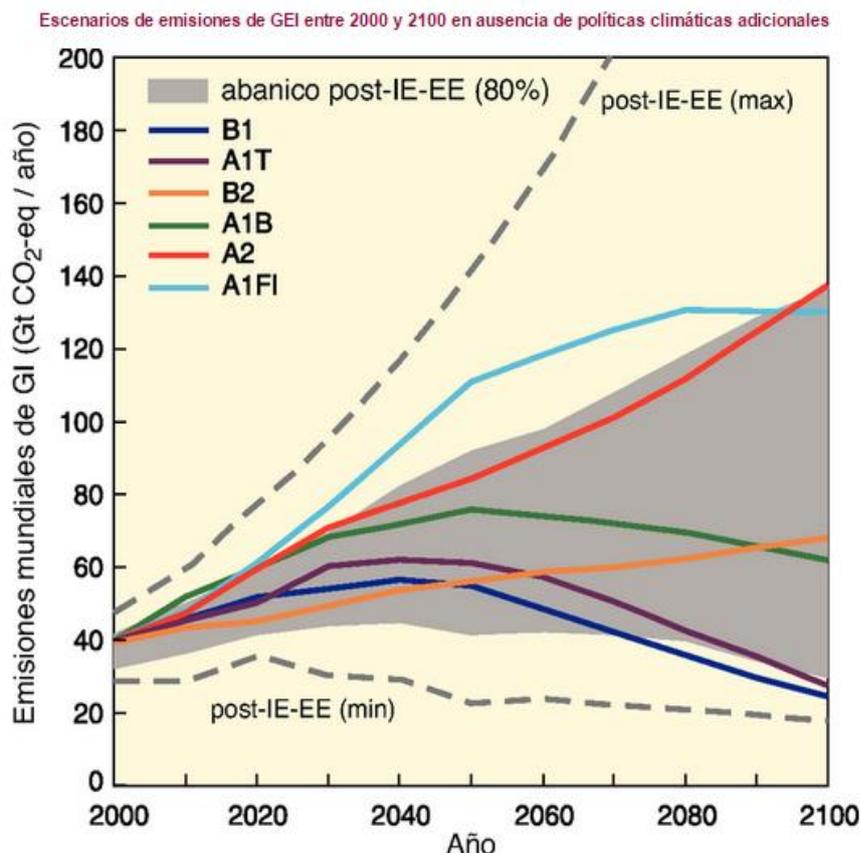


Figura 14. Escenarios de emisiones de GEI (IPCC, 2007).

5.4. Modelos regionales

5.4.1. Introducción

Los modelos regionales se iniciaron con el tercer informe de la IPCC 2001, donde ellos presentan técnicas de regionalización, luego sobre esta base la Unión Europea a través del 5º Programa Marco de la Unión Europea desarrollo escenarios climáticos regionales utilizando técnicas dinámicas (Proyecto PRUDENCE) y técnicas estadísticas (Proyecto STARDEX). Parte de la información de estos proyectos fue recopilada por AEMET en marzo del 2008. Finalmente el proyecto ENSEMBLES es el actual referente internacional del tratamiento probabilístico de las proyecciones climáticas (Osma, 2010).

5.4.2. Concepto de regionalización

En general los modelos MCGAO muestran baja resolución, esto se debe a que no pueden reproducir climas locales o regionales debido a detalles geomorfológicos locales como la orogenia entre otros, por lo cual es necesario incrementar la resolución de los modelos y eso se logra mediante modelos regionales.

Las estimaciones regionales de cambio climático se realizan mediante un procedimiento denominado DOWNSCALING, el cual consiste en pasar modelos globales (de grande escala) a modelos regionales (de pequeña escala).

Clasificación de las técnicas de downscaling

Las técnicas de Downscaling son las siguientes

a) Estadísticas

Este método consiste en establecer relaciones entre las variables climáticas generales y climas específicos. Esta técnica es muy útil cuando se requiere una evaluación rápida y de bajo coste de escenarios climáticos locales

b) Dinámicos

Es la aplicación de modelos numéricos en una malla más densa, este método se utiliza para obtener información de alta resolución

c) Método mixto

Este método mezcla las dos técnicas anteriores

5.4.3. Modelos climáticos regionales para Europa y el Mediterráneo

Para reproducir modelos regionales se requiere de grandes cálculos, lo que genera desfases en tiempo entre la disponibilidad de resultados de los modelos globales (para generar modelos regionales se necesita información de los modelos globales). Los resultados que aparecen en el cuarto informe del IPCC (2007) de los modelos climáticos regionales sobre Europa se refieren principalmente a la integración que utilizan los modelos globales del tercer informe del IPCC del 2001. (Osma, 2010).

Para Europa se tiene el proyecto PRUDENCE, el proyecto EMSEMBLES, el proyecto CIRCE (modelo para el mediterráneo) y STARDEX que serán descritos a continuación:

PRUDENCE (Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects, EU 5th Framework Project) integra el trabajo de distintos grupos de investigación europeos. Uno de sus objetivos es proporcionar proyecciones regionalizadas de Cambio Climático en Europa mediante regionalización dinámica para finales del siglo XXI, y hacer una valoración de la incertidumbre asociada a dichas proyecciones.

Centro	Modelo	Resolución horizontal y n.º de celdillas ($n_x \times n_y$)	Puntos y esquema de relajación	Niveles verticales
CNRM	ARPEGE	50-70 km (sobre Europa)	—	31
ETH	CHRM	0,5° (55 km) 81 × 91	8 Davies 1976	20
HC	HadRM	0,44° (50 km) 106 × 111	—	19
DMI	HIRHAM	0,44° (50 km) 110 × 104	10 Davies 1976	19
MPI	REMO	0,5° (55 km) 97 × 109	8 Davies 1976	19
ICTP	RegCM	50 km Lambert 119 × 98	11 Giorgi et al., 1993a,b	16
UCM	PROMES	50 km Lambert 112 × 96	10 Davies 1976	28
GKSS	CLM	0,5° (55 km) 101 × 107	8 Davies 1976	20
SMHI	RCAO	0,44° (50 km) 90 × 86	8 Davies 1976	24
KNMI	RACMO	0,44° (50 km) 94 × 80	8 (16 u,v) Davies 1976	31

Tabla 6. Relación de centros y modelos regionales en el proyecto PRUDENCE, con las configuraciones de malla y las condiciones de contorno laterales usadas por cada modelo (Fuente: MIMAM, 2008).

Los organismos, en la tabla 6, se referencian por sus siglas:

CNRM: Centro Nacional de Investigaciones científicas de Francia

ETH: Escuela Superior Politécnica de Zurich

HC: Hadley Centre

DMI: Instituto Meteorológico de Dinamarca

MPI: Instituto Max Planck

ICTP: Centro Internacional de Física Teórica

UCM: Universidad Complutense de Madrid

GKSS: Instituto de Investigaciones Costeras

SMHI: Instituto Meteorológico e Hidrológico de Suecia

KNMI: Real Instituto Meteorológico de Holanda

STARDEX. es un modelo probabilístico que se desarrolló dentro del 5º programa marco de la UE. Su objetivo es comparar de forma sistemática y rigurosa métodos de downscaling estadístico y dinámico, y evaluar su capacidad para reconstruir extremos observados (de temperatura y precipitación). En esta comparación se utilizan de nuevo técnicas estadísticas. Sin embargo, no combina los distintos métodos generando un escenario probabilístico (como sí ocurre con ENSEMBLES).

Proyecto EMSEMBLES

Este se encuentra dentro de los modelos probabilísticos, se basa en los resultados de los proyectos STARDEX y PRUDENCE. EMSEMBLES mezcla diferentes métodos de pesado, diferentes modelos globales, distintos escenarios de emisión, distintos RCMs y diferentes técnicas estadísticas de regionalización.

El proyecto CIRCE (Climate Change and Impact Reserach: the Mediterranean Environment) reúne a 62 centros de investigación europeos, magrebíes y norteafricanos de prácticamente todos los países europeos y mediterráneos, desde Portugal hasta Siria, desde el Reino Unido hasta Israel. El proyecto nace para estudiar la evolución del clima y su impacto social y económico en la región mediterránea, y para identificar las mejores estrategias para combatir los efectos del cambio climático en curso.

El proyecto CIRCE ha sido presentado el 3 de mayo en la sede del Centro superior de Investigación científica de Bolonia, un día antes del acto en el que el Comité

Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) presentara en Bangkok su IV informe que ilustra técnicas seleccionadas para mitigar los efectos del cambio climático.

5.5. Escenario climático para el nivel del mar mediterráneo

Para el escenario climático futuro con respecto al nivel del mar, se escogió el trabajo denominado “Sea-level rise in the Mediterranean Sea by 2050: Roles of terrestrial ice melt, steric effects and glacial isostatic adjustment” elaborado por Galassi y Spada (2014), en la cual se estima la cantidad relativa a la variación del nivel del mar mediterraneo esperada para el 2050.

Galassi y Spada (2014), combinaron el derretimiento del hielo terrestre (TIM), el ajuste isostático glacial y los componentes estéricos del nivel del mar. El primero es obtenido de escenarios globales para el balance futuro de masa de las capa de hielo de Groenlandia (GIS) y la Antártida (AIS), el segundo se basa en el modelamiento, utilizando diferentes supuestos sobre la reología de la tierra y la cronología de desglaciación desde la última gran glaciación, la tercera se obtiene de simulaciones publicadas basadas en modelos regionales acoplados atmosfera – océano. Desde un escenario máximo y mínimo para 2040 – 2050.

El componente estérico de aumento de nivel del mar es sacado del modelo de Carillo et al. (2012). Ellos vienen realizando 50 años de experimentos regionales bajo los escenarios de SRES A1B, usando un acoplamiento de modelos de circulación regional de océano - atmosfera.

La zona de estudio se ubica en parte oeste de la cuenca del mediterráneo, y de la tabla 1 se obtiene los valores del nivel del mar para la proyección 2040-2050 y son: 7.2 cm para el escenario MIN50 y 23.4 cm para el escenario MAX50.

SUB CUENCA DEL MEDITERRANEO		
	MIN50 (cm)	MAX50 (cm)
O Med.	7.2	23.4
SC Med.	10.7	25.8
S Crete	5.8	23.4
Levantine	9.4	25.6

Aegean	14	27.4
Ionian	12.5	30.5
Adriatic	11.5	23.8
Tyrrhenian	8.9	24.6
Promedio Ponderado	9.8	25.6

Tabla 7. Proyecciones para el nivel del mar para 2040 – 2050 a través de la sub cuenca del mediterráneo. El aumento total del nivel del mar para escenarios MIN50 y MAX50 (Fuente: Spada, G. y Galassi, G. 2014).

Una forma sencilla de evaluar las anteriores proyecciones obtenidas para los escenarios MIN50 y MAX50 es compararlos con las variaciones del nivel del mar obtenido de los mareógrafos localizados a lo largo de la costa del mar Mediterráneo. Los mareógrafos cercanos al acuífero Plana Oropesa – Torreblanca, son los ubicados en Marsella y Tarifa y las tendencias futuras proyectadas para el escenario MIN50 es de 1.1 mm/año y para el escenario MAX 50 es de 4.2 mm/año (Ver tabla 15).

	Extrapolación para 2050 (cm)	Escenario		Tendencia futura		Variación de la tendencia	
		MIN50 (cm)	MAX50 (cm)	MIN50 (mm/año)	MAX50 (mm/año)	MIN50	MAX50
Marselle	6.3	6	20.9	1.2	4.2	+0.9	+3.3
Venezia P.S.	12.9	11.3	22.7	2.3	4.5	+0.9	+1.9
Trieste	6.2	11.3	22.7	2.2	4.5	+1.8	+3.6
Bakar	4.6	11.3	22.9	2.3	4.6	+2.4	+4.9
Ceuta	3.2	5.4	20.8	1.1	4.2	+1.7	+6.5
Tarifa	4.9	5.4	20.8	1.1	4.2	+1.1	+4.2

Tabla 8. Variación total del nivel relativo del mar y sus rangos para 2040 – 2050 conforme a los escenarios MIN50 y MAX50, en los seis mareógrafos considerados es ese estudio. La columna de extrapolación muestra el aumento del nivel del mar que podría ser observado asumiendo rangos seculares de la anterior tabla y las siguientes columnas son las tendencias futuras. (Fuente: Spada, G. y Galassi, G. 2014).

El proyecto Circe proporciona también una estimación del posible cambio del nivel del mar mediterráneo debido al efecto de cambios de masa en respuesta a un cambio de temperatura o por efectos tectónicos que para esta cuenca se ha demostrado y puede ser

bastante sustancial (Marcos y Tsimplis 2008). A lo largo del periodo proyectado, todos los modelos Circe muestran tendencias positivas significativas de tendencias de cambios de nivel del mar en respuesta a un cambio de temperatura (0.29 ± 0.13 cm/año). La media estérica de aumento del nivel del mar oscila entre los +7 cm (70mm) y +12 cm (120 mm) del 2021 al 2050 con referencia al periodo 1961 -1990. Este modelo trabaja con emisiones del escenario A1B.

En consecuencia, los valores de aumento del nivel del mar mediterráneo proyectado por el proyecto Circe es similar a los valores proyectados por Spada, G. y Galassi, G. (2014) que para la zona de estudio van de 1.1mm/año a 4.2 mm/año.

5.6. Escenarios climáticos para la comunidad valenciana

Existen varios estudios elaborados por la comunidad científica sobre los escenarios del clima futuro para la Comunidad Valenciana. Para el presente trabajo se escogió el escenario climático elaborado por Vicente Chirivella Osma (2010), por ser uno de los últimos estudios, en los recientes años y dar valores sobre la disminución de las recargas en los acuíferos que se encuentran en la confederación hidrográfica del Júcar (CHJ).

Osma (2010) presenta una regionalización climática para la Comunidad Valenciana obtenida con downscaling dinámico. El modelo empleado es RegCM3, con datos de clima futuro procedentes del modelo global ECHAM5, T63L31, y considerando el escenario de emisiones A1B. Se ha considerado como anomalías sobre el clima 1940 – 2007, y el periodo de control de 1990 -2000.

Las anomalías previstas para este escenario y durante el periodo 2010 – 2040 son: disminución de la precipitación de 95 mm/año (-19.77%), incremento en la temperatura media de 0.75°C. El impacto para el mismo periodo sobre los recursos hídricos supone una reducción de 21% en la suma de las cuencas Júcar, Turia y Mijares, y en la recarga prevista de los acuíferos del ámbito territorial de la CHJ, se obtiene una disminución similar a la de los recursos hídricos de -18.7% (Osma, 2010).

5.7. Síntesis y Conclusiones

- El cambio climático se atribuye directa o indirectamente a las actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera y que vienen a añadirse a la variabilidad natural del clima (IPCC, 2001).
- En la actualidad, están surgiendo formas de estudiar este cambio climático mediante modelos de circulación global, los cuales tratan de reproducir procesos físicos que ocurren en la atmósfera y la interacción con otros componentes del medio ambiente. Los últimos modelos de circulación global están incorporando modelos de funcionamiento de los océanos (MCGAO-A).
- Para hacer el análisis del cambio climático en el futuro es necesario hacer el uso de diferentes supuestos sobre el futuro (sobre la población, la economía, actividades industriales, la precipitación, la temperatura y otros) a lo que se denomina escenario.
- Los modelos MCGAO-A muestran baja resolución por lo que es difícil reproducir climas locales o regionales (esto se debe a que ciertos sectores muestran variabilidad de clima en pocos metros debido a la orografía o zonas de costa entre otros), por lo cual es necesario incrementar la resolución mediante modelos regionales. Las estimaciones regionales se realizan mediante un procedimiento llamado Downscaling, este procedimiento se puede realizar mediante técnicas estadísticas, dinámicas o mixtas.
- Para la comunidad europea y el mar mediterráneo existe una variedad de modelos climáticos regionales, a continuación mencionaremos algunos y son: PRUDENCE, STARDEX, EMSEMBLES y CIRCE.
- El incremento del nivel del mar mediterráneo previsto por Spada, G. y Galassi, G. (2014) oscila entre 1.1mm/año a 4.2 mm/año, esta es una proyección hasta el 2050, estos valores se obtuvieron bajo el escenario de emisiones SRES A1B.
- La disminución en las recargas prevista para los acuíferos que se encuentran en el ámbito territorial de la Confederación Hidrográfica del Júcar son de -18.7% (Según Osma, 2010). Esta proyección es para el periodo 2010 al 2040, considerando el escenario de emisiones A1B.

6. MODELO AVANZADO TRANSITORIO Y TRIDIMENSIONAL DEL ACUÍFERO LITORAL DE LA PLANA DE OROPESA – TORREBLANCA.

6.1. Descripción de los datos disponibles

En este apartado se describirá de manera resumida la información disponible, la cual fue extraída del modelo de Sanz (2013).

6.1.1. Caracterización de las zonas hidrogeológicas

La caracterización hidrogeológica indica que existen tres zonas y son las siguientes:

- Zona Pliocuaternaria (Zona 1) → gravas y conglomerados (acuífero Plana Oropesa – Torreblanca).
- Zona Miocénica (Zona 2) → arcillas y margas
- Zona cretácica (Zona 3) → calizas

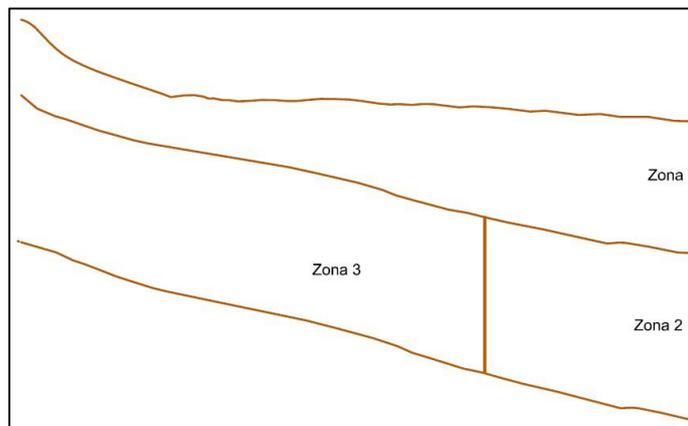


Figura 15. Sectorización por zonas (Sanz, 2013)

6.1.2. Topografía y Muro de la formación hidrogeológica Plana Oropesa - Torreblanca

Los datos de topografía del acuífero Plana de Oropesa – Torreblanca fueron extraídos del modelo elaborado por Sanz (2013), en el que se puede observar que la pendiente del terreno es más o menos constante a lo largo y ancho de la Plana a excepción de la Sierra de Irta y el desierto de la Palas, donde en pocos metros las cotas aumentan considerablemente. De similar forma los datos del muro fueron extraídos del modelo de

Sanz (2013), este muro tiene una profundidad de 125 m y tiene una forma básicamente lenticular en la que se mantiene una pendiente constante en toda la formación hidrogeológica a excepción de las zonas anteriormente dichas, donde la pendiente es más acusada.

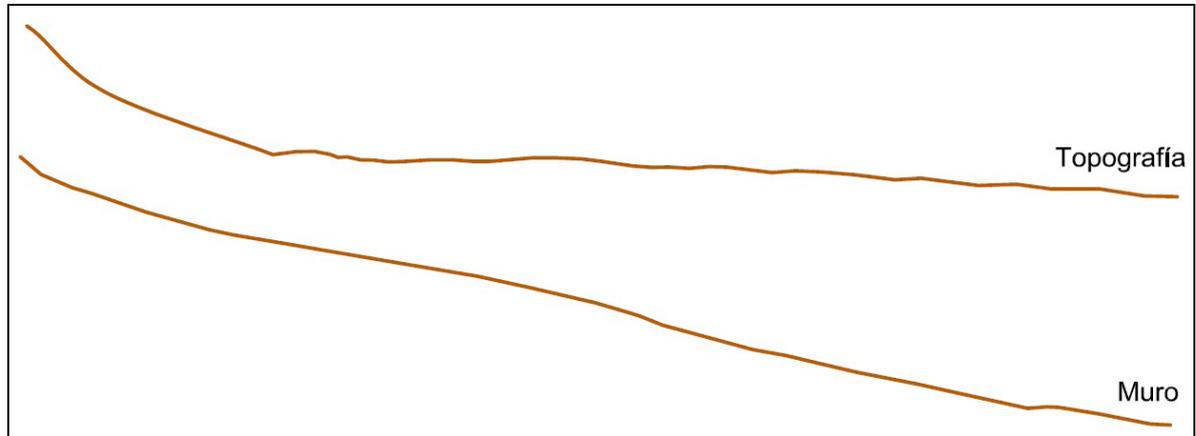


Figura 16. Perfil de la topografía y muro del acuífero Oropesa – Torreblanca (Sanz, 2013).

6.1.3. Muro de la zona Cretácica

Para el muro de la formación Cretácica se consideró una profundidad media de 200 m (esta medida es una aproximación, puesto que se desconoce la profundidad exacta). Esta formación hidrogeológica se sitúa por debajo del acuífero Plana Oropesa Torreblanca. En el modelo no se considera la formación miocénica, ya que no se conocen datos de piezometría de esta formación y podrían desvirtuar la realidad (Sanz, 2013).

6.1.4. Prat de Cabanes

La geometría y las características litológicas del Prat de Cabanes se obtuvieron de la confederación Hidrológica del Júcar (CHJ). Para el modelo se adoptó una profundidad constante igual a 4 m (Información para simular con SEAWAT), se asumió conductancias nulas en zonas donde la altura piezométrica se sitúa por debajo del nivel de la cota topográfica, y conductancias al norte de 800 y 400 al sur (Sanz, 2013).

