

Títol del treball:

Caracterització geològica, geofísica i hidrogeològica de zones morfològicament deprimides associades a estructures tectòniques de la depressió de l'Alt Empordà, entre Figueres i el riu Fluvià

Estudiant: Albert Gómez Villarroya Grau en Ciències Ambientals

Correu electrònic: albert.gvillarroya@gmail.com

Tutor: David Soler Hernández

Empresa / institució:

GEOCAMB, Unitat Geodinàmica Externa, Dept. Ciències Ambientals UdG

Vistiplau tutor (i cotutor*):

Nom del tutor: David Soler Hernández

Empresa / institució: GEOCAMB, Unitat Geodinàmica Externa, Dept. Ciències Ambientals, UdG

Correu(s) electrònic(s): david.soler@udg.edu

ÍNDIX

1. Resum / Resumen / Abstract.....	2
2. Objectius / Objectives.....	5
3. Introducció.....	6
3.1 Els estanys de Siurana	6
3.2 Característiques dels diversos estanys	7
3.3 Geologia de la depressió de l'Empordà	8
3.4 Geologia de l'àrea dels estanys de Siurana	9
3.5 Hidrogeologia de l'àrea d'estudi	11
4. Metodologia.....	11
4.1 Recopilació d'informació geològica i geotècnica	12
4.2 Geologia de camp	13
4.3 Morfometria dels estanys	13
4.4 Prospecció geofísica	13
4.5 Hidrogeologia	15
5. Resultats.....	17
5.1 Relació espacial i temporal entre els materials geològics i els estanys	17
5.2 Caracterització geotècnica dels materials	18
5.3 Morfometria dels estanys i relació amb les estructures tectòniques en superfície	20
5.4 Perfils de tomografia elèctrica	22
5.5 Perfils de refracció sísmica	26
5.6 Piezometria	27
5.7 Hidroquímica	29
6. Discussió.....	30
6.1 Síntesi de l'estructura interior comuna	30
6.2 Edat de formació i rebliment	31
6.3 Funcionament hidrogeològic actual	32
6.4 Relació dels estanys amb l'estructura geològica i els fluxos d'aigua regional	32
6.5 Model de formació i evolució dels estanys estudiats	33
7. Conclusions.....	34
8. Bibliografia.....	36

1. RESUM / RESUMEN / ABSTRACT

Resum

En aquest treball s'han estudiat una sèrie de depressions del terreny localitzades en zones interiors de l'Alt Empordà (NE Catalunya), moltes de les quals, antigament havien estat estanys permanents. En aquestes s'han caracteritzat els materials geològics i l'estructura del subsòl on s'han format, i la relació hidrogeològica que estableixen amb les aigües subterrànies dels aquífers presents.

La metodologia aplicada per aquest estudi ha estat de tipus geològic, geofísic i hidrogeològic. Ha consistit en una síntesi geològica, mitjançant la consulta de la bibliografia, cartografia i el registre de sondejos existents de la zona, amb la qual s'han identificat i caracteritzat geotècnicament els materials que formen les diverses unitats del subsòl. Mitjançant un anàlisi morfomètric de les depressions s'ha establert una relació directa entre aquestes i les estructures tectòniques de la zona.

També s'han realitzat cinc perfils geofísics de tomografia elèctrica als estanys Closa Gran, Estanyet, Palol, Pradell i Púdol, amb els quals s'ha caracteritzat l'estructura interna dels materials geològics de cadascun. Això ha permès constatar que tots segueixen un patró similar, consistent en un rebliment endorreic a la part superficial de la pròpia depressió, per sota del qual es troben les unitats litològiques presents a les vores, fragmentades i desplaçades de forma diferencial en profunditat. També s'han realitzat tres perfils de sísmica de refracció als estanys Closa Gran, Palol i Pradell, que han servit per determinar el gruix mínim dels sediments endorreics que omplen la seva zona central. A partir dels resultats geofísics s'ha pogut estimar el període de temps en què els fenòmens de subsidència i rebliment haurien estat actius, i la velocitat a la que haurien tingut lloc.

També s'ha efectuat un seguiment dels nivells piezomètrics a la zona d'estudi, consistent en nou campanyes espaiades regularment en el temps (juny a desembre de 2014). Amb això s'ha identificat un flux d'aigua subterrània a poca fondària, que en general circula d'oest a est. Aquesta actuació s'ha complementat amb un estudi hidroquímic de les aigües de la zona, que ha permès confirmar la presència d'un flux d'aigua profund.

Finalment s'ha plantejat un model de formació i evolució comú per a totes les depressions, basat en l'existència d'un flux d'aigua a través de les unitats d'evaporites i calcàries presents al subsòl profund de la zona. Aquest hauria ascendit seguint les discontinuïtats que representen les falles normals d'aquesta zona i, en arribar a nivells de materials permeables neògens, s'hauria estès lateralment. Oscil·lacions periòdiques d'aquest flux haurien provocat processos de subfusió, és a dir, eliminació de la fracció fina dels sediments on s'estenia, causant fenòmens d'inestabilitat gravitacional, que s'haurien manifestat en superfície en forma de dolines de flexió.

Resumen

En este trabajo se han estudiado una serie de depresiones del terreno localizadas en zonas interiores de l'Alt Empordà (NE Cataluña), muchas de las cuales, antiguamente, habían sido estanques permanentes. En estas se han caracterizado los materiales geológicos y la estructura del subsuelo donde se han formado, y la relación hidrogeológica que establecen con las aguas subterráneas de los acuíferos presentes.

La metodología aplicada para este estudio ha sido de tipo geológico, geofísico e hidrogeológico. Ha consistido en una síntesis geológica, mediante la consulta de la bibliografía y cartografía existentes sobre la zona, así como el registro de sondeos. Con esto se han identificado y caracterizado geotécnicamente los materiales que forman las diversas unidades del subsuelo. Mediante un análisis morfométrico de las depresiones se ha establecido una relación directa entre estas y las estructuras tectónicas de la zona.

También se han realizado cinco perfiles geofísicos de tomografía eléctrica en las depresiones de Closa Gran, Estanyet, Palol, Pradell y Púdol, con los cuales se ha caracterizado la estructura interna de los materiales geológicos en cada una. Esto ha permitido constatar que todos siguen un patrón similar consistente en un relleno endorreico en la parte superior de la propia depresión, por debajo del cual se encuentran las unidades litológicas presentes en los bordes, fragmentadas y desplazadas de forma diferencial en profundidad. También se han realizado tres perfiles de sismica de refracción en Closa Gran, Palol y Pradell, que han servido para determinar el grosor mínimo de los sedimentos endorreicos que rellenan su zona central. A partir de los resultados geofísicos se ha podido estimar el periodo de tiempo en que los fenómenos de subsidencia y sedimentación habrían sido activos, y la velocidad a la que habrían tenido lugar.

También se ha efectuado un seguimiento de los niveles piezométricos en la zona de estudio, consistente en nueve campañas espaciadas regularmente en el tiempo (junio a diciembre de 2014). Con esto se ha identificado un flujo de agua subterránea a poca profundidad, que en general circula de oeste a este. Esta actuación se ha complementado con un estudio hidroquímico de las aguas de la zona, que ha permitido confirmar la presencia de un flujo de agua profundo.

