



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS



Estudio para la recuperación de la lámina de agua en el humedal "El Cuadro de Santiago" (Benicasim)

Valencia, septiembre de 2018

Titulación: Grado Ingeniería Civil

Autor: Navarro Bautista, Adrián

Tutor: Pérez Martín, Miguel Ángel

Fdo. Adrián Navarro Bautista

Índice

1	Introducción y objetivos	1
2	Localización geográfica	3
3	Antecedentes	4
4	Metodología.....	7
4.1	Geología y materiales.....	8
4.1.1	Marco geológico	9
4.1.2	Caracterización geomorfológica	12
4.2	Modelo digital de elevaciones.....	24
4.3	Piezometría	25
4.3.1	Red de piezometría.	26
4.3.2	Islíneas	29
4.3.3	Estimación del nivel freático.....	31
5	Modelo conceptual.....	37
5.1	Funcionamiento de la red de drenes	38
5.2	Funcionamiento horario de las bombas	41
5.3	Conductividad eléctrica en los drenes	45
6	Modelo matemático.....	49
6.1	Programa Model Muse.....	49
6.2	Régimen natural.....	50
6.3	Régimen actual.....	53
6.4	Desactivación de los drenes	56
6.5	Análisis de sensibilidad a la conductancia de los drenes.....	59
6.6	Valores y funciones del humedal.....	62
7	Conclusiones.....	63
8	Líneas futuras.....	65
9	Referencias.....	68

Índice de figuras

Figura 1. Mapas de localización	3
Figura 2. Trabajadores del coto arrocero del Cuadro (Fuente: Todocolección)	4
Figura 3. Dren que deseca el humedal	5
Figura 4. Proyecto de urbanización (Fuente: Arca Ibérica Asociación Nacional).....	6
Figura 5. Humedal Cuadro de Santiago.....	8
Figura 6. Geología de la Plana Alta de Castellón (Fuente: Mediato Arribas, José Francisco (2016). Oscilaciones del nivel del mar desde el Pleistoceno superior en el sector costero Sagunto-Benicasim (Valencia-Castellón)	11
Figura 7. Límites de la zona de estudio y leyenda de los símbolos empleados en todos los perfiles estratigráficos (Fuente: SEHUMED)	14
Figura 8. Perfil nº1 de los sondeos (Fuente: SEHUMED)	15
Figura 9. Perfil nº2 de los sondeos (Fuente: SEHUMED)	16
Figura 10. Perfil nº3 de los sondeos (Fuente: SEHUMED)	17
Figura 11. Perfil nº4 de los sondeos (Fuente: SEHUMED)	18
Figura 12. Perfil nº5 de los sondeos (Fuente: SEHUMED)	19
Figura 13. Ubicación del Cuadro de Santiago y del sondeo (Fuente: Google Maps).....	20
Figura 14. Perfil del sondeo.....	21
Figura 15. Perfil del sondeo de los último 1,95 m (Fuente: Mediato Arribas, José Francisco (2016). Oscilaciones del nivel del mar desde el Pleistoceno superior en el sector costero Sagunto-Benicasim (Valencia-Castellón)	23
Figura 16. Líneas de nivel en el Cuadro de Santiago (Fuente: ArcGis).....	24
Figura 17. Flujos de salida del agua (Fuente: Caracterización Hidrogeológica del humedal Cuadro de Santiago, 2017).....	25
Figura 18. Red representativa de piezómetros de la Plana de Castellón (Fuente: CHJ)	26
Figura 19. Red de piezómetros más cercanos al Cuadro de Santiago (Fuente: ArcGis).....	27
Figura 20. Piezómetro 08.07.013	27
Figura 21. Piezómetro 08.12.028	28
Figura 22. Mapa de isolíneas del IGME (Fuente:ArcGis)	29
Figura 23. Mapa de isolíneas de la CHJ (Fuente: ArcGis)	30

Figura 24. Zona inundable con 5 m.s.n.m. de cota (Fuente: ArcGis)	31
Figura 25. Zona inundable con 3 m.s.n.m. de cota (Fuente: ArcGis)	32
Figura 26. Zona inundable con 1 m.s.n.m. de cota (Fuente: ArcGis)	32
Figura 27. Zona inundable con 0,5 m.s.n.m. de cota (Fuente: ArcGis)	33
Figura 28. Zona inundable con 0 m.s.n.m. de cota (Fuente: ArcGis)	34
Figura 29. Zona inundable con 0,2 m.s.n.m. de cota (Fuente: ArcGis)	34
Figura 30. Lámina de agua que aflora a la superficie	35
Figura 31. Lámina de agua.....	35
Figura 32. Lámina de agua que aflora a la superficie pese al drenaje del humedal	36
Figura 33. Perfil del terreno del humedal	37
Figura 34. Sistema de drenaje (Fuente: ArcGis).....	38
Figura 35. Dren	38
Figura 36. Bombas que drenan el humedal. A la izquierda la de Castellón y a la derecha la de Benicasim	40
Figura 37. Tuberías que dirigen el agua hacia el mar. A la izquierda la de Castellón y a la derecha la de Benicasim	40
Figura 38. Funcionamiento horario de las bombas de Castellón (Fuente: Facsa).....	41
Figura 39. Funcionamiento horario de la bomba pequeña de Benicasim (Fuente: Facsa).....	42
Figura 40. Funcionamiento horario de la bomba grande de Benicasim (Fuente: Facsa).....	42
Figura 41. Bombeo anual Benicasim	43
Figura 42. Serie mensual del caudal de Benicasim y el base entre 2015-1018	44
Figura 43. Conductividad eléctrica de los drenes.....	45
Figura 44. Proceso de intrusión salina (Fuente: SEHUMED).....	46
Figura 45. Modelo de funcionamiento de los humedales de la plana en relación a los cambios climáticos y del nivel del mar	47
Figura 46. Conductividad eléctrica en cada uno de los drenes.....	48
Figura 47. Geomallas del programa Model Muse	49
Figura 48. Geomallas con el Cuadro de Santiago (Fuente: Model Muse)..	50
Figura 49. Modelo digital de elevaciones (Fuente: Model Muse).....	51
Figura 50. Capa del mar y de la cuenca (Fuente: Model Muse)	51
Figura 51. Simulación con 0,5 m sobre el nivel de mar (Fuente: Model Muse)	52

Figura 52. Simulación con 0,1 m sobre el nivel de mar (Fuente: Model Muse)	52
Figura 53. Ubicación de los drenes en la simulación (Fuente: Model Muse)	54
Figura 54. Nivel con el régimen actual (Fuente: Model Muse)	54
Figura 55. Drenes que se desactivan de la parte de Benicasim interior o marjal (Fuente: Model Muse)	56
Figura 56. Ascenso de los niveles de nivel piezométrico provocados por la desactivación de los drenes	58
Figura 57. Simulación con una conductancia de 0.0001 m/s (Fuente: Model Muse)	59
Figura 58. Simulación con una conductancia de 0.00001 m/s (Fuente: Model Muse)	60
Figura 59. Simulación con una conductancia de 0.000001 m/s (Fuente: Model Muse)	61
Figura 60. Escombros ubicados en el Cuadro de Santiago	65
Figura 61. Plano de colocación de las lagunas (Fuente: SEHUMED)	66
Figura 62. Plano de la vegetación (Fuente: SEHUMED)	67

Índice de tablas

Tabla 1. <i>Horas de trabajo y volúmenes de agua bombeado en Coviles (Fuente: SEHUMED)</i>	39
Tabla 2. <i>Entradas y salidas al humedal con los drenes activos Desactivación de los drenes</i>	55
Tabla 3. <i>Entradas y salidas al humedal con los drenes de la parte interior o marjal desactivados</i>	57

1 Introducción y objetivos

Este estudio se basa en analizar la relación entre el acuífero y el humedal del Cuadro de Santiago para definir las medidas necesarias para recuperar la lámina de agua en dicha zona. Para ello se necesita conocer su funcionamiento en el régimen actual, ya que actualmente un sistema de drenaje está desecando el humedal, y cuál sería su funcionamiento en régimen natural si no existieran los drenajes.

Por lo que el objetivo del estudio es conocer el comportamiento del humedal para posteriormente proponer una solución para la recuperación de la lámina de agua, teniendo en cuenta el contexto urbanístico en el que se encuentra la zona ya que durante años se ha urbanizado en los alrededores del humedal.

Las orientaciones que han guiado el desarrollo de este estudio han tenido como objetivo compatibilizar la coexistencia de un ecosistema de la forma más natural posible con la situación urbanística que actualmente hay en los alrededores de la zona. Por lo que el estudio va enfocado a conocer que pasaría si los drenes que están desecando el humedal desde el año 1971 se desactivaran, y si esto provocaría problemas de inundaciones en las zonas cercanas al humedal.

Este estudio evidentemente presenta ciertas dificultades por sus características y por su emplazamiento, las cuales son:

- Se pretende desactivar los drenes del espacio en la que se encuentra la zona húmeda manteniendo desecado el área colindante.
- Las construcciones próximas que se encuentran sobre los terrenos de marjal están a una cota de 0 m o inferior.
- Se producen periodos de lluvias de fuerte intensidad horaria, en los que la subida de los niveles piezométricos es generalizada para toda la zona, lo que podría provocar grandes inundaciones en toda la zona de estudio ya que al desactivar los drenes de dicha zona es posible que la lámina de agua aflore a la superficie.

-La necesidad del funcionamiento permanente de los bombes de las partes en las que no se encuentra la zona de estudio deberán mantener el nivel piezométrico por debajo del topográfico.

El trabajo se ha estructurado en tres capítulos importantes:

- Metodología: geología y materiales, modelo digital de elevaciones, y piezometría.
- Modelo conceptual.
- Modelo matemático.

El capítulo de la metodología incluye el estudio de todos los elementos que caracterizan el humedal. Por una parte, se definen las características geológicas de la zona y se analizan mediante los sondeos realizados en un espacio cercano al humedal.

El modelo conceptual integra toda la información geológica, piezométrica previamente obtenida con la finalidad de conocer el funcionamiento del sistema. Todo esto permitirá determinar las relaciones entre el agua subterránea y las láminas de agua existentes en condiciones naturales para poder establecer previsiones de evolución bajo distintos escenarios de gestión.

El tercer capítulo es el modelo matemático, el cual consiste en la representación gráfica matemática del humedal para de esta forma conocer su comportamiento.

2 Localización geográfica

El Cuadro de Santiago se sitúa en el municipio de Benicasim en la Comunidad Valenciana, España. Se encuentra situado en la costa de la provincia de Castellón, en la comarca de la Plana Alta. Concretamente, la zona de estudio se halla situada próxima al extremo septentrional de la Plana de Castellón.

La Plana de Castellón es una comarca geográfica natural que ocupa una franja costera comprendida entre Benicasim y Almenara, de 464 km² de extensión, situada casi totalmente entre el nivel del mar y la cota 130.

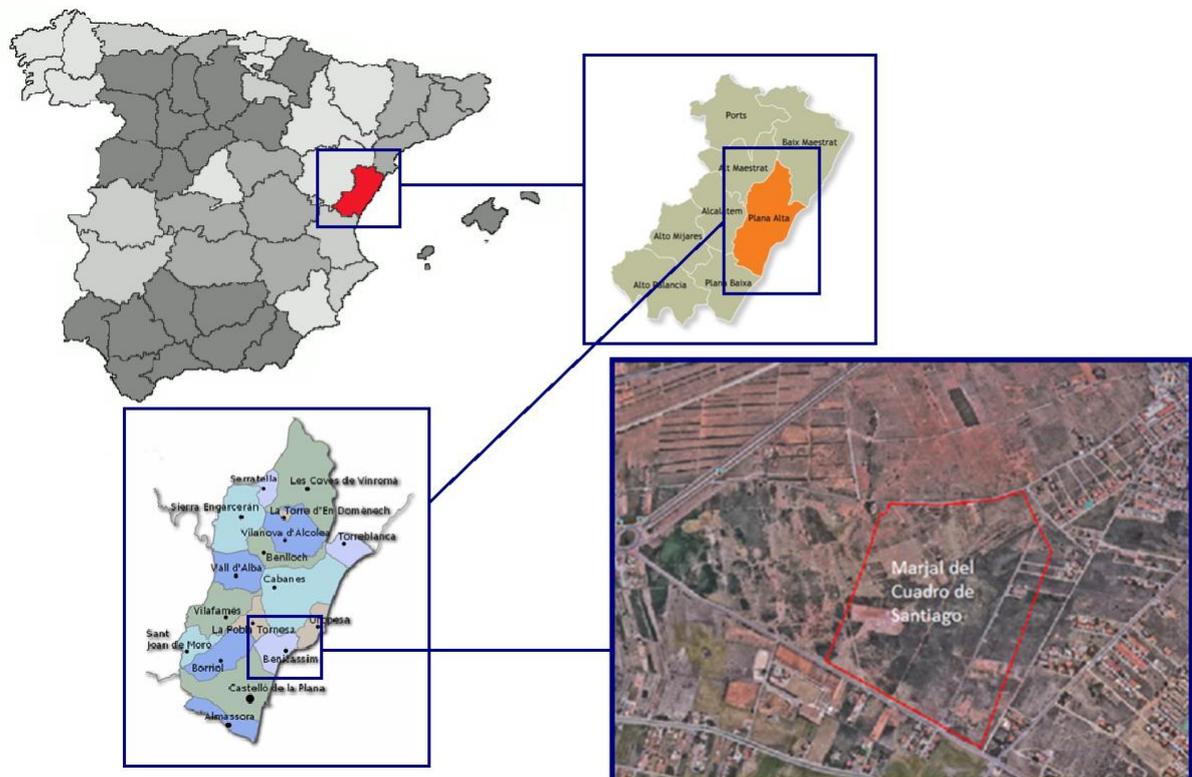


Figura 1. Mapas de localización

3 Antecedentes

El Cuadro de Santiago ha sido durante muchos años un lugar de disputa puesto que por una parte el Ayuntamiento de Benicasim tenía intención de construir en dicha zona, pero diferentes grupos ecológicos denunciaron estas intenciones. Por lo que esta zona ha provocado una disputa urbanístico-ambiental.

Los primeros datos que se tienen de la zona son de 1947, año en el que se forma el coto arrocero del Cuadro.



Figura 2. Trabajadores del coto arrocero del Cuadro (Fuente: Todocolección)

En 1963 deja de cultivarse el arroz y se establece el balance hídrico y biológico natural. Puesto que el nivel del agua afloraba a la superficie, entre los años 1969 y 1971 la Confederación Hidrográfica del Júcar mediante dos proyectos técnicos, el "Proyecto de acondicionamiento para mejora de riegos de la marjalería de Castellón, Almazora y Benicasim e información pública" aprobado en 1969 y el "Proyecto de terminación del acondicionamiento para la mejora de riegos de la marjalería de Castellón, Almazora y Benicasim" aprobado en 1971 por la Dirección General de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas, se colocaría un drenaje con alcantarillado en el subsuelo con unas bocas y trapas que todavía son visibles, con la finalidad de desecar el espacio y dedicarlo al cultivo de frutales y hortalizas. El intento solo afectó a 37 hectáreas y fue un fracaso a causa de la salinidad de los suelos, además tampoco resolvía el problema

de las avenidas cuando se producían periodos de lluvia. En 1977 se mejoraron las condiciones mediante la colocación de un sistema de drenaje y una serie de instalaciones entre las que se recogían los grupos de bombeo necesarios para impulsar el agua hasta el mar con sus correspondientes tuberías.



Figura 3. Dren que deseca el humedal

Desde estos años se ha estado desecando la zona, lo que ha permitido que se urbanizara en las áreas colindantes. En el año 2002 se realizan los estudios para llevar a cabo un proyecto de urbanización y un PAI Benicasim Golf en la zona del Cuadro de Santiago. Por esta razón, el grupo ecologista Acció Ecologista Agro se negó a que esto ocurriera ya que pese a que el Cuadro de Santiago no estuviera incluido en la Lista de Humedales de Importancia Internacional del Convenio Ramsar, no significa que no sea una zona de interés ecológico que está protegida por la Ley de Espacios Naturales aunque la zona se encuentre en mal estado. Además, la desecación del humedal es ilegal puesto que los únicos motivos para poder desecar un humedal según la Ley de Aguas es por sanidad o por alto interés público, no siendo este el caso del Cuadro de Santiago.

El proyecto de urbanización y PAI Benicasim Golf pese a ser aprobados en el año 2005, no se han llegado a realizar debido a las denuncias durante estos años de las asociaciones ecologistas Acció Ecologista-Agró y Arca Ibérica que han paralizado dichas obras.



Figura 4. Proyecto de urbanización (Fuente: Arca Ibérica Asociación Nacional)

Finalmente, en el año 2012 la sentencia del Tribunal Supremo anuló el acuerdo por el que se aprobó la construcción del Benicasim Golf. Por otra parte, esta zona se declaró zona no urbanizable y será incluida en el Catálogo de Zonas Húmedas.

Actualmente, se pretende desactivar el sistema de drenaje que deseca el humedal. Pese a que la desactivación no se ha realizado todavía, debido al mal estado de dichos drenes en ciertas partes del humedal no funciona el bombeo, lo que ha provocado que agricultores de la zona critiquen la dificultad de cultivos en tierras próximas por el estancamiento de agua.

Por parte de la Confederación Hidrográfica del Júcar se ha adjudicado a la empresa Evren el proyecto de “Adecuación ambiental y mejora de la inundabilidad en la marjalería del Cuadro de Santiago” para compatibilizar la zona urbana y la húmeda.

4 Metodología

En este apartado se muestra la metodología aplicada para determinar las características del lugar, para posteriormente realizar una serie de operaciones con las que llegar a una conclusión lo más real posible.

La metodología de trabajo aplicada en este estudio ha ido precedida por la recopilación de información disponible tanto en el área de estudio como en diferentes zonas cercanas de características similares. Inicialmente se comenzó seleccionando toda la información existente de la masa de agua subterránea a partir de la información aportada por la página web de la Confederación Hidrográfica del Júcar, incluyendo datos de niveles piezométricos, inventario de puntos de agua, datos de precipitación, así como la cartografía geológica Magna actualizada y el modelo digital de elevaciones proporcionado por el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA).

Por otra parte, se ha hecho referencia a trabajos anteriormente realizados como son: el "Anteproyecto para la restauración del marjal Cuadro de Santiago (Benicassim, Castellón)" 2004, SEHUMED (Sede para el Estudio de los Humedales Mediterráneos); el "Encauzamiento del barranco de la Parreta y estación de bombeo de aguas pluviales en el Cuadro de Santiago. Benicàssim (Castellón)" 2010, CIOPU (Consultora de ingeniería, obras públicas y urbanismo); y finalmente, la Tesis Doctoral "Oscilaciones del nivel del mar desde el Pleistoceno superior en el sector costero Sagunto-Benicasim (Valencia-Castellón)" 2016, José Francisco Mediato Arribas.

En este apartado se diferencian los siguientes apartados principales: geología y materiales, modelo digital de elevaciones y piezometría.

4.1 Geología y materiales

En este capítulo se hace una caracterización geológica regional, centrando el estudio del humedal del Cuadro de Santiago de Benicasim dentro de un marco hidrogeológico más amplio.

En la primera parte del capítulo se presenta el marco geológico de la zona de estudio, donde se explica las características de la zona y los materiales presentes. En la segunda parte la caracterización geomorfológica, donde se exponen los diferentes sondeos realizados en la zona junto con las características estratigráficas y sedimentarias de esta.



Figura 5. Humedal Cuadro de Santiago

4.1.1 Marco geológico

El área de estudio se encuentra en el sector levantino de la Cordillera Ibérica, este conjunto geológico se encuentra separado por un sistema de fallas con dirección NNE-SSW. La zona de Benicasim está formada por una serie de sistemas montañosos con depresiones y valles paralelos a la costa, que a medida que acerca a la costa pierde altura hasta que se hunde en el mar.

El área de estudio en lo referente a la tectónica, se encuentra dentro de la denominada Zona Oriental Fallada, en las cadenas litorales existentes entre Vinaroz y Castellón (*SEHUMED, 2004*).

Paralelas a la línea de costa se destacan 3 fallas:

- La falla Castellón-Villafamés.
- La falla Castellón-Pobla de Tornesa.
- La falla Castellón-Benicasim.