La zona húmeda está representada mediante la condición de contorno tipo dren, alimentada por el acuífero. Para representarlo en el modelo avanzado se procedió a

evaluar cada celda con esta condición, y se le reubica en las nuevas capas, considerando su ubicación en las tres dimensiones.

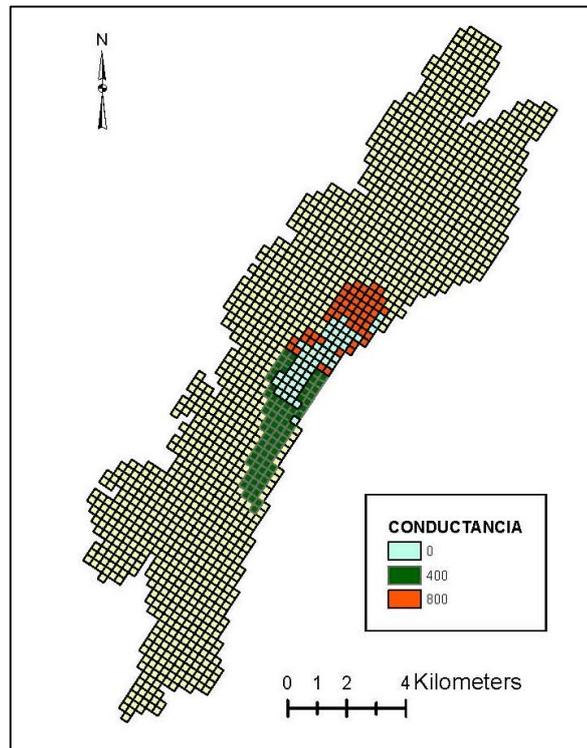


Figura 17. Conductancia del Prat de Cabanes (Sanz, 2013)

6.1.5. Parámetros Hidrogeológicos

La caracterización de los parámetros hidrogeológicos se resumen en:

Conductividad Hidráulica horizontal

La conductividad hidráulica horizontal para el acuífero Pliocuatnario extraída del modelo de Sanz (2013) está distribuida por zonas. Los sectores donde las conductividades son altas de entre 200 m/día representan al lecho del río San Miguel y alrededores del Prat de Cabanes, otro sector es de 125 m/día representa a manantiales costeros uno de ellos es Alcossebre y el otro manantial se encuentra bordeando el Desierto de las Palmas al SO de la masa subterránea. En el Prat de Cabanes se diferencia tres zonas de conductividad, una es de 90 m/día que se encuentra en el norte, otra es de 50 m/día y 5 m/día hacia el Sur. Por ultimo las celdas cercanas al mar presentan una menor conductividad, esta reducción se realiza para representar la cuña salina, la cual es característica en acuíferos costeros, estas conductividades van de 150 m/día a 125 m/día en las 5 primeras capas, y 0.1 m/día en la última capa del acuífero Pliocuatnario.

Las conductividades observadas en el modelo de Sanz (2013) para el acuífero cretácico son menores a los valores de conductividad del acuífero pliocuaternario. Los valores de conductividad van de 0.001 m/día hasta 10 m/día, siendo menor la conductividad en celdas cercanas al mar y aumentando hacia el interior.

Conductividad Hidráulica Vertical

La conductividad hidráulica vertical fue calculada como la décima parte de la conductividad horizontal

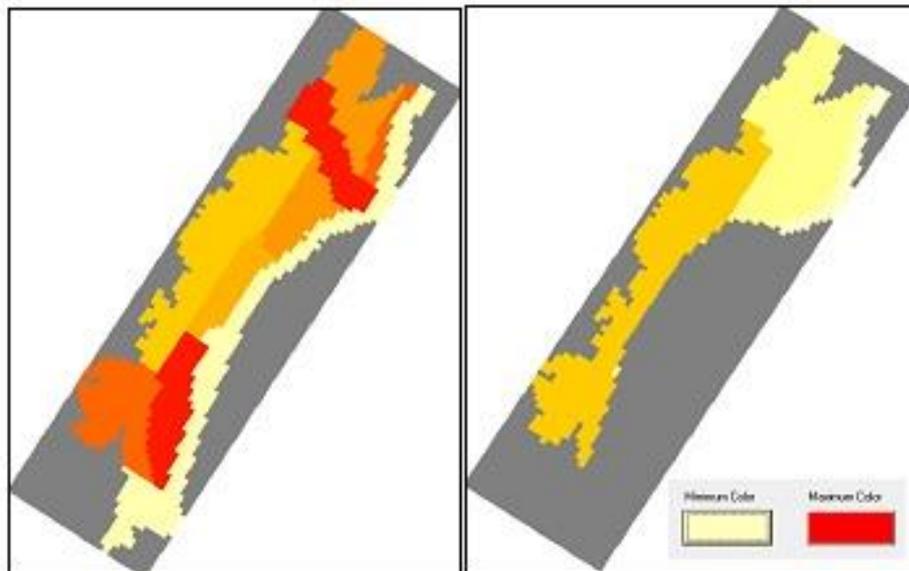


Figura 18. Conductividad hidráulica para el acuífero Pliocuaternario (izquierda) y acuífero cretácico (izquierda) (Sanz, 2013).

Almacenamiento Específico, Porosidad efectiva y Transmisividades

Estos tres parámetros tienen valores mayores en la formación Pliocuaternaria y son menores en la formación Cretácica.

6.1.6. Recarga

Los datos de la recarga para el modelo fueron extraídos del modelo de Sanz (2013), la cual está compuesta por dos componentes: la infiltración de las precipitaciones y los retornos de riego.

Los datos que se tomaron fueron los correspondientes al periodo 1973 – 2009. La tasa de infiltración de las precipitaciones que se consideró para todo el periodo fue de 14%

(Tuñón, 2000), y la infiltración debida al retorno de riego se ha calculado en función del método de regadío, ya sea por inundación o goteo. También se consideraron zonas sin recarga a los centros pobladas como: Oropesa, Marina d'Or, Torreblanca, Alcocebre y Torrenostra.

En las siguientes figuras se puede observar la evolución de las precipitaciones y las infiltraciones tomando en cuenta los criterios anteriormente mencionados.

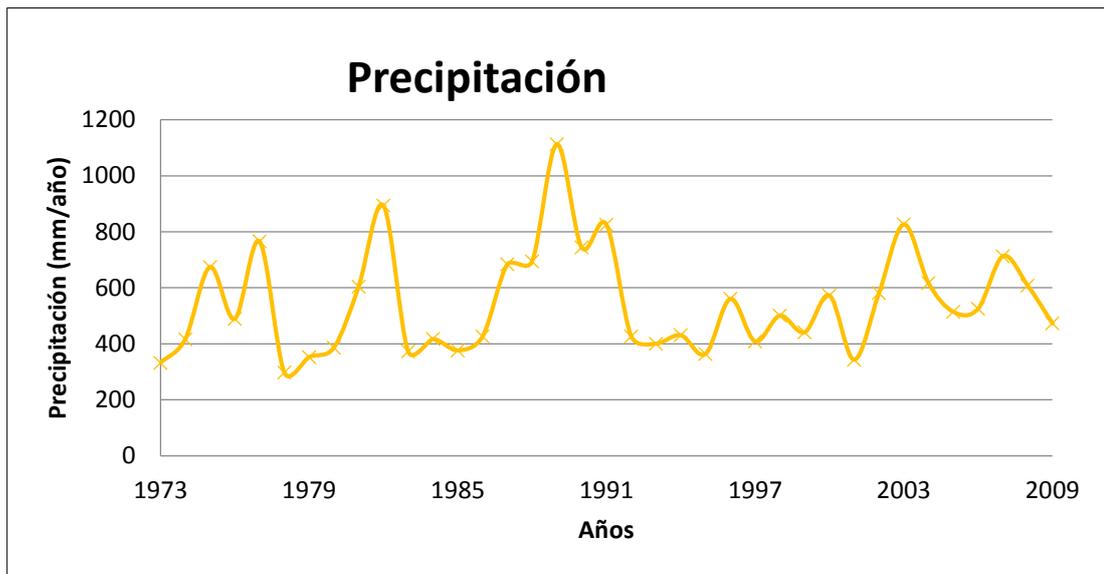


Figura 19. Evolución de las precipitaciones para el periodo 1973 a 2009 (Sanz, 2013)

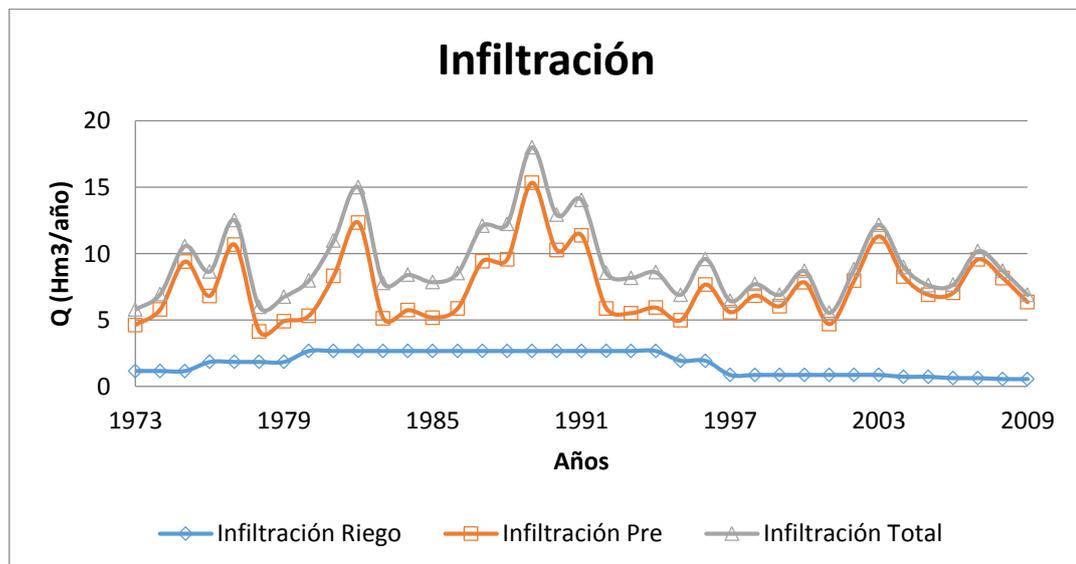


Figura 20. Evolución de la infiltración a lo largo del periodo 1973 a 2009 (Sanz, 2013)

6.1.7. Bombeos

Los datos de bombeo son para el periodo 1973 – 2009 y su clasificación es la siguiente:

- Pozos identificados con un nombre, estos datos son proporcionados por la comunidad de regantes y ayuntamientos, en la ficha de cada pozo aparece información como: termino municipal al que pertenece, toponimia, actualidad (Si sigue en actividad), las coordenadas UTM y retorno de riego en función del tipo de riego, si el riego es a manta el retorno de riego es del 8% y si el riego es a goteo el retorno de riego es del 4%.
- Y otros “inventados”, esto en consecuencia de que existen zonas que tienen campos de cultivo, pero que no se les ha asignado ningún pozo, el cálculo se realizó tomando en consideración el tipo de 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.

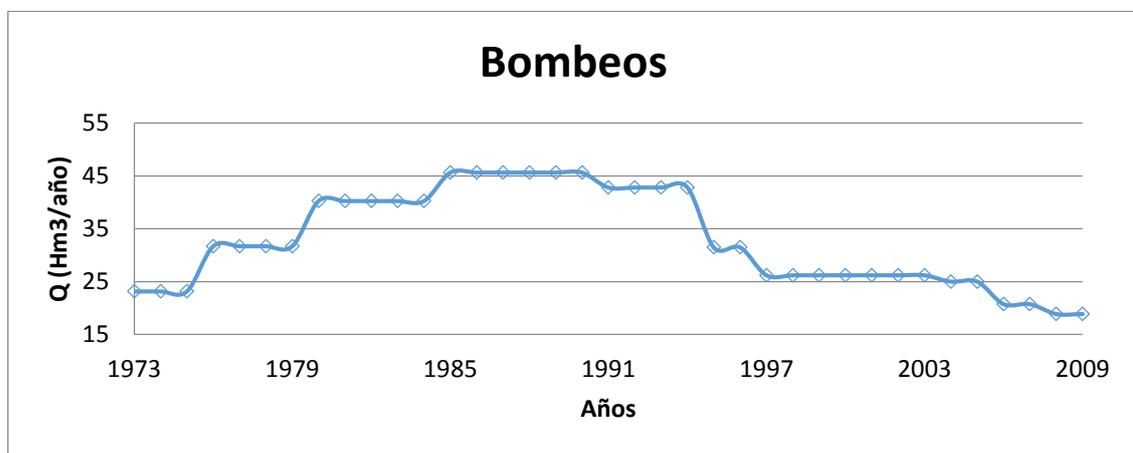


Figura 21. Evolución anual de los bombeos (Sanz, 2013)

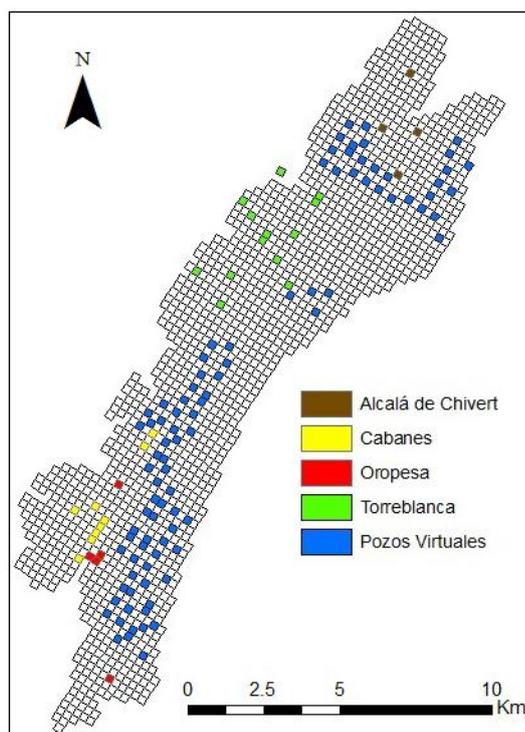


Figura 22. Pozos de bombeo en el acuífero Plana Oropesa – Torreblanca (Sanz, 2013)

Pozo Calculado	Periodo de funcionamiento	Q. Max (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 9. Pozos ubicados en la Plana Oropesa – Torreblanca I (Renau – Pruñonosa, 2013)

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

Tabla 10. Pozos ubicados en la Plana Oropesa – Torreblanca II (Renau – Pruñonosa, 2013)

Termino Municipal	Pozo	Periodo de funcionamiento	Q. Max (m ³ /año)
Alcocebre	Anna	1973-2009	585000
	Racó-Vale	1973-2007	450000
	Tossalet1	1973-1990	378000

	Tossalet2	1973-2009	210000
	Palaba-Estopet	1973-2009	2025000
Cabanes	Diluvio	1973-2009	792000
	Hidráulica	1973-2009	324000
	Laguna	1973-2009	900000
	Polido	1973-2009	212400
	R.Cabanes	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
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 11. Pozos ubicados en la Plana Oropesa – Torreblanca III (Renau – Pruñonosa, 2013)

6.1.8. Piezometría y puntos de Control de Calidad

Para la zona de estudio existen 32 puntos de piezometría y 39 puntos de control de calidad. Para el modelo se tomaron solo 10 puntos de observación de piezometría y 8 puntos de control de calidad de las aguas subterráneas, los demás puntos no fueron considerados en el modelo por encontrarse por encima de la cota del terreno. Estos puntos poseen una

ubicación en las tres dimensiones, estos puntos fueron reubicados en un mayor número de capas en el modelo avanzado tomando en cuenta sus coordenadas y profundidad.

Los puntos de control de calidad de aguas subterráneas tiene como información los siguientes parámetros: bicarbonatos (mg/l HCO₃) 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 NO₃) en mg/l, oxígeno disuelto (% satur., Campo) en % sat.O₂, oxígeno disuelto (mg/l, Campo) en ppm O₂, sulfatos (mg/l SO₄) en ppm SO₄ y la temperatura del agua en °C.

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
08. 11.046		766723.3	4447007	NO	SI

Tabla 12. Coordenadas de piezómetros y puntos de control

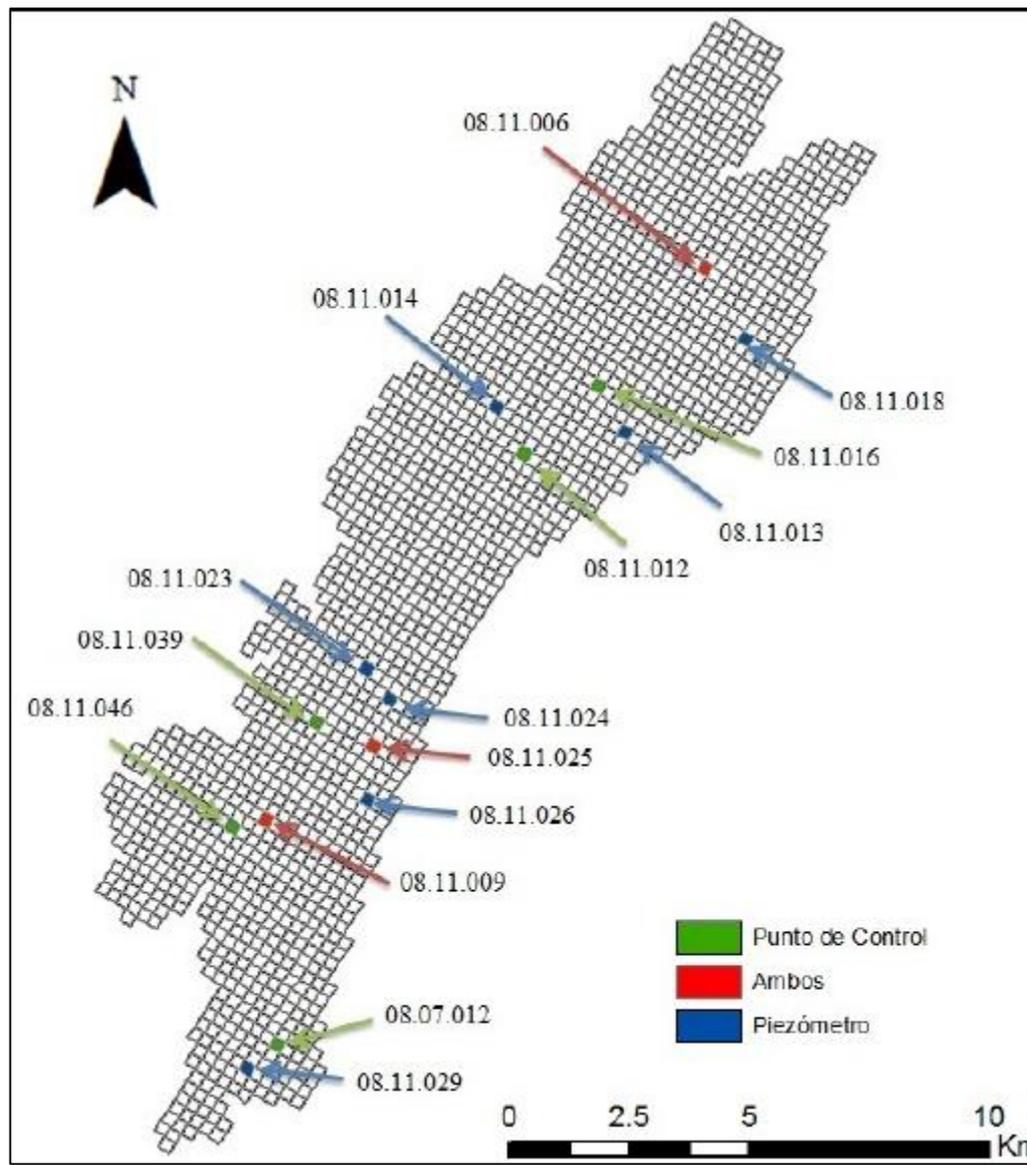


Figura 23. Localización de los piezómetros y puntos de control de calidad (Sanz, 2013)

6.1.9. Flujo lateral

Los flujos laterales provienen del acuífero Maestrazgo, de este acuífero solo se conoce sus niveles piezómetros y se desconoce con precisión valores que cuantifiquen los flujos laterales hacia el acuífero Plana Oropesa – Torreblanca.

Este flujo lateral está representado mediante la condición de contorno de potencial general (GHB) y está asociado a la capa 11, los valores para esta condición de contorno fueron calibrados por Sanz (2013) tomando en cuenta las precipitaciones.

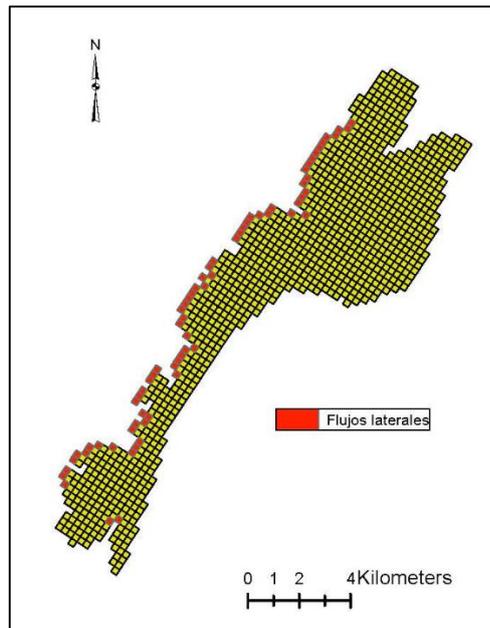


Figura 24. Flujos laterales

6.2. Modelo matemático

El modelo matemático para el acuífero Plana Oropesa – Torreblanca será desarrollado en la plataforma modular de MODFLOW 2000- 2005, que incluye paquetes como SEAWAT que utilizan las ecuaciones de flujo y transporte para simular bajo condiciones de densidad variable.