Finalmente se ha planteado un modelo de formación y evolución común para todas las depresiones, basado en la existencia de un flujo de agua a través de las unidades de evaporitas y calizas presentes en el subsuelo profundo de la zona. Estas habrían ascendido siguiendo las discontinuidades que representan las fallas normales de esta zona y, en llegar a niveles de materiales permeables neógenos, se habrían extendido lateralmente. Oscilaciones periódicas de este flujo habrían provocado procesos de subfusión, es decir, eliminación de la fracción fina de los sedimentos, causando fenómenos de inestabilidad gravitacional, que se habrían manifestado en superficie en forma de dolinas de flexión.

Abstract

This work focuses on a series of depressions located in inland areas of Alt Empordà (NE Catalonia), which in the past have been permanent ponds. The geological materials and structure of the subsoil and the existing hydrogeological relation with groundwater aquifers have been characterized.

Geological, geophysical and hydrogeological methodologies have been applied in this study. First, a geological bibliographic and cartographic synthesis of the region has been done, followed by the consultation of geotechnical reports available in the area, which allowed to identify and characterize the materials present in the subsoil. A morphometric analysis of the depressions established a direct relationship between them and the tectonic structures of the area.

Five geophysical electrical tomography profiles in the ponds of Closa Gran, Estanyet, Palol, Pradell and Púdol have led to characterize their internal geological structure. All of them show a similar pattern consisting of an endorheic sedimentary filling in the uppermost part of the depression. Below this filling, older sedimentary formations which also are present in the edges and the surrounding areas are fractured, deformed and vertically displaced towards depth. Three seismic refraction profiles in Closa Gran, Palol and Pradell, have served to determine the minimum thickness of the endorheic sediments in the central area. The geophysical results have allowed estimating the period of time when subsidence and sedimentation phenomena have been active, and the rate at which they took place.

The hydrogeological relations between ponds and aquifers have been surveyed by means of nine piezometric campaigns regularly spaced in time (June to December, 2014). A general flow of groundwater running from west to east has been identified. This action has been complemented by a hydrochemical study of groundwaters in the area, which has confirmed the presence of a deep, regional water flow.

As a conclusion, a conceptual model of formation and evolution of the studied depressions has been proposed. It is based on the existence of a water flow through deep limestone and evaporite units. This flow would rise across the discontinuities that represent the normal faults in this area and reach the Neogenen permeable sediments, where it would have spread laterally. Periodical oscillations of the hydraulic levels would have caused suffosion processes, that is, the removal of the fine fraction of the sediments, and gravitational instabilities. These phenomena would have been manifested in the surface as subsidence dolines.

2. OBJECTIUS

Aquest treball té com a objectiu principal l'estudi geològic, geofísic i hidrogeològic d'una determinada sèrie de depressions del terreny (moltes d'elles antics estanys) que es localitzen en zones interiors de l'Alt Empordà (NE Catalunya), en una àrea compresa entre Figueres i el riu Fluvià. Es proposa investigar la relació que aquestes puguin tenir amb les estructures tectòniques, els sistemes aquífers i els recursos hídrics de la zona on s'ubiquen.

Per tal d'arribar al compliment dels objectius anteriors, es planteja l'aplicació de les tècniques i metodologies següents:

- Estudi geològic detallat de les depressions, basat en una recopilació de bibliografia i cartografia geològica publicada, i de l'anàlisi dels registres de punts de prospecció del terreny existents a la zona.
- Tècniques de prospecció geofísica per conèixer la configuració del subsòl a les depressions. Concretament, la tomografia de resistivitats elèctriques (ERT) i la sísmica de refracció (SR).
- Realització de diverses campanyes d'investigació hidrogeològica, consistents en el seguiment del nivell piezomètric dels aquífers de la zona, i l'estudi de les característiques hidroquímiques de les aigües subterrànies, per tal de conèixer l'estat, origen i variació temporal dels recursos hídrics subterranis a la zona on s'emporten els estanys.

Objectives

This work has the aim to study under a geological, geophysical and hydrogeological point of view a particular series of depressions (formerly permanent lakes) that are located in inland areas of the Alt Empordà (NE Catalonia), between the town of Figueres and the Fluvià River. It is proposed to investigate the relation between the depressions and the regional tectonic structures, water resources and aquifer systems in the area where they are located.

To achieve these objectives, it is considered the application of the following techniques and methodologies:

- *A detailed geological study of the depressions, based in the recompilation of published bibliography and geological cartography, complemented with the compilation and analysis of ground investigation reports available in the area.*
- *Geophysical prospection surveys of the depressions subsoil, by means of the application of electrical resistivity tomography (ERT) and seismic refraction (SR) techniques.*
- *Hydrogeological investigation of temporal variations and origin of groundwater, consisting in the monitoring of piezometric levels in the area, and hydrochemical analyses.*

3. INTRODUCCIÓ

3.1 Els estanys de Siurana

Els anomenats estanys de Siurana en realitat són un conjunt de depressions del terreny, de forma més o menys circular i amb un relleu poc accentuat, que es troben presents dins la depressió de l'Alt Empordà, al llarg d'una superfície no molt extensa, entre els rius Manol i Muga pel nord i Fluvià pel sud.

Tant per coneixement popular com per escrits antics, es coneix que aquestes depressions havien estat històricament zones pantanoses inundables, però que ja des d'abans de l'edat mitjana, i sobretot entre els segles XVIII i XIX, van començar a ser drenades amb finalitats agrícoles (donada l'alta fertilitat dels seus sols) i també perquè es creia que eren focus d'insalubritat que amenaçaven la salut pública (Matas, 1986; Romagosa, 2008). Actualment, aquestes zones mantenen l'ús agrícola del seu passat més recent, ja que el seu canvi d'ús és molt difícil, atès que a nivell hidrogeològic aquestes continuen actuant com àrees tancades que recullen les precipitacions de les zones properes, i en els episodis de grans precipitacions encara s'inunden durant uns dies.

A diferència d'altres zones humides empordaneses, aquests, no sembla que estiguin directament relacionats amb la dinàmica dels ambients fluvio-deltaics holocens de la plana alt-empordanesa, sinó que per la seva morfologia i situació, més aviat s'intueix un origen genètic diferent. Segons la bibliografia consultada, aquestes depressions serien dolines de flexió i/o subfusió relacionades amb certs processos d'esfondrament puntual del terreny vinculats a possibles fenòmens profunds de tipus càrstic (ITGE, 1994; ICC, 1996a; ICC 1996b; IGC-ICC, 2010; IGC-ICC, 2011; IGC-ACA-ICC, 2013; ICGC-ACA, 2014).

En el marc de la temàtica d'aquest treball, es plantegen tres hipòtesis en referència al comportament hidrològic de les depressions objecte d'estudi: 1) Que aquestes siguin simplement zones de caràcter endorreic relacionades amb els aqüífers superficials; 2) que actuïn com a zones de surgència d'aigües subterrànies profundes, o 3) que es tracti de zones d'infiltració d'aigües superficials cap a aqüífers profunds.