La morfología es prácticamente llana, con pendientes topográficas muy pequeñas y que debido a las características de baja permeabilidad de los materiales que la forman, son comunes los encharcamientos e inundaciones. Además, por la tectónica se ha facilitado la formación de sistemas de drenaje como pueden ser barrancos que se van ordenando y estructurando a medida que descienes hacia el mar. A pesar de esto, en condiciones naturales es estable y con características modificables bajo la acción del hombre. (*CIOPU, 2010*)

Debido a la permeabilidad de los materiales de la zona, existe una importante circulación subterránea de agua dulce procedente de las formaciones mesozoicas que atraviesan los depósitos permeables del cuaternario. En la costa existen surgencias en las que se mezclan el agua dulce y salada, formando áreas pantanosas que posteriormente se han convertido en turberas.

Los materiales que afloran a la superficie en el área de estudio corresponden a los depósitos cuaternarios que se describen a continuación:

-Aluvión.

Durante el Cuaternario las cadenas montañosas sufren una fuerte abrasión que provoca la colmatación de la llanura litoral.

En las zonas abarrancadas se distinguen dos niveles de cantos rodados con dos niveles de arcilla, intermedio y superior.

Superficialmente aparece un caliche que fosiliza tanto los conglomerados como las arcillas.

-Coluvial.

Depósitos que se encuentran en la base de las laderas compuestos por cantos muy heterogéneos.

-Playas.

Depósitos de arena acumulados en la línea de costa, de granulometría uniforme y tamaño fino-medio. Los grnaos son fundamentalmente de cuarzo además de fragmentos carbonatados y metales pesados.

-Rambla.

Depósitos cuaternarios constituidos por cantos sueltos y bastante redondeados. La naturaleza de los cantos es prácticamente en su totalidad carbonatada, con muy pocos elementos detríticos. Se pueden considerar como gravas, y la potencia de estos depósitos puede superar los 10 m.

-Depósitos de albufera.

Ocupan las zonas más deprimidas, cerradas por un lado por el cordón litoral y por el otro por los depósitos de pie de monte del interior. Se trata de limos orgánicos con niveles de turba, y son los depósitos del marjal que se fue colmatando por los aportes de finos y que una vez desecados artificialmente se han modificado por el uso agrícola o urbanístico. (SEHUMED, 2004)

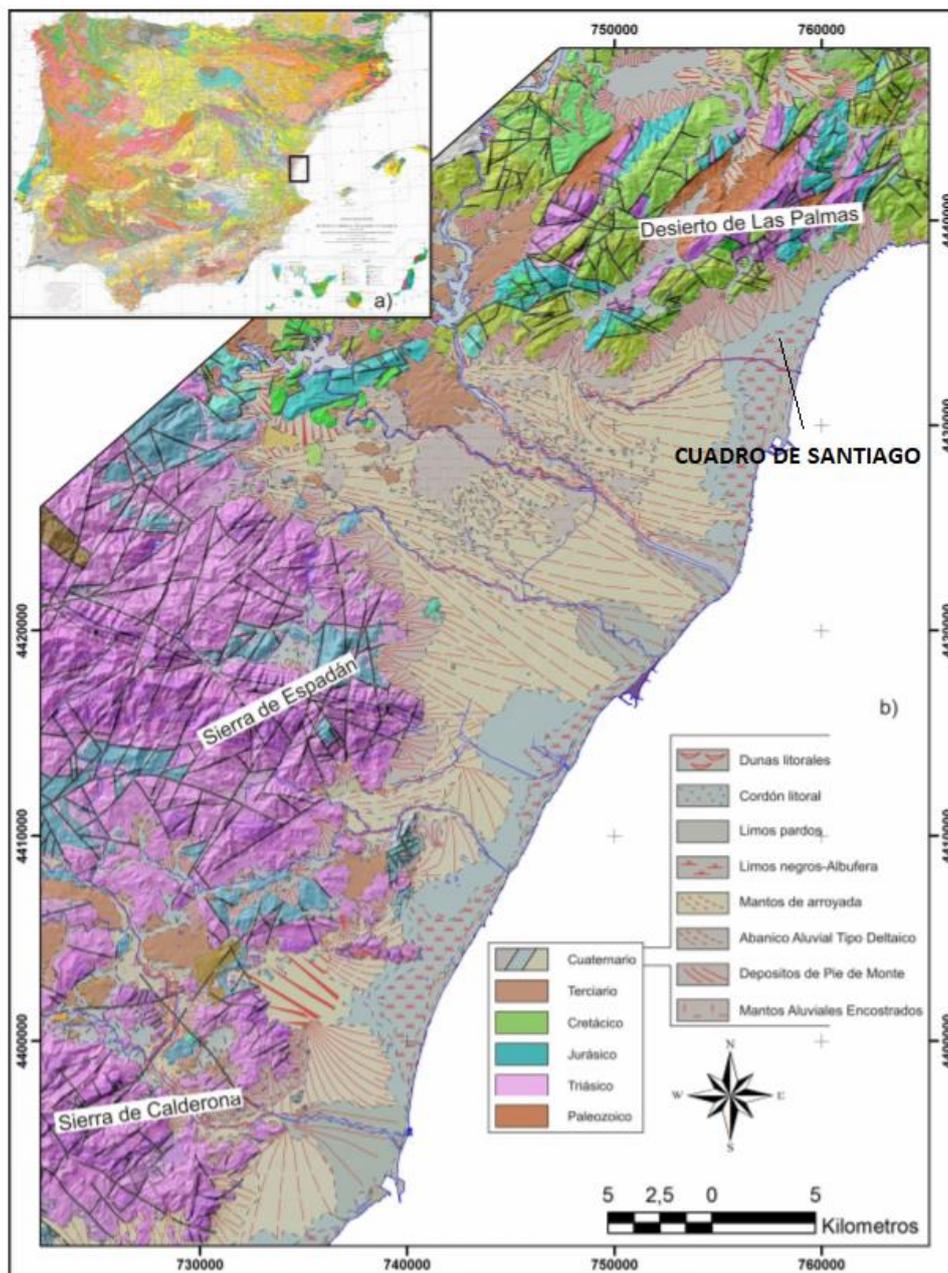


Figura 6. Geología de la Plana Alta de Castellón (Fuente: Mediato Arribas, José Francisco (2016). Oscilaciones del nivel del mar desde el Pleistoceno superior en el sector costero Sagunto-Benicasim (Valencia-Castellón)

4.1.2 Caracterización geomorfológica

El Cuadro de Santiago se encuentra ubicado sobre la unidad geomorfológica denominada Plana de Castellón, la cual se trata de una unidad sedimentaria cuaternaria que es parte de una unidad de mayor extensión que incluye la Marjalería de Castellón.

El conjunto de sedimentos cuaternarios están compuestos por paquetes de gravas, arenas y conglomerados incrustados en una formación arcilloso-limosa. Dependiendo de la zona, el conjunto se encuentra en partes sobre materiales mesozoicos de muy baja permeabilidad. *(SEHUMED, 2004)*

La erosión y el vaciado de las cuencas de drenaje es lo que ha provocado el proceso de acumulación sedimentaria en esta zona. El origen era una cubeta tectónica abierta al mar y que actualmente se encuentra rellena de sedimentos del Mioceno y del Pliocuatnario. Debido a los aportes fluviales por la acción del mar se fue cerrando la depresión y se desarrolló el sistema marjaleño actual.

Este humedal, de la misma forma que otros ubicados sobre llanos costeros, destacan por el papel que ha tenido el mar y los ríos en su creación. Uno de los rasgos significativos en su evolución se debe a la subsidencia geológica, lo que quiere decir que la evolución de la cuenca está marcada por una elevada tasa de relleno. *(SEHUMED, 2004)*

Puesto que este humedal es característico por la gran cantidad de sedimentos finos y su abundante vegetación, se puede considerar al modelo de área palustre o marjal. Las plantas ayudan a atrapar los depósitos y se acumulan en el fondo cuando mueren, por lo que van incorporando de esta forma grandes cantidades de materia orgánica al suelo.

La degradación de los rasgos hidrológicos del marjal ha provocado la aparición de marismas salobres en algunas partes del sistema, en especial en las partes más cercanas al mar, puesto que la explotación del acuífero ha acelerado el proceso de intrusión salina.

El marjal actual es muy diferente a la ciénaga que fue en sus primeras etapas. Los ambientes que pueden reconocerse son: *(SEHUMED, 2004)*

-Glacis y abanicos pleistocenos: son consecuencia del ajuste de los bloques montañosos. Se trata de una amplia superficie formada

formada con el concurso de diversos conos como el del barranco de Ratlla, el de la Parreta, el de riu Sec, etc. Está compuesta por barras de cantos subangulosos de matriz limoarenosa y barras y bancos de arena, y también niveles limoarcillosos provenientes de la zona de inundación. El Mijares es el edificio aluvial más importante.

-Restinga litoral: ocupa una franja de arenas de unos 7 km de longitud y anchura creciente de N a S (de 70 a 700 m) que acaba este marjal apoyándose en la desembocadura del barranco de Farges y el abanico del río Mijares.

-Marjal: es el área donde se centra el estudio. Es una zona de topografía llana, y los sedimentos provienen de las laderas orientales del Desert de les Palmes. Los materiales que la constituyen son limos orgánicos y turbas.

Para conocer la estratigrafía de la zona y los materiales de cada uno de los estratos se han tomado datos de dos proyectos diferentes en los que se estudiaba el área de estudio y zonas cercanas a ella, para de esta forma poder llegar a una conclusión del tipo de geología en este punto.

El primer proyecto sobre el que se han tomado datos es: "Anteproyecto para la restauración del marjal Quadro de Santiago (Benicassim, Castellón)", realizado por la "Sede para el Estudio de los Humedales Mediterráneos" (SEHUMED, 2004). En este se realizaron diversas catas estratigráficas en el marjal con el objetivo de determinar las características específicas del suelo y los sedimentos para así conocer las características litológicas y geotécnicas de la zona.

En la siguiente figura se muestra el emplazamiento donde se realizaron los perfiles. En los perfiles se muestran los diversos estratos y materiales que componen cada perfil.

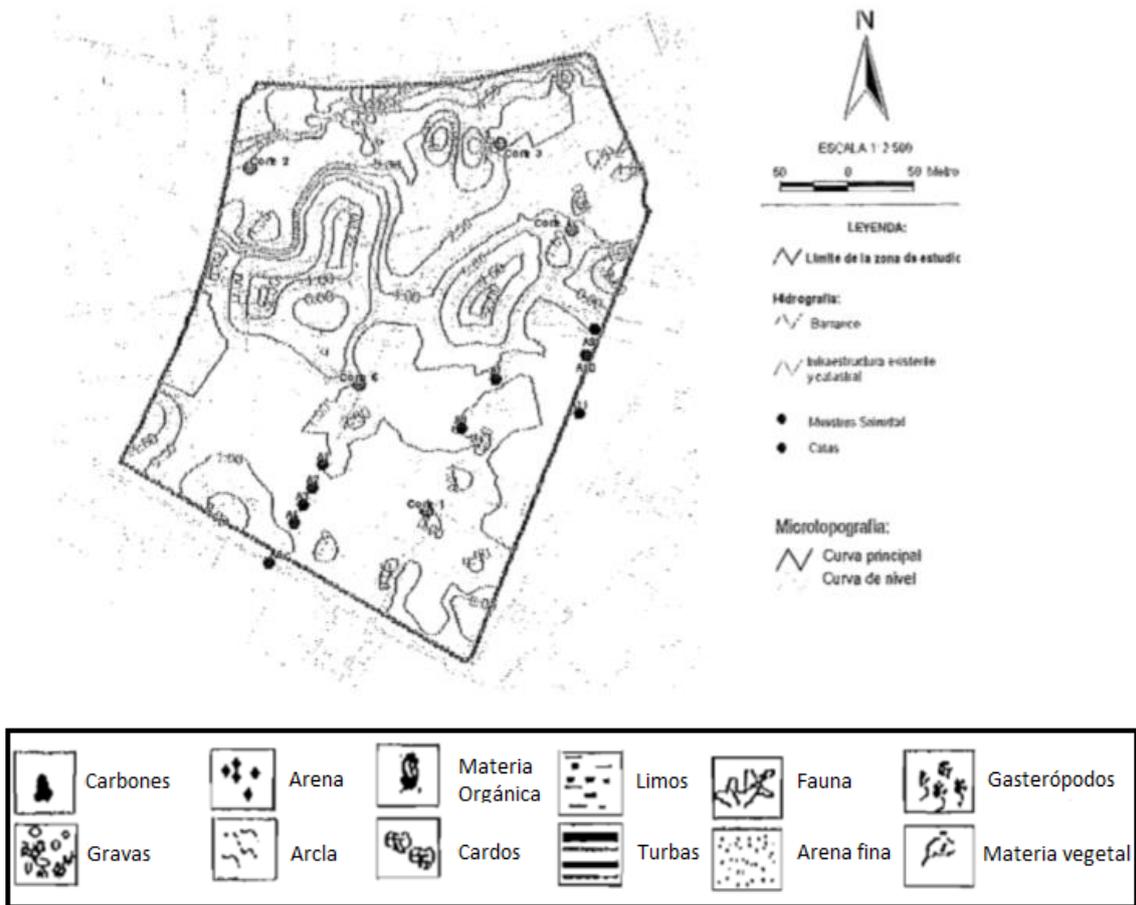
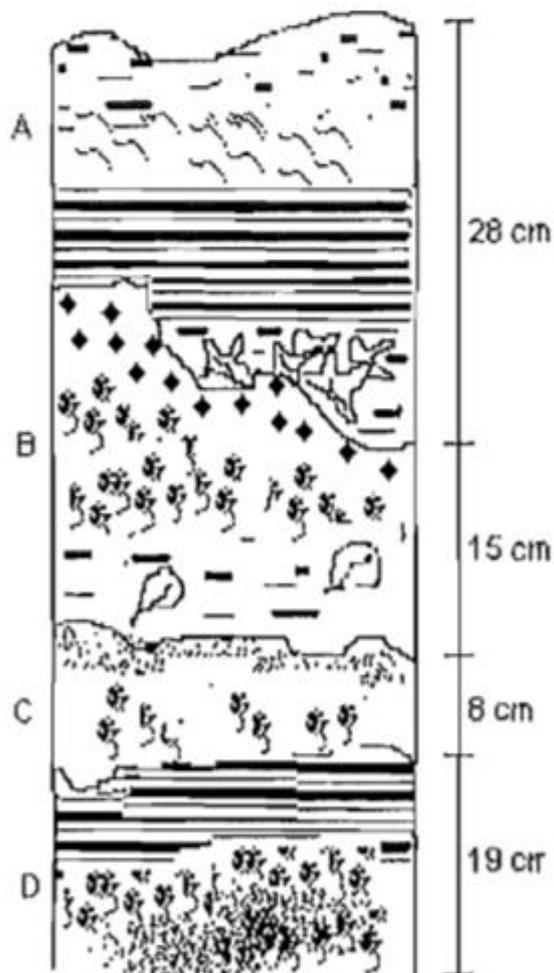


Figura 7. Límites de la zona de estudio y leyenda de los símbolos empleados en todos los perfiles estratigráficos (Fuente: SEHUMED)

Perfil 1:



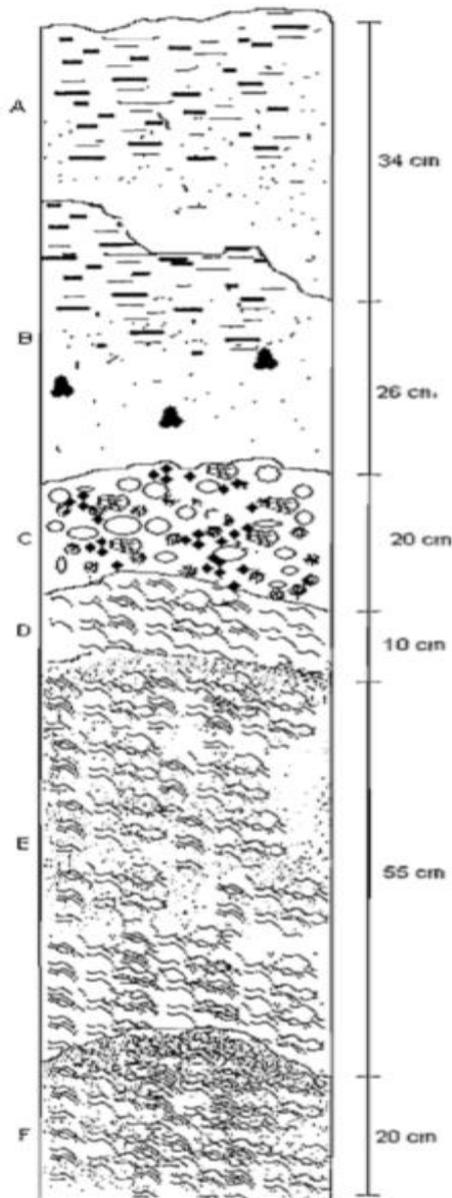
Horizonte	Depósitos
A	Arcillas marrones, turbas, aporte vegetal.
B	Techo con arena, turbas con gasterópodos similar al D. Limos y material vegetal.
C	Techo gris más claro, detrítica y fauna. Gasterópodos.
D	Turbas, no se ve donde hay invasión de agua freática.

Figura 8. Perfil nº1 de los sondeos (Fuente: SEHUMED)

El nivel freático se encuentra a -70 cm desde la cota de superficie. La salinidad del agua es del 30 %.

El nivel freático a las 2 horas y cuarto después había ascendido a 47 cm.

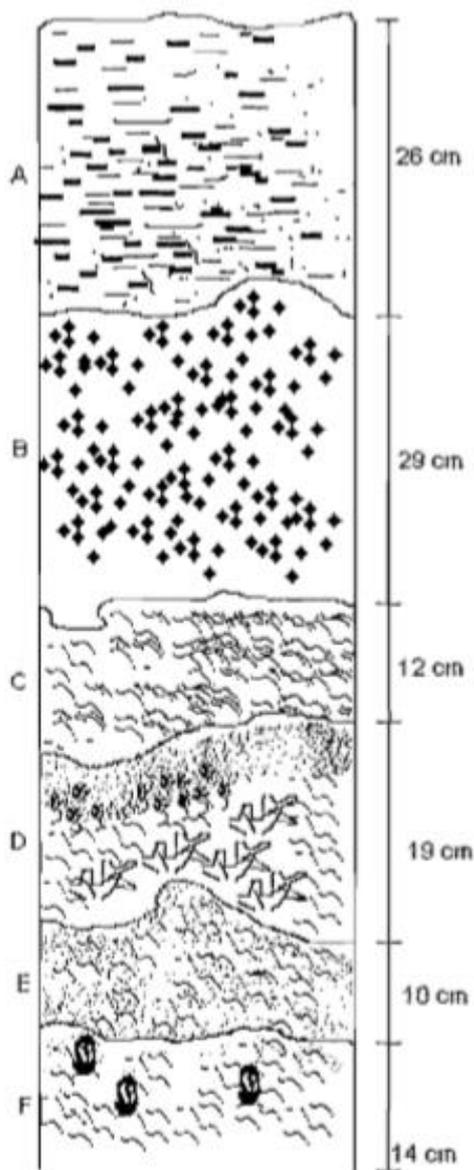
Perfil 2:



Horizonte	Depósitos
A	Capa superficial alterada con restos similares a la B, pero más alterada al estar expuesta en superficie.
B	Limos y arenas finas, restos de desisación ligera.
C	Nivel de cantos gravas con matriz de arena gruesa y media hacia el techo. Degradación positiva.
D	Nivel arcilloso marrón. Todo el corte está húmedo.
E	Arenas marrones masivas. Contacto superior gradual.
F	Arcillas puras color marrón con algunas intrusiones de materia orgánica, restos de conchas, contacto superior. Gradúa algunas oxidaciones asociadas a la materia orgánica hacia la parte de techo en el contacto.