El modelo se trabajó sobre una malla de 7250 x 26000 m, con una discretización horizontal de 250x250 m (104 filas y 29 columnas) y una discretización vertical de 11 capas (mayor que la de modelos anteriores). De esta manera mejoramos la resolución vertical de nuestro modelo, reduciendo con ello el tamaño de celda (varios metros), lo cual nos permite recoger adecuadamente las heterogeneidades que se presenta en cada celda. El modelo es simulado para el periodo 1973 a 2009, con una discretización del tiempo mensual.

El modelo consta de 7229 celdas activas y 570 celdas de flujo constante en el borde del acuífero para representar el mar. De las 11 capas, 10 pertenecen al acuífero pliocuaternario (zona 1) y 1 capa pertenece al cretácico (zona 3). El acuífero mioceno (zona 2) no se tuvo en cuenta en el modelo, ya que según los informes consultados de Renau -Pruñonosa (2013) tiene muy poca influencia en el modelo matemático.

A continuación en la figura 25, se puede observar la discretización vertical para el acuífero Pliocuaternario, la cual fue dividida en 10 capas de aproximadamente de 12 m cada capa. Para el acuífero Cretácico se continuó con una sola capa de 200 m. de media y el acuífero Miocénico tiene la misma potencia que el acuífero cretácico, pero para nuestro modelo el último acuífero no será considerado por las razones ya anteriormente expuestas. La discretización vertical se hizo tomando en cuenta el muro del acuífero Pliocuaternario, con lo cual siempre serán posibles los flujos hacia la capa 11 al movernos hacia el NO.

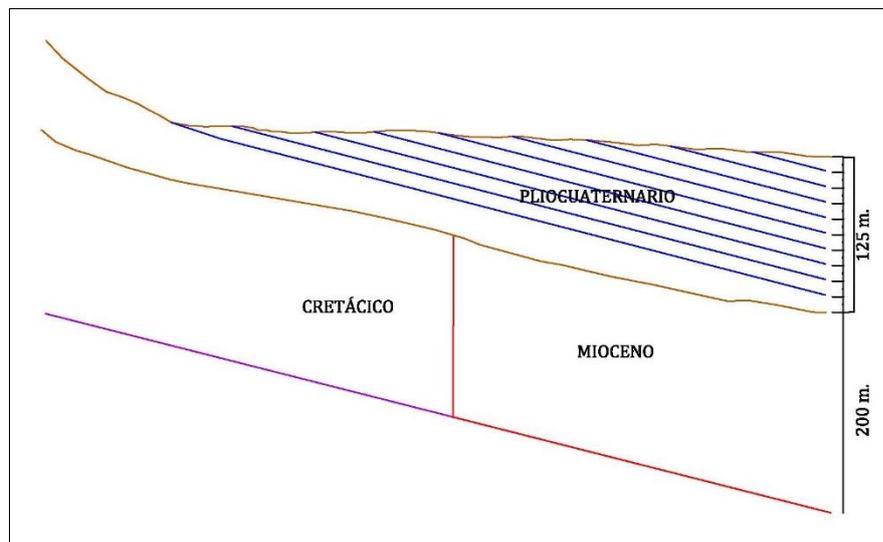


Figura 25. Discretización vertical

Luego de la discretización vertical, se procedió a determinar la distribución de las celdas activas para cada capa.

Capa1	Capa2	Capa3	Capa4	Capa5	Capa6	Capa7	Capa8	Capa9	Capa10	Capa11
10	31	88	203	301	590	756	1141	1359	1657	1093

Tabla 13. Celdas activas por capa

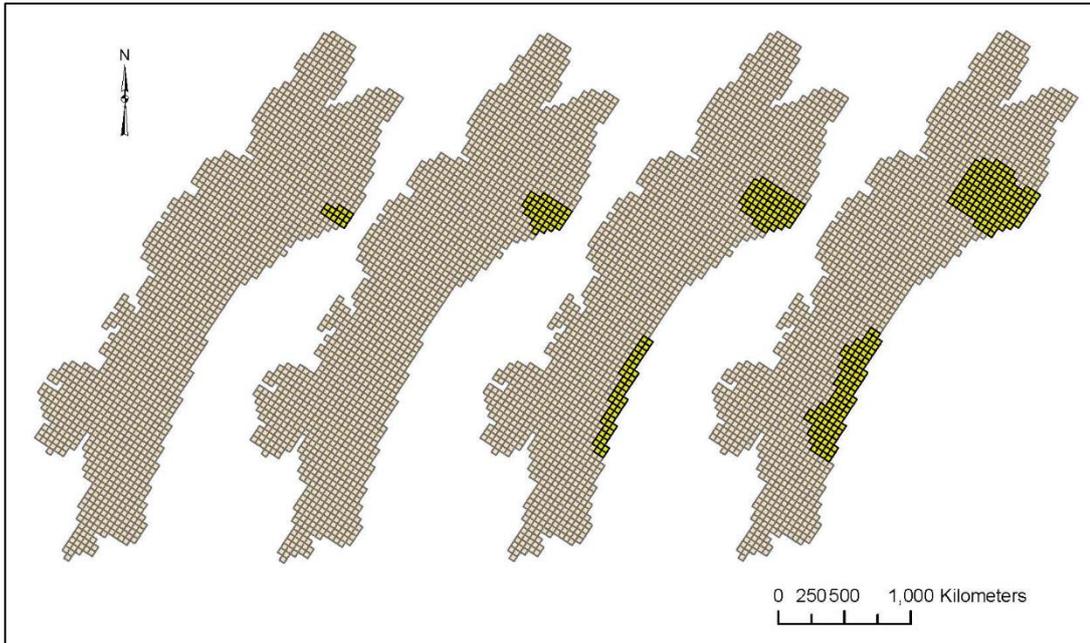


Figura 26. Celdas activas de la capa 1, 2,3 y 4 (referidas a la malla de 250x250)

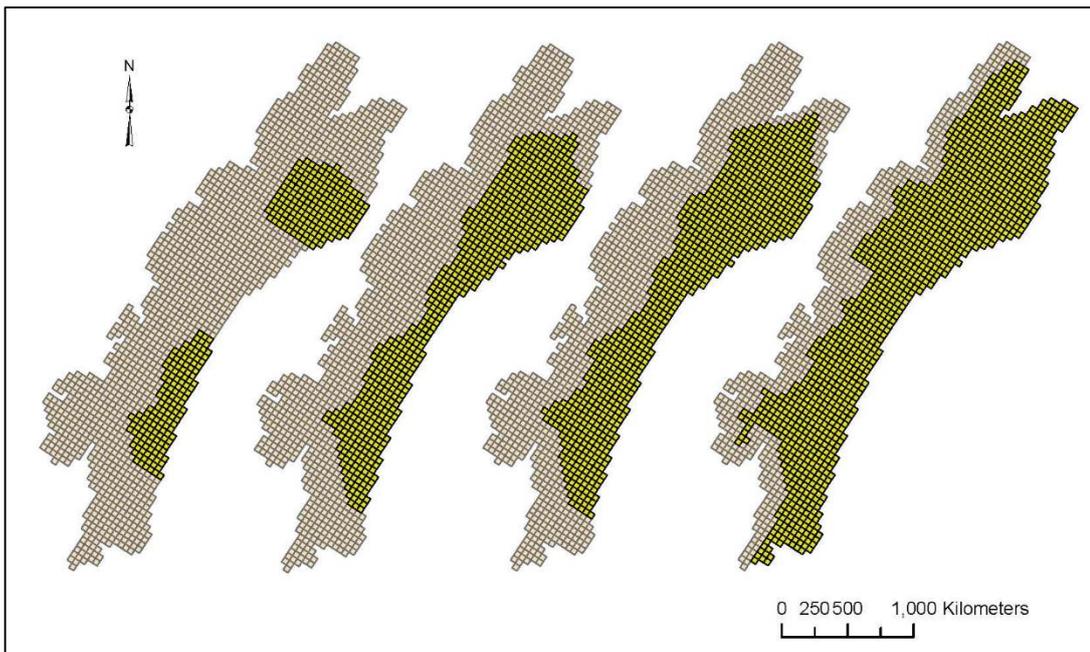


Figura 27. Celdas activas de la capa 2, 3,4 y 5 (referidas a la malla de 250x250)



Figura 28. Celdas activas de la capa 9, 10, y 11 (referidas a la malla de 250x250)

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

Para modelar el flujo y transporte con efectos de densidad variable se utiliza datos del nivel piezométrico y datos de concentración de salinidad, en principio similar a modelos anteriores, pero con la diferencia de una mayor resolución vertical.

En este apartado explicaremos los pasos y datos introducidos en el modelo para su calibración.

Altura piezométrica inicial

Se utilizó la altura piezométrica inicial del modelo de Sanz (2013), esta condición inicial para el acuífero Pliocuaternario (zona 1) se obtuvo mediante la interpolación de datos puntuales de la confederación hidrográfica del Júcar. Para el acuífero cretácico (zona 3) se optó por elevar el nivel de la zona 1 progresivamente desde la zona cercana al mar hacia el interior.

Concentración de salinidad

La concentración de salinidad es un dato imprescindible para el modelamiento con SEAWAT, porque mediante estos valores podemos representar la evolución de la concentración de salinidad a lo largo del periodo simulado.

La concentración de salinidad fue extraída del modelo de Sanz (2013), y al mejorar la resolución vertical del modelo, el número de capas se incrementó, por lo que se realizó una interpolación de los datos extraídos para obtener nuevos valores para las nuevas capas, siempre tomando en cuenta que la concentración de salinidad en el margen costero es mayor y se incrementa en profundidad. Las unidades de concentración de salinidad están en g/l. (Ver figura 29, 30 y 31).

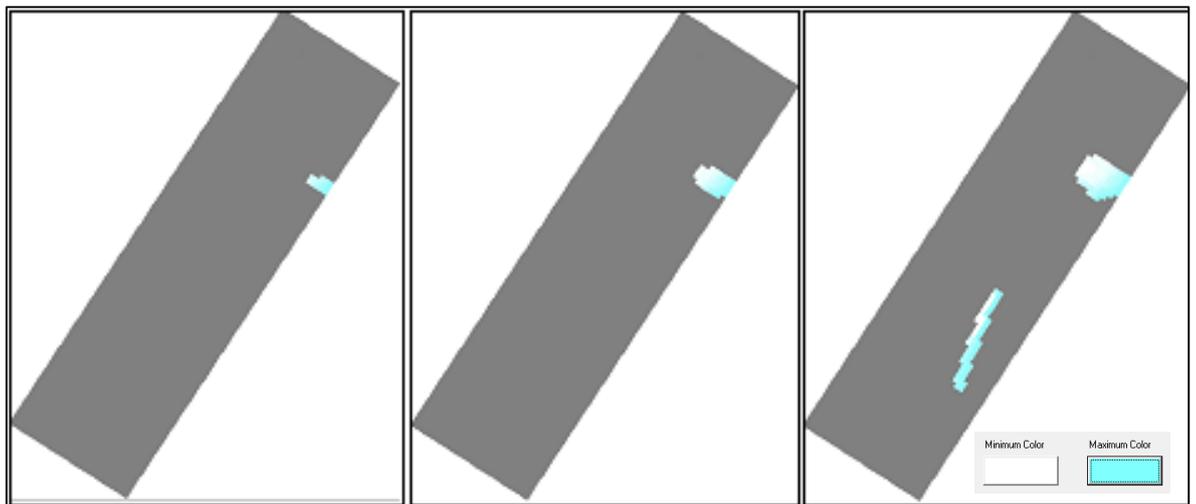


Figura 29. Concentración de salinidad en la capa 1, capa 2 y capa 3.

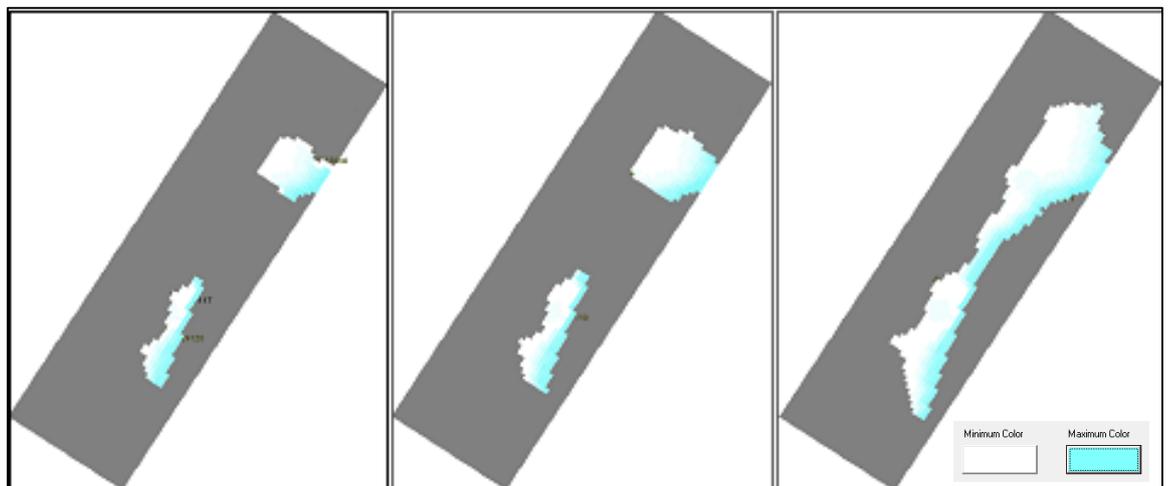


Figura 30. Concentración de salinidad en la capa 4, capa 5 y capa 6.

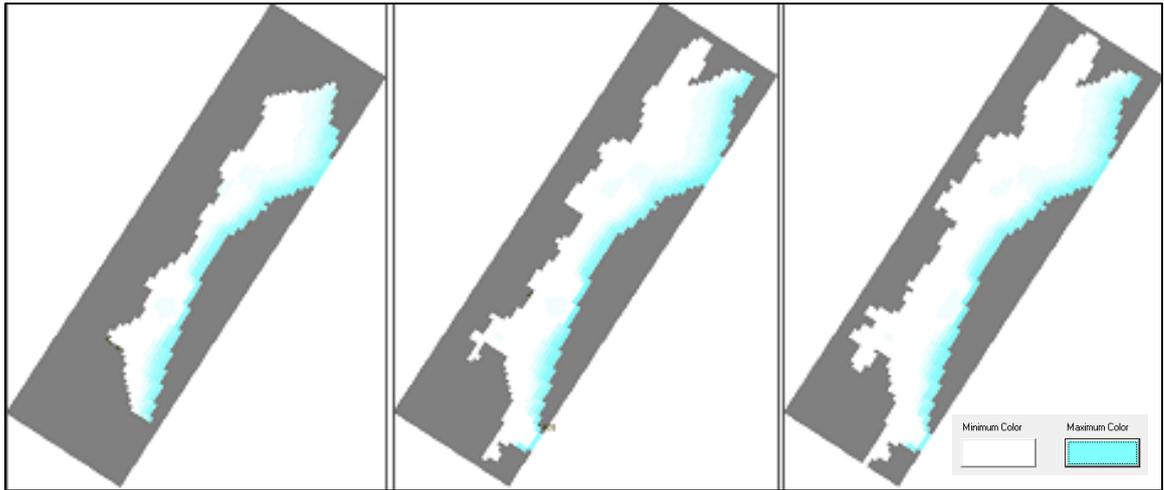


Figura 31. Concentración de salinidad en la capa 7, capa 8 y capa 9.



Figura 32. Concentración de salinidad en la capa 10 y capa 11.

Calibración de las Conductividades

Para el proceso de calibración de las conductividades se partió de los datos de conductividad encontrados en el modelo de Sanz (2013).

A la hora de calibrar el acuífero Pliocuaternario en el modelo avanzado se optó solo por modificar las conductividades en las celdas cercanas a la costa, siendo estas más bajas en las capas más profundas y consiguiendo con ello simular la cuña salina característica en los acuíferos costeros. Las conductividades en las celdas cercanas a la costa van de 6.25 a 150 m/día en las primeras 8 capas y 0.1 m/día para las 2 últimas capas. Dándole con ello mayor realismo de la forma adoptada de la intrusión salina, y siendo más preciso que los modelos anteriores. En el siguiente grafico se muestra el mapa de conductividades.

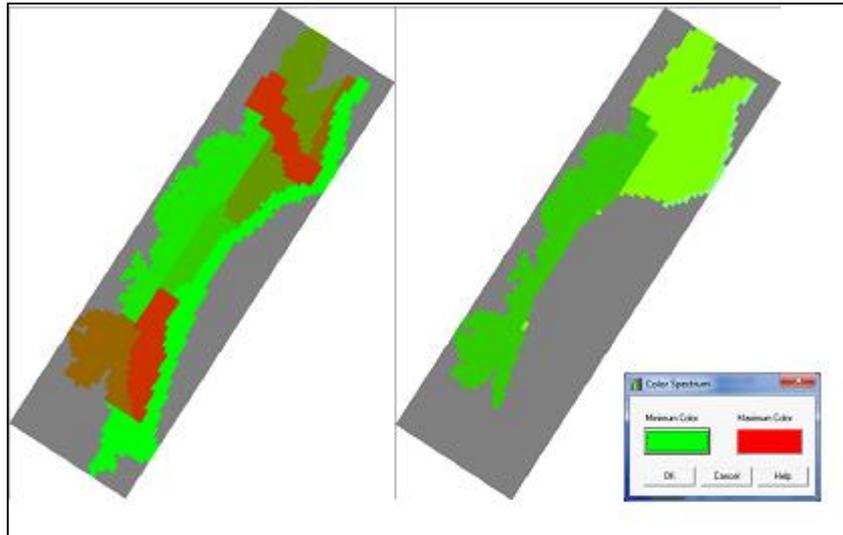


Figura 33. Conductividad en el acuífero Pliocuaternario (izquierda) y en el acuífero cretácico (derecha).

Condiciones de contorno

El modelo presenta tres condiciones de contorno y son: flujos laterales, la zona húmeda (Prat de Cabanes) y el mar.

Los flujos laterales serán representados por la condición de contorno de potencial general (GHB), esta condición está relacionada a la capa 11 (zona 3). La zona Húmeda (Prat de Cabanes) se establecerá como condición tipo dren. Y el mar se establecerá mediante una condición de nivel constante de 0 msnm.

Recarga y bombeo

Para la recarga y el bombeo se tomaron los datos ya mencionados anteriormente, y la primera fue aplicada a las celdas activas de mayor cota y la segunda se consideró como totalmente penetrante.

6.2.2. Resultados del modelo

Después de modificar las conductividades hidráulicas correspondientes a las celdas más próximas a la costa para simular la cuña salina característica en los acuíferos costeros, mostraremos la ubicación de los puntos calibrados y las tendencias que el modelo es capaz de reproducir en cada punto.

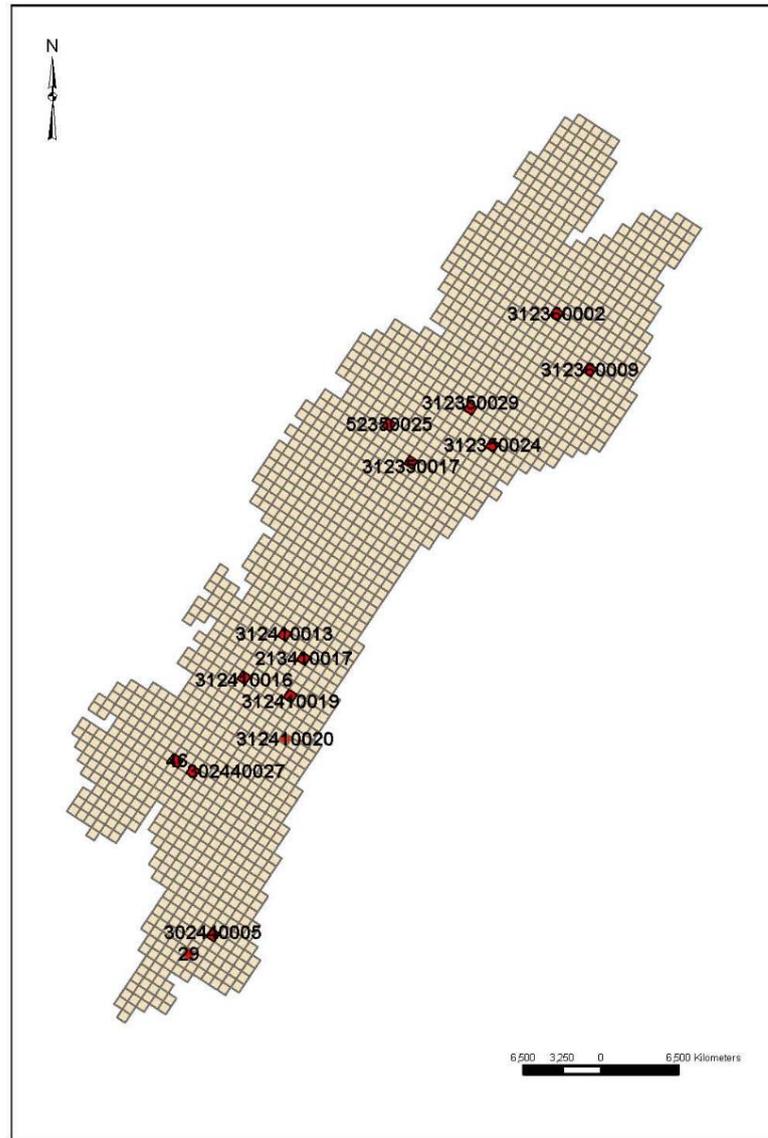


Figura 34. Ubicación de los puntos de control de salinidad y piezometría

El punto 312360002 se encuentra entre los rangos de altura piezométrica de -4msnm y 4msnm, mientras que el punto 312360009 se encuentra entre los -1 msnm y 1.5 msnm. Se observa que el punto 312360002 y 312360009 presentan saltos en los niveles piezométricos, esto puede ser consecuencia de que el primer punto es un pozo de bombeo activo y el segundo es un piezómetro que se encuentra influencia por pozos de bombeo cercanos. Estos puntos se ubican en el sector norte del acuífero Plana Oropesa – Torreblanca.