Si es tractés de zones de descàrrega d'aigües profundes, els estanys podrien constituir punts de recàrrega dels aqüífers superficials, que ajudarien a millorar la qualitat de l'aigua dels aqüífers superficials de la zona, reduint així la forta pressió antròpica que aquestes pateixen. Però, actualment aquest procés de recàrrega no està constatat. Tampoc no hi ha cap evidència que relacioni els episodis d'inundació amb surgències d'aigües profundes, sinó que més aviat sembla que la seva inundació ocasional està provocada únicament pels episodis meteorològics de grans precipitacions.

Amb aquest estudi es pretén millorar el coneixement dels materials geològics implicats en la gènesi d'aquestes depressions, de l'estructura interna del subsòl, de la seva relació amb els sistemes aqüífers més propers, i del coneixement hidroquímic de les aigües de la zona. Així, s'aportarà informació sobre la relació dels estanys amb les principals estructures tectòniques regionals de la zona, amb la dinàmica hidrogeològica regional i local, i en definitiva, amb la seva contribució a la qualitat i quantitat de recursos hídrics subterranis al sector de l'Alt Empordà on es troben.

3.2 Característiques dels diversos estanys

Dins de la zona d'estudi (Figura 1), s'han reconegut i localitzat 13 depressions assimilables a antics estanys (Taula 1), amb unes característiques morfològiques semblants. Entre les principals característiques, cal destacar que tots es troben molt modificats per diverses activitats antròpiques (sobretot l'agricultura), aquest fet provoca que sigui difícil reconèixer-los sobre el terreny sense uns coneixements previs del fenomen o informació històrica. Pel que fa a la situació detallada dels estanys estudiats, aquests es troben distribuïts de forma més o menys homogènia per una zona concreta de la depressió de l'Alt Empordà.

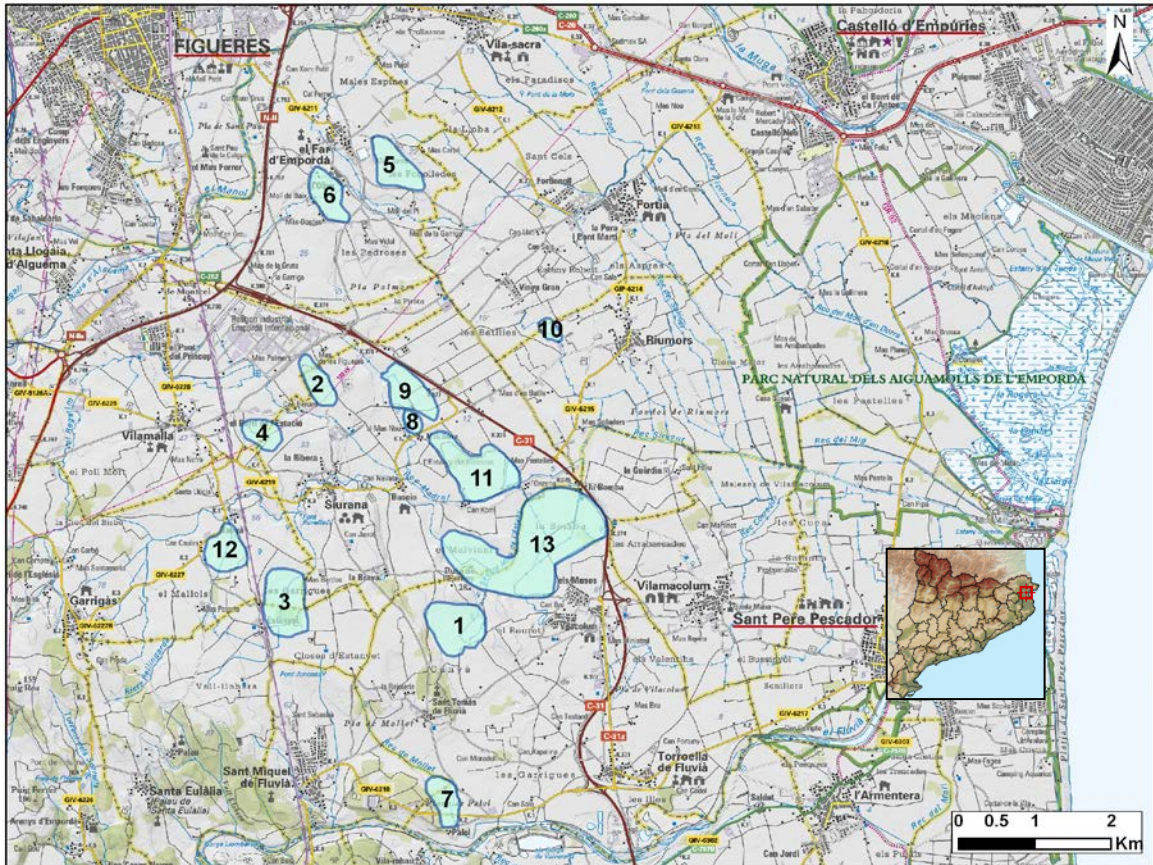


Figura 1: Plànol de situació dels estanys estudiats. Base topogràfica ICGC.

Entre tots els estanys existents a la zona, els cinc següents han estat estudiats mitjançant l'aplicació de tècniques de prospecció geofísica: la Closa Gran, l'Estany Púdol, el Pradell, les Closes d'Estanyet i l'Estany de Palol. Aquests s'han seleccionat perquè tenen unes dimensions adequades per poder aplicar els mètodes geofísics escollits per tal d'estudiar-los, i per l'acceptació del propietari davant la demanda d'estudiar elements presents dins dels seus terrenys. A continuació s'expliquen les seves característiques més rellevants (Matas, 1986):

-Closa Gran: Antigament era l'estany més profund de la zona i per això, actualment, el seu relleu presenta una morfologia molt accentuada. Per mantenir-lo sense aigua es va haver de drenar i posteriorment construir un túnel de 700 m de llargada que desemboca al reg Regatim.

-Closes d'Estanyet: En aquest cas, cal destacar, que la morfologia del seu perímetre és molt suau, en comparació als altres estanys estudiats. També era conegut com a estany de les Garrigues.

-Palol: Aquest és l'estany situat més al Sud de la zona d'estudi. D'igual manera que els altres estanys, també té construïda una galeria per mantenir-lo sec. Cal remarcar que a la vora sud té construït un talús artificial de terra que probablement ha reduït la seva extensió original.

-Pradell: Era el més petit de tots els estanys del terme municipal de Siurana, amb una superfície de 6'4 ha. Com en els altres casos, per assecar-lo, també es va construir una galeria de drenatge, que en aquest cas connecta amb la galeria de drenatge de l'Estany Púdol.

-Púdol: Segons textos antics, es coneix que tenia un perímetre proper als 2 km, i es va dessecar durant el segle XIX. Per drenar-lo es va construir una galeria subterrània de 2'5 km de llargada que desemboca a la riera de Siurana. També se'l coneix amb el nom de l'Estany del Pou de Glaçat.