Figura 9. Perfil nº2 de los sondeos (Fuente: SEHUMED)

Perfil 3:



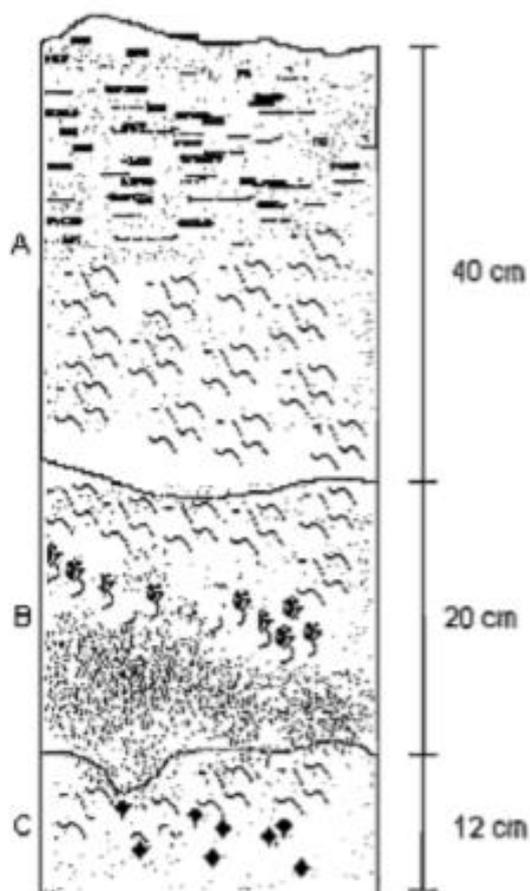
Horizonte	Depósitos
A	Limos marrones.
B	Arenas marrones.
C	Arcillas marrones.
D	Arcillas más ocreas con manchas grises sobre todo al techo. Abundante fauna (gasterópodos).
E	Arcillas marrones.
F	Arcillas, ocreas gris, ambiente reductos. Materia orgánica.

Figura 10. Perfil nº3 de los sondeos (Fuente: SEHUMED)

Nivel freático a 110 cm.

Salinidad del agua del 10 %

Perfil 4:



Horizonte	Depósitos
A	Limos, arcillas de color marrón.
B	Pasada sucesiva de arcillas de color gris de base de techo gris oscuro, marrón gris claro ocre con bastantes gasterópodos.
C	Arcillas marrones con intercalaciones y asociaciones de color marrón gris; arcillas limos.

Figura 11. Perfil nº4 de los sondeos (Fuente: SEHUMED)

Nivel freático a 70 cm.

Salinidad del agua del 18 – 20 %

Perfil 5:

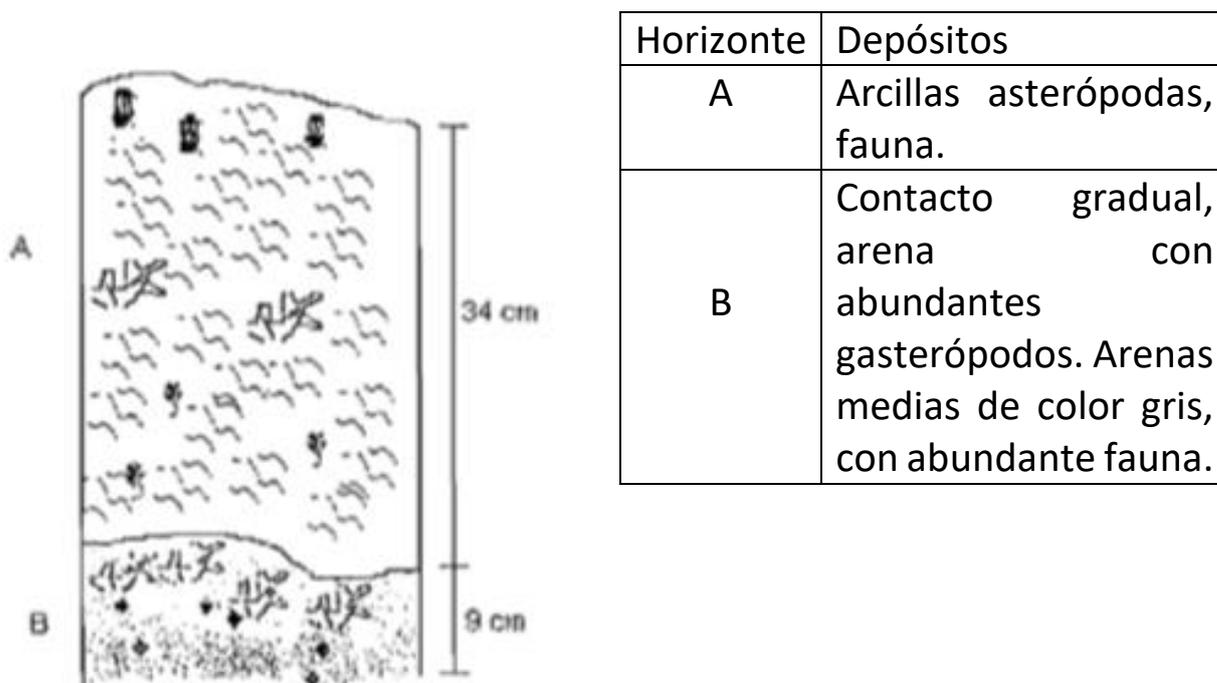


Figura 12. Perfil nº5 de los sondeos (Fuente: SEHUMED)

Nivel freático a 34 cm.

Salinidad del agua del 20 %

El segundo proyecto que ha servido de apoyo para conocer la estratigrafía de la zona es la tesis doctoral de José Francisco Mediato Arribas del departamento de Estratigrafía de la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid, cuyo título es "Oscilaciones del nivel del mar desde el Pleistoceno superior en el sector costero Sagunto-Benicasim (Valencia-Castellón). Registro sedimentario, geoquímico e histórico".

En dicho proyecto se da a conocer un sondeo realizado en la parte interior del marjal de Benicasim, situado en el camino de la Ralla. Se encuentra localizado a 1,5 km de la línea de costa y a una altura de 0 m respecto del nivel del mar. El sondeo se realizó a rotación y alcanzó una profundidad de 21 m, este sondeo se completo junto con otro sondeo en el mismo lugar del que se recuperaron los 1,95 m superiores.



Figura 13. Ubicación del Cuadro de Santiago y del sondeo (Fuente: Google Maps)

Los 21 m están separados en los tramos que se describen a continuación:

- Tramo a)** 21,00-12,15 m: Arcillas, limos y arenas finas con intercalaciones carbonatadas.
- Tramo b)** 12,15-6,00 m: Arenas bioclásticas.
- Tramo c)** 6,00-4,50 m: Arcillas grises y margo-calizas con bivalvos.
- Tramo d)** 4,50-1,35 m: Turbas con intercalaciones de margas y caráceas.
- Tramos e)** 1,35-0,00 m: Limos con cantos.

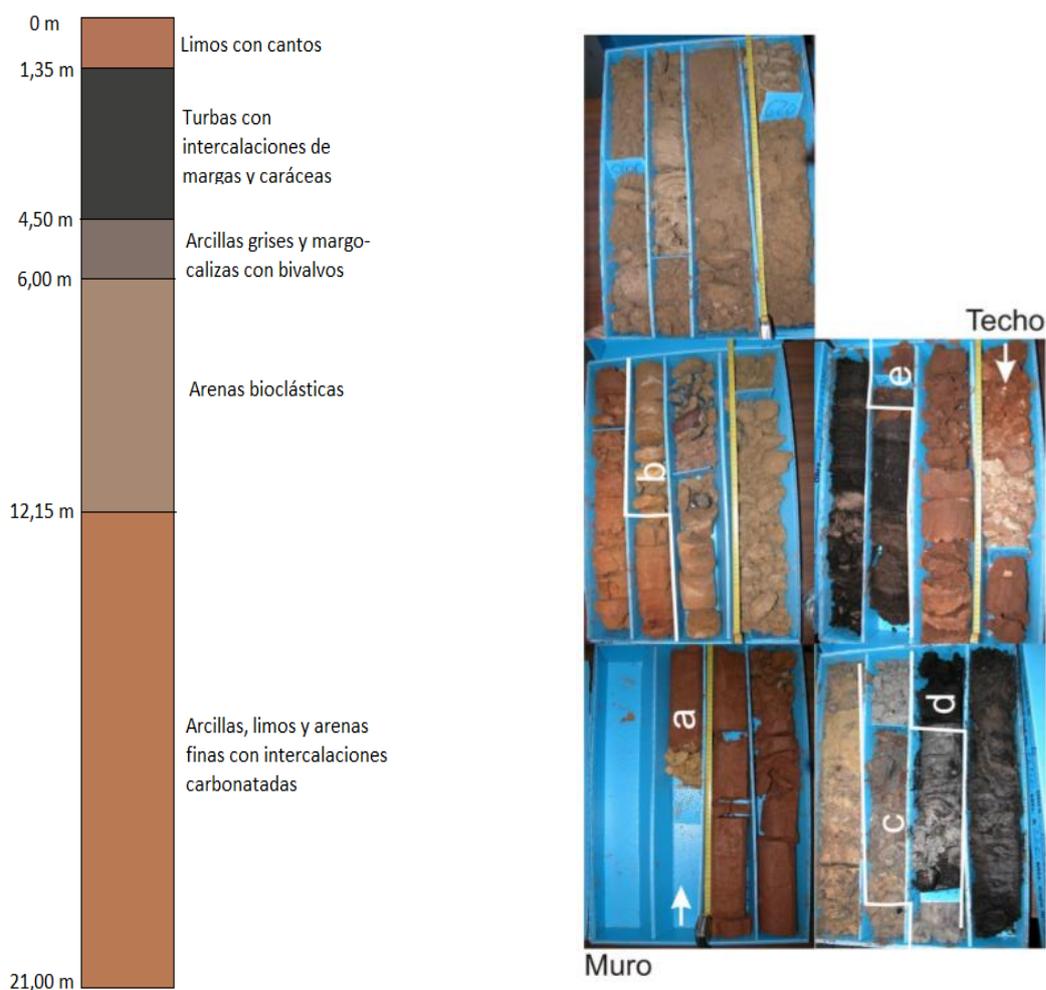


Figura 14. Perfil del sondeo

Para ser más exactos se tiene en cuenta el sondeo de los 1,95 m últimos, el cual se encuentra ubicado entre los abanicos aluviales holocenos y el cordón dunar. Este está formado por 13 tramos, que son los siguientes:

-Tramo 1) 1,95-1,91 m: Turba de color negro, en la que abundan gasterópodos enteros y fragmentados.

-Tramo 2) 1,91-1,87 m: Margas pardas con gasterópodos enteros. En este estrato se encuentran restos de plantas no degradadas, y el contacto con el estrato inferior es muy irregular.

-Tramo 3) 1,87-1,80 m: Margas de color gris con gasterópodos enteros. Abundantes restos de fibras de plantas y con distintos grados de descomposición. El contacto inferior es irregular y erosivo.

-Tramo 4) 1,80-1,75 m: Tramo de restos de caráceas pardas finas. En la base aparecen arcillas que disminuyen hacia el techo. Restos de gasterópodos y de raíces a lo largo de todo el estrato.

-Tramo 5) 1,75-1,73 m: Turba negra con restos de fibras vegetales de color rojo. Restos de gasterópodos.

-Tramo 6) 1,73-1,68 m: Margas de color negro-grisáceo con gasterópodos enteros dispersos. Base irregular.

-Tramo 7) 1,68-1,66 m: Tramo de margas de color amarillos con fragmentos de caráceas y gasterópodos.

-Tramo 8) 1,66-1,41 m: Turba negra. Se reconocen gasterópodos enteros.

-Tramo 9) 1,41-1,19 m: Arcillas pardo-grisáceas con fragmentos de gasterópodos. Presenta pequeñas concentraciones de materia orgánica.

-Tramo 10) 1,19-1,00 m: Limo arenoso marrón-rojizo con cantos de calizas y cuarcitas, cuyo tamaño de grano disminuye hacia el techo.

-Tramo 11) 1,00-0,40 m: Limo arenoso marrón-rojizo con cantos carbonáticos.

-Tramo 12) 0,40-0,30 m: Limo con nódulos de carbonato. Posible relleno.

-Tramo 13) 0,30-0,00 m: Relleno antrópico. Limos pardos con cantos carbonáticos.

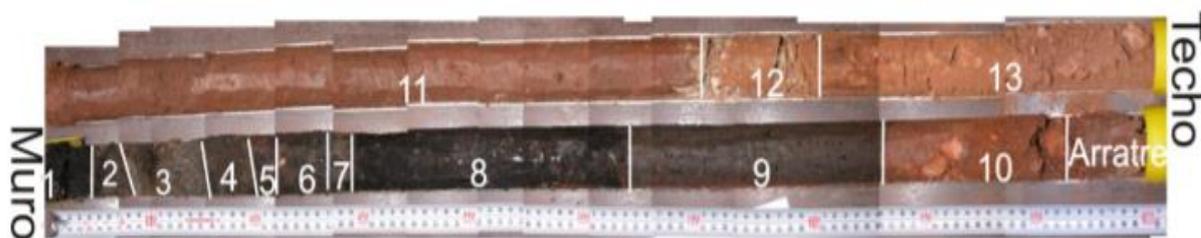


Figura 15. Perfil del sondeo de los último 1,95 m (Fuente: Mediato Arribas, José Francisco (2016). Oscilaciones del nivel del mar desde el Pleistoceno superior en el sector costero Sagunto-Benicasim (Valencia-Castellón)

Como se observa en ambos estudios la turba tiene un papel predominante en ellos, y esta es una de las razones por las que el Cuadro de Santiago tiene características propias de un humedal.

4.2 Modelo digital de elevaciones

El Modelo Digital del Terreno (MDT) es un conjunto de capas (generalmente raster) que representan las distintas características de la superficie terrestre derivadas de una capa de elevaciones a la que se denomina Modelo Digital de Elevaciones (MDE).

La información que proporciona dichas elevaciones del terreno en la zona de estudio se ha obtenido a partir de una ortofoto de la zona proporcionada por el Instituto Geográfico Nacional, más concretamente del Plan Nacional de Ortografía Aérea (PNOA). La resolución tomada es de 50 centímetros. Esta herramienta consiste en una imagen de la superficie terrestre en la que los elementos presentan una escala homogénea que provoca que se produzcan menos errores- De esta forma se permite visualizar toda la zona del Cuadro de Santiago teniendo en cuenta la situación de los edificios y los cambios de elevación del terreno.

Por lo que de esta forma sabemos que el Cuadro de Santiago se sitúa en una superficie más o menos nivelada de terreno, a excepción de acumulaciones puntuales, ocupada por diferentes agrupaciones vegetales resultado de la presión antrópica ejercida sobre la zona. Así que se encuentra en una zona muy plana, entre 0 y 5 metros, con área por debajo del nivel del mar (nivel 0). El Molí de la Font se sitúa justo en la curva de nivel de 5 m.

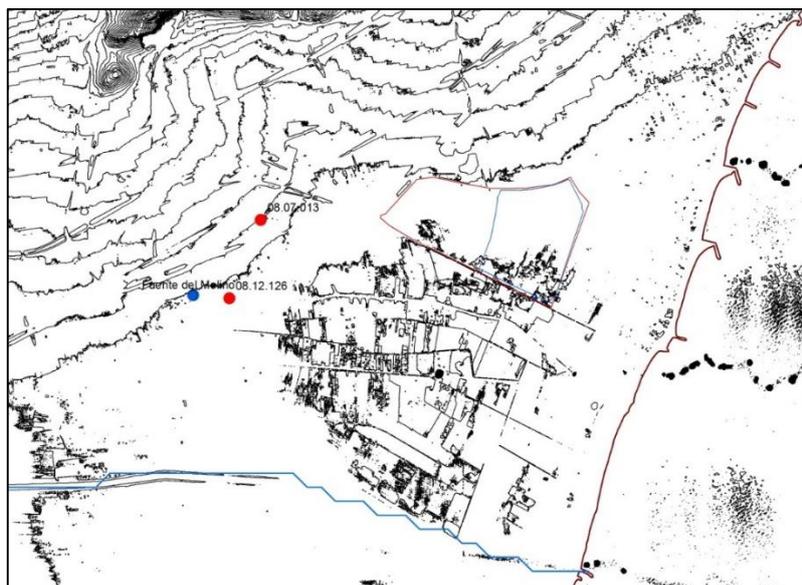


Figura 16. Líneas de nivel en el Cuadro de Santiago (Fuente: ArcGis)

4.3 Piezometría

La piezometría en el área de estudio está totalmente condicionada por el sistema de drenaje establecido en 1971 por la Confederación Hidrográfica del Júcar para desecar y permitir el cultivo de esta zona.

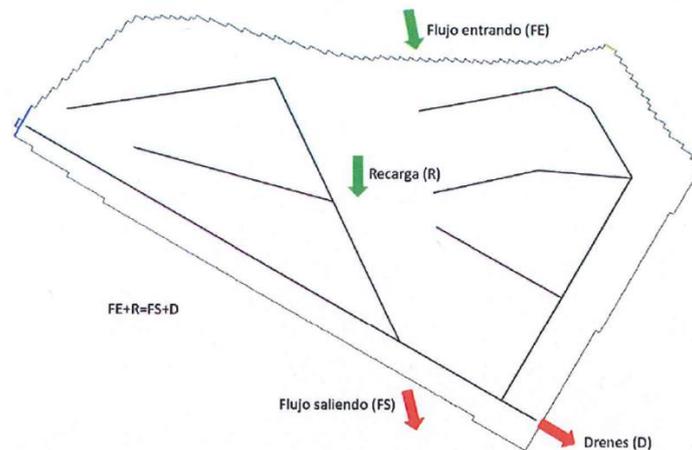


Figura 17. Flujos de salida del agua (Fuente: Caracterización Hidrogeológica del humedal Cuadro de Santiago, 2017)

Este sistema se basa en una red ramificada de tubos de hormigón porosos enterrados a 1 – 1,5 metros de profundidad, que desembocan en un colector principal que discurre paralelo al camino de La Ratlla y desemboca a su vez en el grupo de bombeo de Los Coviles. (SEHUMED, 2004)

En este apartado referido a la piezometría se comienza analizando la red de piezometría de la Plana de Castellón a partir de los datos de la Red Piezométrica de la Confederación Hidrográfica del Júcar. Posteriormente se analizan las isóneas regionales aportadas por la Confederación Hidrográfica del Júcar y el Instituto Geológico y Minero de España, para finalmente en el último apartado llegar a una estimación del nivel freático de la zona de estudio con la suficiente exactitud.

4.3.1 Red de piezometría.

Para conocer el nivel piezométrico de la zona es necesario acudir a los datos de la Confederación Hidrográfica del Júcar. En la zona de la Plana de Castellón la red representativa de las masas de agua subterránea es la 080.127, en la que se encuentran 5 piezómetros que se consideran representativos del comportamiento de las masas de agua subterránea. Dichos piezómetros son: 08.12.010, 08.12.014, 08.12.015, 08.12.033 y 08.12.017.

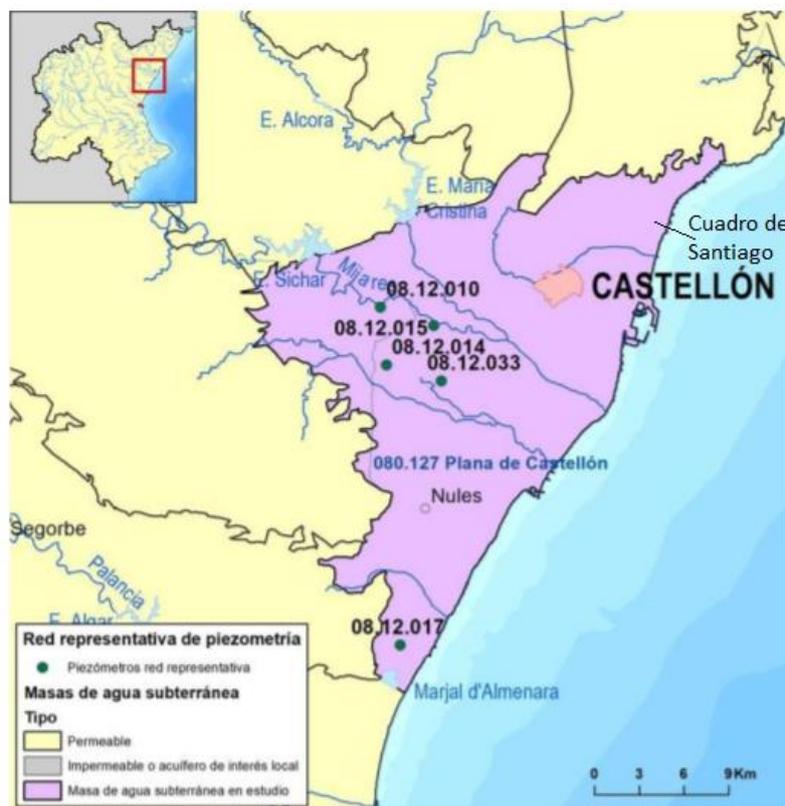


Figura 18. Red representativa de piezómetros de la Plana de Castellón (Fuente: CHJ)

Puesto que la distancia de estos piezómetros a la zona de estudio es grande, es necesario acudir a la red operativa, que es la que está constituida por los puntos de control en los que actualmente se toman medidas con una periodicidad mensual o trimestral. En la red operativa hay un mayor número de piezómetros cercanos a la zona. Los más cercanos son el 08.12.126, el 08.07.013 y el 08.12.128 junto al manantial Molí de la Font.