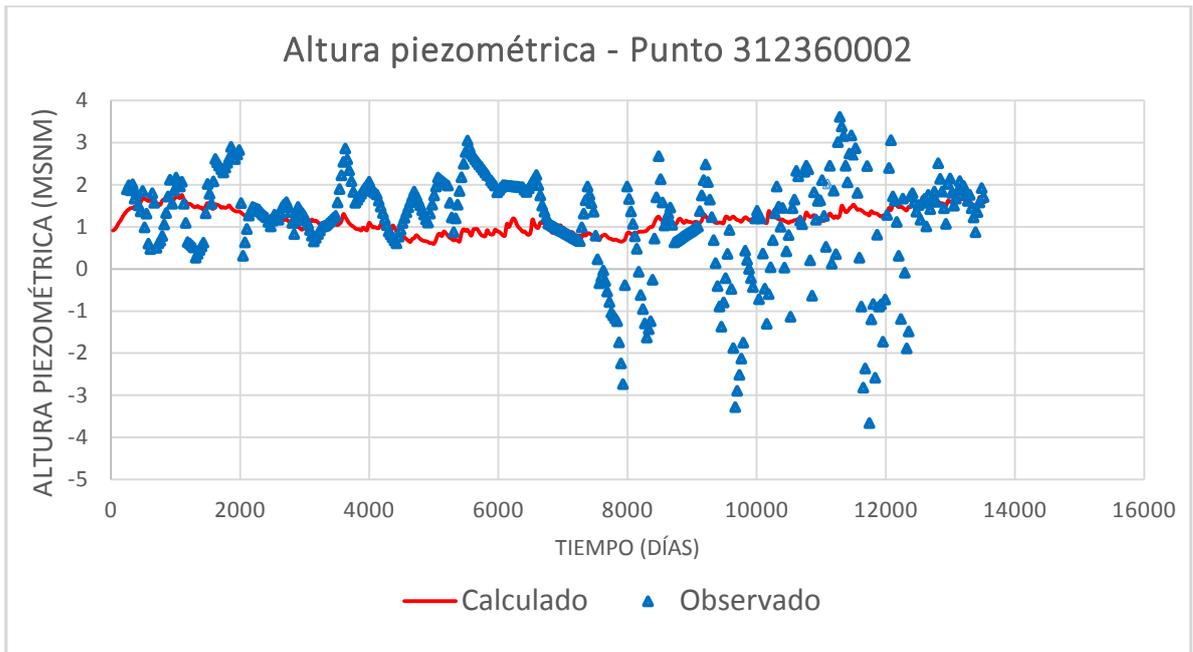


Figura 35. Altura piezométrica Obs vs Calc (punto 312360002, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)

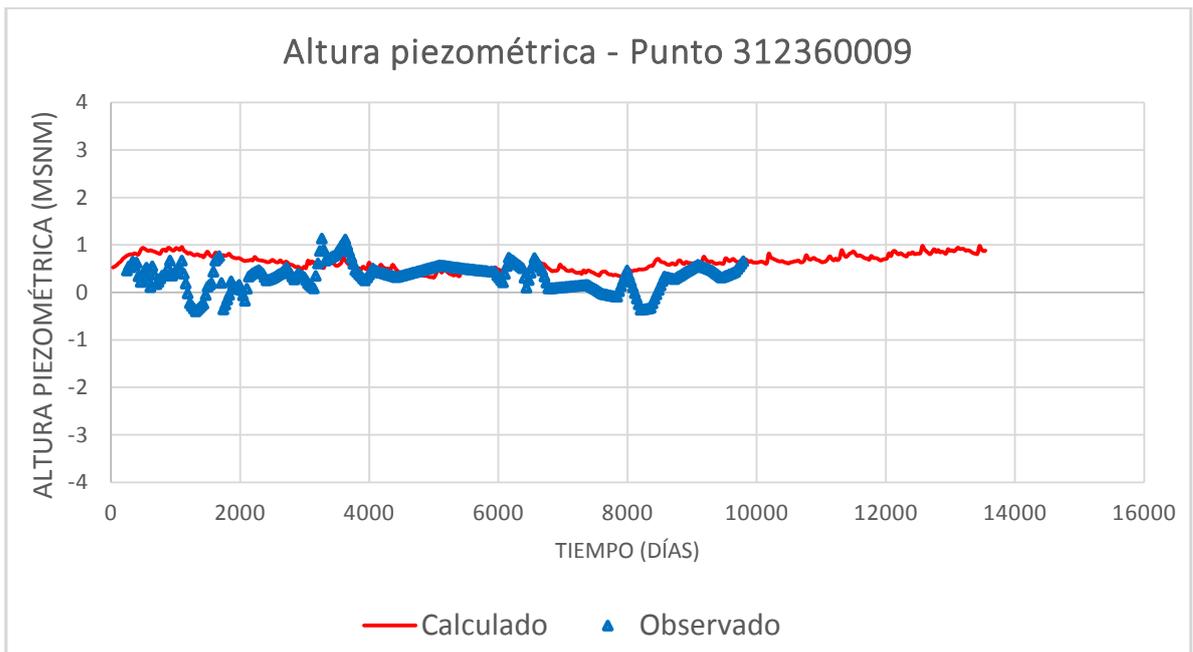


Figura 36. Altura piezométrica Obs vs Calc (punto 312360009, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)

El punto 312350024 muestra una altura piezométrica que se encuentra entre los rangos de -1 msnm y 1 msnm, en este punto se puede observar que la calibración es buena. Para el punto 31230024 la calibración es buena también, pero al final del periodo de simulación

la tendencia varia con respecto a los datos observados. Estos puntos se ubican en el sector centro del acuífero Plana Oropesa – Torreblanca.

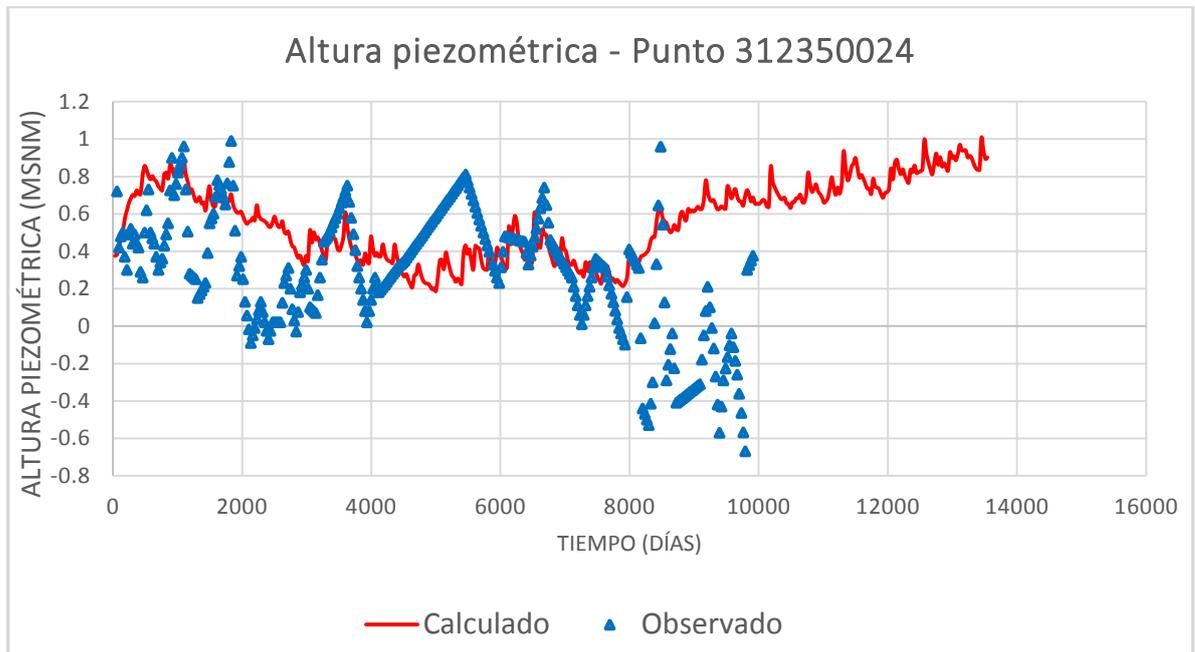


Figura 37. Altura piezométrica Obs vs Calc (punto 312350024, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)

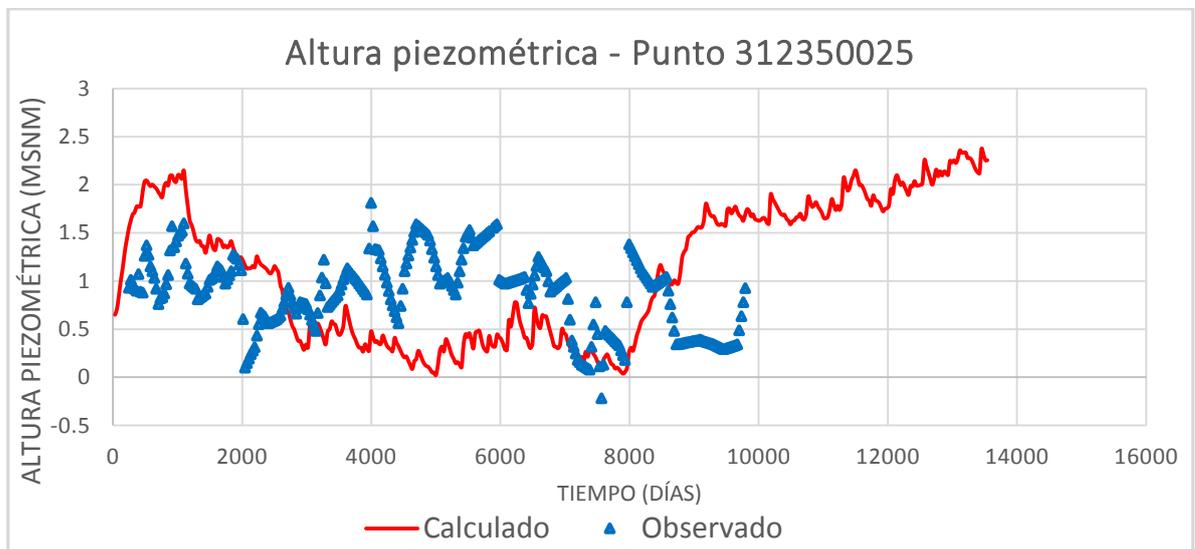


Figura 38. Altura piezométrica Obs vs Calc (punto 312350025, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)

Los puntos 312410013, 312410017, 312410019 y 312410020 se ubican hacia la zona sur de la masa de agua subterránea Plana Oropesa – Torreblanca, estos puntos presentan similar tendencia, esto puede deberse a que están separados por distancias muy cortas. Se

observa que las simulaciones no representan adecuadamente la tendencia en el periodo comprendido entre 4003 (1986) a 8000 (1999).

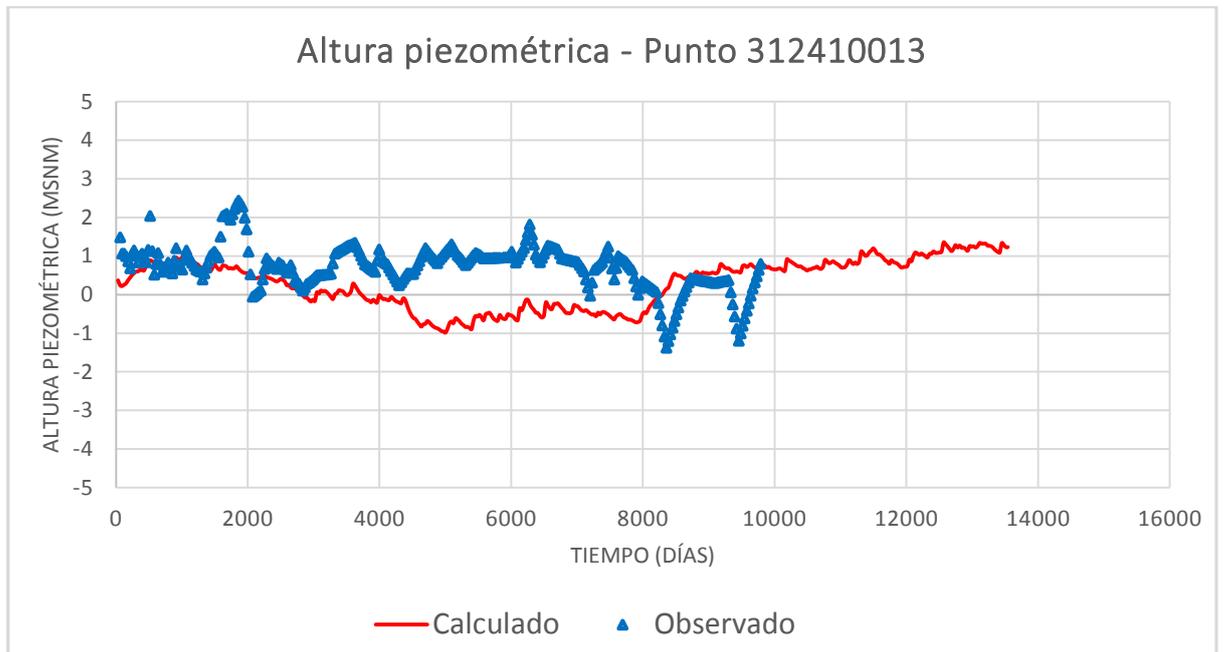


Figura 39. Altura piezométrica Obs vs Calc (punto 312410013, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)

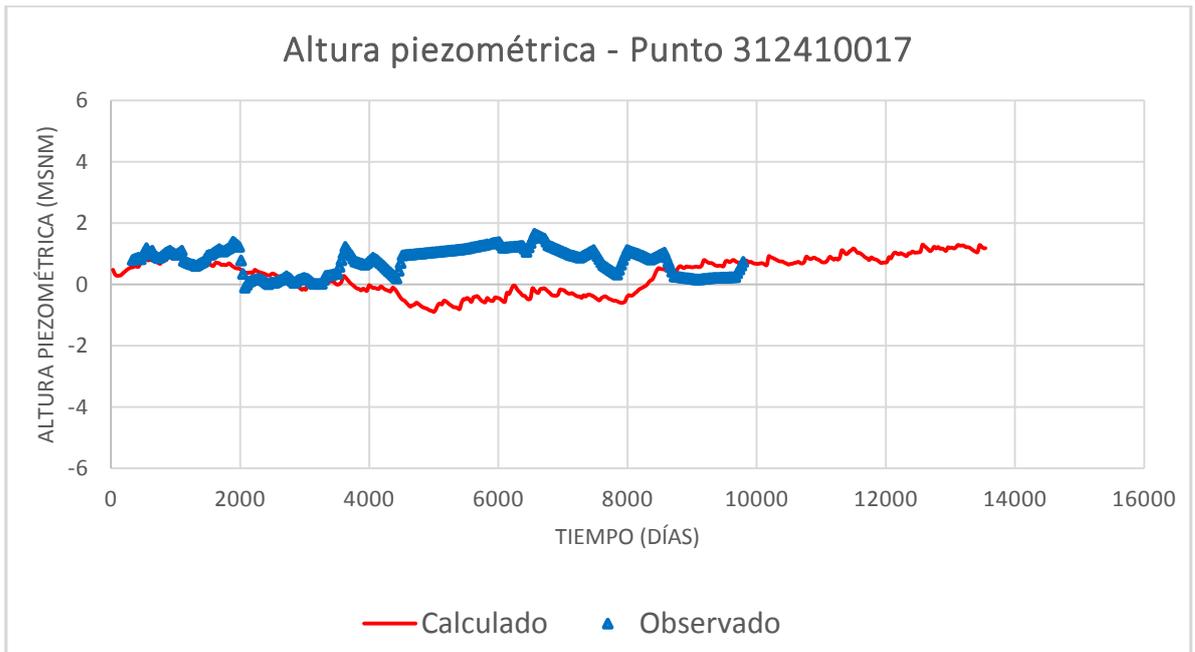


Figura 40. Altura piezométrica Obs vs Calc (punto 312410017, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)

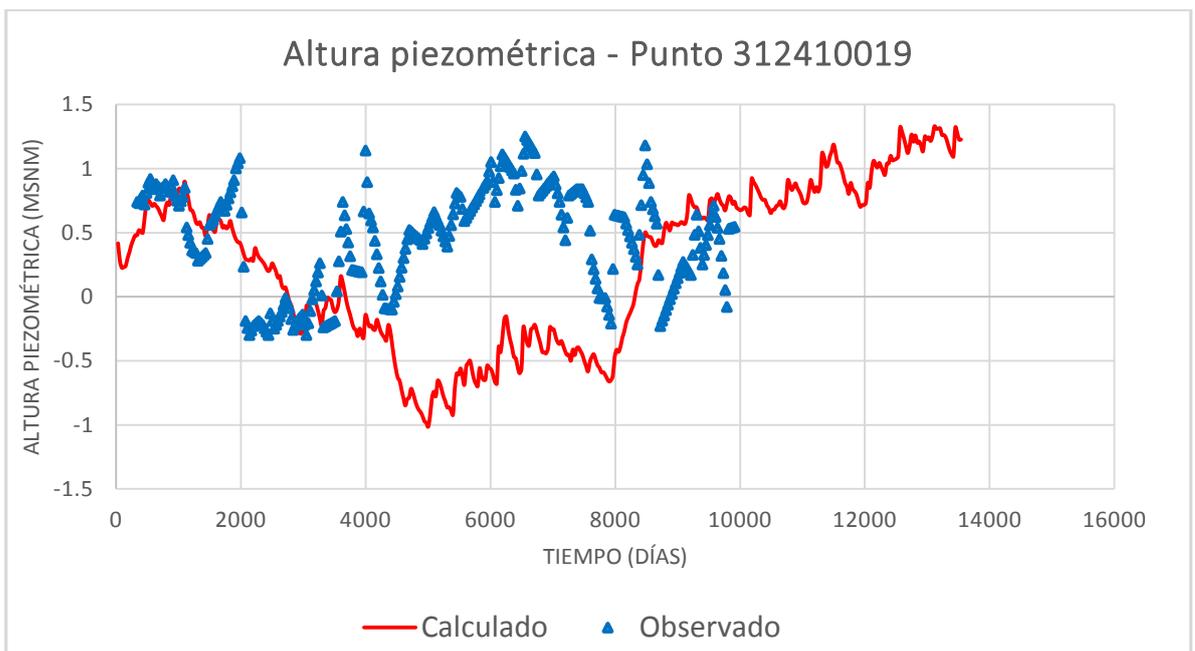


Figura 41. Altura piezométrica Obs vs Calc (punto 312410019, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)

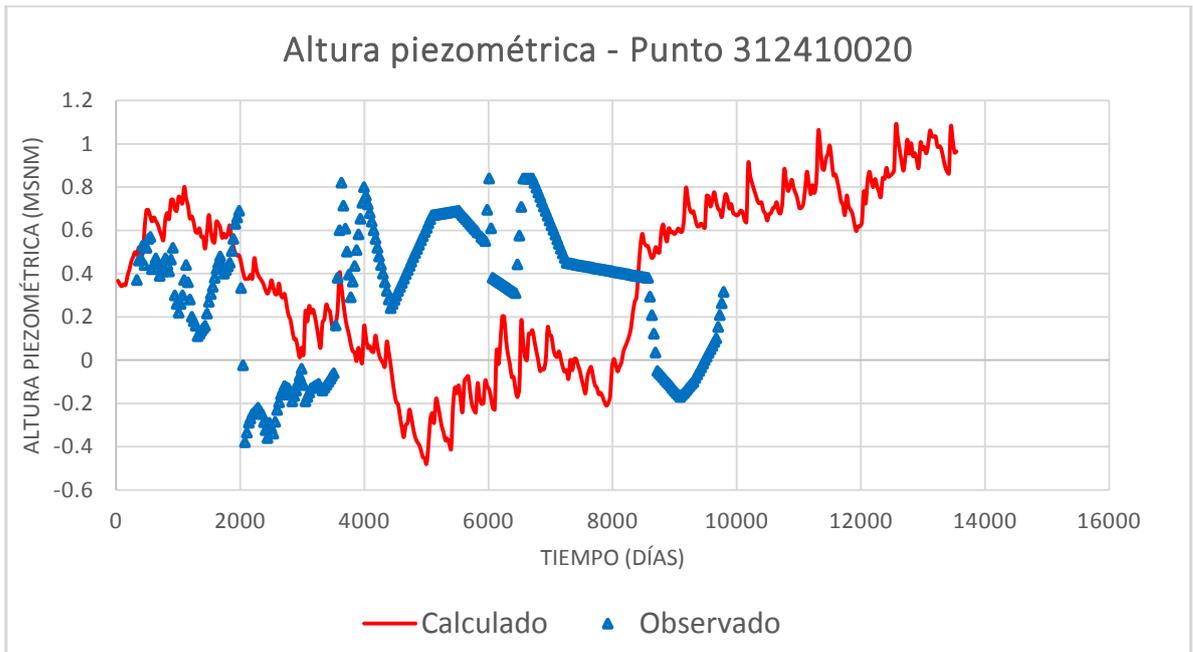


Figura 42. Altura piezométrica Obs vs Calc (punto 312410020, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)

El punto 312440027 se ubica al sur de la masa de agua subterránea Plana Oropesa - Torreblanca, en el cual se observa que la calibración es un poco deficiente.