Taula 1: Informació general dels estanys.

Núm.	Nom de l'estany	UTM X (m)	UTM Y (m)	Superfície (ha)	Termes municipals
1	Canyà	501196	4671140	42,7	Vilacolum
2	Closa Gran	499387	4674394	18,3	Siurana
3	Estanyet	498934	4671471	44,5	Garrigàs, Siurana, Palau de Santa Eulàlia i Sant Miquel de Fluvià
4	Passabords	498651	4673737	15,9	Siurana, Vilamalla i Garrigàs
5	Fonolledes	500532	4677187	29,5	El Far d'Empordà
6	L'Oliva	499513	4677042	23,6	El Far d'Empordà
7	Palol	501073	4668853	20,2	Sant Miquel de Fluvià i Torroella de Fluvià
8	Pradell	500629	4673870	5,8	Siurana
9	Púdol	500569	4674307	30,1	Siurana
10	Robert	502443	4675110	6,1	Riumors i Fortià
11	Siurana	501550	4673211	59,6	Siurana
12	Tonyà	498172	4672172	18,3	Garrigàs
13	Vilacolum	502139	4672109	167,8	Torroella de Fluvià

3.3 Geologia de la depressió de l'Empordà

Geogràficament la depressió de l'Alt Empordà es troba al Nord-est de Catalunya entre les comarques de l'Alt Empordà, el Baix Empordà, el Gironès i el Pla de l'Estany. Geològicament està situada entre tres importants estructures, els Pirineus, les Serralades Transversals i les Serralades Costaneres Catalanes.

Pel que fa al context geològic general de la zona estudiada, aquesta es troba dins el context del rift europeu, el qual està definit principalment per un sistema de falles de tipologia normal i de geometria lística, d'orientació NW-SE, amb uns salts mitjans en el pla de falla de l'ordre de 1000 m. Al llarg del temps aquestes falles juntament amb altres processos geològics, han anat modelant les conques de la zona estudiada, les quals actualment es troben reblertes amb sediments sintectònics majoritàriament neògens i quaternaris (Picart *et al.*, 1996; Saula *et al.*, 1994).

La formació de la fosa on s'emplaça aquest estudi, es coneix que es deu als moviments de caràcter distensiu que es van donar després de l'orogènia Alpina. Dins d'aquesta fosa, les falles més importants que s'hi poden distingir són tres: Albanyà, Jonquera-Figueres i Garriguella-Roses. Aquestes controlen la distribució en blocs de la fosa, donant lloc a la diferenciació de dues cubetes principals, la de Riumors i la de Fellines. La primera és més extensa i té una potència de sediments major, els quals són miocens i pliocens, mentre que la segona és més reduïda i els seus sediments són només pliocens (Rivero *et al*, 2001).

A més, una característica rellevant de la zona on es troben emplaçades les depressions estudiades i que es creu que pot ser determinant per la seva formació, és la presència en profunditat de la làmina encavalcant de Figueres-Montgrí. Aquesta làmina es va desplaçar en direcció sud durant l'orogènia alpina i va situar materials mesozoics sobre els materials paleògens. Posteriorment (Neogen) es va produir a la zona un període d'erosió i moviments de falles normals, i es van anar reomplint les cubetes amb sediments neògens i quaternaris d'origen continental, que són els que s'hi poden trobar actualment. A la zona dels estanys de Siurana no afloren materials de la làmina Figueres-Montgrí, però algunes evidències profundes permeten atribuir-li característiques semblants a les formacions d'edat mesozoica que afloren a l'oest de Figueres i al massís del Montgrí, els quals estan formats per roques evaporites triàsiques i formacions carbonatades juràsiques i cretàcies (ITGE, 1994; ICC, 1996a).

3.4 Geologia de l'àrea dels estanys de Siurana

La zona d'estudi es situa dins de la cubeta de Riumors, allunyada de la costa (Figura 2). En aquesta zona, la cubeta presenta una potència de reblliment de sediments Neògens de centenars de metres. A l'àrea estudiada els materials que s'hi troben presents començant pels més antics i acabant pels més recents són: (ICC, 1996a i 1996b).

- **Materials preneògens:** En primer lloc hi ha un substrat preneogen, que ha estat interpretat com a cretaci, i que no aflora a cap lloc de la zona d'estudi, però se'n té constància de la seva presència gràcies al sondeig GEOT#1 (Lanaja, 1987). En el seu registre s'hi troben a partir de 1000 metres de profunditat, unes calcàries mesozoiques amb un gruix de 60 metres, i per sota d'aquestes una unitat margo-calcària, que es correspon amb els materials de la làmina Figueres-Montgrí (ITGE, 1994).

- **Materials Neògens:** Per sobre de la unitat anterior s'hi troben sediments del Neogen, dins dels quals també podem diferenciar diverses parts. Com a neogen més antic trobem una sèrie de basalts olivínics i traquites del Miocè superior (Epígraf NT i NB dels mapes geològics de Catalunya 1:25000). Aquests materials afloren en uns pocs llocs de manera puntual i poc extensa, com per exemple a Vilacolum. Per sobre d'aquests materials, trobem una sèrie de sediments de tipus marí, les anomenades margues de Siurana (NPM), les quals tenen poca extensió d'aflorament en superfície, però la seva presència és coneguda en gran part de l'àrea estudiada a partir de sondatges i pous, els quals mostren gruixos que superen els centenars de metres. Per sobre d'aquests materials, trobem una sèrie de sediments de transició continental-litoral formats bàsicament per sorres (NPs, NPFm i NPLm). Finalment, per sobre d'aquests últims, trobem diverses tipologies de sediments detrítics del Pliocè, els quals es caracteritzen per estar formats per nivells de sediments al·luvials com sorres,

graves, argiles i lutites, en diferents proporcions. Aquests provenen d'antics sistemes fluvials i al·luvials que van reomplir la cubeta (NPMg, NPFa, NPFs, NPLg, NPSs).