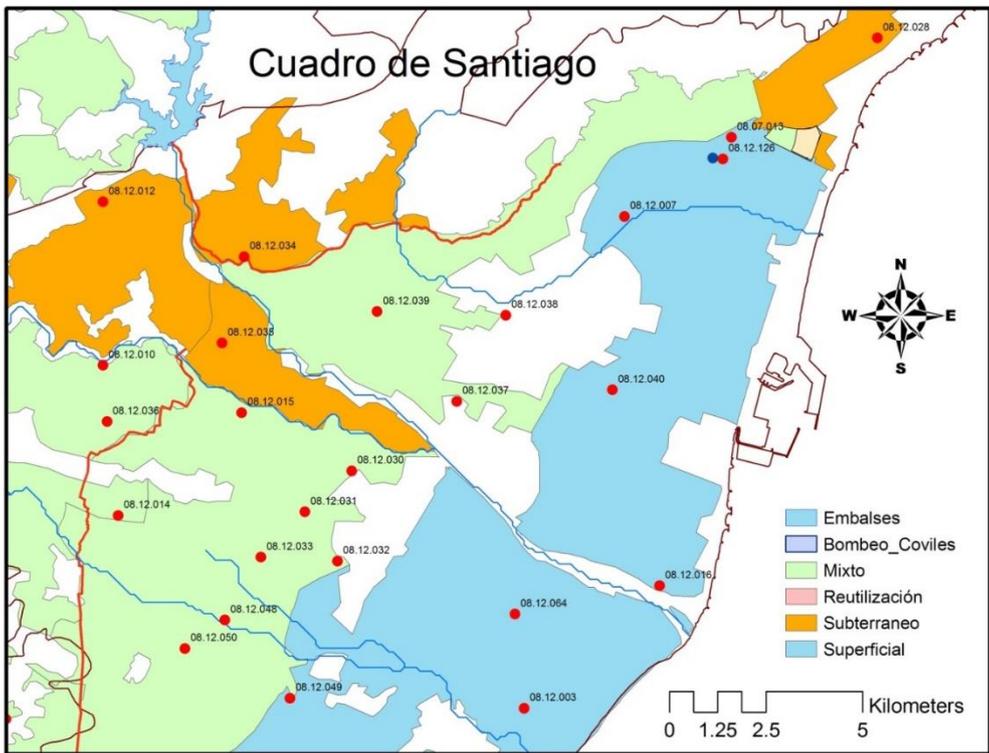


Figura 19. Red de piezómetros más cercanos al Cuadro de Santiago (Fuente: ArcGis)

Teniendo en cuenta los datos históricos de la Confederación Hidrográfica del Júcar se han realizado las siguientes gráficas:

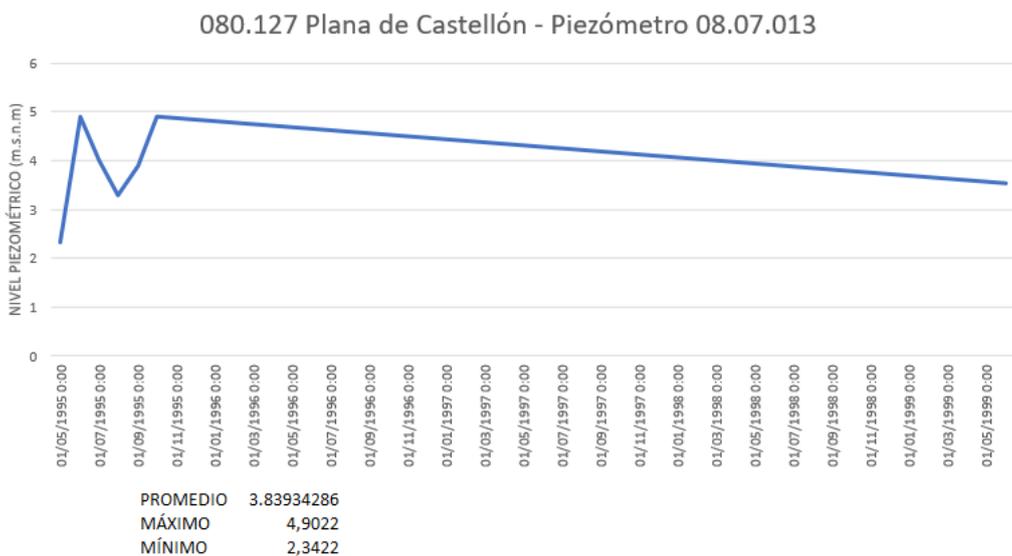


Figura 20. Piezómetro 08.07.013

Del piezómetro 08.07.013 sólo se recogieron datos de 1995 a 1999, y de estos se tiene que el nivel piezométrico promedio es de 3,84 m.s.n.m., con un máximo de 4,90 m.s.n.m. y un mínimo de 2,34 m.s.n.m.

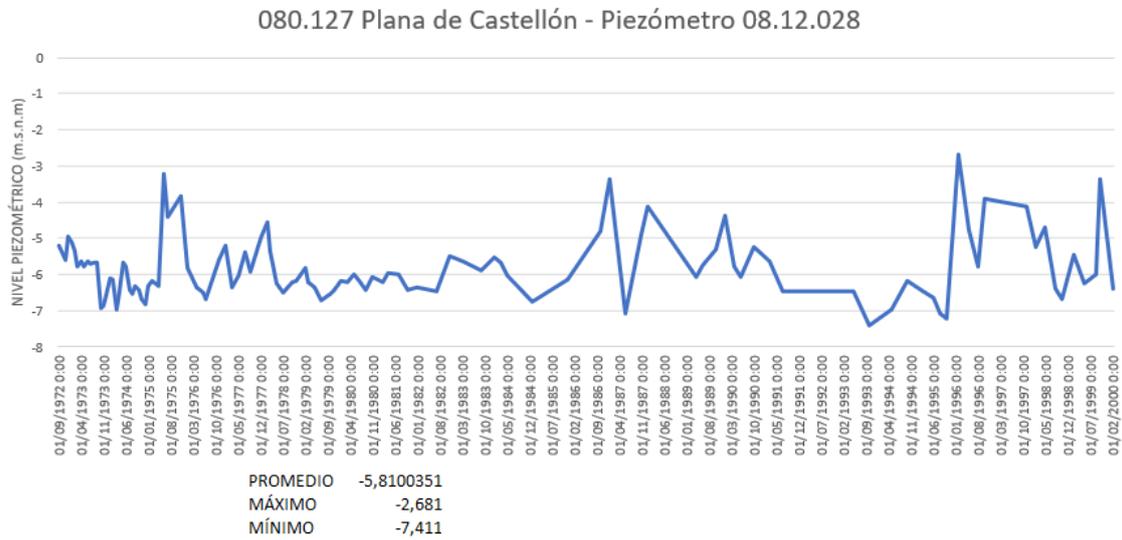


Figura 21. Piezómetro 08.12.028

En cuanto al piezómetro 08.12.028, se han recogido datos desde 1972 hasta el 2000. De dichos datos se llega a la conclusión de que el nivel piezométrico promedio es de -5,81 m.s.n.m., con un máximo de -2,68 m.s.n.m. en 1993 y un mínimo de -7,41 en 1996. Pese a que este piezómetro proporciona mejores resultados ya que tiene un mayor número de datos, la distancia a la zona de estudio es mayor.

El piezómetro 08.12.126, el cual está cercano a la zona de estudio no se proporcionaban datos de este en el histórico.

Por lo que debido a la falta de datos en los piezómetros cercanos a la zona de estudio se llega a la conclusión de que no existe ningún piezómetro que sea representativo del comportamiento actual del nivel piezométrico de la zona puesto que los datos no están actualizados y están a la suficiente distancia del humedal como para que no se concuerden los datos de estos con los de la zona.

4.3.2 Isolíneas

Las isolíneas regionales de la Plana de Castellón se encuentran analizadas por dos organismos. Por una parte, la Confederación Hidrográfica del Júcar realizó un mapa de isolíneas en el año 2005; y por otro lado, en el año 2008 el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) realizó otro estudio de los niveles piezométricos con el que realizaron un mapa de isolíneas.

El objetivo de estos mapas es el de representar el nivel piezométrico regional de las masas subterráneas de la Demarcación Hidrográfica del Júcar. Por lo que dichos mapas deben entenderse como una aproximación a la realidad y no como algo completamente exacto y al detalle.

El mapa de isolíneas de la zona de estudio según el IGME se observa que las líneas piezométricas que pasan por el Cuadro de Santiago son la de 5 m.s.n.m. por la zona central del humedal, y la de nivel 0 m.s.n.m. en la parte en la que se encuentra el Bombeo de Coviles.

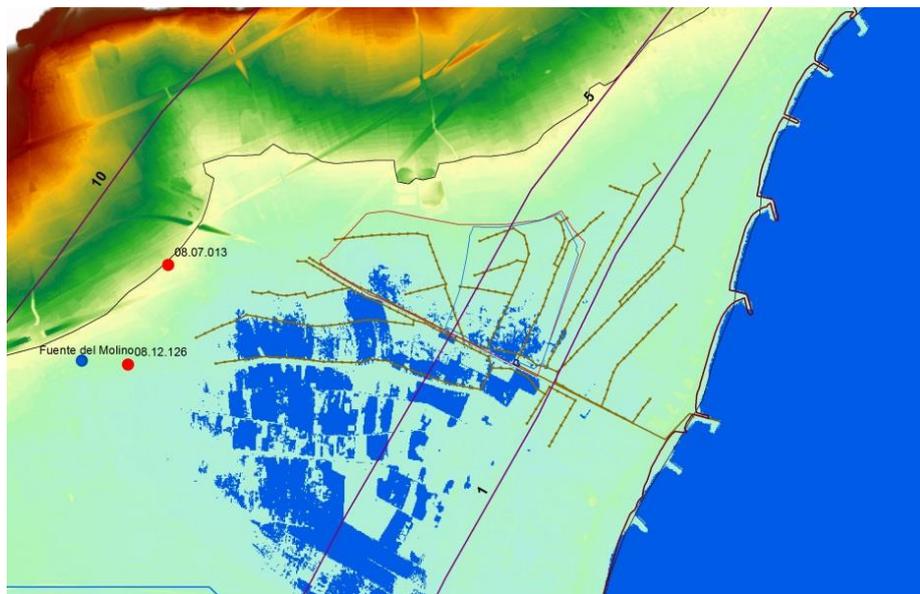


Figura 22. Mapa de isolíneas del IGME (Fuente:ArcGis)

Por otra parte, en el mapa de isolíneas de la CHJ se observa que el Cuadro de Santiago se encuentra entre la línea piezométrica 0 y la 1 m.s.n.m.

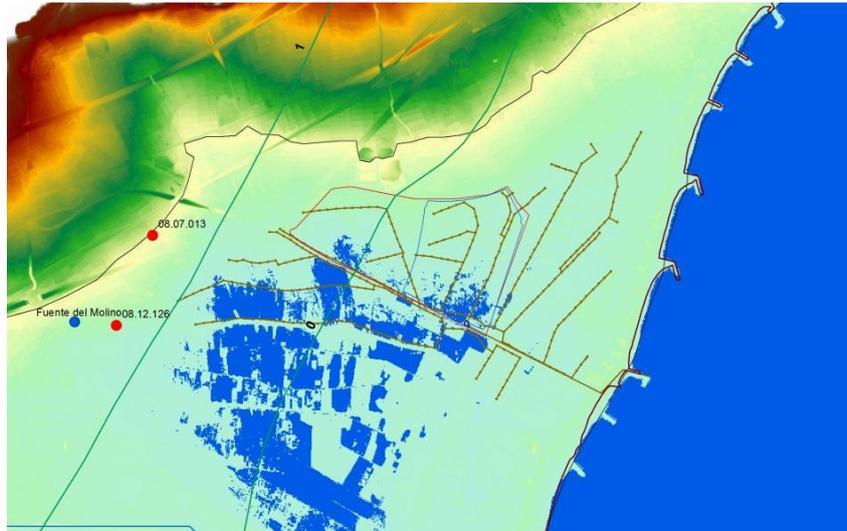


Figura 23. Mapa de isótopos de la CHJ (Fuente: ArcGis)

Por lo que comparando los datos de ambos organismos se observa que distan mucho el uno del otro. Esto es debido a que en esta zona los datos recogidos no son claros, lo que quiere decir que en esta zona para la realización de los mapas se han interpretado los datos de los puntos piezométricos de ambos organismos.

Como conclusión, se observa que las isótopos que cruzan la zona de estudio son la 0, 1 y 5; esto quiere decir que el nivel piezométrico en esta zona varía entre esos valores. Por lo que pese a servir los datos de ayuda para una estimación con poca precisión del nivel piezométrico de la zona no es suficientemente correcta como para poder dar por válida la aproximación.

4.3.3 Estimación del nivel freático

El nivel freático en el Cuadro de Santiago, como ya se ha dicho anteriormente está afectado por el sistema de drenaje que deseca el humedal, por lo que conocer el nivel freático en condiciones naturales necesita de una estimación aproximada teniendo en cuenta el comportamiento de las zonas de alrededor del humedal que no están sometidas al constante bombeo de agua.

Para estimar el nivel freático es preciso la utilización del programa ArcGis y del modelo digital de elevaciones en el cual se plasma la altimetría de la zona. Por lo que mediante la elevación del terreno se generan unas imágenes en las que se refleja la superficie del terreno que estaría inundada sin el sistema de drenaje para las diferentes alturas.

A partir de la información del anterior apartado en el cual se estimaba que la zona de estudio tiene un nivel piezométrico entre 0 y 5, se realiza el estudio de la zona teniendo como referencia dichos niveles piezométricos.

En el caso de que el nivel freático llegara a los 5 m.s.n.m. la zona inundable sería muy extensa, por lo que se descarta que en un régimen natural el nivel freático fuera de 5 m.s.n.m.

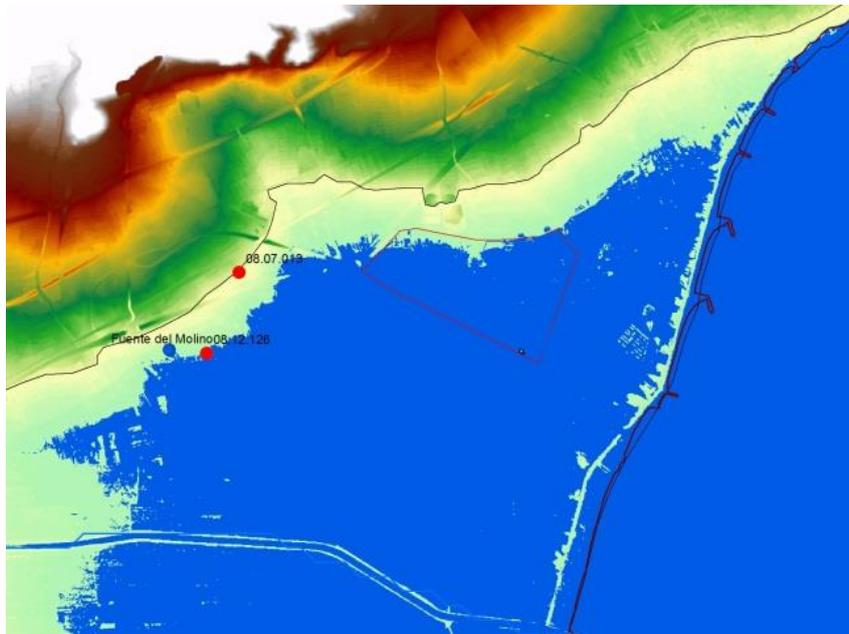


Figura 24. Zona inundable con 5 m.s.n.m. de cota (Fuente: ArcGis)

Con un nivel freático que llegara a los 3 m.s.n.m., la zona inundable sigue siendo excesiva teniendo en cuenta los datos históricos de la zona, en los que no se ha registrado esos valores en términos normales.

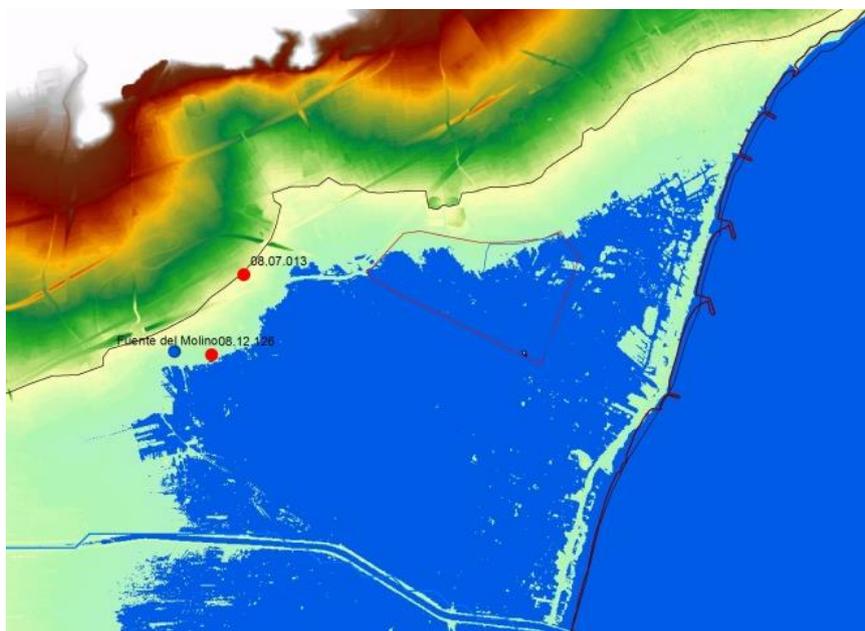


Figura 25. Zona inundable con 3 m.s.n.m. de cota (Fuente: ArcGis)

Para el nivel de 1 m.s.n.m. gran parte del humedal seguiría estando inundado, y las zonas agrícolas cercanas estarían cubiertas por agua. Este nivel no se considera adecuado ya que la zona más al sur de Benicasim, en la que se le somete a un drenaje continuo de agua no se observan inundaciones.

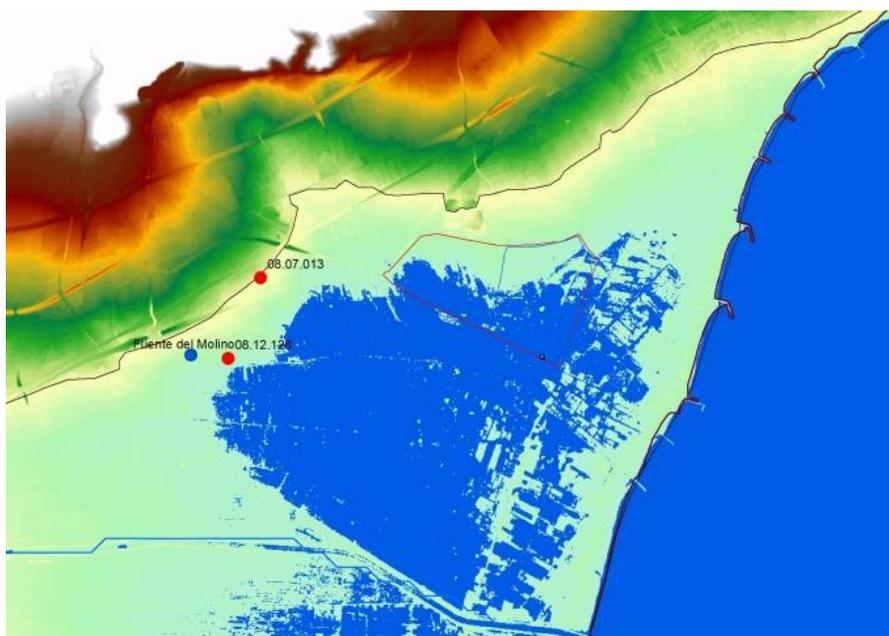


Figura 26. Zona inundable con 1 m.s.n.m. de cota (Fuente: ArcGis)

En el caso de que el nivel freático del agua estuviera a 0,5 m.s.n.m. la aproximación tiene lógica ya que el Cuadro de Santiago ha sido un coto arrocero, por lo que ha existido una pequeña lámina de agua que ha permitido su cultivo. Además, las edificaciones al norte del humedal no se encuentran afectadas por inundaciones durante la gran parte del año, únicamente en el caso de fuerte lluvias. Por otra parte, también se pueden tener como referencia otros puntos como el caudal del agua que lleva el río Seco, el cual en este caso se observa que en su desembocadura el caudal es algo mayor que el que suele llevar. Por lo que habría que ajustar algo más la estimación.