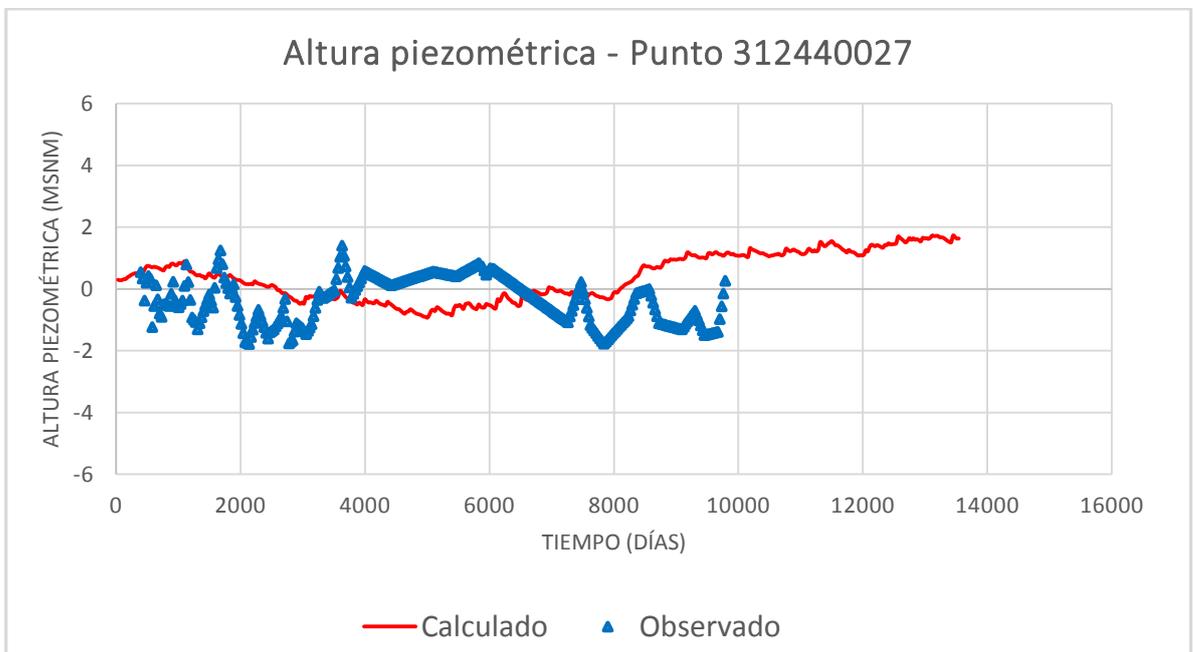


Figura 43. Altura piezométrica Obs vs Calc (punto 302440027, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)

En el punto 29 la calibración es un poco deficiente, podemos observar que las alturas piezométricas muestran saltos, esto puede deberse a que se trata de un pozo activo.

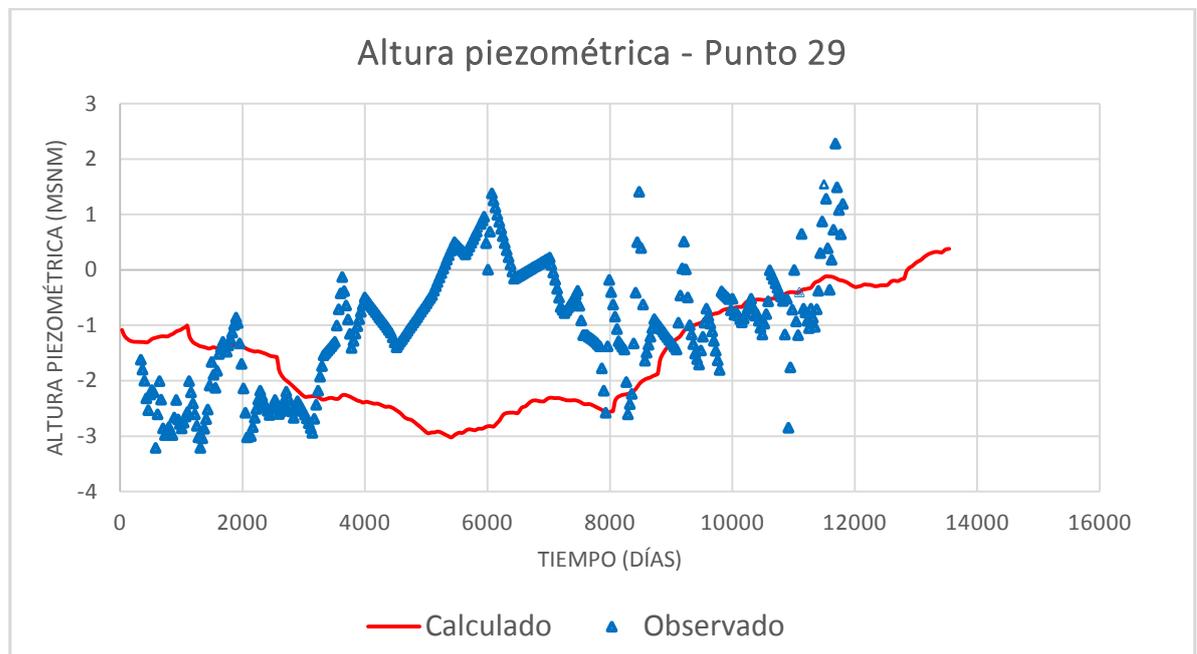


Figura 44. Altura piezométrica Obs vs Calc (punto 29, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)

La calibración para los puntos de concentración de salinidad es compleja, ya que el número de mediciones en los puntos de control de calidad son escasos y se puede observar que la variación mensual es alta, por lo tanto para reproducir adecuadamente todas las variaciones sería necesario una discretización temporal más fina y mayor información.

En el punto de control 302440005 el ajuste es un poco deficiente, este punto se encuentra en la zona central de la masa de agua subterránea Plana Oropesa – Torreblanca.

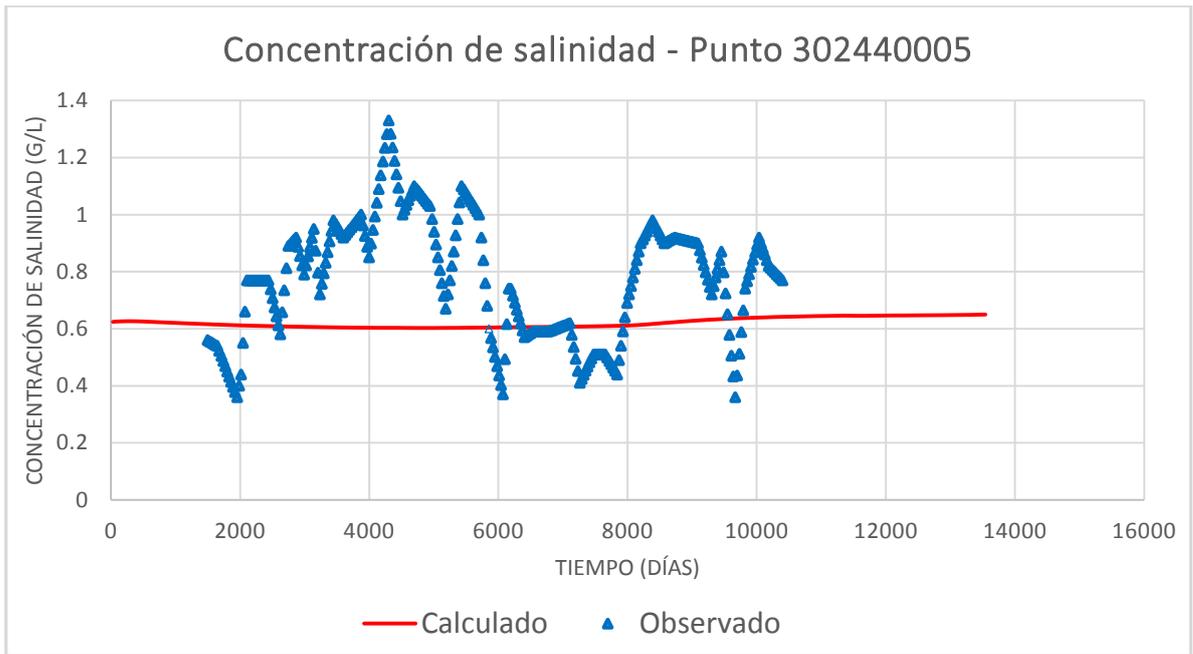


Figura 45. Concentración salinidad Obs vs Calc (punto 302440005, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)

En el punto de control 46 la información es insuficiente para su correcta calibración.

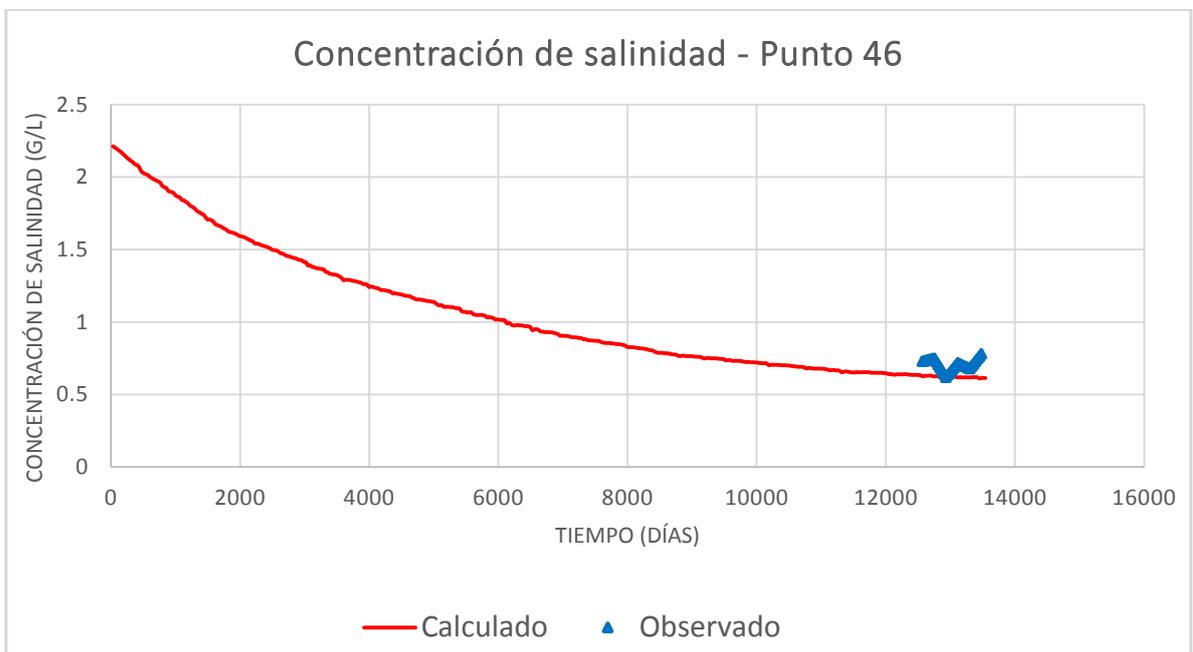


Figura 46. Concentración salinidad Obs vs Calc (punto 46, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)

En el punto de control 312350029 el ajuste es bueno, capta la tendencia de los datos observados, este punto se ubica hacia el norte en la masa de agua subterránea Plana Oropesa – Torreblanca.

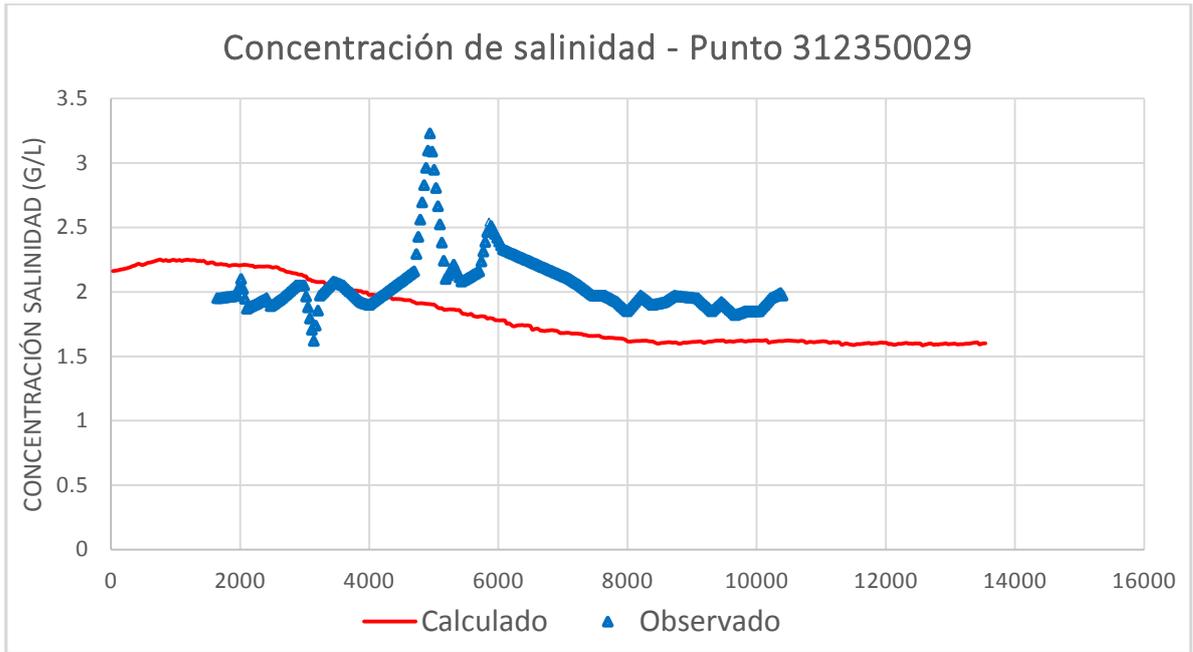


Figura 47. Concentración salinidad Obs vs Calc (punto 312350029, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)

El punto de control 31236002 no presenta buen ajuste, esto puede deberse a que en éste punto se ubica un pozo activo.

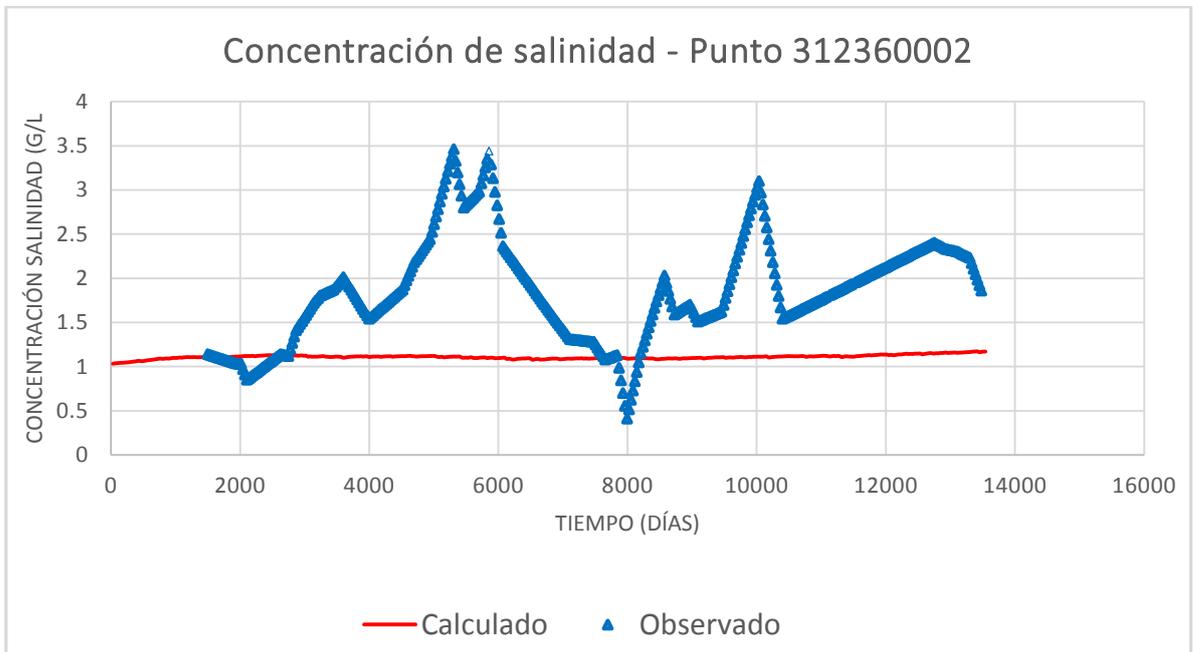


Figura 48. Concentración salinidad Obs vs Calc (punto 312360002, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)

En los puntos de control 302440027 y 312350017, la calibración es buena en el inicio del periodo simulado, ya por el final se observa que el ajuste es deficiente mostrando una tendencia descendente contraria a la tendencia de los datos observados.

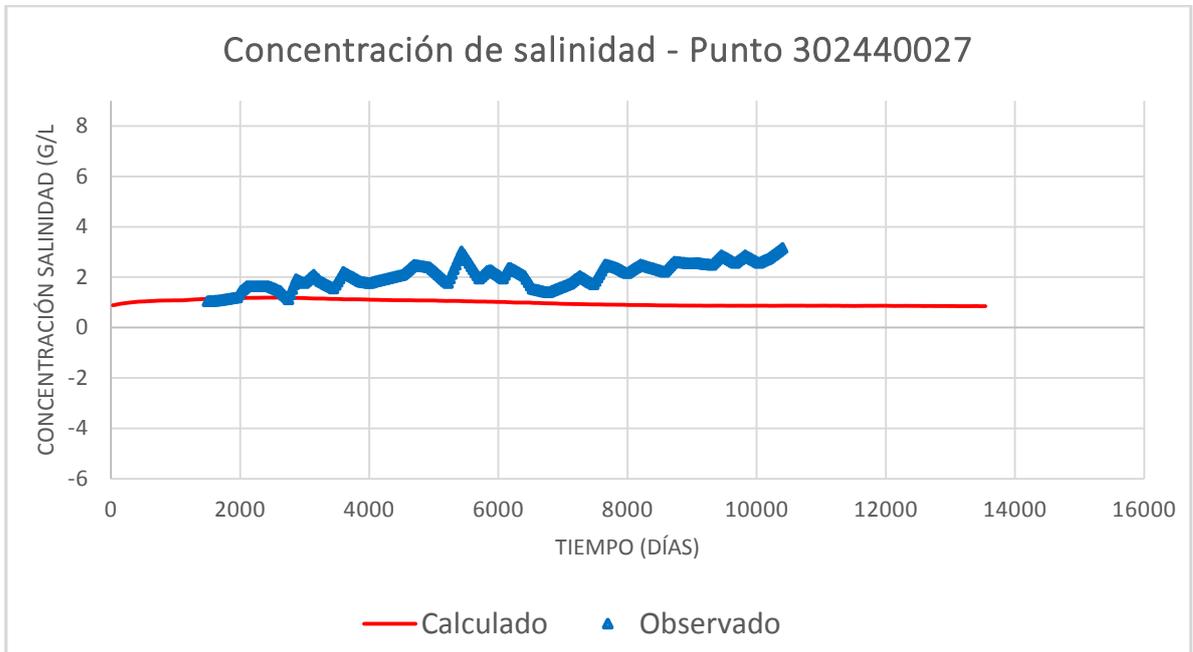


Figura 49. Concentración salinidad Obs vs Calc (punto 302440027, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)

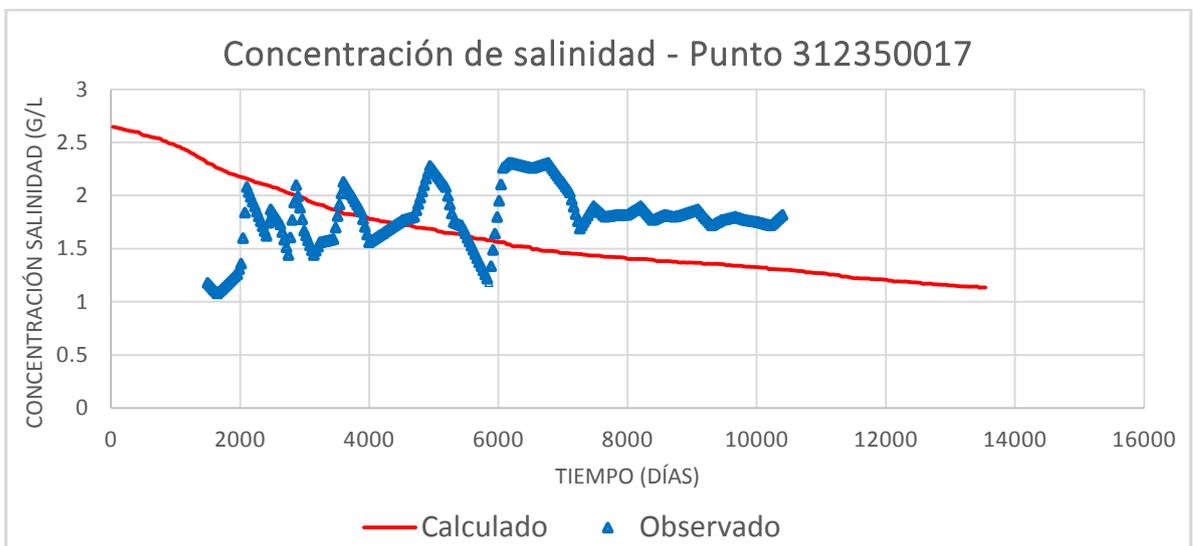


Figura 50. Concentración salinidad Obs vs Calc (punto 312350017, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)

En los puntos de control 312310019 y 312310016 el ajuste de la calibración es muy bueno porque el modelo capta la tendencia de los datos. Estos puntos se ubican en la parte central de la masa de agua subterránea Plana Oropesa – Torreblanca.