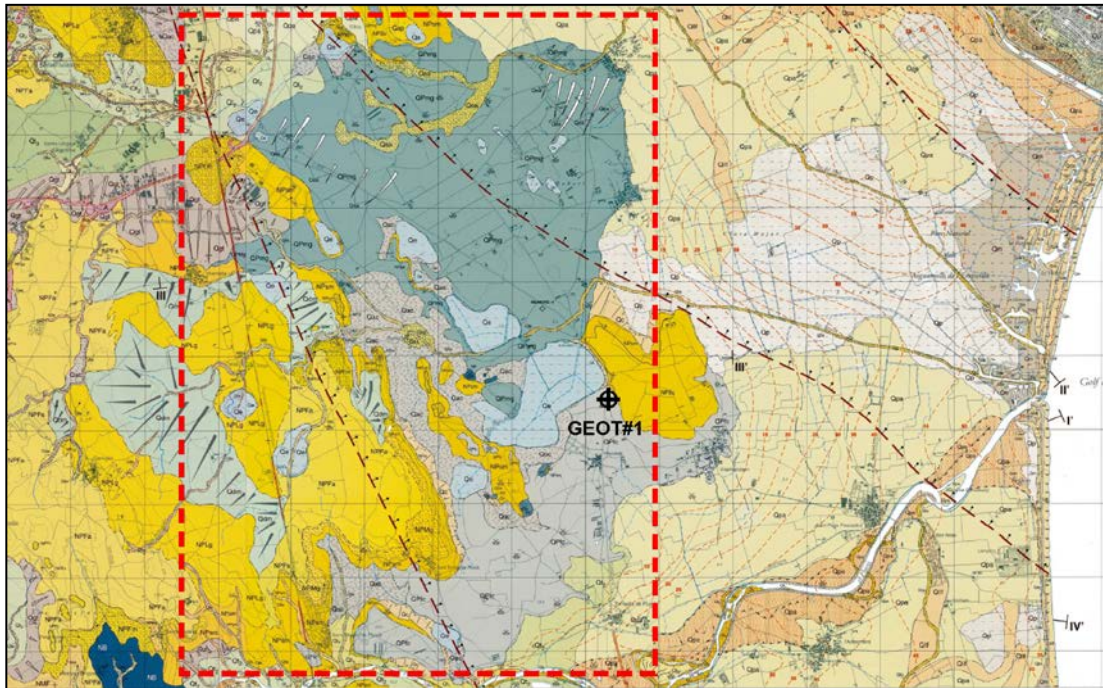


Figura 2: Mapa geològic del sector comprès entre Figueres, el Fluvià i el mar. El requadre vermell delimita l'àrea on hi ha els estanys estudiats. La zona situada a l'oest i al centre amb colors grocs correspon a materials neògens, la zona central amb colors verds i grisos correspon a sediments quaternaris antics (Plistocè), i la zona est amb colors marrons i beix, correspon a materials quaternaris fluviodeltaics moderns, bàsicament holocens (Extret de ICC, 1996a i 1996b). S'indica la situació del sondeig GEOT#1.

- Materials Quaternaris: Per sobre del neogen i recobrint-lo, trobem varies formacions quaternàries que, a grans trets, es poden agrupar en un conjunt de quaternaris antics i un de quaternaris moderns. Dins dels quaternaris antics (Plistocè mitjà), trobem dos conjunts de materials, que correspondrien a sistemes de ventalls al·luvials relacionats amb antigues desembocadures dels actuals rius Manol i Fluvià. Aquestes estan formades per argiles, llims amb alguns còdols intercalats i molta grava sorrenca, i tenen un gruix aproximat de 10 metres (Qpmg, Qpfc, Qgt). Posteriorment apareixen les antigues terrasses dels rius Fluvià, Manol i Muga (T3 i T2) al seu pas per la zona, les quals estan formades de materials d'origen fluvial i al·luvial, com per exemple graves i sorres del Plistocè superior (Qt3, Qt2).

Per sobre de les terrasses anteriors, trobem sediments quaternaris recents d'origen fluvio-deltaic, formats per sorres i graves de gra més fi. Aquests queden situats vora la costa omplint el que era una badia durant l'Holocè, i també es troben relacionats amb la dinàmica al·luvial i col·luvial de petites rieres i torrents actuals, que localment han anat aportant sediments a les zones endorreiques (Qt1, Qpa, Qp, Qac, Qdm, Qc). Finalment, trobem que les pròpies depressions objecte d'aquest estudi, estan reblertes per sediments de tipus endorreic (Qe). Aquests estan formats principalment per argiles i llims arenosos, amb un contingut en matèria orgànica molt elevat.

3.5 Hidrogeologia de l'àrea d'estudi

A l'àrea d'estudi hi trobem dues masses d'aigua subterrània diferents, és a dir, dues regions de terreny clarament diferenciades i delimitades, susceptibles de contenir aigua.

A l'oest predomina la massa d'aigua anomenada Empordà, i a l'est l'anomenada Fluviodeltaic del Fluvià-Muga. Però en gran part de la zona d'estudi, aquestes es troben encavalcades entre elles, situant-se la Fluviodeltaic del Fluvià-Muga per sobre i la Empordà per sota. (ACA, 2004a i 2004b).

Pel que fa a la primera, alberga gairebé tota la zona d'estudi, excepte el marge est (Figura 3). La seva tipologia litològica dominant és detrítica no al·luvial, està formada per unitats litostratigràfiques sedimentaries d'edat neògena i quaternària, i les seves característiques hidràuliques dominants són: aqüífers lliures i confinats amb predomini dels confinats, dels quals alguns són multicapa. En aquesta zona, bàsicament es troba l'aqüífer dels neògens de l'Empordà, però localment a les zones més properes al riu Fluvià, es troba l'aqüífer al·luvial del Fluvià. La seva recàrrega natural es dona a partir de les aportacions influents dels rius que travessen la massa (Fluvià i Muga), i per la recàrrega pluviomètrica. La seva descàrrega es produeix a través dels cursos superficials, i per les captacions d'aigua per a usos agrícoles, urbans i ramaders, les quals representen les principals pressions sobre l'estat fisicoquímic de l'aigua, ja que després del seu ús retornen l'aigua als aqüífers i cursos fluvials amb una qualitat inferior.

Pel que fa a la massa d'aigua Fluviodeltaic del Fluvià-Muga, alberga la zona est de l'àrea d'estudi, i una petita zona del nord-oest (Figura 3). La seva tipologia litològica és únicament al·luvial, està formada pels materials sedimentaris equivalents a les terrasses 1 i 2, i les seves característiques hidràuliques dominants són aqüífers lliures i confinats amb predomini dels lliures. Una altra característica important d'aquest aqüífer, és que es tracta d'una zona litoral amb risc d'intrusió salina i la seva zona saturada es troba a una profunditat compreses entre 0 i 5 m. La seva recàrrega es dona a partir de les aportacions influents dels rius que travessen la massa, és a dir, el Fluvià i la Muga, i per la recàrrega pluviomètrica. La seva descàrrega es produeix a través dels cursos superficials i per nombroses captacions d'aigua, destinades a usos agrícoles, urbans i ramaders, que representen les principals pressions sobre l'estat fisicoquímic de l'aigua.

La climatologia de la zona és del tipus Mediterrani Pirinenc Oriental, amb una distribució de la precipitació irregular i escassa, amb hiverns moderats i estius calorosos. Concretament la precipitació mitjana anual és troba entre 450 i 500 mm/any. Els períodes de major precipitació es donen a la primavera i la tardor, assolint els màxims durant els mesos de setembre i octubre, amb uns volums de precipitació mitjana mensual entre 50 i 70 mm. I els episodis de menor precipitació es donen a l'estiu, amb mínims entre 5 i 10 mm al mes de juliol. (SMC, 2015).

4 METODOLOGIA

Per tal de complir els objectius d'aquest treball, es van aplicar diversos mètodes de treball de camp i de gabinet en geologia, geofísica i hidrogeologia.