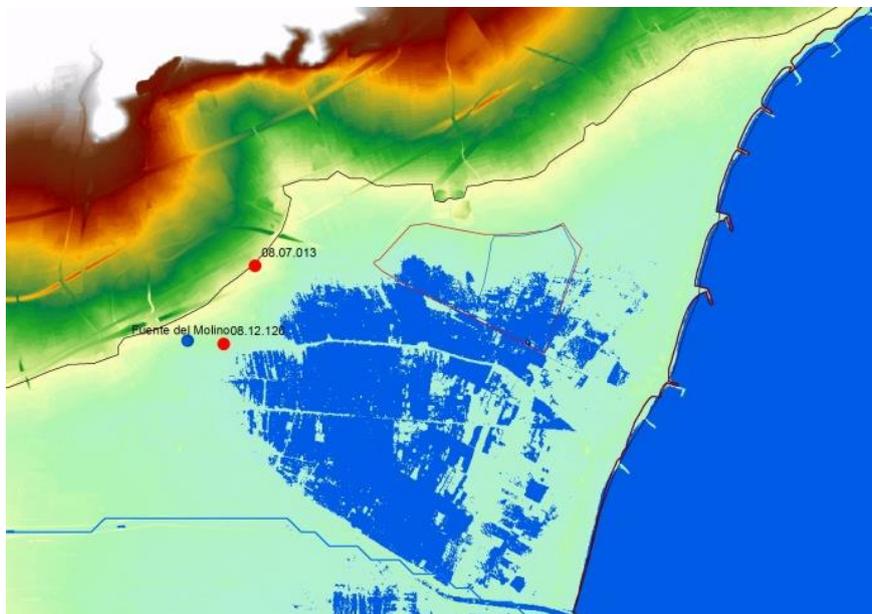


Figura 27. Zona inundable con 0,5 m.s.n.m. de cota (Fuente: ArcGis)

Con un nivel freático al nivel del mar, es decir, a cota 0 m.s.n.m. se observa que el Cuadro de Santiago no se inundaría en prácticamente ninguna zona de su extensión, por lo que no sería un humedal y no tendría problemas de inundación. Como sí se genera una lámina de agua continua en el momento en el que se deja de desecar el humedal, quiere decir que la cota del agua es superior a 0 m.s.n.m.

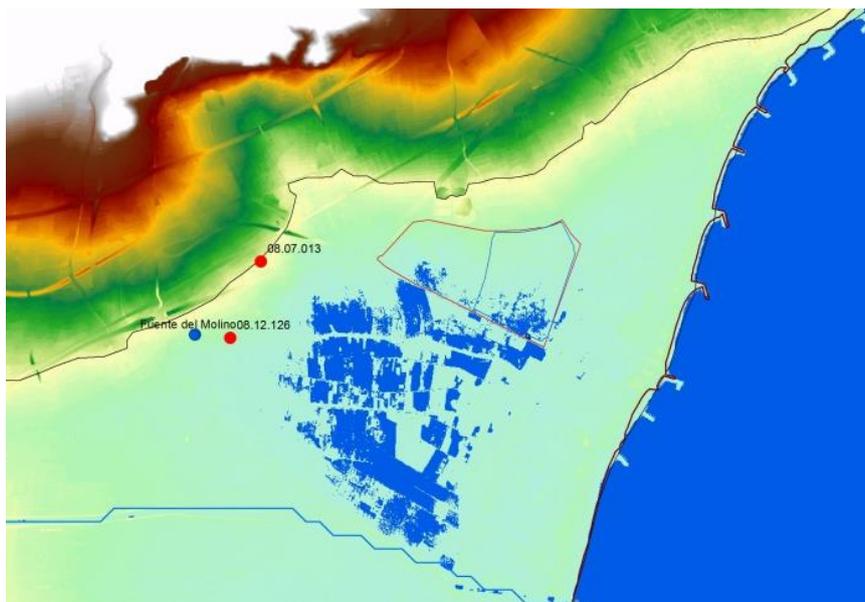


Figura 28. Zona inundable con 0 m.s.n.m. de cota (Fuente: ArcGis)

Por lo que el nivel freático se encuentra entre 0,5 y 0 m.s.n.m., para ser más exactos se realiza una última aproximación de 0,2 m.s.n.m. en la que se puede observar como el humedal sigue teniendo una lámina de agua en su parte S-E. Esta parte es la que se considera humedal y donde se encuentran las bombas que desecan la zona. Por otra parte, la zona de la desembocadura del río Seco al Sur de la imagen se observa como es más parecida a la de la realidad.

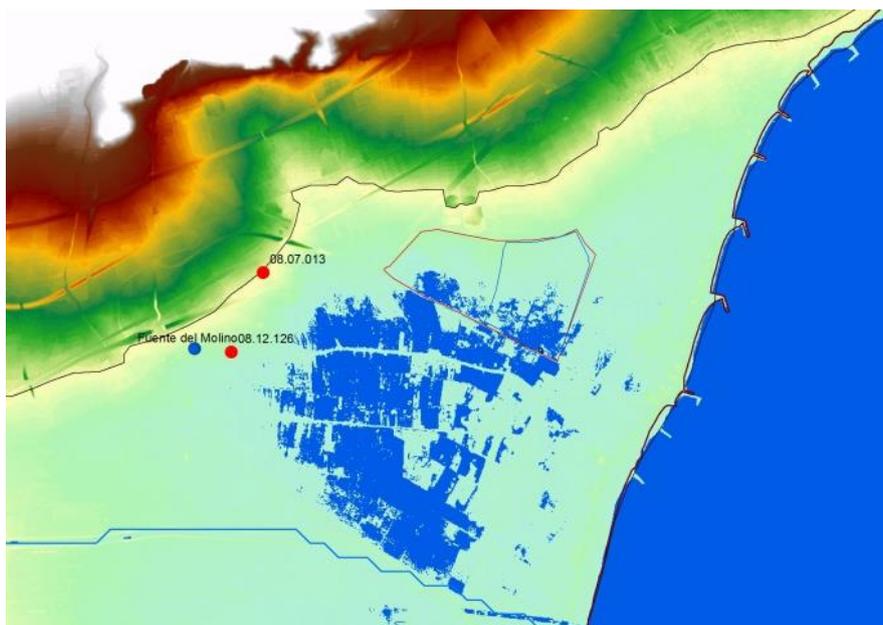


Figura 29. Zona inundable con 0,2 m.s.n.m. de cota (Fuente: ArcGis)

Con todo esto, se llega a la conclusión de que en las condiciones naturales del humedal el nivel freático estaría situado entre 0 y 0,2 m.s.n.m. ya que niveles superiores generarían una gran superficie inundada que no se corresponde con la realidad de la zona.

La mayor parte del área inundada como se puede observar en las imágenes a partir del nivel de 1 m.s.n.m. es la situada en Castellón fuera de la zona de marjal, en la que por una parte hay casas, pero también hay una gran cantidad de campos en los que se observa una pequeña lámina de agua.



Figura 30. Lámina de agua que aflora a la superficie



Figura 31. Lámina de agua



Figura 32. Lámina de agua que aflora a la superficie pese al drenaje del humedal

5 Modelo conceptual

En este capítulo lo que se quiere conseguir es elaborar un modelo conceptual que integre toda la información geológica, piezométrica previamente obtenida con la finalidad de conocer el funcionamiento del sistema. A esto, se le añadirá nuevos datos sobre el funcionamiento de la red de drenes, entre ellos la capacidad de bombeo y sus intervalos para de esta forma llegar a conocer mejor la zona de estudio.

Todo esto permitirá determinar las relaciones entre el agua subterránea y las láminas de agua existentes en condiciones naturales para poder establecer previsiones de evolución bajo distintos escenarios de gestión y ante posibles cambios ambientales naturales y/o antrópicos.

Del capítulo anterior se ha llegado a la conclusión de que el terreno está principalmente compuesto por arcillas, limos y arenas finas, junto con intercalaciones de estratos de turbas, estas son las principales características estratigráficas de los humedales. Por otra parte, se llegó a la conclusión de que el nivel freático del agua en condiciones naturales es de entre 0 y 0,2 m.s.n.m. Por lo que con estos datos, al estudiarlos de forma unificada se puede conocer cómo funciona el humedal Cuadro de Santiago, esto además se verá ampliando en este capítulo mediante los datos captados del funcionamiento del sistema de drenaje que deseca el humedal, y como afecta este a la zona de estudio.

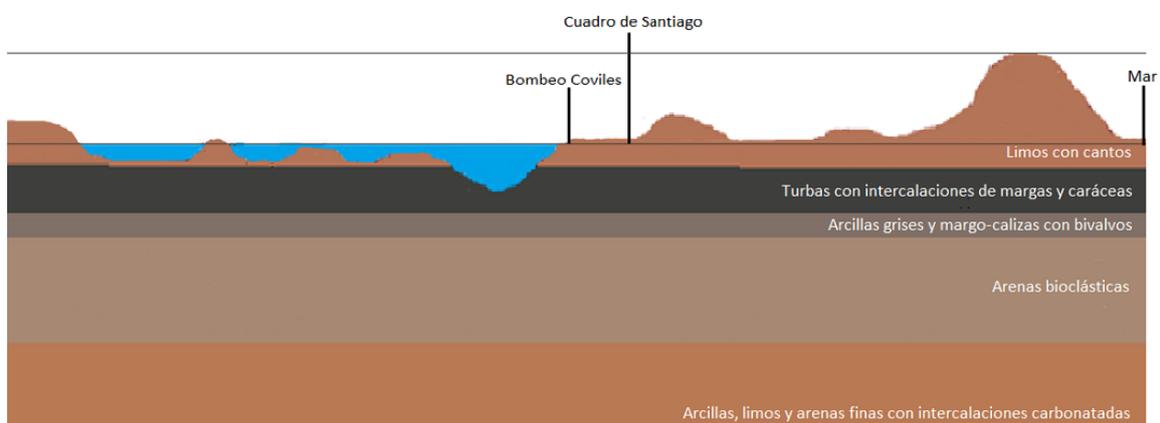


Figura 33. Perfil del terreno del humedal

5.1 Funcionamiento de la red de drenes

Como ya se apuntó anteriormente en el apartado de piezometría, el área de estudio está totalmente condicionada por el sistema de drenaje establecido en 1971 por la Confederación Hidrográfica del Júcar para desecar y permitir el cultivo de esta zona.

El sistema se basa en una red ramificada de tubos de hormigón porosos enterrados a 1-1,5 metros de profundidad, que desembocan en un colector principal que discurre paralelo al camino de La Ratlla y desemboca a su vez en el grupo de bombeo de Los Coviles. (SEHUMED, 2004)

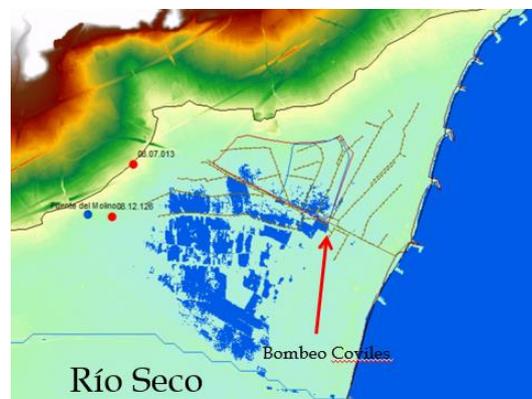


Figura 34. Sistema de drenaje (Fuente: ArcGis)

A este grupo también afluyen las aguas drenadas en la zona de marjal más meridional, dentro del término municipal de Castellón.

Desde este grupo de bombeo las aguas son evacuadas hasta el mar por una tubería, paralela también al camino de La Ratlla, de 900 mm de diámetro.



Figura 35. Dren

Según datos facilitado por el Ayuntamiento de Benicasim, tanto Castellón como este ayuntamiento cuentan respectivamente con dos bombas de eje horizontal de 25 C.V. y 35C.V. con una capacidad de bombeo de 200 y 400 l/s. (SEHUMED, 2004)

El sistema se pone en funcionamiento mediante boya siendo la máxima capacidad de evacuación de 960 l/s.

Como se puede comprobar en la siguiente tabla, el tiempo de funcionamiento de las distintas bombas es mínimo, con una media anual de 715,88 horas la bomba pequeña y 365,58 horas la bomba grande, lo que supone menos de una hora al día de funcionamiento la bomba grande y casi 2 h/día la bomba pequeña.

Horas de trabajo y volúmenes de agua bombeados en Coviles

AÑO	Horas de bombeo (Bomba pequeña – 200 l/s)	Horas de bombeo (Bomba grande – 400 l/s)	Caudal total (m3)
1994	659,2	391,6	1.038.557
1995	583,3	182,3	682.445
1996	1069,1	280,4	1.173.478
1997	777,6	497,0	1.275.581
1998	415,7	388,7	858.974
1999	609,0	202,6	730.210
2000	856,9	514,2	1.357.373
2001	766,8	429,8	1.170.914
2002	705,4	425,7	1.120.925
2003	715,8	343,5	1.010.023
MEDIA	715,88	365,58	1.041.848

Tabla 1. Horas de trabajo y volúmenes de agua bombeado en Coviles (Fuente: SEHUMED)

El volumen bombeado correspondiente a la zona de marjal dentro del término de Benicasim oscila entre 1.357.373 m3 y 682.445 m3, con una media de 1.041.848 m3. Esto supone un caudal continuo de casi 35 l/s, a partir del funcionamiento de las bombas unas horas al día, siendo la máxima capacidad de evacuación como anteriormente se ha dicho de 960 l/s.



Figura 36. Bombas que drenan el humedal. A la izquierda la de Castellón y a la derecha la de Benicasim

El sistema de drenaje consta de 2 redes de drenaje al bombeo, la red de Benicasim y la red de Castellón, ambas con un doble sistema de impulsión formados por una bomba grande y una bomba pequeña que permite desecar el humedal con caudales de salida diferentes.



Figura 37. Tuberías que dirigen el agua hacia el mar. A la izquierda la de Castellón y a la derecha la de Benicasim

5.2 Funcionamiento horario de las bombas

El sistema de drenaje se divide en las bombas del lado de Castellón y las del lado de Benicasim, puesto que el funcionamiento en ambas partes es totalmente diferente debido a las necesidades de cada una de las partes. Los datos del funcionamiento de las bombas son obtenidos de un estudio de Facsa.

En el lado de Castellón, que es donde se encuentran las dos bombas más grandes, se encuentra sometido a continuas arrancadas y paradas a lo largo del día. El promedio de horas que funciona la bomba grande de Castellón es de 4,4 h/día, y la bomba pequeña de 7,0 h/día, lo que provoca que el caudal extraído sea de 5.284.080 m³. Este caudal en la parte de Castellón es grande debido a que en la zona en la que se sitúan estos drenes hay cultivos agrícolas y se encuentra en una zona en la que se ha urbanizado en el pasado por lo que se tienen que extraer grandes caudales para no poner en peligro dicha zona.

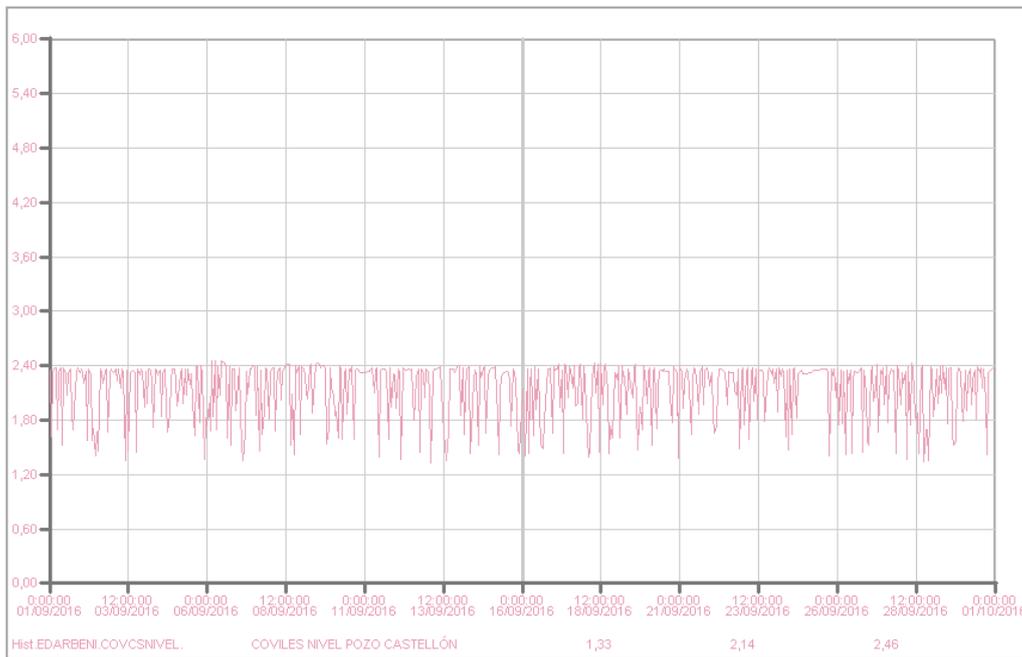


Figura 38. Funcionamiento horario de las bombas de Castellón (Fuente: Facsa)

En el lado de Benicasim a diferencia de en el de Castellón, el funcionamiento es muy reducido con características totalmente diferentes puesto que no consiste en una continua arrancada y parada a lo largo del

día. En esta parte el caudal medio bombeado es de 20 l/s por parte de la bomba pequeña, la cual arranca cada 6-7 horas

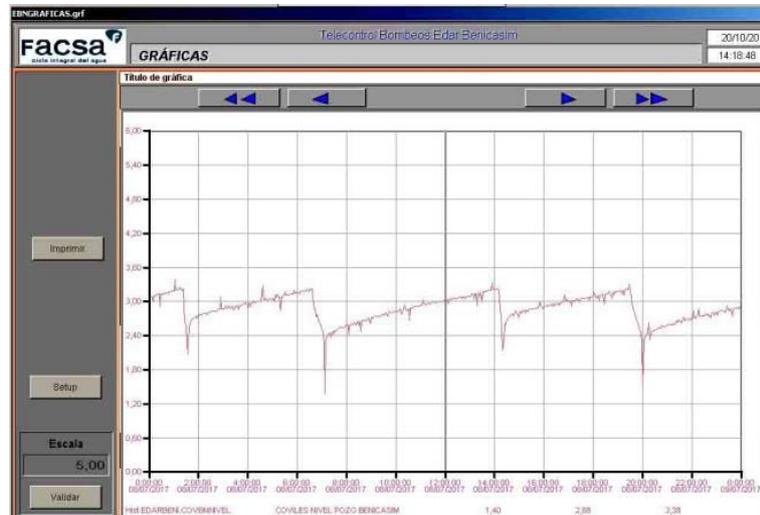


Figura 39. Funcionamiento horario de la bomba pequeña de Benicasim (Fuente: Facsa)

Por otra parte, la bomba grande de la parte de Benicasim extrae un caudal medio de 100 l/s, con arrancadas cada 2-3 horas.

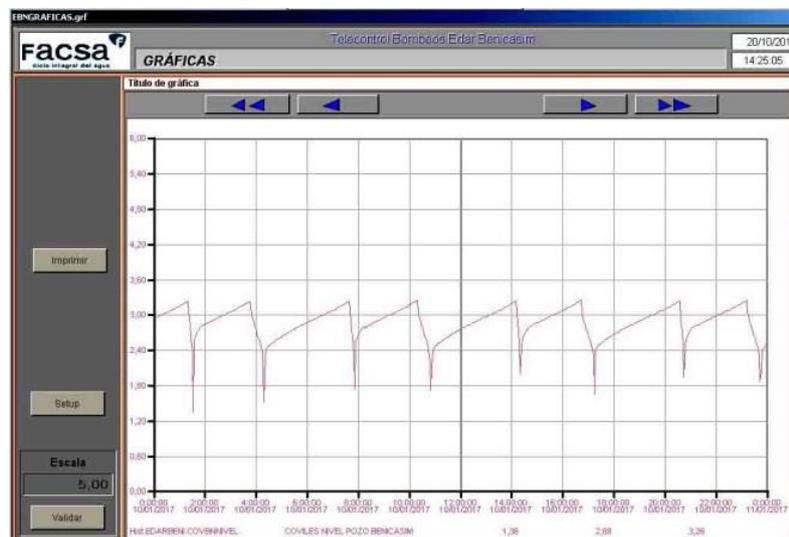


Figura 40. Funcionamiento horario de la bomba grande de Benicasim (Fuente: Facsa)

Por lo que en la parte de Benicasim el caudal extraído en 2017 según los datos del estudio realizado por Facsa es de 831.708 m³.