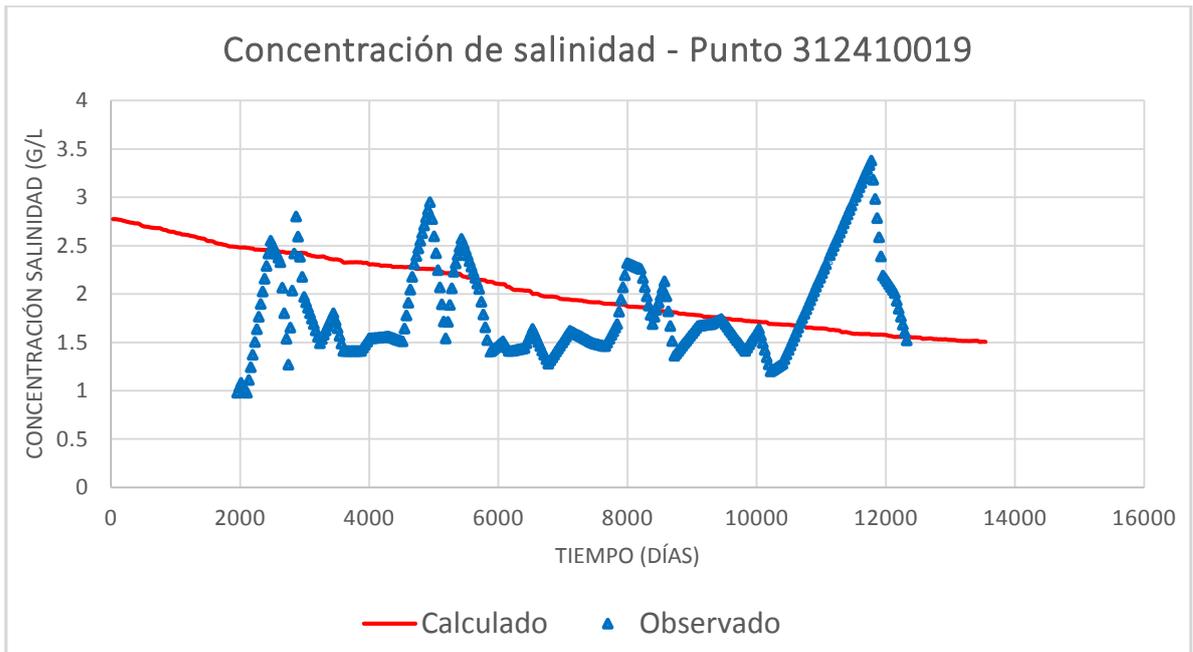


Figura 51. Concentración salinidad Obs vs Calc (punto 312310019, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)

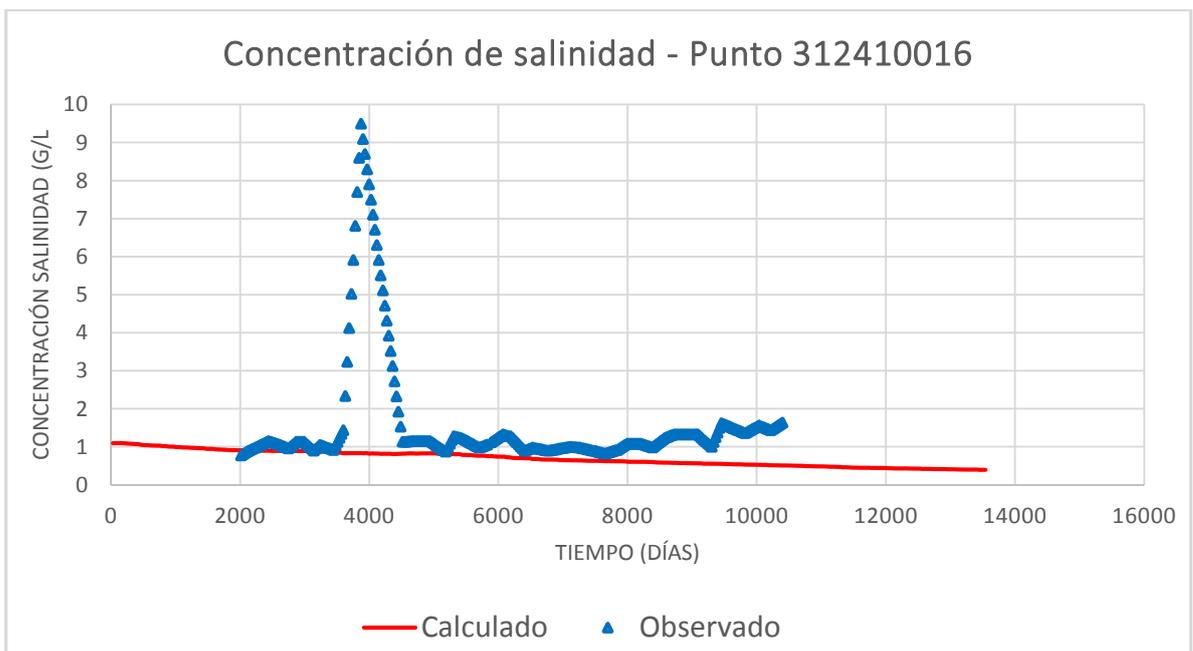


Figura 52. Concentración salinidad Obs vs Calc (punto 312310016, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)

En el balance hídrico anual podemos observar que la intrusión es alta en los periodos 1985 – 1986 y 1993 – 1994 esto es debido a la fuerte explotación de los pozos de bombeo que tiene lugar en el periodo 1985 – 1994 y las fuertes y sucesivas disminuciones de las

recargas a lo largo de todo el periodo simulado. También podemos observar que la intrusión salina disminuye desde 1995 siendo estable hasta el 2009.

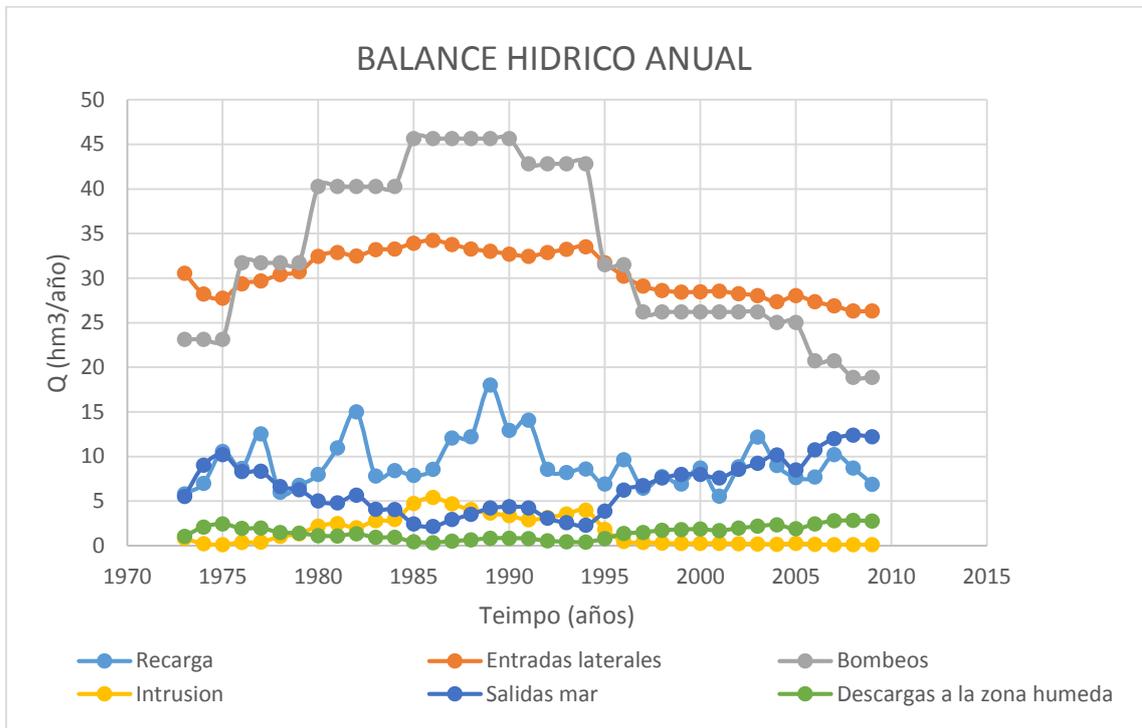


Figura 53. Balance hídrico anual

La intrusión salina alcanza su valor máximo de 5.3 hm³/año en el año 1986, luego a partir de 1996 hasta el 2009 disminuyen considerablemente sus valores. Las salidas al mar tienen una media de 6.52 hm³/año y alcanzan un valor máximo de 12.39 hm³/año en el 2008. Las descargas a la zona húmeda muestran una media de 1.44 hm³/año y el valor máximo es de 2.83 hm³/año en el 2008.

En lo que respecta al balance hídrico medio, se observan ligeras diferencias entre los resultados de Sanz (2013) y el nuevo modelo calibrado. Los valores de intrusión son similares en ambos modelos, mientras los valores de flujos laterales, salidas al mar y dren disminuyeron con respecto a los resultados de Sanz (2013), esto se debe a que el nuevo modelo avanzado tiene mayor resolución vertical con lo cual muestra mayor precisión.

ENTRADAS (hm ³ /año)			SALIDAS (hm ³ /año)		
	Sanz, 2013	Modelo Calibrado		Sanz, 2013	Modelo Calibrado
Intrusión	1.67	1.65	Salidas al mar	9.24	6.52

entradas laterales	33.42	30.47	Pozos	32.93	32.93
infiltración	9.23	9.23	Descarga a la zona Húmeda	1.68	1.44
Total	44.32	41.35	Total	43.85	40.89

Tabla 14. Comparación de los balances hídricos medios calculados para el modelo

6.2.3. Análisis de sensibilidad

Después de la calibración del modelo, se procedió al análisis de sensibilidad para conocer la variación de los valores alcanzados en la calibración.

Considerando que la variación en el nuevo modelo fue casi exclusivamente en la conductividad, se procedió hacer un análisis de sensibilidad de este parámetro y de los flujos laterales, encontrando que los cambios en la conductividad son ligeramente despreciables, no siendo así en los flujos laterales los cuales presentan un cambio apreciable en todos los componentes del balance. Al presentar la conductividad cambios ligeros en el análisis de sensibilidad, podemos decir que la calibración fue buena.

	MODELO CALIBRADO	CONDUCTIVIDAD		FLUJOS LATERALES	
		-20%	+20%	-20%	+20%
ENTRADAS (hm³/año)					
Intrusión	1.65	1.63	1.68	2.90	0.87
entradas laterales	30.47	29.60	31.21	25.82	35.18
infiltración	9.23	9.23	9.23	9.23	9.23
Total	41.34	40.45	42.11	37.95	45.28
SALIDAS (hm³/año)					
Salidas al mar	6.52	5.61	7.34	3.92	9.50
Pozos	32.93	32.93	32.93	32.93	32.93
Descarga a la zona Húmeda	1.44	1.43	1.42	0.82	2.22
Total	40.89	39.96	41.69	37.67	44.65

Tabla 15. Balance hídrico medio (análisis de sensibilidad)

El número de grados de libertad dentro de la calibración es extensa, ello supone que existe una infinidad de soluciones plausibles. Para mostrar estos cambios a continuación se muestra un punto de piezometría con una variación de los valores obtenidos con respecto al modelo calibrado, en la que podemos observar que la variación en los flujos laterales es significativo, mientras que en las conductividades es inapreciable. También se tomó

un punto de control de concentración de salinidad en el que se puede observar que las variaciones tanto en los flujos laterales y conductividades presentan cambios prácticamente inapreciables.

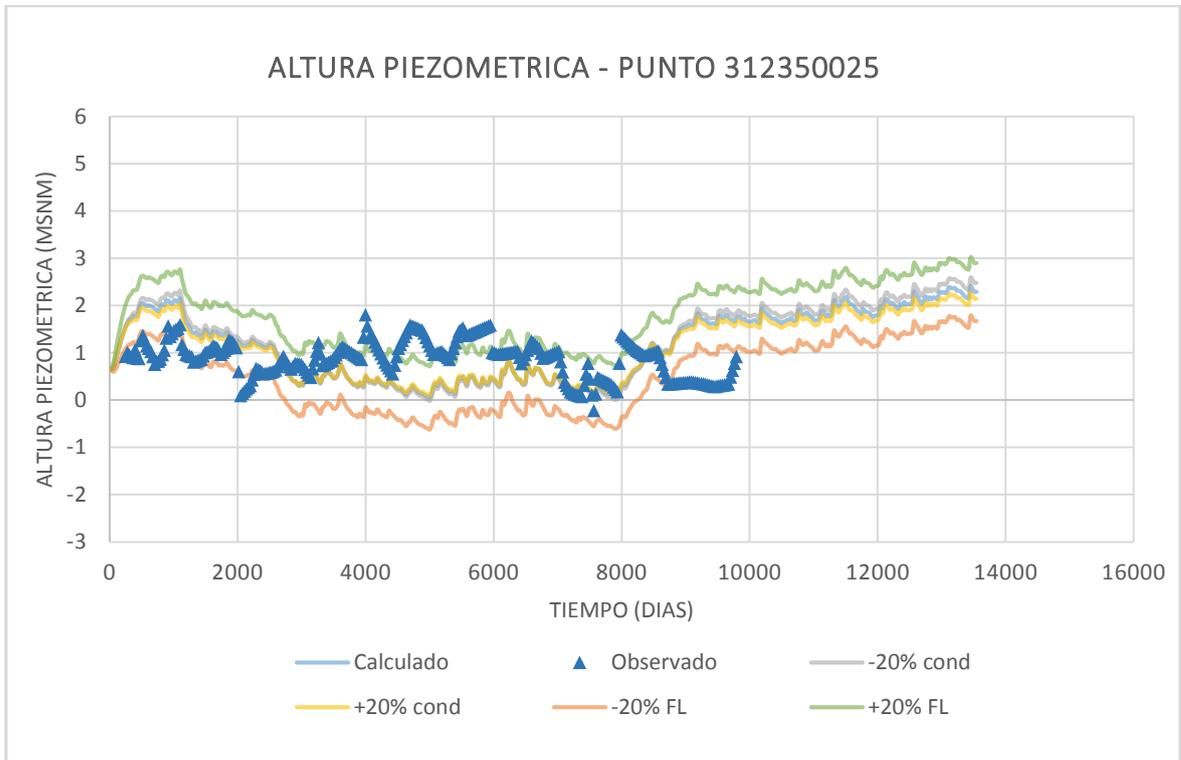


Figura 54. Altura piezométrica Obs vs Calc (punto 312350025)

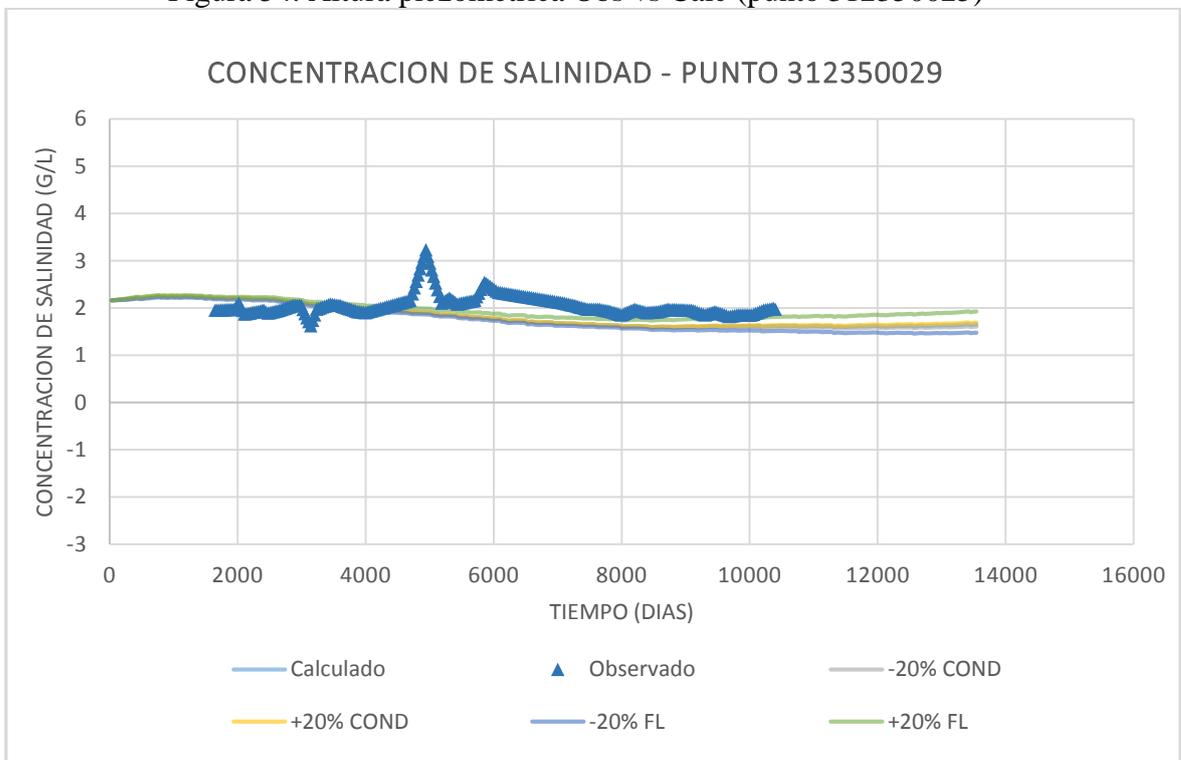


Figura 55. Concentración de salinidad Obs vs Calc (punto 312350029)

6.2.4. Efectos del fenómeno upconing en los puntos de control de calidad

Como se describió en el Capítulo 4, el fenómeno upconing se origina por una sobreexplotación de aguas subterráneas, dicho fenómeno se encuentra en pozos de bombeo, en la parte inferior de estos pozos se forma un cono salino, eso no es más que la interfaz de agua dulce – agua salada moviéndose verticalmente hacia arriba en respuesta del bombeo de un pozo. Lo que logramos al simular con SEAWAT es la interfaz de agua dulce – agua salada, más no esos pequeños movimientos verticales de la interfaz agua dulce – agua salada que se produce en respuesta del bombeo de un pozo.

Para empezar hacer el análisis del efecto upconing sobre los datos, primero se elaboró una tabla con los puntos de monitoreo piezométricos y de control de calidad, haciendo una clasificación según su uso, de estos se observó que solo tres de ellos eran pozos de bombeo y los demás piezómetros, además quisimos tomar en cuenta a algunos piezómetros que se encontraban cercanos a pozos de bombeo y ver su influencia. (Ver tabla 9).

Código CHJ	Código IGME	Coord. X	Coord. Y	Pozos	Puntos piezométricos cercanos a pozos	Información de datos de control de calidad.
08.07.012	302440005	767764	4442682			
08.11.006	312360002	776513	4458619	SI		Disponible
08.11.009	302440027	767498	4447242			
08.11.012	312350017	772718	4454959			
08.11.013	312350024	774798	4455201			
08.11.014	312350025	772219	4455676			
08.11.016	312350029	774129	4456181			
08.11.018	312360009	777368	4457294		SI	No disponible
08.11.023	312410013	769525	4450434		SI	No disponible
08.11.024	312410017	770071	4449729			
08.11.025	312410019	769663	4448781			
08.11.026	312410020	769655	4447728		SI	No disponible
08.11.029		767110	4442234	SI		No disponible
08.11.039	312410016	768465	4449289			
08. 11.046		766723.3	4447007	SI		Insuficiente

Tabla 16. Tabla clasificando los puntos de control según su uso

De la tabla 9 podemos observar que tenemos dos puntos de control y son: el punto de control 312360002 y el punto de control 46, de estos el ultimo muestra información insuficiente para su análisis, por consiguiente solo trabajaremos con el Pozo de bombeo 312360002.

Empezaremos analizando los datos observados de los niveles piezométricos del punto 312360002, en el que podemos observar que durante todo el periodo de simulación el pozo presento ascensos y descensos del nivel piezométrico, confirmando con ello que estuvo en constante actividad.