4.1 Recopilació d'informació geològica i geotècnica

Mitjançant la foto interpretació i la cartografia geològica existent, es van identificar i delimitar de forma detallada totes les zones endorreiques objecte d'estudi, per tal de localitzar i delimitar tant els estanys catalogats, com altres zones de morfologia deprimida susceptibles d'haver estat estanys en el passat. A més, es van recopilar el màxim nombre possible d'estudis geotècnics de la zona i es va consultar tota la informació referent a sondejos, disponible als arxius d'estudis geotècnics del GEOCAMB, i del servei Geoíndex de l'ICGC (Taula 2). Posteriorment aquesta informació es va ordenar i analitzar detalladament per conèixer quins materials es trobaven al subsòl de la zona, quins gruixos tenien i com estaven disposats. Després es va fer un buidatge de la informació, per poder caracteritzar els materials des d'un punt de vista geològic i geomecànic, d'acord amb els criteris habituals en l'enginyeria del terreny (González de Vallejo *et al.*, 2002).(Figura 3).

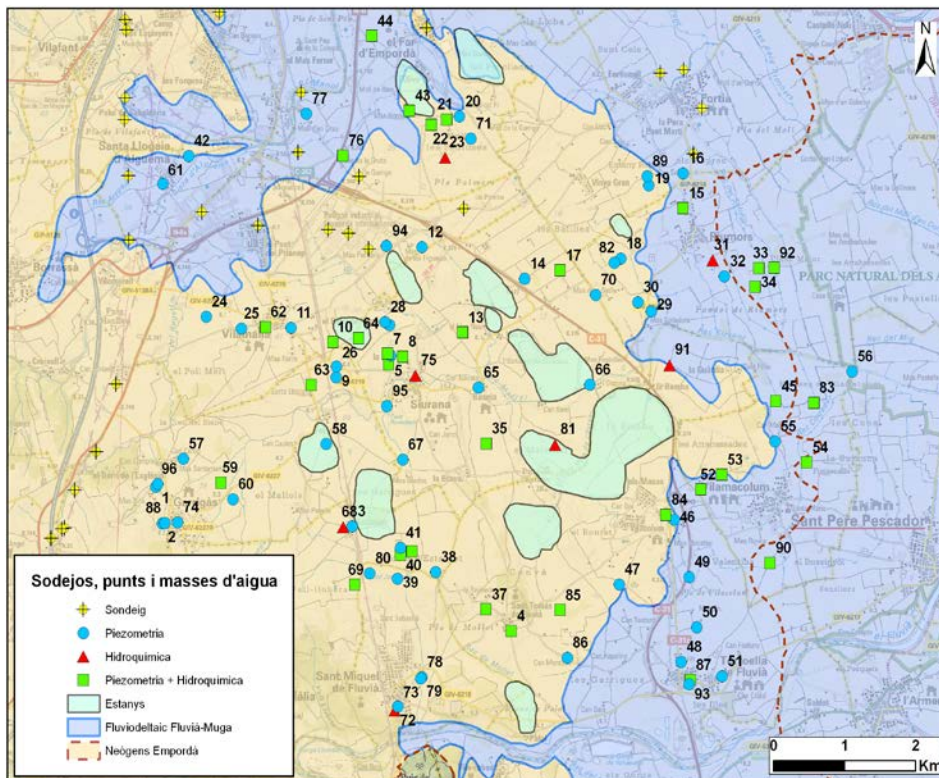


Figura 3: Plànol de situació de sondejos i pous inventariats, i delimitació de les masses d'aigua subterrània.

Taula 2: Recull de la informació extreta dels estudis geotècnics de la zona..(*)SPT: Standard Penetration Test

	Total
Numero d'estudis geotècnics	32 (7 Geocamb, 25 ICGC)
Numero de sondatges	80
Metres lineals perforats	906'7
Numero d'SPT(*)	370
Numero de mostres de sòl	8
• Assaig de granulometria	6
• Assaig de plasticitat	4
• Assaig de densitat	3
• Assaig d'humitat	3

4.2 Geologia de camp

Per tal de conèixer de primera mà la zona de treball, es va realitzar un reconeixement geològic de camp, en que es van observar els materials que afloraven, es van identificar totes les depressions inventariades i es van escollir aquelles que es podien considerar més adequades per al seu estudi geofísic. Posteriorment es va decidir quins estanys eren susceptibles de ser investigats més a fons, i quines eren les tècniques més adequades per fer-ho.

4.3 Morfometria dels estanys

Mitjançant el model digital del terreny (MDT), la fotografia aèria de la zona i els mapes topogràfics, es van delimitar els estanys i es van calcular les seves característiques morfomètriques següents (Figura 4), basades en la metodologia de Bondesan *et al.*, (1992): superfície, cota mínima interior, cota màxima exterior, cota mínima exterior, relleu relatiu (cota màxima exterior menys cota mínima interior), longitud màxima (L), amplada màxima (A), orientació respecte el nord de la longitud màxima i relació longitud-amplada (L/A).

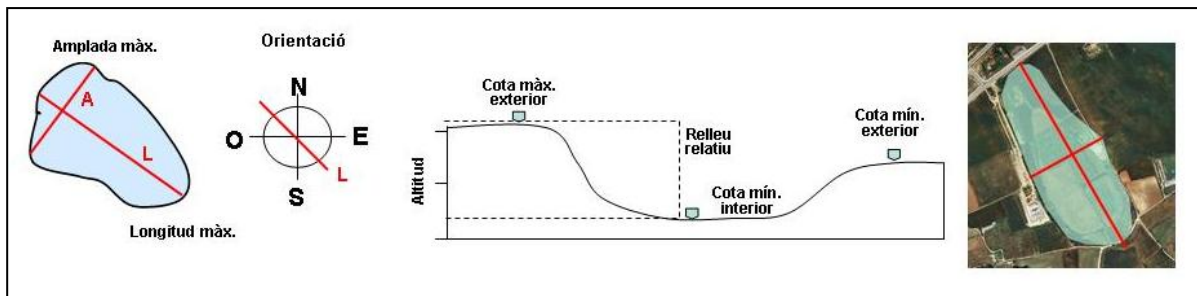


Figura 4: Paràmetres morfomètrics determinats en els estanys.

4.4 Prospecció geofísica

Amb l'objectiu d'investigar el subsòl de les depressions seleccionades, es van aplicar dos mètodes de prospecció geofísica complementaris: la tomografia de resistivitats elèctriques (ERT) i la sísmica de refracció (SR) (Figura 5).

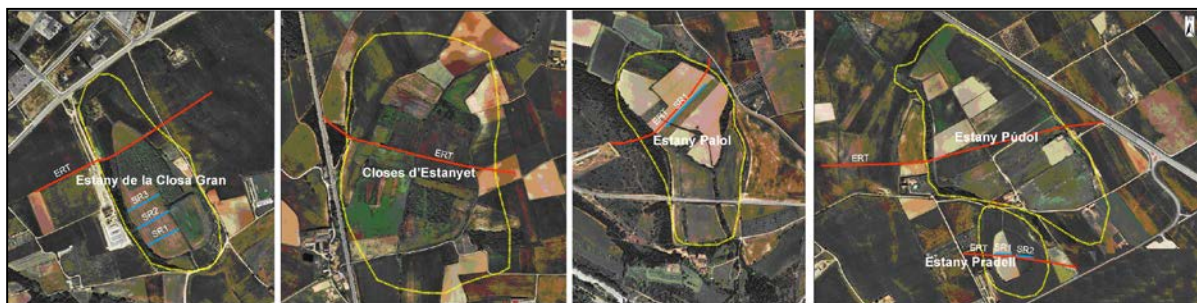
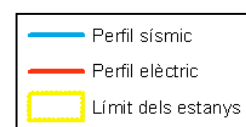


Figura 5: Fotografia aèria del diferents estanys, amb la situació de les prospeccions geofísiques realitzades.