Con los datos ofrecidos de ambos lados se puede observar que en el lado de Castellón el caudal que se extrae de agua es mucho mayor que en el de

Benicasim, es 6 veces mayor. Esto es debido a la necesidad de extraer agua en la parte más al sur puesto que como se ha dicho anteriormente hay cultivos agrícolas y viviendas por lo que se es necesario extraer agua para que no se produzcan problemas e inundaciones.

Puesto que el lado que se encuentra en la zona de estudio es el lado de Benicasim se analizan los datos de esta parte. Según los datos del bombeo de agua del lado de Benicasim que aportan el proyecto de SEHUMED durante los años 1994 a 2004, y el estudio realizado por Facsa analizando los años de 2011 a 2017, se tiene una extracción media de agua de 1,04 hm³/año, con un pico en el año 2000 de hasta casi los 1,4 hm³/año y una reducción en los últimos años debido a la sentencia del Tribunal Supremo que decidió que se pararan las bombas.

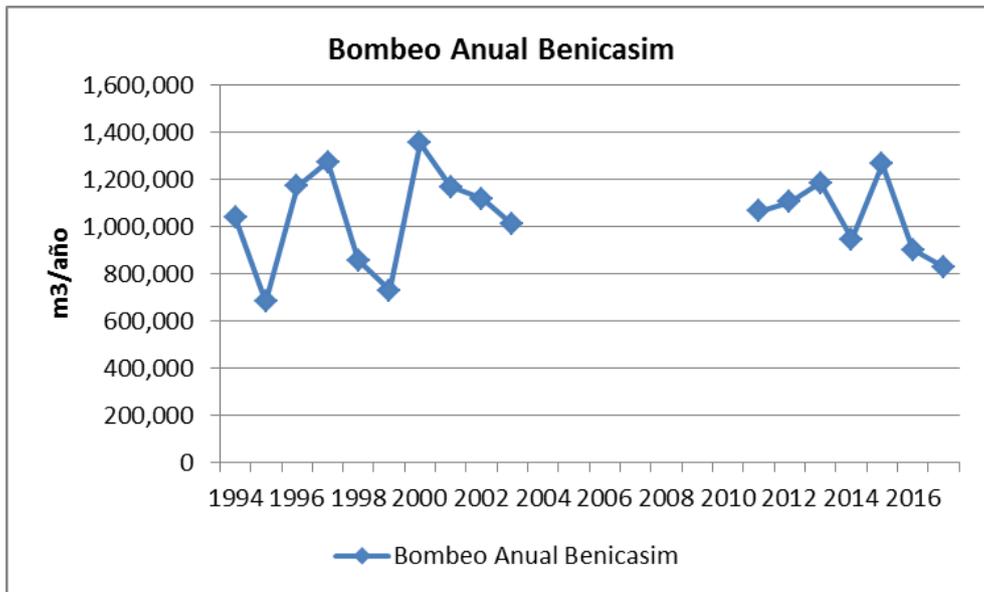


Figura 41. Bombeo anual Benicasim

Entrando en detalle en la serie mensual de Facsa entre los años 2015 y 2018, se estima que el caudal base es de 20 l/s, es decir, 0,61 hm³/año. El caudal de Benicasim entre el año 2016 y 2017 tiene un pico de hasta los 110 l/s, el cual fue disminuyendo hacia el año 2018 en el cual alcanza el caudal base de 20 l/s.

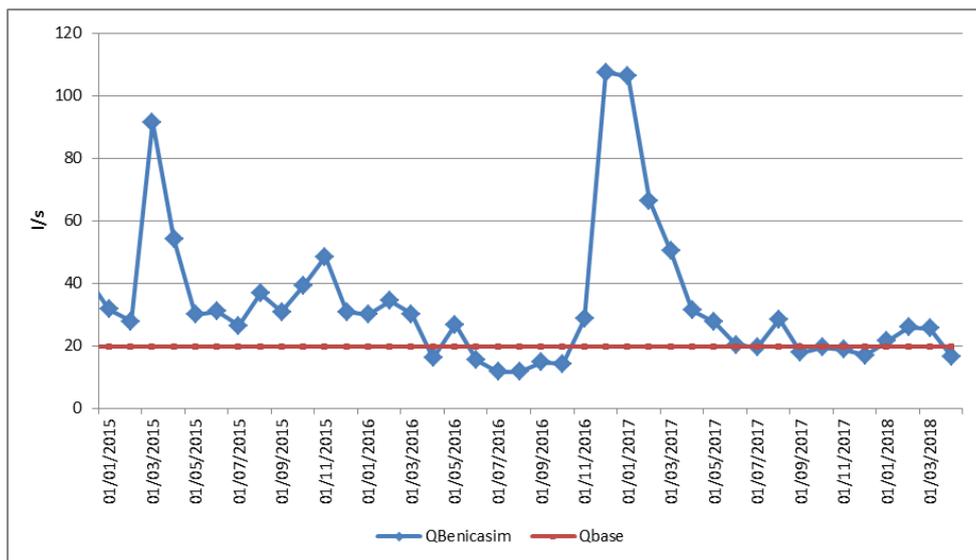


Figura 42. Serie mensual del caudal de Benicasim y el base entre 2015-2018

Por lo que en el momento de realizar el modelo matemático en el capítulo siguiente se pretenderá buscar que el sistema de drenaje extraiga 1,04 hm³/años, por lo que este dato determinará la calibración de otras propiedades como la conductividad eléctrica.

5.3 Conductividad eléctrica en los drenes

La composición fisicoquímica de las aguas es de suma importancia a la hora de establecer cuales son los posibles usos a que ese agua va a poder ser destinada; de este modo la calidad requerida para un agua que se va a emplear en uso agrícola no será la misma que para un agua que se destine a potabilización o para uso piscícola.

En definitiva, independientemente del uso al que se vaya a destinar el agua, se deben medir unos parámetros indiciadores de contaminación que nos dan idea de la calidad general del agua. En nuestro caso, el indicador que nos interesa estudiar es la conductividad y la salinidad para de esta forma conocer cómo se encuentra el agua del marjal y que puede estar pasando en la zona de estudio.

Puesto que las muestras de agua que se tomaron para conocer la conductividad del agua corresponden a la red de drenaje, en este apartado únicamente comentaremos de forma general los resultados destacando aquellos datos que pueden ser singulares.

Como principal característica hay que destacar la alta concentración de sales (salinidad) del agua, con valores de conductividad en el lado de Benicasim de 20.000-30.000 microS/cm y en el lado de Castellón de entre 1.700-2.7000 microS/cm. Teniendo en cuenta que la conductividad eléctrica del agua del mar es de 50.000 microS/cm, quiere decir que en el lado de Benicasim los niveles de conductividad son muy elevados.

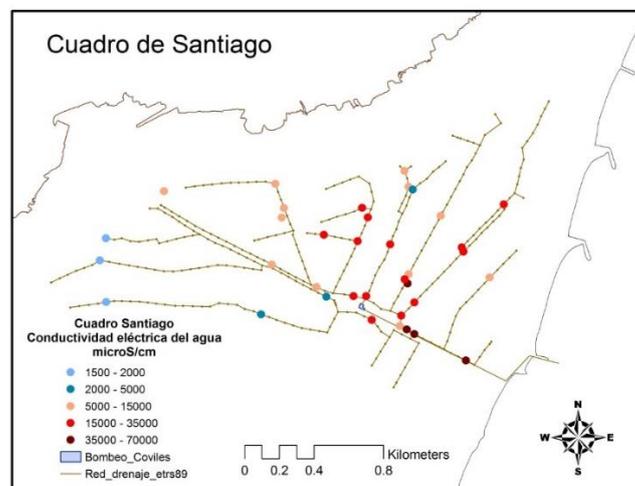


Figura 43. Conductividad eléctrica de los drenes

Este hecho puede hacernos sospechar de la existencia de un efecto de intrusión salina, en la que se produce una entrada de agua de mar hacia la zona de estudio, debido a la desaparición de un flujo natural de agua dulce desde tierra firme hasta el mar. Este flujo de descarga de agua dulce paraliza la cuña de intrusión salina y al desaparecer hace que la masa de agua salada penetre hacia el interior.

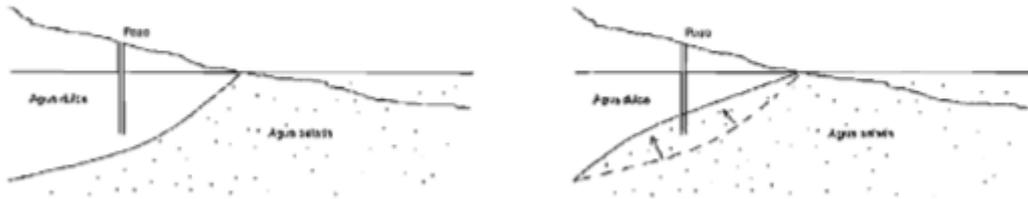


Figura 44. Proceso de intrusión salina (Fuente: SEHUMED)

Otros datos significativos son los elevadísimos valores de los parámetros de la concentración de cloruros y la conductividad eléctrica del agua. La conductividad eléctrica nos indica la capacidad que tiene la corriente eléctrica para circular a través de un fluido. La concentración de cloruros es indicativo de la cantidad de sales (NaCl, KCl, etc) disueltas en el agua.

Por lo que los análisis realizados muestran que el agua de la red de drenaje que recorre todo el área de estudio posee una elevada salinidad y conductividad, con valores que llegan a ser la mitad del agua marina. Este hecho es debido a que los bombeos de la zona de estudio están favoreciendo la penetración de agua del mar hacia el interior de la costa, este efecto conocido como intrusión salina puede ser altamente peligroso para el acuífero subyacente debido a la contaminación por sales. El hecho de bombear agua para bajar el nivel de la capa freática hace que la lámina de agua dulce que descarga de forma subterránea hacia el mar desaparezca permitiendo a la cuña salada penetrar hacia el interior.

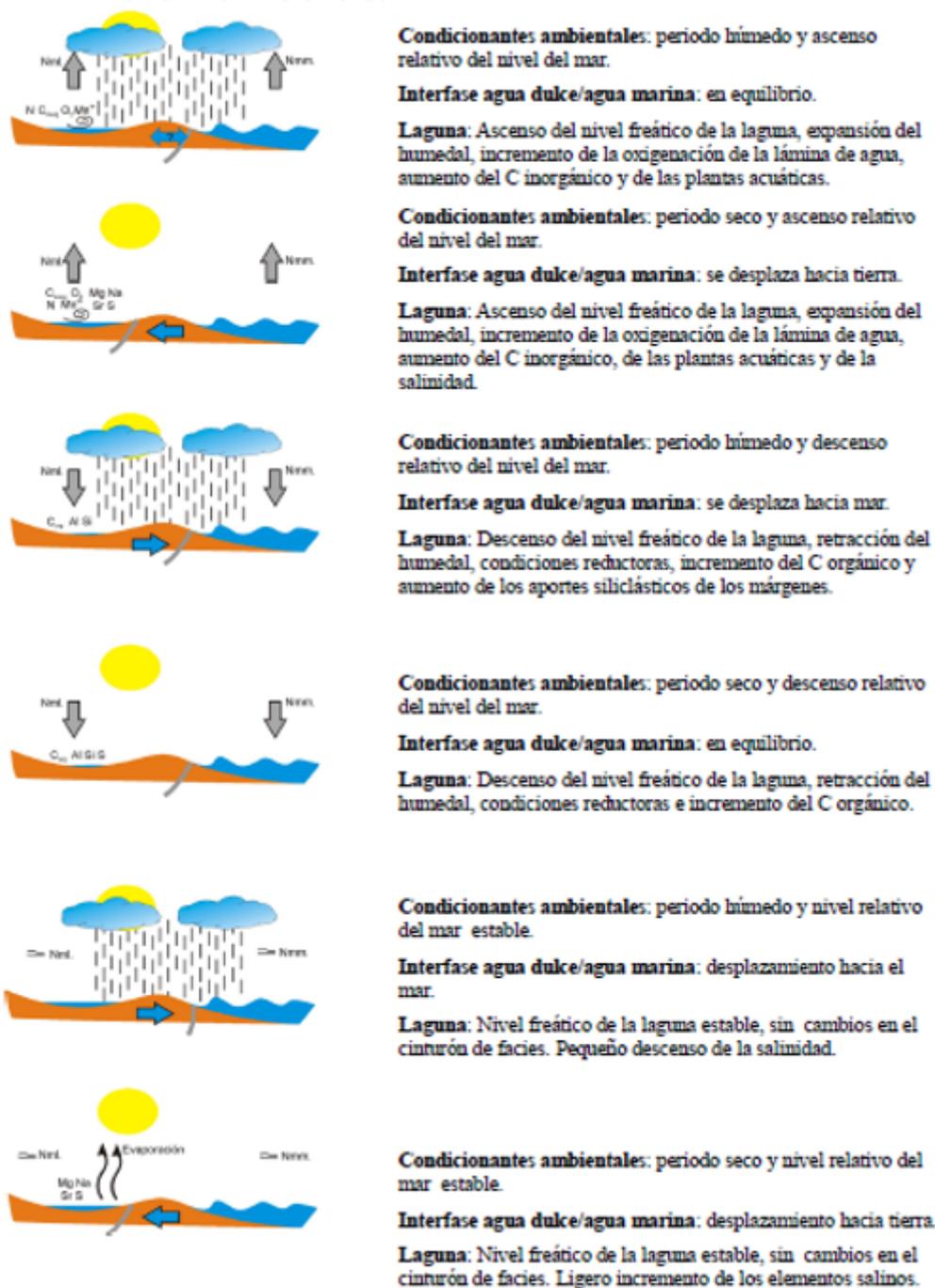


Figura 45. Modelo de funcionamiento de los humedales de la plana en relación a los cambios climáticos y del nivel del mar

Como se observa en la figura anterior, el funcionamiento del humedal según los cambios climáticos y del nivel del mar provoca que en ciertos casos, además de que los drenes provoquen de por sí la intrusión salina, que la intrusión del agua del mar hacia el interior avance de forma natural. En periodos en los que el nivel del mar aumenta, la intrusión salina es mayor, así como en periodos secos y con nivel freático estable también aumenta la intrusión salina.

6 Modelo matemático

6.1 Programa Model Muse

El modelo matemático consiste en la representación gráfica matemática de un fenómeno de estudio, con fines de representación o predicción de estudio. *(Universidad de la Salle, Programa de ingeniería ambiental y sanitaria Bogotá D.C., 2016)*

Para la realización del modelo matemático se ha utilizado el programa Model Muse, el cual fue desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos, con el fin de modela los flujos subterráneos por diferencias finitas simulando el comportamiento de los acuíferos.

Model Muse permite resolver problemas de flujo subterráneo en tres dimensiones de manera efectiva mediante un sistema gráfico con diversas ventanas, en donde el usuario puede introducir gran parte de la información asignando dentro del mismo modelo las propiedades y características del sistema que se quiere simular.

Esta herramienta también permite introducir, modificar, analizar y presentar datos de modelado de agua subterráneas, de tal manera que genera una hipótesis de flujo. *(USGS. U.S. Geological Survey, 2016).*

Este modelo necesita como datos de entrada la distribución local de la geología, recarga y cuerpos hídricos superficiales como así mismo el modelo digital 3D del terreno, y como variables de salida es capaz de calcular los niveles estáticos y el balance hídrico de la cuenca.

El programa Model Muse trabaja por medio de una grilla, creando celdas que contengan las características de cada una de las variables de entrada y a partir de estas realizar iteraciones calculando las variables de salida hasta obtener una discrepancia acorde a los objetivos.

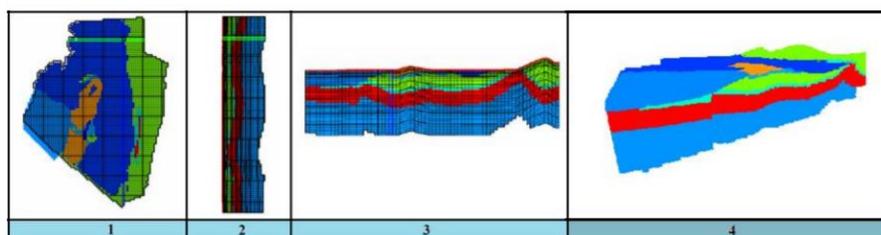


Figura 47. Geomallas del programa Model Muse

6.2 Régimen natural

La información recogida en anteriores capítulos permite que se pueda llevar a cabo la modelación del humedal Cuadro de Santiago, para de esta forma poder conocer mejor como se comportará dicho humedal en el caso de que los drenes que se encuentran en la zona de estudio fuesen desactivados.

Para comenzar la modelización lo primero que se define es el número de columnas, filas y longitud que tiene nuestro modelo. En nuestro caso, el número de columnas es de 65, el de filas de 46. Por otra parte, la rejilla de origen se encuentra en las coordenadas $X=754622,4$, $Y=4436836,7$, con un espesor del acuífero de 20 metros. De esta manera se consigue visualizar el mallado de nuestro modelo.

El siguiente paso es introducir en el modelo el componente geológico, para que las elevaciones del terreno sean las correctas. Por lo que el paso a seguir es importar el archivo que contiene el modelo digital de elevaciones de la zona de estudio, el cual fue proporcionado por el PNOA y era 5x5. Puesto que el modelo digital de elevaciones proporcionado tenía demasiada exactitud, se redujo la exactitud a 100x100 metros puesto que no es necesaria tanta precisión.

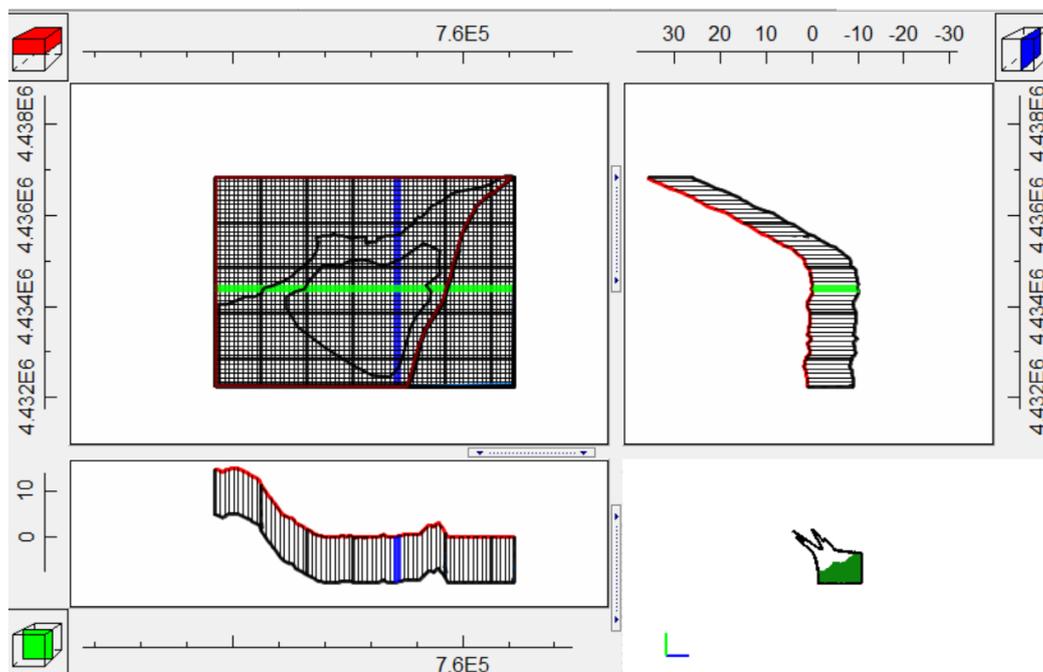


Figura 48. Geomallas con el Cuadro de Santiago (Fuente: Model Muse)

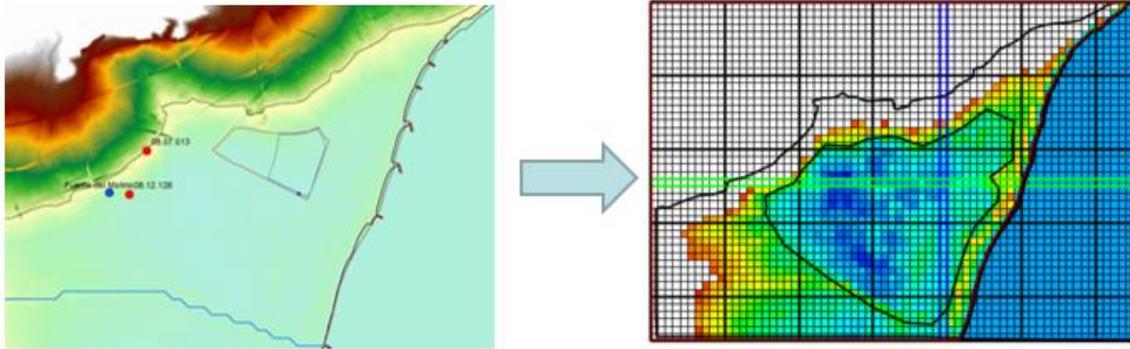


Figura 49. Modelo digital de elevaciones (Fuente: Model Muse)

A Model Muse hay que especificarle que el modelo digital de elevaciones tiene que estar sujeto al Model Top, es decir, a la parte superior del acuífero.