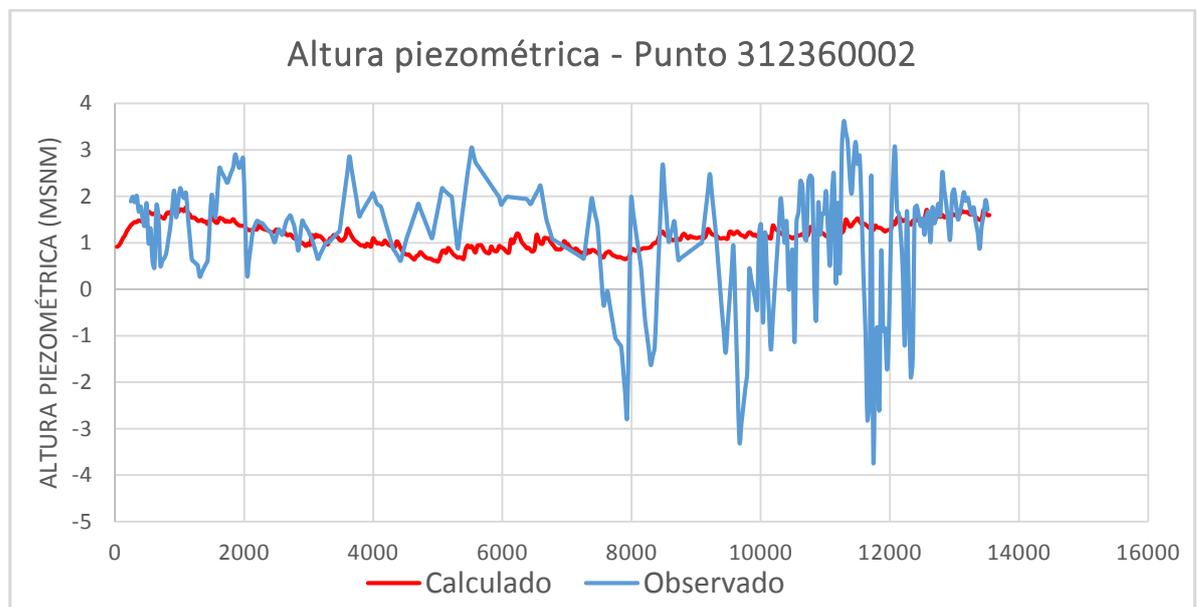


Figura 56. Altura piezométrica Obs vs Calc (punto 312360002, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)

El punto 312360002 muestra incrementos y descensos de concentración de salinidad. Si consideramos la hipótesis de que este punto pudo haberse visto afectado por el fenómeno Upconing, podríamos decir que su salinidad se incrementó hasta un 8% de la salinidad media (este porcentaje de incremento en la salinidad es según Schmorak y Mercado, 1969).

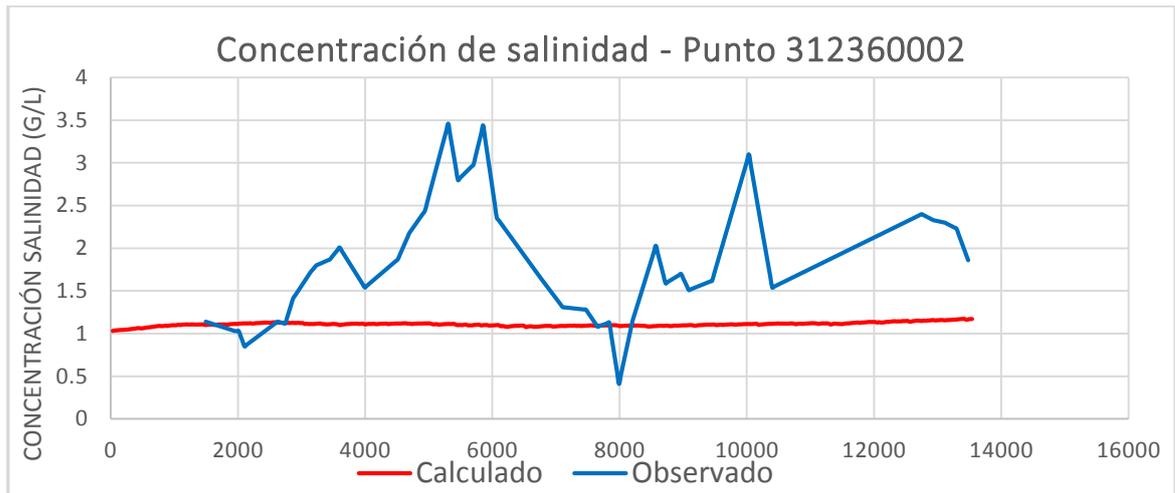


Figura 57. Concentración salinidad Obs vs Calc (punto 312360002, calibración del flujo y transporte con efectos de densidad variable)

Al hacer un análisis global de todos los puntos de control de salinidad podemos observar que el modelo reproduce tendencias lineares con respecto a las concentraciones salinas, esto se debe a que el objetivo del modelo es reproducir la cuña salina. En cambio la tendencia de los datos observados presenta variaciones incrementos y descensos de la salinidad, esta variación de la salinidad podría ser causada por el fenómeno upconing.

En el siguiente grafico a la izquierda se observa el mapa piezómetro del acuífero Plana Oropesa – Torreblanca, en la que las curvas en sectores de bombeo forman conos de extracción. A la derecha se observa la posición de puntos de control de piezometría y concentración de salinidad. De los siguientes gráficos podemos concluir que la ubicación de los pozos es preponderante para conocer si los piezómetros contiguos se ven afectados por las extracciones de agua subterránea.

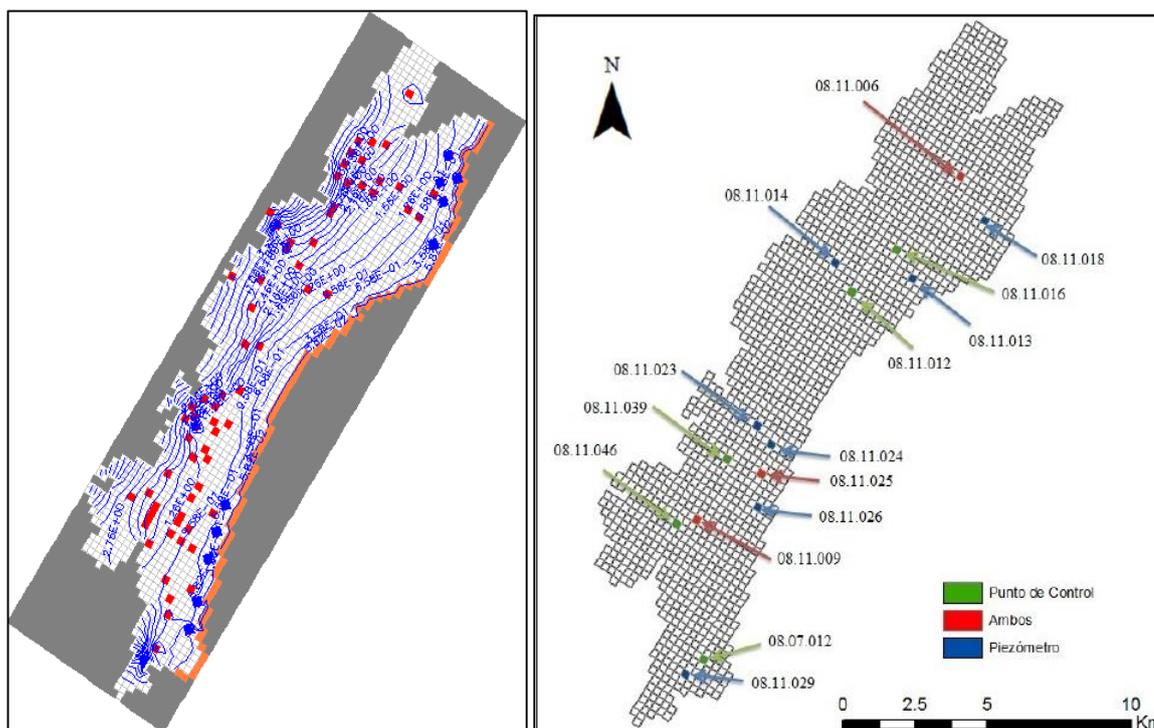


Figura 58. A la izquierda el mapa de las curvas piezométricas del acuífero Plana Oropesa – Torreblanca (Capa 10) y a la derecha el mapa de ubicación de puntos de control y piezometría proyectados en la capa 10.

6.3. Efectos del cambio climático en el nivel del mar y el acuífero costero Plana de Castellón

6.3.1. Selección de escenario climático

Para la selección del escenario de cambio climático futuro se parte de la categorización establecida por la comunidad científica internacional como es el panel intergubernamental sobre el cambio climático (IPCC), seleccionándose el escenario A1B. Tomando en cuenta este escenario se decidió utilizar las siguientes proyecciones a futuro y son:

Para el incremento del nivel del mar mediterráneo, se tomó la proyección elaborada por Spada, G. y Galassi, G. (2014), la cual prevé un incremento del nivel del mar que va de 1.1mm/año a 4.2 mm/año, esta es una proyección hasta el 2050.

Para la disminución de las recargas en el acuífero, se tomó la proyección elaborada por Osma (2010) que prevé una disminución de -18.7% para el periodo 2010 al 2040.

6.3.2. Simulación del modelo con afección por el cambio climático

Para hacer una simulación de cambio climático, partimos del modelo anteriormente elaborado y haremos una proyección futura para el periodo 2015 – 2052 (37 años).

Para representar el cambio climático se empezó modificando la serie histórica de recarga, disminuyendo progresivamente hasta un -18% (datos según Osma, 2010), se disminuyó también los flujos laterales en la misma proporción que las recargas. Y para representar el aumento del nivel mar, se tomó el valor máximo de incremento 4.2 mm/año (dato según Spada, G. y Galassi, G., 2014), este incremento proyectado para 37 años se introdujo en las celdas que representan el borde costero en la altura piezométrica inicial. Los demás parámetros y condiciones de contorno se mantendrán igual que el modelo avanzado.

6.3.3. Resultados de la simulación en el acuífero

Considerando el escenario climático seleccionado, este estudio nos da una vista de los cambios temporales en los recursos subterráneos y sus posibles afecciones.

En el balance medio anual podemos observar que la intrusión salina se incrementó aproximadamente la mitad del valor obtenido con el modelo avanzado, por lo cual los recursos anuales de agua dulce del acuífero disminuirán considerablemente (los componentes de los recursos de agua dulce son: las entradas laterales y la infiltración). En el balance medio anual también se observa que las salidas al mar mostraran una disminución con respecto al modelo avanzado. En cambio en la descarga a la zona húmeda se observa un incremento, esto puede deberse al aumento del nivel del mar, el cual puede provocar una transgresión marina, provocando con ello una inundación en la zona húmeda, en las celdas que representan la zona húmeda se observó un incremento de las concentraciones salinas, esto con respecto al modelo avanzado.

ENTRADAS (hm ³ /año)			SALIDAS (hm ³ /año)		
	Modelo Avanzado	Modelo con afección del cambio climático		Modelo Calibrado	Modelo con afección del cambio climático
Intrusión	1.65	2.47	Salidas al mar	6.52	4.79
entradas laterales	30.47	29.02	Pozos	32.93	32.93
infiltración	9.23	8.32	Descarga a la zona Húmeda	1.44	1.69
Total	41.34	39.81	Total	40.89	39.41

Tabla 17. Balance hídrico calculado para modelo con cambio climático

Los componentes del balance hídrico anual muestran las mismas tendencias que el modelo avanzado a lo largo de la simulación a futuro de cambio climático, pero con incrementos en la intrusión salina y en las descargas a la zona húmeda, pero con descensos en los valores de salidas al mar. La tendencia similar entre el modelo de cambio climático y el modelo avanzado es a causa del uso de las mismas series de bombeo y de infiltración, esta última serie sufrió una disminución según las proyecciones a futuro.

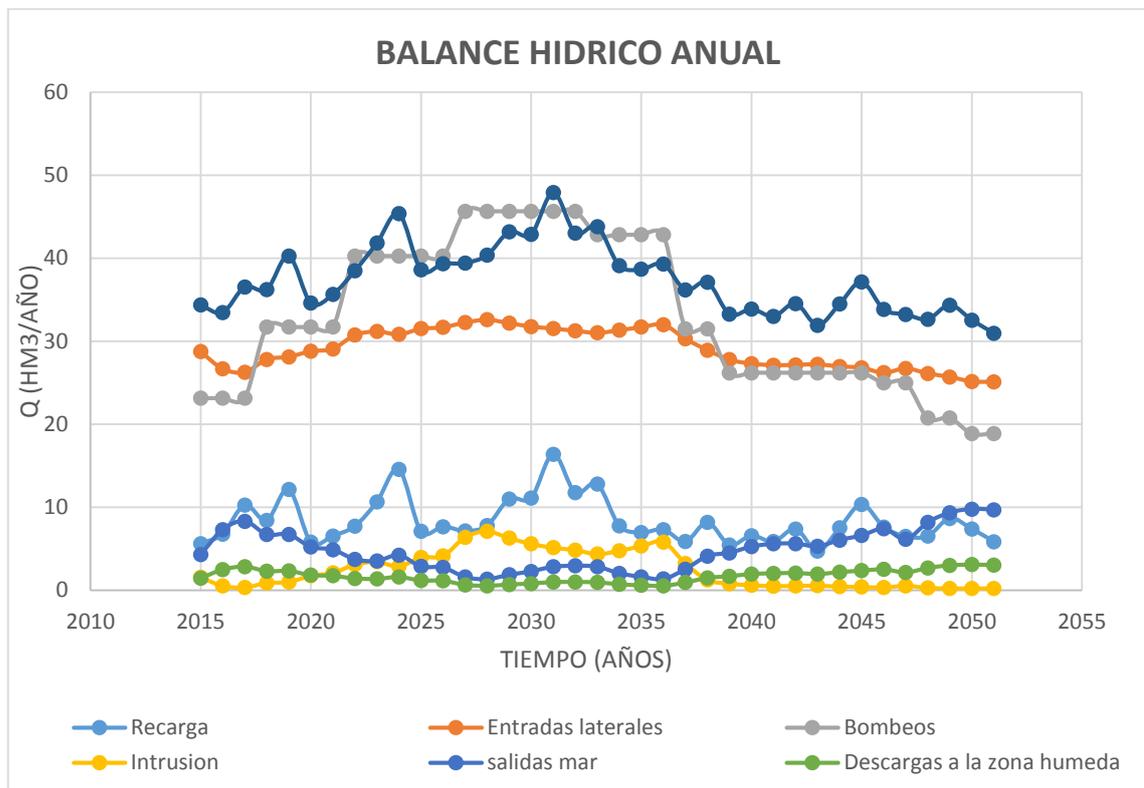


Figura 59. Balance hídrico anual del modelo avanzado con afección por el cambio climático

En la siguiente figura podemos observar que la intrusión salina es mayor en el modelo con afección por el cambio climático con respecto al modelo avanzado, por el contrario las salidas al mar muestran una disminución considerable a consecuencia de la disminución en las infiltraciones.

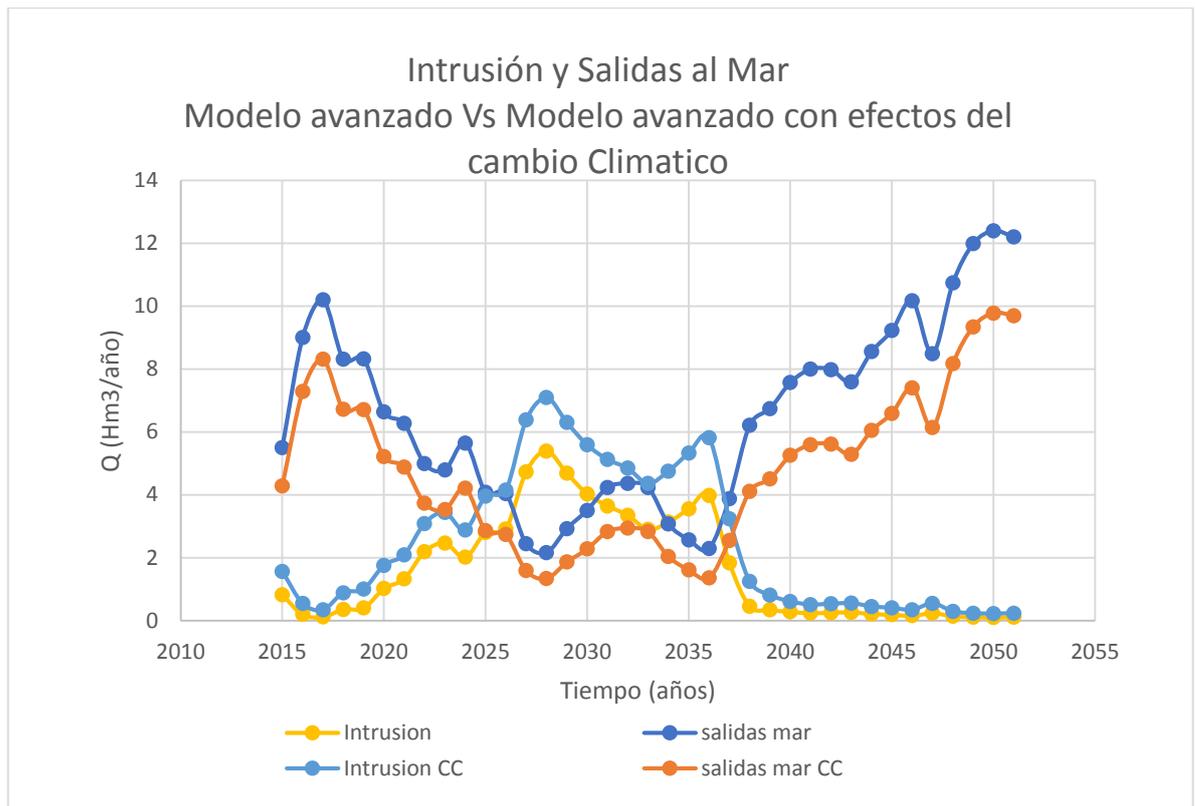


Figura 60. Intrusión y salidas al mar del modelo avanzado Vs el modelo avanzado con efectos del cambio climático

6.3.4. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se realizó sobre el modelo con afección por el cambio climático, en el cual se estableció diferentes hipótesis y son las siguientes:

Primera hipótesis incremento del nivel del mar hasta un 15%, el incremento se realizó en la altura piezométrica prescrita (en celdas cercanas al mar).

Segunda hipótesis disminución en los flujos laterales de hasta un 20%, esta disminución se puede efectuar en la altura hidráulica externa o en la conductancia, para esta hipótesis se realizó la disminución en la altura hidráulica externa.

Tercera hipótesis disminución en la recarga de hasta un 15%, la disminución se efectuó sobre la serie histórica de recarga.

En la siguiente tabla podemos observar que la intrusión marina es muy sensible a la hipótesis de disminución en los flujos laterales, contraria a las hipótesis de incremento del nivel del mar y disminución de la recarga que resulto ser muy poco sensible. Con

respecto a los demás componentes del balance hídrico medio existen pequeñas variaciones con la hipótesis de disminución de la recarga e incremento del nivel del mar, la hipótesis de disminución de flujos laterales afecta a las salidas del mar y al dren disminuyendo sus valores significativamente con respecto al modelo con afección por el cambio climático.

Si alguna de las hipótesis se presentara en el futuro el mayor impacto lo ocasionaría la disminución en los flujos laterales, el cual incrementaría la intrusión casi un 100% y disminuirá los las descarga a la zona húmeda, todo ello en comparación con el modelo con afección por el cambio climático, mientras el incremento del nivel del mar y la disminución de la recarga muestran incrementos mínimos en la intrusión y variaciones mínimas en la descarga a la zona húmeda.

	Modelo con afección por el cambio climático	Nivel del mar +15%	Flujos laterales -20%	recarga -15%
ENTRADAS (hm³/año)				
Intrusión	2.47	2.53	4.04	2.78
entradas laterales	29.02	28.98	24.59	29.29
infiltración	8.32	8.32	8.32	7.07
Total	39.81	39.83	36.95	39.15
SALIDAS (hm³/año)				
Salidas al mar	4.79	4.72	2.72	4.30
Pozos	32.93	32.93	32.93	32.93
Descarga a la zona Húmeda	1.69	1.78	1.07	1.54
Total	39.41	39.42	36.71	38.78

Tabla 18. Tabla de análisis de sensibilidad del modelo avanzado con efecto del cambio climático.

Para mostrar como las hipótesis anteriormente mencionadas afectan la calibración del modelo, utilizamos un punto de piezometría y un punto de concentración de salinidad, en el que podemos observar la variación de los valores con cada hipótesis. Al observar el punto piezómetro la variación en el flujo lateral es significativo, mientras que en el incremento del nivel del mar y disminución de la infiltración la variación es mínima. Las diferentes hipótesis expuestas en el punto de concentración de salinidad muestran cambios prácticamente inapreciables.