Tomografia de resistivitats elèctriques

La tomografia de resistivitats elèctriques (Loke, 2014) és una tècnica que pertany al grup de mètodes geofísics de caràcter elèctric, habitualment aplicada en la investigació d'estructures geològiques d'esfondrament del terreny, entre d'altres (Gutiérrez *et al.*, 2008; Carbonel *et al.*, 2014a). L'execució d'aquesta tècnica consisteix en la instal·lació sobre el terreny objecte d'estudi, una sèrie d'elèctrodes d'acer connectats a un màxim de quatre bobines de cablejat multiaxial disposades en sèrie, tot definint un perfil idealment rectilini. Posteriorment, a través dels elèctrodes s'injecta un corrent continu mitjançant una bateria estàndard de 12 V i 60 Ah. Un cop fet això, de forma automàtica i per grups de 4 elèctrodes, el mateix aparell (LundImaging System de la casa ABEM Instrument AB, consistent en un resistímetre Terrameter System SAS1000 i un selector automàtic de canals ES10-64), va mesurant la pèrdua de potencial elèctric en diferents punts. Alhora, va generant una base de dades de resistivitats aparents, mesurades al llarg d'una pseudosecció del subsòl organitzada en nivells de dades, en què es té en compte l'espaiat interelectròdic i un seguit de nombres sencers que el multipliquen, tot contemplant les màximes combinacions possibles d'acord amb els elèctrodes disponibles.

Finalment, mitjançant el programari adequat (RES2DINV, Geotomo Software) es tracta'n les dades enregistrades per tal d'obtenir el model geofísic de la secció de variació de la resistivitat elèctrica al subsòl. La qual s'utilitza per interpretar anomalies del subsòl, com per exemple canvis en la seva litologia, nivell freàtic o estructures geològiques.

La configuració electròdica escollida va ser la Wenner-Schlumberger (Loke, 2014), ja que dona una bona resolució tant en vertical com en horitzontal, per tant permet detectar anomalies en la resistivitat del terreny en vertical i en horitzontal. Es va escollir aquesta configuració donat que inicialment no es sabia que podia trobar-se al subsòl.

Es varen realitzar cinc perfils de tomografia elèctrica, un en cadascun dels estanys estudiats (Taula 3), a partir de les quals es va obtenir la corresponent secció de resistivitats elèctriques del subsòl (detalls sobre el processat a la Taula 4).

Taula 3: Característiques dels perfils de resistivitats elèctriques realitzats. (a) Distància entre elèctrodes corresponent al protocol de mesura llarg i curt, respectivament. (b) No inclou el temps de muntatge i desmuntatge.

<i>Perfil ERT</i>	<i>Data</i>	<i>Longitud (m)</i>	<i>Espaiat (m)^(a)</i>	<i>Posicions electròdiques</i>	<i>Temps de mesura^(b)</i>	<i>Punts de resistivitat aparent</i>	<i>Nivells de dades</i>
Closa Gran	15/07/14	700	10 i 5	141	6h 50min	1837	26
Estanyet	04/07/14	700	10 i 5	141	7h 17min	2129	26
Palol	08/07/14	500	10 i 5	101	6h 42min	1536	26
Pradell	01/07/14	400	10 i 5	81	4h 38min	1200	26
Púdol	22/07/14	1000	20 i 10	101	5h 07min	1450	26

Taula 4: Detalls relatius al tractament preliminar, la inversió de dades i les seccions de resistivitat.

Perfil ERT	Pre-processat i inversió preliminar			Inversió i model final de resistivitats			
	Llindar d'error	Punts eliminats	Punts vàlids	Iteracions	Error absolut	Punts calculats	Profunditat màxima (m)
Closa Gran	65%	10	1827 (99,5%)	4	5,1%	2008	80,8
Estanyet	50%	7	2122 (99,7%)	6	1,6%	3644	79,4
Palol	70%	41	1495 (97,3%)	7	4,5%	1272	80,8
Pradell	26%	0	1200 (100%)	4	1,3%	1496	79,4
Púdol	45%	6	1444 (99,6%)	6	3,3%	2171	158,9

Sísmica de refracció

La sísmica de refracció és una tècnica que utilitza les ones sísmiques per detectar contrastos o anomalies en el subsòl (Reynolds, 1997). Aquesta tècnica consisteix, en la instal·lació sobre el terreny objecte d'estudi, una sèrie de 12 geòfons col·locats a intervals d'espai regulars de forma alineada, i alhora connectats tots ells mitjançant un cable multiaxial, alimentat per una bateria estàndard 12V i 60Ah i l'aparell encarregat d'enregistrar les dades (sismògraf Geometrics S12). Un cop fet això, es fa impactar una massa que té adherit un sensor d'inèrcia, sobre una placa metàl·lica col·locada a terra en diferents posicions del dispositiu. Així, es van realitzant diversos tirs (cops de martell a la placa metàl·lica) a unes distàncies conegudes, per tal de generar ones sísmiques. D'aquestes s'enregistra el moment d'arribada a cada geòfon i així es pot conèixer la seva velocitat de propagació per les diferents capes del subsòl i les fondàries a les quals hi ha interfases capaces de causar una refracció crítica de les ones sísmiques. Finalment amb la informació obtinguda i mitjançant l'ajuda del programari informàtic (Pickwin i Plotrefa, Geometrics Inc.), es poden reconèixer les diferents capes del terreny en funció de la velocitat de propagació de les ones sísmiques per cada una d'aquestes. Aquesta tècnica es va dur a terme en tres estanys: Closa Gran, Pradell i Palol. La investigació es va limitar a la zona central dels estanys, on el gruix de rebliment és major (Taula 5).

Taula 5: Dades dels perfils de sísmica de refracció efectuats.

Perfil SR	Data	Nombre de línies	Longitud total (m)	Espaiat (m)	Geòfons	Tirs
Closa Gran	29/07/14	3	198	6	36	15
Pradell	03/10/14	2	110	5	24	17
Palol	03/10/14	2	132	6	23	15

4.5 Hidrogeologia

Per tal d'investigar l'existència de possibles relacions hidrogeològiques entre les depressions estudiades i els nivells freàtics regionals o els diferents aquífers tant superficials com profunds presents a l'àrea d'estudi, es va realitzar una extensa campanya de seguiment del nivell freàtic en els pous accessibles de la zona. Amb aquesta actuació es va obtenir informació sobre la variació piezomètrica de l'aigua del subsòl al llarg del temps. A més, es va estudiar el quimisme de l'aigua d'un nombre elevat d'aquests pous, per tal de determinar la seva composició en ions majoritaris.