Una vez el modelo digital de elevaciones está junto al mallado previamente realizado se tienen que delimitar la zona de estudio del mar y la cuenca por lo que cada uno de los Shapefiles que tenemos de ambas zonas se importan. En este caso, se debe especificar que ambas zonas van de la parte superior del acuífero a la inferior.

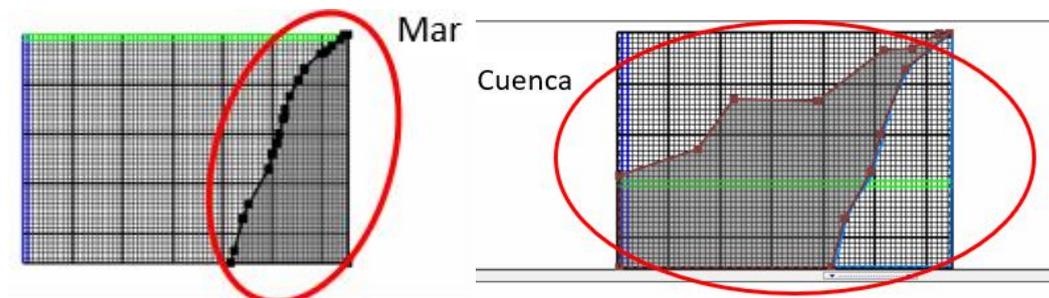


Figura 50. Capa del mar y de la cuenca (Fuente: Model Muse)

Una vez cargadas las dimensiones del mallado del modelo, las características del terreno y la delimitación de la zona de estudio, se procede a ajustar el espesor del acuífero y colocar los paquetes a simular que provocarán que la simulación sea efectiva. Puesto que lo que se quiere conseguir es la simulación del nivel piezométrico del acuífero, se activan los paquetes de Layer Property Flow Package, en el cual se especifican las propiedades del flujo, y el Time Variant Specified-Head Package en el que se define el nivel de inicio y fin.

Una vez especificadas estas propiedades se simula el modelo con el objetivo de calibrar el nivel freático natural del humedal para que en siguientes

simulaciones con el sistema de drenaje se pueda observar cuales son los cambios que se producen en el humedal.

En un primer caso, se procede a simular el modelo en régimen estacionario con 0,5 m sobre el nivel del mar, en el que se observa que toda la zona interior se inunda y se produce intrusión salina y afloramiento en superficie del agua.

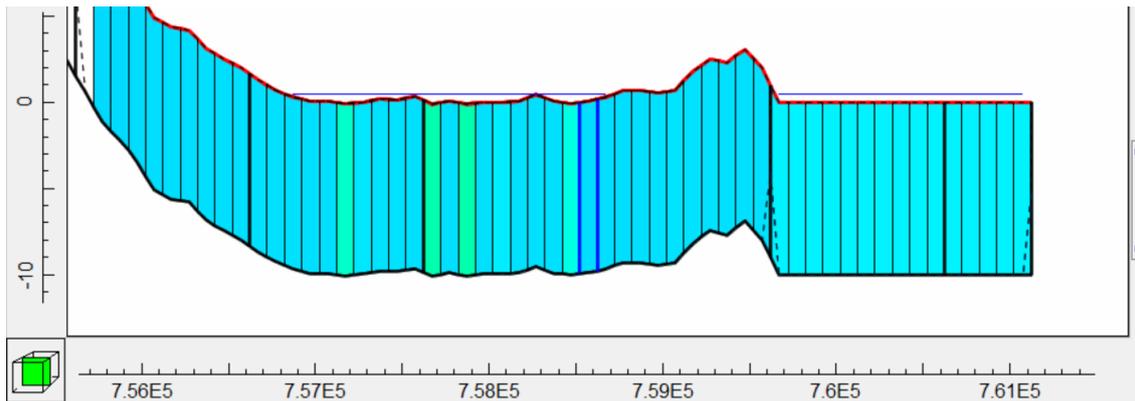


Figura 51. Simulación con 0,5 m sobre el nivel de mar (Fuente: Model Muse)

Una vez realizada la primera simulación que sirve de calibración del modelo, se simula con un nivel freático de 0,1 m sobre el nivel del mar. En este caso, el afloramiento del agua es en zonas específicas del Cuadro de Santiago.

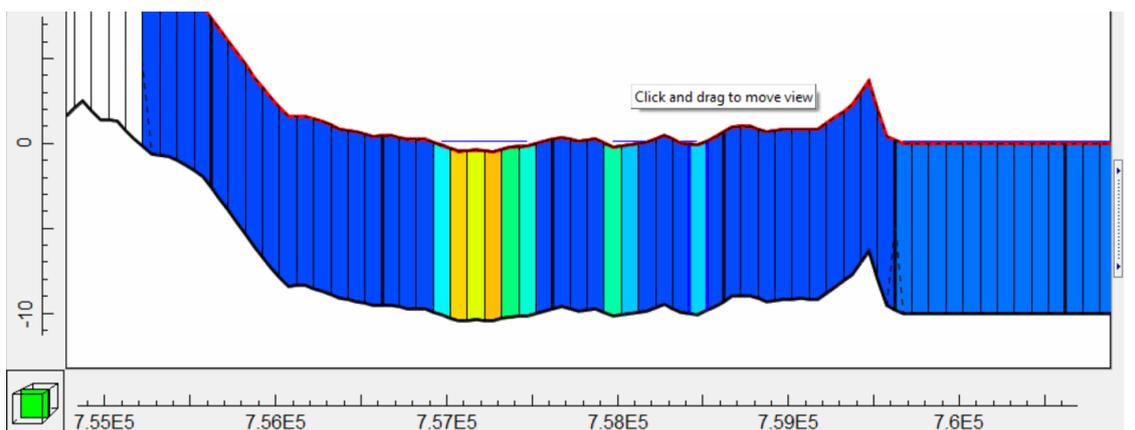


Figura 52. Simulación con 0,1 m sobre el nivel de mar (Fuente: Model Muse)

6.3 Régimen actual

Puesto que el régimen actual en el que se encuentra el Cuadro de Santiago se encuentra modificado por el sistema de drenaje que deseca el humedal, para una correcta simulación del modelo es necesario a partir de la simulación en régimen natural añadir los drenes activos y comprobar cómo se comporta el modelo.

El procedimiento que se realiza para la simulación con drenes activos comienza activando los paquetes que proporcionarán las propiedades a cada uno de los elementos que se introducen en el modelo. Los paquetes que se introducen son el Layer Property Flow package, el Seawater Intrusion package, el Drain Package, el General-Head Boundary package y el Recharge package, con los que cada uno de los Shapefiles que introduzcamos de las zonas del humedal obtendrán las propiedades.

Por una parte, se introducen los Shapefiles del acuífero en dos partes, el acuífero del norte que se corresponde a lado de Benicasim, y el acuífero de sur que se corresponde al lado de Castellón. Las dos partes tienen las mismas propiedades y se introducen de la misma forma, de la parte superior del acuífero a la parte inferior que se encuentra a 2 m. A ambas capas se les confiere la propiedad de recarga mediante el paquete de Recharge package puesto que en el acuífero se produce una recarga de lluvia de 70 mm/años, es decir, de 1 hm³/año que es el dato que nos sirve para calibrar el modelo.

Seguidamente se introduce el Shapefile que define la parte del fondo del mar. Esta capa se coloca a 2 m de profundidad también y no tiene ningún tipo de propiedad específica de Model Muse.

El siguiente paso es introducir la parte activa del mar, la cual se introduce en dos capas diferentes que separan la parte norte de la parte sur. Estas capas van de la parte superior a la parte inferior también y en este caso la densidad también es de 1. En cuanto a los paquetes, en este caso se activa el paquete de General-Head Boundary package, el cual se utiliza para simular el flujo entre una celda y una fuente externa de nivel constante. En este paquete se precisa definir la conductancia, que es un valor que necesita una calibración.

Por último, se introducen los drenes que se encuentran separados en 3 zonas: drenes del marjal de Benicasim, drenes de Benicasim costa y drenes

de Castellón. En los drenes las características son las mismas y se encuentran a una profundidad de 1,3 m, y en estos se activa el paquete de Drain package para que confiera las características de los drenes.

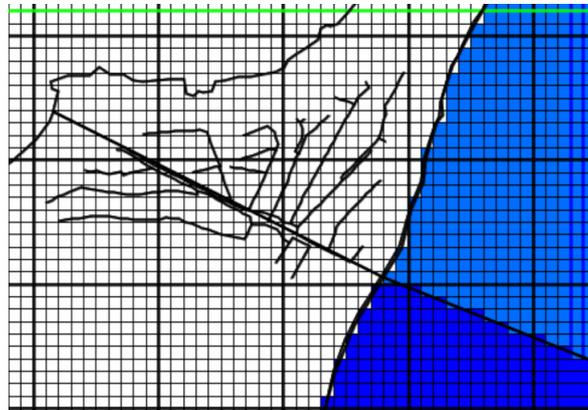


Figura 53. Ubicación de los drenes en la simulación (Fuente: Model Muse)

Una vez todos los parámetros están incluidos en el modelo se procede a la simulación y al análisis de los resultados. Los resultados de la simulación nos indica que las salidas de los drenes de Castellón son 2 veces superiores a las salidas de Benicasim. Por otra parte, el reparto de la recarga de lluvia de 70 mm/años es también 2 veces superior en la parte de los drenes de Castellón.

Puesto que el objetivo es que los drenes de Benicasim drenen un caudal de 1,04 hm³/año, se busca una conductancia que proporcione dicho valor. La conductividad que finalmente supone que se drenen 1,04 hm³/año en el humedal por parte de los drenes es de $k_x=k_y= 0,0024$ m/s, lo que quiere decir que el valor de la conductancia es elevado puesto que la conductancia es directamente proporcional a la conductividad ($C = K \times L$), y además en el proyecto de SEHUMED los valores de la conductividad eran de 0,0006 a 0,0006 m/s, y en Benicasim de 0,0003 m/s.

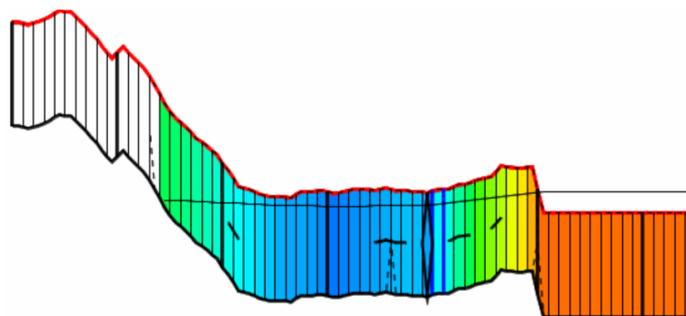


Figura 54. Nivel con el régimen actual (Fuente: Model Muse)

Con la activación de los drenes, los niveles en el marjal de Benicasim son de -1,2 a -1,3 m de profundidad, por lo que no hay afloramientos ni en la parte de Benicasim ni en la de Castellón.

En la siguiente figura se muestra el balance hídrico que ha aportado la simulación, en el cual las entradas y las salidas son las mismas y tienen un valor de 2,93 hm³/año. Las entradas se dividen en 3 partes: la lluvia que es de 0,99 hm³/año, la intrusión de Benicasim que es de 0,77 hm³/año y la intrusión de Castellón que es de 1,18 hm³/año, por esto se separaba anteriormente entre la parte norte del mar y la parte sur igualmente que el acuífero de la parte norte y de la parte sur ya que de esta forma se puede conocer la intrusión por separado en cada una de las partes y llegar a una conclusión más concisa.

En cuanto a las salidas, puesto que hay un balance también son de 2,93 hm³/año, que están divididas según la colocación de los drenes. Puesto que el objetivo era conseguir que el drenaje de los drenes de la parte de Benicasim fuera de 1,04 hm³/año, estos se han conseguido con un drenaje en los drenes de la parte del marjal de 0,38 hm³/año y de 0,65 hm³/año en la parte de Benicasim costa, con unas salidas al mar muy pequeñas de simplemente 0,01 hm³/año puesto que los drenes no permiten la salida de prácticamente nada de agua al mar. En la zona de Castellón el drenaje subterráneo de los drenes es de 1,89 hm³/año y el superficial es mayor y es de 4,11 hm³/año.

	hm ³ /año
Entradas	2.93
Lluvia	0.99
Intrusión Benicasim	0.77
Intrusión Castellón	1.18
Salidas	2.93
<u>Subt drenes Benicasim</u>	1.04
<u>Subt drenes Benicasim marjal</u>	0.38
<u>Subt drenes Benicasim costa</u>	0.65
<u>Salidas mar Benicasim</u>	0.01
Drenes Castellón *	6.00
Subt drenes Castellón	1.89
Superf drenes Castellón	4.11

Tabla 2. Entradas y salidas al humedal con los drenes activos

6.4 Desactivación de los drenes

La finalidad del estudio es conocer el comportamiento del humedal sin el funcionamiento de los drenes que desecan dicha zona. Por lo que el siguiente paso en el modelo matemático es la desactivación de los drenes interiores de Benicasim, que son los que bajo la sentencia del Tribunal Supremo deben ser inhabilitados para de esta forma recuperar el humedal del Cuadro de Santiago.

Por lo que provocando la desactivación de los drenes interiores de Benicasim en el modelo los datos de las entradas y salidas cambia.

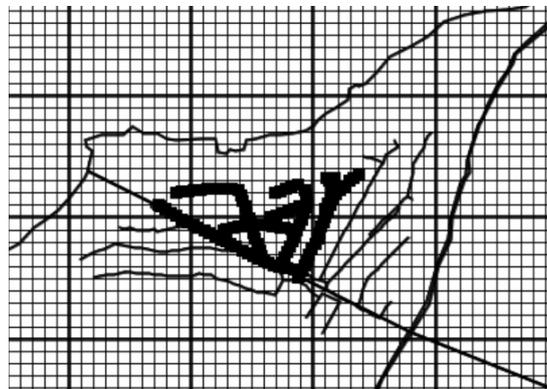


Figura 55. Drenes que se desactivan de la parte de Benicasim interior o marjal (Fuente: Model Muse)

Por una parte, las entradas cambian mínimamente puesto que la lluvia es la misma habiendo drenes que sin ellos, pero en el caso de la intrusión salina los drenes al no estar activos las entradas son menores puesto que el hecho de que los drenes estén activados favorecía a la intrusión del mar en el humedal. Pese al cambio de entradas debido a la intrusión salina, sigue siendo la misma situación puesto que con drenes activos entraban 2,93 hm³/año y con drenes inactivos entran 2,92 hm³/año, con una diferencia de -0,02 hm³/año.

Por otra parte, las salidas cambian considerablemente al desactivar los drenes interiores puesto que los 0,38 hm³/año que extraían los drenes interiores del marjal ya no los extrae, por lo que los drenes de la parte de Benicasim costa que no están desactivados y siguen funcionando pasan de extraer 0,65 hm³/año a bombear 0,80 hm³/año. Así que en la parte de Benicasim que anteriormente se extraían 1,04 hm³/año ahora con la desactivación se extraen 0,23 hm³/año menos, es decir, que se extraen

0,80 hm³/año en la parte de Benicasim lo cual es un 23% menos que en la situación en la que todos los drenes están activados.

En la parte de Castellón también cambian los valores puesto que parte del agua que deja de bombear los drenes ahora desactivados la extraen los otros drenes. En este caso, se pasa de extraer 1,89 hm³/año a extraer 2,10 hm³/años, es decir, que hay un aumento de 0,21 hm³/año lo cual es un 3,6% más que en la situación en la que todos los drenes están activados.

	dren activo hm ³ /año	sin dren hm ³ /año	Diferencia hm ³ /año	
Entradas	2.93	2.92	-0.02	
Lluvia	0.99	0.99	0.00	
Intrusión Benicasim	0.77	0.75	-0.01	
Intrusión Castellón	1.18	1.17	0.00	
Salidas	2.93	2.92	-0.02	
Subt drenes Benicasim	1.04	0.80	-0.23	-23%
Subt drenes Benicasim marjal	0.38	0.00	-0.38	
Subt drenes Benicasim costa	0.65	0.80	0.15	
Salidas mar Benicasim	0.01	0.01	0.00	
Drenes Castellón *	6.00	6.21	0.21	3.6%
Subt drenes Castellón	1.89	2.10	0.21	
Superf drenes Castellón	4.11	4.11	0.00	

Tabla 3. Entradas y salidas al humedal con los drenes de la parte interior o marjal desactivados

Por lo que se produce un aumento del nivel piezométrico producido por la desactivación de los drenes del marjal de Benicasim debido a la diferencia de niveles que se produce en la situación natural y en la situación real.

La desactivación produce que en la parte en la que se encuentran las Bombas de Coviles suba el nivel piezométrico alrededor de 0,10 m, lo que produce que una pequeña lámina de agua aflore a la superficie pero sin tener unas consecuencias muy graves. Analizando las zonas interiores al marjal, el ascenso de los niveles sigue siendo muy pequeño.

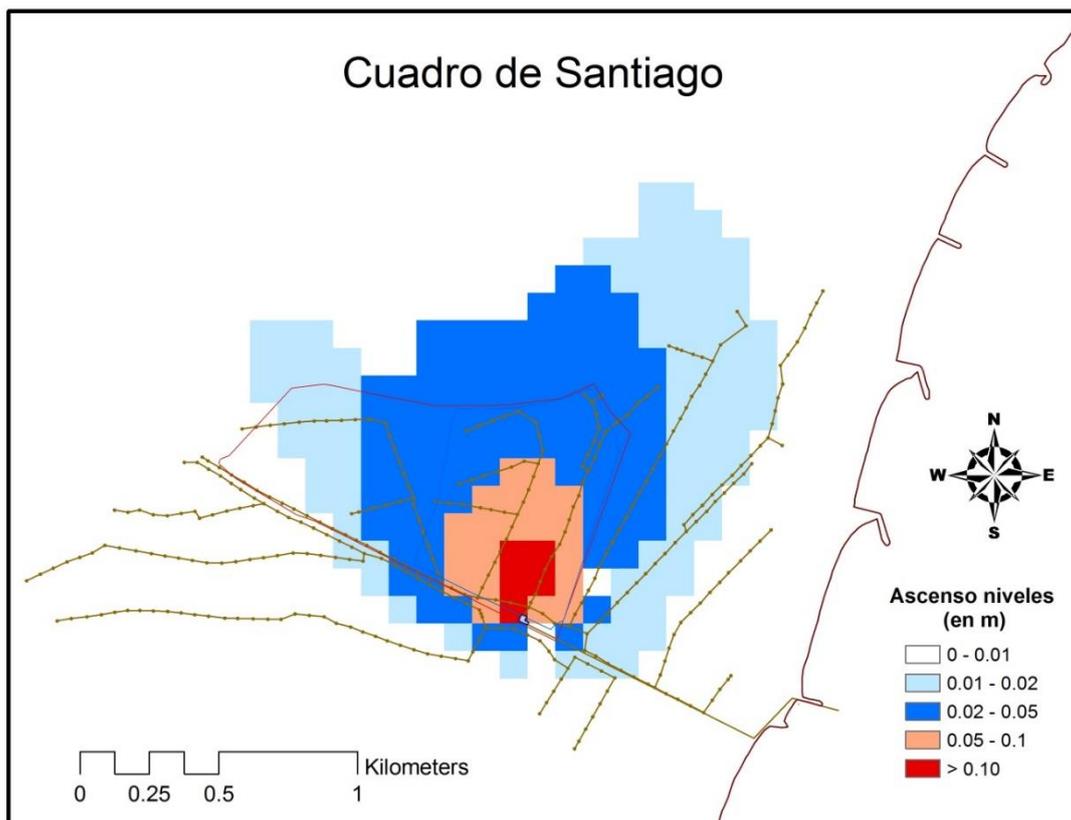


Figura 56. Ascenso de los niveles de nivel piezométrico provocados por la desactivación de los drenes

Puesto que el objetivo era conocer cómo funciona el humedal del Cuadro de Santiago y ver el efecto que tendría una desactivación exclusiva de los drenes dentro del humedal, se puede comprobar que el efecto que produce no es problemático siempre y cuando sigan funcionando los drenes laterales de Benicasim costa y de Castellón, puesto que si estos dejaran de extraer agua sí que se producirían problemas importantes en la zona.