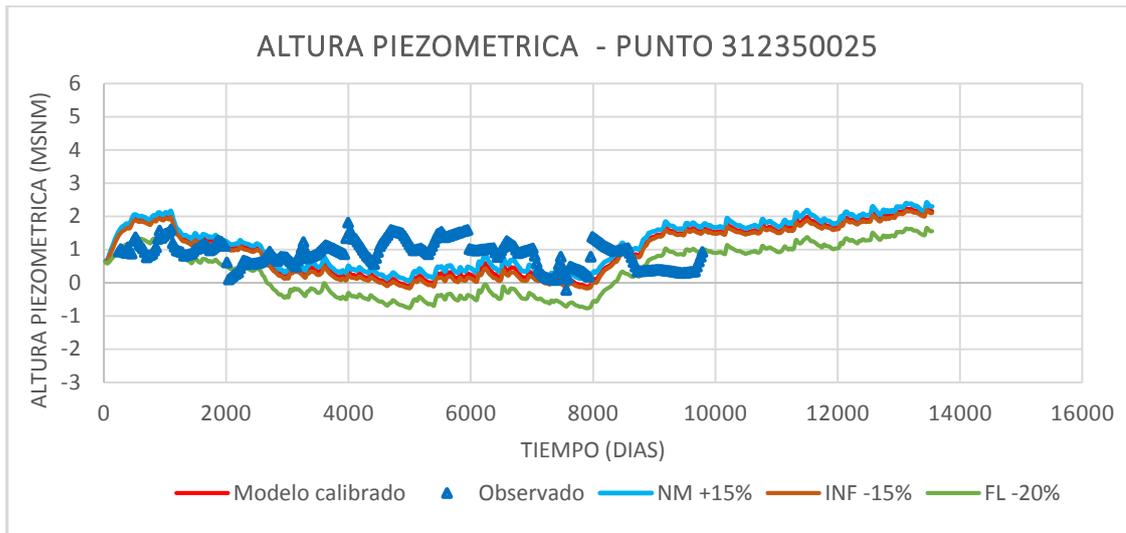


Figura 61. Análisis de sensibilidad en el punto de altura piezométrica 312350025

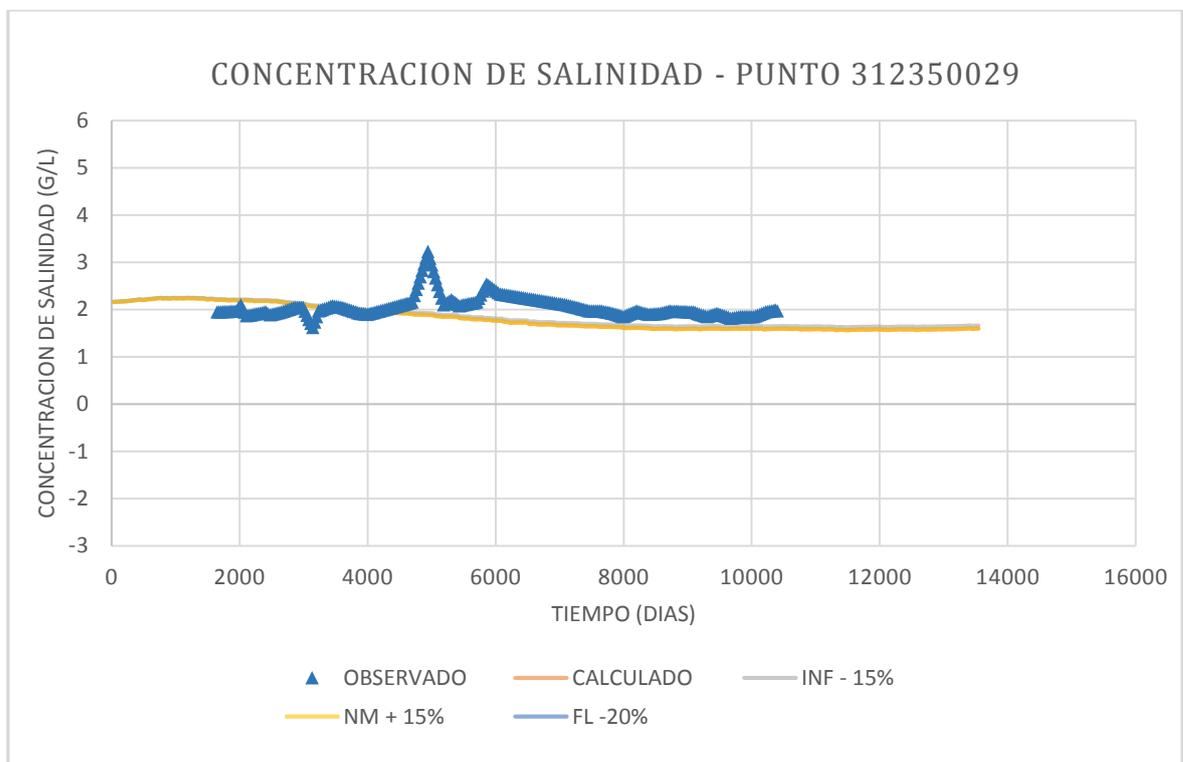


Figura 62. Análisis de sensibilidad en el punto de concentración de salinidad 312350029

7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

7.1. Síntesis y Conclusiones

El acuífero litoral Plana Oropesa – Torreblanca viene siendo estudiado desde los setenta, primero con estudios hidrogeológicos y luego con la elaboración de modelos matemáticos. Al analizar la documentación existente del último modelo disponible de este acuífero, se observó que presenta dificultad para reproducir la forma adoptada por la intrusión salina en la dimensión vertical, por lo que se decidió elaborar un modelo avanzado con mayor resolución vertical y además incluir los efectos del cambio climático.

En principio para la elaboración del modelo avanzado, se partió de los datos del modelo de Sanz (2013). El modelo avanzado muestra importantes mejoras como una mayor discretización vertical compuesta por 10 capas que representan a la Formación Pliocuaternaria, también muestra una variación de las conductividades hidráulicas correspondientes a las celdas más próximas de la costa, las cuales tiene valores de 150 a 6.25 m/día en las ocho primeras capas. Al mejorar la resolución vertical podemos reproducir con mayor realismo la evolución de la interfaz salina.

Comparando los resultados obtenidos del balance hídrico medio de los flujos laterales, salidas de agua al mar y descargas hacia la zona húmeda con los del modelo de Sanz (2013), observamos que estos muestran una reducción, esto se debe a que al disminuir ligeramente los resultados de la intrusión salina (obtenidos con el modelo avanzado), el balance presenta una disminución en los flujos laterales y salidas de agua al mar. Con estos resultados se puede concluir que con un mejoramiento en la discretización vertical, se puede obtener una mayor precisión en los resultados. En la siguiente tabla se muestran estas diferencias.

ENTRADAS (hm ³ /año)			SALIDAS (hm ³ /año)		
	Sanz, 2013	Modelo Calibrado		Sanz, 2013	Modelo Calibrado
Intrusión	1.67	1.65	Salidas al mar	9.24	6.52
Entradas laterales	33.42	30.47	Pozos	32.93	32.93
infiltración	9.23	9.23	Descarga a la zona Húmeda	1.68	1.44
Total	44.32	41.35	Total	43.85	40.89

Otro importante resultado del modelo son las descargas hacia la zona húmeda (Prat de Cabanes) que obtienen un valor de 1.44 hm³/año, estas descargas se encuentran representadas por 126 celdas distribuidas en seis capas, por lo que diríamos que su representación es mucho más precisa y por consiguiente el resultado obtenido.

Considerando que las modificaciones que se realizaron en el modelo fueron esencialmente en las conductividades, se elaboró un análisis de sensibilidad de la conductividad hidráulica y los flujos laterales, concluyendo que el modelo es poco sensible a la conductividad hidráulica, no siendo así en los flujos laterales.

En los resultados de la calibración de los diferentes puntos de piezometría y de control de calidad, se observa que reproducen la tendencia de los datos observados. Siendo mejor el ajuste en los puntos de piezometría, estos resultados son en cualquier caso similares a modelos anteriores.

En el balance hídrico anual podemos observar que la intrusión es alta en los periodos 1985 – 1986 y 1993 – 1994 esto es debido a la fuerte explotación de los pozos de bombeo que tiene lugar en el periodo 1985 – 1994 y las fuertes y sucesivas disminuciones de las recargas a lo largo de todo el periodo simulado.

La intrusión salina muestra un valor medio de 1.65 hm³/año y alcanza su valor máximo de 5.3 hm³/año en el año 1986, luego a partir de 1996 hasta el 2009 disminuyen considerablemente sus valores. Las salidas al mar tienen una media de 6.52 hm³/año y alcanzan un valor máximo de 12.39 hm³/año en el 2008. Las descargas a la zona húmeda muestran una media de 1.44 hm³/año y el valor máximo es de 2.83 hm³/año en el 2008.

Se hizo el análisis de los datos del punto 312360002 para conocer si éste se encontraba influenciado por el efecto upconing. Tras dicho análisis se llega a la conclusión de que sería muy probable su afección por este fenómeno, que estaría incrementando su salinidad media hasta en un 8%. No se realizó el análisis de los demás puntos de control por no contar con información suficiente.

El estudio de la afección del cambio climático sobre los acuíferos costeros es importante para entender el comportamiento que tendrían estos cuerpos de agua en el futuro. Hay

que considerar que estos cambios pueden afectar a las actividades socioeconómicas en regiones que presentan presiones por intrusión salina. Según la Confederación Hidrográfica del Júcar en su memoria de inventario de presiones (2013), el acuífero objeto del presente trabajo-presenta presiones significativas por intrusión salina.

Para la simulación del modelo avanzado del acuífero La Plana Oropesa – Torreblanca incluyendo el efecto de cambio climático, se decidió trabajar sobre el periodo futuro 2015 – 2052 (37 años) y bajo el escenario A1B. Este escenario contempla esencialmente un rápido crecimiento económico unido a un empleo equilibrado de las fuentes de energía por parte de una población que alcanzaría su valor máximo hacia mediados de siglo XXI y que disminuiría posteriormente.

Para realizar la simulación de este modelo con afección por el cambio climático para el periodo seleccionado se hizo uso de dos datos importantes: la reducción de las recargas y el incremento del nivel del mar. La información de reducción de recargas se ha consultado en el trabajo elaborado por Osma (2010) que indica una proyección de reducción en la recarga de un 18% para el periodo 2010 – 2040 sobre los acuíferos que pertenecen a la confederación Hidrográfica del Júcar. La información sobre el incremento del nivel del Mar Mediterráneo fue extraída del trabajo elaborado por Galassi y Spada (2014), que señala que el incremento máximo del nivel del Mar Mediterráneo en la zona de estudio será de 0.0042 m/año (proyecciones hasta 2050).

Al analizar el balance hídrico medio del modelo avanzado con afección por el cambio climático con respecto al balance hídrico medio del modelo avanzado, se prevé un incremento considerable de la intrusión salina (este incremento en la intrusión es aproximadamente la mitad del valor obtenido con el modelo avanzado). En consecuencia el acuífero presentara pérdidas en sus recursos (disminución en las infiltraciones y entradas laterales), y también se prevé una disminución en las salidas al mar. Sin embargo las descargas a la zona húmeda muestran un incremento, esto puede deberse a que al aumentar el nivel del mar se produce una inundación en la zona húmeda. Para el año 2052, las celdas que representan la zona húmeda presentan una mayor concentración de salinidad.

ENTRADAS (hm³/año)			SALIDAS (hm³/año)		
	Modelo Avanzado	Modelo con afección del cambio climático		Modelo Calibrado	Modelo con afección del cambio climático
Intrusión	1.65	2.47	Salidas al mar	6.52	4.79
Entradas laterales	30.47	29.02	Pozos	32.93	32.93
Infiltración	9.23	8.32	Descarga a la zona Húmeda	1.44	1.69
Total	41.34	39.81	Total	40.89	39.41

7.2. Líneas de investigación futuras

Esta investigación deja abiertas líneas de trabajo futuras y son las siguientes:

Teniendo en cuenta la resolución actual que tiene el modelo cabría considerar la realización de una calibración con un zonado más denso (incrementar el zonado de la calibración). Posterior a ello sería deseable plantearse la necesidad de una discretización horizontal de mayor resolución.

Para mejorar el análisis del fenómeno upconing sobre los datos sería recomendable analizar las ubicaciones de los pozos virtuales y hacer ligeros cambios en sus posiciones sin afectar el objetivo que éstos tienen en el modelo (de representar zonas de cultivo que no tienen un pozo asignado). Ya que la ubicación precisa de los pozos es preponderante para el análisis del fenómeno upconing.

Para elaborar el modelo con afección por el cambio climático se hizo un incremento en el nivel del mar, una disminución de los flujos laterales y las recargas utilizando un escenario específico. Para mejorar este modelo de cambio climático podríamos hacer un cálculo más preciso en las recargas; se sabe que éstas están formadas por dos componentes: la infiltración de las precipitaciones y los retornos de riego (en este modelo). Para obtener un cálculo preciso de la serie de infiltración de las precipitaciones futuras, se puede trabajar primero con la serie histórica de las precipitaciones a la cual se le adicionaría la anomalía de la precipitación en un determinado escenario climático, y con ello obtendríamos una serie de precipitación futura y por consiguiente una serie de infiltración futura.

La mayor incertidumbre del modelo se encuentra en los flujos laterales que alimentan al acuífero La Plana Oropesa - Torreblanca, en el capítulo 2 del presente trabajo se tiene una caracterización del acuífero de borde (Maestrazgo oriental) que descarga agua hacia el acuífero Plana Oropesa Torreblanca, en el cual no se observa una cuantificación precisa de esta descarga. Por este motivo sería deseable contar con una investigación acerca de los flujos laterales que alimentan a este acuífero.

8. BIBLIOGRAFÍA

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET, 2009). Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España.

Aharmouch, A. y Larabi, A. (2001). “Numerical Modeling of Saltwater Interface Upconing in Coastal aquifers” en First International Conference on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers – Monitoring, Modeling, and Management (Essaouira). Morocco. Disponible en: <http://www.olemiss.edu/projects/sciencenet/saltnet/swica1/Aharmouch-Larabi-paper.pdf> [consulta: 05 de enero del 2015].

Bower, J. W., Motz, L. H., Durden, D. W. (1999). Analytical solution for determining the critical condition of saltwater upconing in a leaky artesian aquifer. *Journal of Hydrology* 221, 43–54.

Galassi, G., Spada, G. (2014). Sea-level rise in the Mediterranean Sea by 2050: Roles of terrestrial ice melt, steric effects and glacial isostatic adjustment. *Global and Planetary Change*, Volumen 123, 55 - 66.

Hamza, K. I. (2006). Numerical analysis of saltwater upconing beneath a pumping well, en Tenth International Water Technology Conference (Alejandria). Egipto. Disponible en http://www.researchgate.net/publication/251810439_NUMERICAL_ANALYSIS_OF_SALTWATER_UPCONING_BENEATH_A_PUMPING_WELL [consulta: 01 de enero del 2015].

Instituto Geológico y Minero de España; Universitat Jaume I de Castelló (IGME - UJI, 2009a). Estudio piloto para el cálculo de 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.

Marcos, M. y Tsimplis, M.N. (2008). Comparison of results of AOGCMs in the Mediterranean Sea during the 21st century. *Journal of Geophysical Research*, vol. 113.

Marcos, M. y Tsimplis, M.N. (2008). 21st century Mediterranean sea level rise: Steric and atmospheric pressure contributions from a regional model. *Global and Planetary Change* 63, 105–111.

- Modelación del Comportamiento Hidrodinámico del agua subterránea de la zona comprendida entre Carbó, Pesqueira y Zamora, Sonora. <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/21396/Capitulo9.pdf>.
- Molinero, J., Custodio, E., Sahuquillo, A. y Llamas, R. (2011). DMA Y La Gestión Del Agua Subterránea En España. Congreso Ibérico sobre las aguas subterráneas.
- Sanz Garrido, I y Capilla Roma, J. (2013). Modelación transitoria tridimensional y con densidad variable de la interfaz salina del acuífero litoral de la Plana de Oropesa Torreblanca (Castellón, España).
- Schamorak, S. y Mercado, A. (1969). Upconing Fresh Water-Sea Water Interface Below Pumping Wells, Field Study. *Water Resources Research*, volumen 5, 6.
- Werner, A. D., Bakker, M., Post, V., Chunhui Lu, A., Ataie-Ashtiani, B., Simmons, C., Barry, D. (2013). Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges. *Advances in Water Resources* 51, 3–26
- Werner, A D, Jakovovic, D y Simmons C T. (2009). “Experimental observations of saltwater up-coning” en *Journal of Hydrology* 373 (2009) 230–241
- Wagner, J. y Kent, D. (1985). Upconing of a Salt-Water/Fresh Water Interface below a Pumping Well. U.S. Environmental Protection Agency (EPA) 600, 2 – 85.

ANEJO 1: BALANCES HIDRICOS ANUALES

Año	Entradas (Hm ³ /año)			Salidas (Hm ³ /año)		
	Recarga	FL	Intrusión	Pozos	Salidas al mar	Dren
1973	5.79	30.55	0.82	23.14	5.50	1.05
1974	6.97	28.20	0.20	23.14	9.01	2.09
1975	10.57	27.75	0.12	23.14	10.21	2.45
1976	8.68	29.37	0.36	31.70	8.32	1.92
1977	12.53	29.66	0.40	31.70	8.33	1.96
1978	5.99	30.39	1.02	31.70	6.63	1.47
1979	6.75	30.70	1.33	31.70	6.27	1.40
1980	7.97	32.44	2.19	40.27	4.99	1.11
1981	10.97	32.87	2.46	40.27	4.80	1.08
1982	15.01	32.46	2.01	40.27	5.65	1.31
1983	7.80	33.17	2.80	40.27	4.08	0.92
1984	8.42	33.27	2.92	40.27	4.04	0.91
1985	7.86	33.91	4.73	45.65	2.44	0.43
1986	8.55	34.24	5.39	45.65	2.16	0.34
1987	12.07	33.76	4.69	45.65	2.92	0.51
1988	12.20	33.27	4.03	45.65	3.51	0.63
1989	18.01	32.99	3.65	45.65	4.23	0.83
1990	12.92	32.69	3.35	45.65	4.36	0.82
1991	14.07	32.44	2.90	42.82	4.24	0.79
1992	8.55	32.85	3.13	42.82	3.07	0.53
1993	8.19	33.22	3.55	42.82	2.57	0.44
1994	8.59	33.49	3.98	42.82	2.29	0.38
1995	6.91	31.71	1.84	31.48	3.88	0.77
1996	9.62	30.23	0.46	31.48	6.22	1.34
1997	6.43	29.09	0.35	26.20	6.74	1.48
1998	7.72	28.62	0.28	26.20	7.57	1.73
1999	6.90	28.42	0.24	26.20	7.99	1.80
2000	8.69	28.47	0.25	26.20	7.98	1.84
2001	5.56	28.54	0.26	26.20	7.60	1.69
2002	8.84	28.24	0.21	26.20	8.56	1.95
2003	12.16	28.04	0.19	26.20	9.23	2.17
2004	8.97	27.33	0.16	25.00	10.18	2.34
2005	7.64	28.01	0.24	25.00	8.48	1.88
2006	7.70	27.34	0.14	20.74	10.74	2.44
2007	10.18	26.88	0.11	20.74	11.99	2.77
2008	8.69	26.32	0.10	18.87	12.40	2.83
2009	6.89	26.32	0.11	18.87	12.20	2.75

Tabla 19. Balance Hídrico anual del modelo avanzado

Año	Entradas (Hm3/año)			Salidas (Hm3/año)		
	Recarga	FL	Intrusión	Pozos	Salidas al mar	Dren
1973	5.619	28.746	1.561	23.140	4.283	1.448
1974	6.765	26.685	0.546	23.140	7.286	2.493
1975	10.248	26.274	0.342	23.140	8.311	2.849
1976	8.416	27.806	0.884	31.703	6.718	2.313
1977	12.156	28.120	1.001	31.703	6.715	2.334
1978	5.811	28.794	1.757	31.703	5.216	1.828
1979	6.548	29.087	2.094	31.703	4.885	1.744
1980	7.732	30.742	3.089	40.266	3.734	1.430
1981	10.640	31.182	3.436	40.266	3.531	1.375
1982	14.561	30.825	2.882	40.266	4.213	1.604
1983	7.096	31.512	3.953	40.266	2.861	1.187
1984	7.664	31.673	4.147	40.266	2.742	1.154
1985	7.149	32.264	6.383	45.651	1.594	0.653
1986	7.780	32.590	7.093	45.651	1.342	0.545
1987	10.985	32.191	6.304	45.651	1.862	0.700
1988	11.103	31.772	5.594	45.651	2.278	0.818
1989	16.393	31.534	5.127	45.651	2.829	0.992
1990	11.756	31.263	4.847	45.651	2.947	0.999
1991	12.804	31.012	4.363	42.820	2.831	0.963
1992	7.778	31.334	4.755	42.820	2.041	0.721
1993	6.962	31.707	5.331	42.820	1.612	0.606
1994	7.299	31.985	5.815	42.820	1.361	0.539
1995	5.875	30.293	3.235	31.485	2.544	0.942
1996	8.180	28.930	1.245	31.485	4.111	1.494
1997	5.466	27.780	0.814	26.202	4.508	1.697
1998	6.564	27.296	0.603	26.202	5.255	1.967
1999	5.862	27.122	0.510	26.202	5.592	2.045
2000	7.387	27.156	0.533	26.202	5.612	2.084
2001	4.724	27.209	0.554	26.202	5.290	1.962
2002	7.518	26.967	0.449	26.202	6.048	2.187
2003	10.337	26.807	0.403	26.202	6.593	2.369
2004	7.626	26.202	0.343	25.004	7.397	2.530
2005	6.491	26.720	0.544	25.004	6.143	2.162
2006	6.542	26.115	0.293	20.741	8.169	2.693
2007	8.656	25.700	0.234	20.741	9.340	3.011
2008	7.387	25.149	0.222	18.867	9.779	3.092
2009	5.854	25.110	0.235	18.867	9.693	3.045

Tabla 20. Balance hídrico anual del modelo avanzado con reducción de la precipitación, de los flujos laterales e incremento del nivel del mar.