6.5 Análisis de sensibilidad a la conductancia de los drenes

La conductancia de los drenes se refiere a la capacidad de transporte de la partícula de agua hacia el dren, con una conductancia infinita significaría que no existe esfuerzo alguno, pero en el caso de que estuviera rodeado de arcillas o limos que a lo largo de los años se han ido consolidando y depositando es posible que se necesitara una altura suficiente para poder pasar entre las partículas del material.

Para conocer la conductancia y realizar un análisis de sensibilidad se ha ido reduciendo la conductancia en el modelo y simulando, es decir, se ha ido dificultando la salida del agua, lo que significa que el agua necesitaría un nivel mayor para poder vencer y salir.

El primer caso que se simula es con una conductancia de $0,0001 \text{ m/s}$, es decir, $8,64 \text{ m}^2/\text{día}$, lo que teniendo en cuenta que en el estudio de Benicasim los datos de la conductancia eran de $15,1 \text{ m}^2/\text{día}$ se está realizando una simulación con una conductancia baja. A la conclusión que se llega con este valor de conductancia es que no hay afloramientos en el marjal ya que los niveles son de $-1,0 \text{ m}$, en cambio en la zona de Castellón si hay afloramientos.

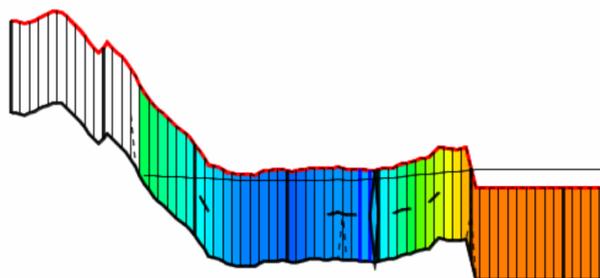
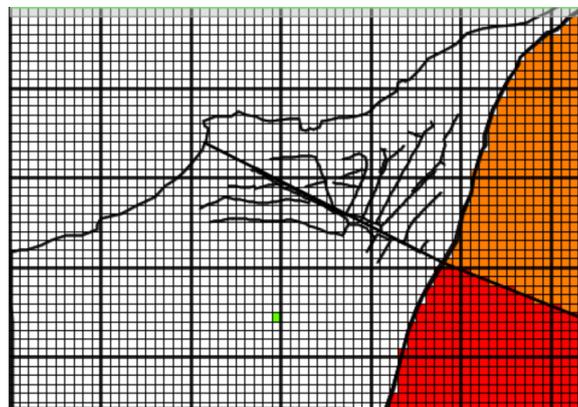


Figura 57. Simulación con una conductancia de 0.0001 m/s (Fuente: Model Muse)

El siguiente valor de conductancia con el que se simula es todavía más inferior ya que es un valor de $0,00001 \text{ m/s}$, es decir, $0,864 \text{ m}^2/\text{día}$. Con dicho valor los afloramientos de agua en la zona de Castellón comienzan a visualizarse, pero los niveles en el marjal de Benicasim siguen siendo de $-0,5 \text{ m}$.

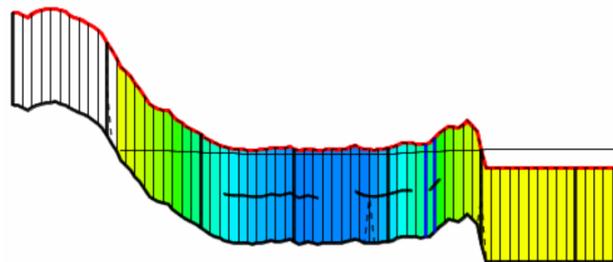
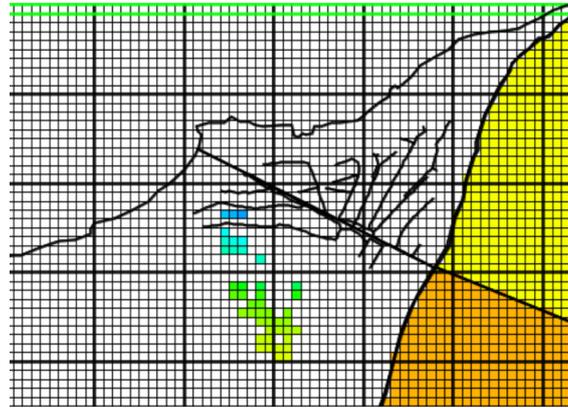


Figura 58. Simulación con una conductancia de 0.00001 m/s (Fuente: Model Muse)

Y por último, con una conductancia todavía menor de $0,000001 \text{ m/s}$, es decir, $0,0864 \text{ m}^2/\text{día}$, los afloramientos de agua en la zona de Castellón son ya bastante elevados en bastantes zonas y en la marjal de Benicasim en ciertas zonas también se producen afloramientos a la superficie. Los niveles en el marjal en este caso varían entre $-0,2$ y $-0,4 \text{ m}$ por lo que como se puede observar en la figura hay zona en las que el agua sale a la superficie.

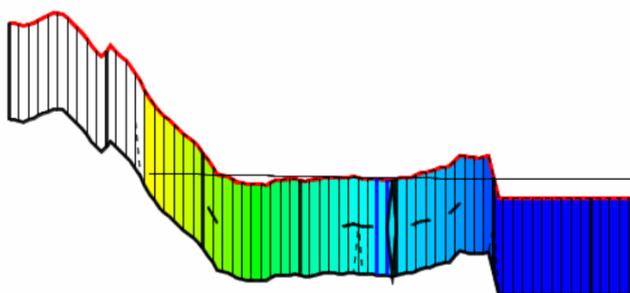
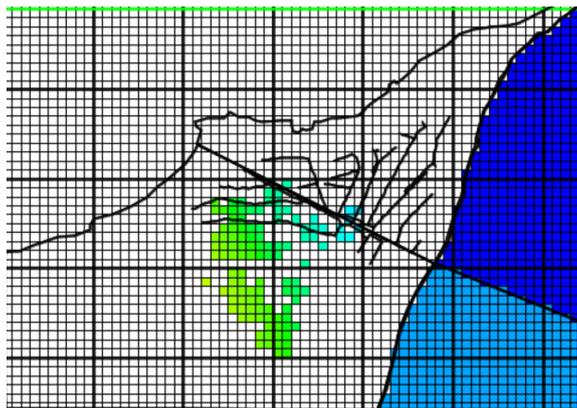


Figura 59. Simulación con una conductancia de 0.000001 m/s (Fuente: Model Muse)

A partir de estas simulaciones a la conclusión que se llega es que se piensa que la conductancia tiene que ser muy alta ya que con los drenes en funcionamiento si la conductancia fuera como en las simulaciones de baja significaría que el agua puede salir a la superficie. Por lo que tiene que tener un valor elevado ya que con los drenes activados no se producen afloramientos a la superficie.

6.6 Valores y funciones del humedal.

Una vez conocido el comportamiento del humedal a partir de las simulaciones, los principales valores y funciones del humedal son:

-Descarga de aguas subterráneas: esta zona húmeda constituye el punto de encuentro del agua subterránea con la superficie. Por ello tiene un importante papel como recurso en el mantenimiento de las condiciones locales de las aguas subterráneas, fundamentalmente en lo que se refiere a abastecimiento de agua potable y para la agricultura.

-Control de inundaciones: esta función hace referencia al papel que pueden jugar estos humedales como reguladores de fuertes precipitaciones y crecidas de los ríos; es decir, actúan a modo de embalses donde se detiene, retiene y disminuye la velocidad del flujo, amortiguando y ralentizando de esta manera el pido de crecida de la inundación.

-Regulador de la calidad de aguas: esta función hace referencia al efecto de balsa de decantación que realiza el humedal respecto a los ríos y al mar, impidiendo que muchos contaminantes que van entre los sedimentos puedan llegar a un río aguas abajo o al mar. La efectividad de esta función se incrementa con la presencia de vegetación, que contribuye a atrapar los sedimentos.

7 Conclusiones

El objetivo de este estudio era conocer cómo funciona el humedal Cuadro de Santiago y analizar qué efecto tendría una actuación exclusiva dentro de esta zona.

Desde los años 70 se ha estado desecando el humedal mediante un sistema de drenaje que bombeaba el agua hacia el mar. Esto ha provocado que en los alrededores del humedal se realizaran proyectos urbanísticos ya que en principio no habrían problemas relacionados al afloramiento de agua ni a posibles inundaciones.

Diferentes grupos ecologistas como Acció Ecologista-Ágro o Arca Ibérica denunciaron la desecación ilegal del marjal del Cuadro de Santiago, que pese a su estado de deterioro presenta una lámina de agua más o menos permanente condicionada por las oscilaciones del nivel freático provocadas por la desecación. Conociéndose lo anterior, en 2002 se aprobó la realización de un proyecto de urbanización junto con un campo de golf en la zona del propio humedal alegando que el Cuadro de Santiago no se encontraba incluido en el Catálogo de Zonas Húmedas de la Generalitat Valenciana. Finalmente, este proyecto nunca será llevado a cabo y el humedal será incluido en el Catálogo de Zonas Húmedas.

Por lo que este estudio tiene una gran importancia ya que se pretende conocer el comportamiento del humedal cuando se proceda a la desactivación del sistema de drenaje.

Partiendo de los proyectos realizados por el SEHUMED y CIOPU, se conoce que la geología de la zona está predominada por los niveles de turbas, lo que tiene sentido teniendo en cuenta que más de la mitad de los humedales del mundo son turberas que se componen por material vegetal acumulado durante miles de años sin descomponerse del todo por el ambiente saturado.

Por otra parte, para llevar a cabo las simulaciones mediante la herramienta Model Muse, era necesario conocer el nivel freático de la zona de estudio en condiciones naturales. Basándose en la información de la red de piezómetros y las isolíneas de la Confederación Hidrográfica del Júcar no se pudo llegar a ninguna conclusión ya que los datos no tienen la suficiente precisión en esta zona. Por lo que a partir del modelo digital de elevaciones

se realizaron mediante ArcGis diferentes imágenes en las que se observa cual sería la superficie inundada en las cotas de 5, 3, 1, 0,5, 0,2 y 0 m.s.n.m. Con lo que se llega a la conclusión de que el nivel freático está entre 0 y 0,2 m.s.n.m.

Para finalizar la recopilación y análisis de información se lleva a cabo el modelo conceptual, en el cual se integra toda la información geológica, piezométrica previamente obtenida con la finalidad de conocer el funcionamiento del sistema. A la que se le añade datos como el funcionamiento de la red de drenes, la capacidad de bombeo y sus intervalos para de esta forma llegar a conocer mejor la zona de estudio. Analizando la información se llega a la conclusión de que en el Cuadro de Santiago se extrae una media de agua de 1,04 hm³/año. Además, esta agua tiene una elevada conductividad eléctrica debido a la intrusión salina que está provocando el bombeo de agua, con valores en el lado de Benicasim de 20.000-30.000 microS/cm y en el lado de Castellón de entre 1.700-2.700 microS/cm, teniendo en cuenta que la conductividad eléctrica del agua del mar es de 50.000 microS/cm quiere decir que los datos de conductividad son muy altos.

Finalmente, se realizó mediante la herramienta Model Muse las simulaciones para conocer el comportamiento del humedal con la desactivación de los drenes interiores o del marjal de Benicasim. A parte de todos los datos expuestos anteriormente también se introdujo en el modelo una recarga de 70 mm/año.

Con las simulaciones realizadas y analizadas se llega a la conclusión de que la desactivación de los drenes de dentro del marjal tiene consecuencias, pero no son muy graves ya que los niveles de agua aflorarían como mucho 0,1 m en la parte en la que se encuentra el bombeo de Coviles, y en la gran parte del humedal aflorarían niveles de entre 0,05 y 0,02 m. Por lo que no se producirían problemas de inundaciones en los alrededores del humedal del Cuadro de Santiago siempre y cuando no se desactivaran los drenes de la parte de Castellón y de la parte de la costa de Benicasim.

Como solución para recuperar el humedal se propone la opción de remodelar la topografía para poder habilitar un vaso permanente de inundación y recrear unas charcas salobre permanentes con el objetivo de fomentar la instalación de fauna de humedal.

8 Líneas futuras

El marjal del Cuadro de Santiago es un espacio considerado como suelo no urbanizable por tratarse de una zona húmeda que se acoge a la Ley de Aguas que protege genéricamente a todas las zonas húmedas del territorio español. Además, también se beneficia de los principios protectores con los que el Convenio Internacional sobre Zonas Húmedas o de Ramsar ampara a los humedales. Por lo que el primer paso y el cual se efectuará en un futuro cercano es su inclusión en el Catálogo de Zonas Húmedas de la Comunidad Valencia, para que de esta forma el marjal pueda recuperar sus valores naturales.

En cuanto a las actuaciones que se deberían realizar para la restauración del humedal, sería necesario realizar una adecuación del sitio para prepararlo para las acciones que después quieran realizarse. Esto consiste en: la retirada de basuras o escombros, vallado o restricción de entrada en la zona.



Figura 60. Escombros ubicados en el Cuadro de Santiago

La primera actuación una vez retirados los escombros que se han colocado en la zona consistiría en retirar los aportes de sedimentos, para así rebajar la cota de los terrenos del Cuadro de Santiago y aumentar la superficie susceptible de inundación permitiendo la regulación de las aguas precipitadas sobre el humedal. Una opción interesante podría ser

remodelar la topografía para poder habilitar un vaso permanente de inundación y recrear unas charcas con el objetivo de fomentar la instalación de fauna de humedal

Por lo que la creación de dos lagunas con lámina libre de agua con carácter permanente sometidas a fluctuaciones del nivel freático. Ambas se situarían en la parte central del Cuadro de Santiago ya que se trata de la zona más deprimida ya que en las zonas con mayor valor ecológico no sería adecuado modificarlas. La máxima excavación sería en el centro de las lagunas y a una profundidad de 1,8 m, para que de esta forma se puedan formar las lagunas.



Figura 61. Plano de colocación de las lagunas (Fuente: SEHUMED)

Por otra parte, debido a las características de los alrededores del marjal en cuanto a su calidad estético-paisajística, sería necesaria la instalación de una pantalla vegetal perimetral para aislarla acústica y visualmente del exterior. Debido al bajo relieve del área se consideraría necesario realizar algunos tramos sobreelevados para poder ocultar ciertos elementos como construcciones o instalaciones.

Por último, para finalizar la restauración se debería proceder a la replantación vegetal del humedal. En primer caso, la prioridad sería la de preservar la diversidad vegetal existente y potenciar la restauración vegetal natural con actuaciones puntuales que favorezcan a determinadas especies y comunidades vegetales. Por lo que la eliminación de las especies alóctonas y plantar especies representativas de los ecosistemas que hoy en

día existen en el marjal, y de las comunidades vegetales que existieron o podrían existir si la intervención humana no hubiera degradado la vegetación. Por otra parte, en cuanto a la recuperación de la fauna no se llevarían a cabo acciones puesto que si el estado de conservación es bueno la fauna se instalará de nuevo en el humedal. Pese a esto sería adecuado llevar un control de la calidad de las aguas y la evolución de la fauna para en un futuro poder evaluar y llevar a cabo actividades que favorezcan la reintegración de nuevas especies.

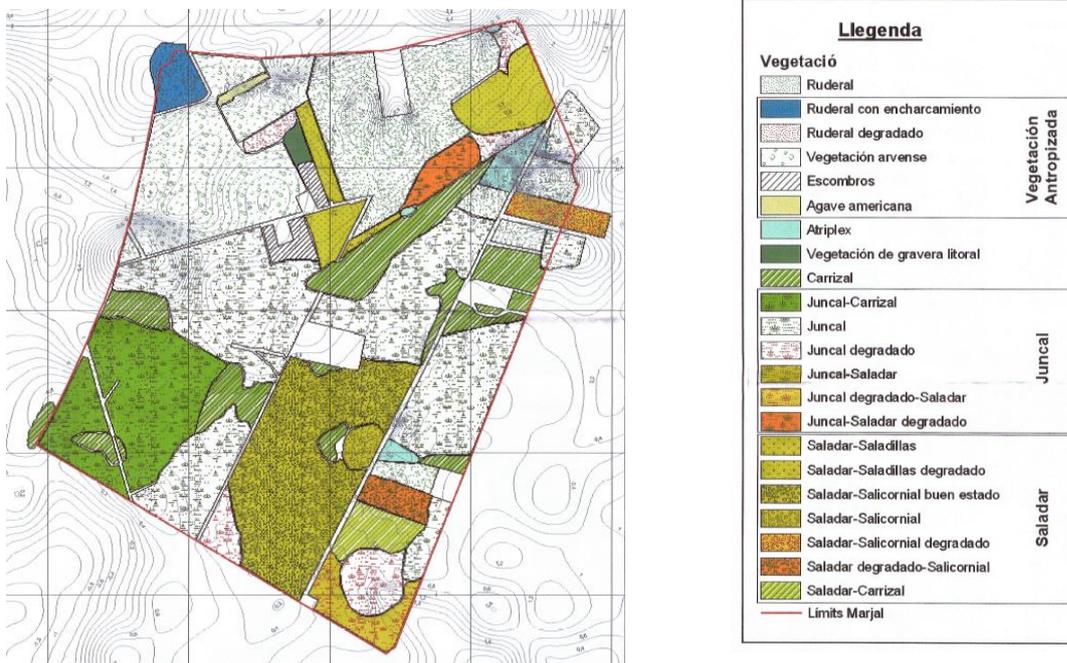


Figura 62. Plano de la vegetación (Fuente: SEHUMED)

9 Referencias

SEHUMED, 2004. *“Anteproyecto para la restauración del marjal Cuadro de Santiago (Benicassim, Castellón)”*

Tesis Doctoral-José Francisco Mediato Arribas, 2016. *“Oscilaciones del nivel del mar desde el Pleistoceno superior en el sector costero Sagunto-Benicassim (Valencia-Castellón)”*

CIOPU, 2010. *“Encauzamiento del barranco de la Parreta y estación de bombeo de aguas pluviales en el Cuadro de Santiago. Benicàssim (Castellón)”*

CHJ, Red de piezometría

USGS. U.S. Geological Survey, 2016

Manual de restauración de humedales mediterráneos, 2007

Ramsar, 2015. *“Las turberas, el cambio climático y el uso racional: implicaciones para la Convención de Ramsar”*

Acció Ecologista-Agró, 2006. *“Recurso contencioso marjal Cuadro de Santiago”*

EOI, 2006. *“Traducción resumida del manual PMWIN 4.1.”*

Universidad de la Salle, Programa de ingeniería ambiental y sanitaria Bogotá D.C., 2016. *“Evaluación del modelo hidrogeológico conceptual del bloque norte de la ciudad de Bogotá, a partir de las herramientas Visual Modflow y Sistemas de Flujo de Tóth”*

Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), 2017. *Modelo Digital de Elevaciones*

CHJ, 2015. *“Ciclo de planificación hidrológica 2015-2021”*

Facsa, 2017. *Funcionamiento de las bombas Coviles del Cuadro de Santiago*