Això es va fer amb la finalitat bàsica de determinar possibles orígens o processos que afectessin a aquestes aigües. Les diverses parts de l'estudi hidrogeològic es van realitzar abastant una zona més amplia que aquella on es localitzen els estanys, per tenir una informació més completa (Figura 3).

Campanyes de piezometria

Per aquestes campanyes es van seleccionar 94 punts corresponents a pous i algunes fonts. Cal destacar que la gran majoria de pous tenen un ús agrícola i són superficials, a més, molts d'aquests estan en desús. També cal dir, que no va ser possible mesurar-los tots en totes les campanyes. Ja fos a causa de dificultats d'accés (finques privades o pous accessibles només ocasionalment), per instal·lació de maquinària de bombeig que n'impedia la mesura, o bé perquè se'n van anar localitzant de nous a mesura que avançaven les campanyes. Per determinar el nivell piezomètric es va utilitzar una sonda piezomètrica de 30 metres de llargada, equipada amb sensor acústic del nivell d'aigua.

Taula 6: Resum del número de punts mesurats durant la realització de les campanyes.

<i>Campanya</i>	<i>Data (2014)</i>	<i>Núm. de punts</i>	<i>Campanya</i>	<i>Data (2014)</i>	<i>Núm. de punts</i>
1	26 de juny a 11 de juliol	53	6	22 de setembre	61
2	18 a 22 de juliol	57	7	15 i 17 de octubre	70
3	5 a 7 d'agost	61	8	19 de novembre.	65
4	17 i 18 d'agost	65	9	17 de desembre	45
5	8 i 9 de setembre	62			

En total, es van realitzar 9 campanyes, espaiades en el temps per períodes d'uns 15 dies, a excepció de les tres últimes, que es van espaiar un mes. Cal dir que les dues primeres campanyes es van dilatar en el temps, pel fet que inicialment es van haver de localitzar els pous (Taula 6). Finalment, tota la informació de les campanyes piezomètriques, es va integrar en un entorn de treball GIS per poder representar-les cartogràficament.

Hidroquimisme

Simultàniament a la realització de les campanyes de piezometria es van anar recollint mostres d'aigua en aquells pous on era possible. *In situ*es determinaven els paràmetres de conductivitat i temperatura mitjançant un conductímetre portàtil. Després es posaven en recipients hermètics i a baixa temperatura fins al seu enviament al laboratori, on s'hi determinarien altres paràmetres. De totes les mostres recollides es van seleccionar les que es consideraven més interessants segons diversos criteris (situació geogràfica, profunditat, règim d'ús i accessibilitat), i es van fer analitzar els paràmetres que podien aportar informació interessant.

L'alcalinitat es va mesurar al laboratori de l'àrea de Geodinàmica Externa de la UdG utilitzant el mètode de titració de Gran, que permet obtenir el pH i la concentració de bicarbonats. Els altres compostos majoritaris analitzats van ser els següents: anions (clorurs, nitrats i sulfats) i cations (calci, magnesi, potassi i sodi). Aquests es van analitzar mitjançant la tècnica de cromatografia iònica als laboratoris de l'Institut Català de la Recerca de l'Aigua (ICRA). En total, es van analitzar 42 mostres.

Hidrometeorologia

Una altra actuació que es va realitzar, va ser la recopilació de tota la informació relativa a variables meteorològiques de la xarxa d'estacions automàtiques del Servei Meteorològic de Catalunya (www.meteo.cat). Les variables que es van recopilar van ser: temperatura màxima diària (°C), temperatura mínima diària (°C), temperatura mitjana diària (°C), precipitació diària (mm) i grau d'insolació diari (MJ/m²). Aquestes dades es van recopilar de forma diària en les estacions meteorològiques més properes a l'àrea d'estudi (situades a les poblacions de Sant Pere Pescador, Torroella de Fluvià i Navata), durant el període de temps de temps compres entre el dia 1 de març de 2014 i el 31 de desembre de 2014. Finalment, es va relacionar la informació de les campanyes de piezometries amb els episodis de recàrrega per precipitacions.

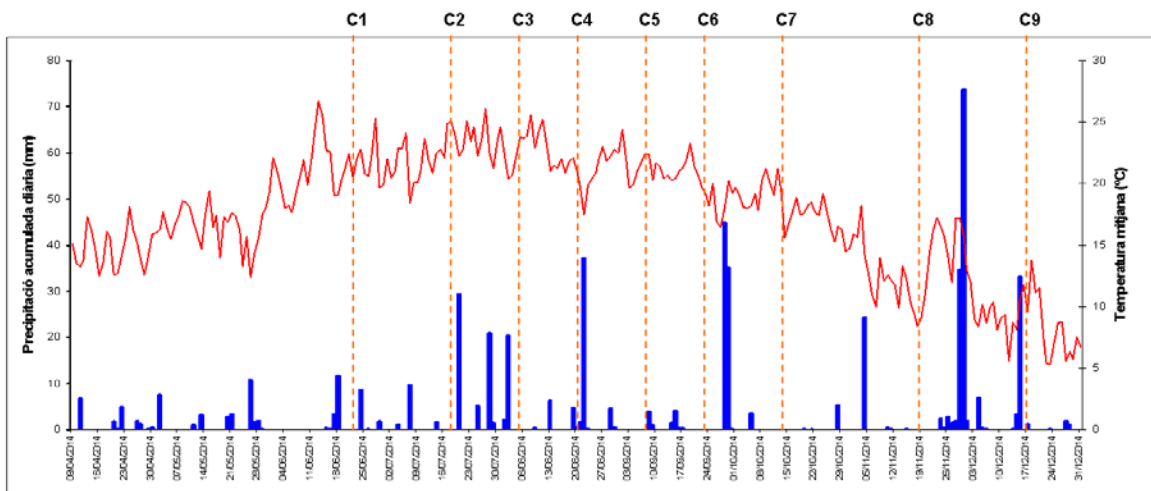


Figura 6: Representació gràfica de la precipitació diària acumulada i la temperatura mitjana diària a Torroella de Fluvià, amb indicació de la data de les campanyes piezomètriques. Font de les dades: Servei Meteorològic de Catalunya.

5 RESULTATS

5.1 Relació espacial i temporal entre els materials geològics i els estanys

Pel que fa a les diferents unitats geològiques caracteritzades, i la seva relació espacial i temporal en relació amb els estanys, no totes estan afectades per el fenomen de subsidència que s'ha donat en les zones d'estudi. Pel que fa als materials preneògens i basalts miocens, amb les dades actuals no es pot saber si estan afectades. Els materials neògens, en canvi, si que es trobarien afectats en tots els estanys, tot i que en alguns això no es pot apreciar en superfície, ja que aquests materials no hi afloren directament. Els sediments quaternaris antics es troben afectats en tots els estanys, excepte aquells en què no s'hi troben presents (Estanyet i Tonyà). Finalment, els sediments quaternaris recents no són interceptats en cap estany, sinó que es troben reomplint la part interior de tots els estanys (cas dels sediments endorreics), així com alguns sectors de la seva perifèria (sediments al·luvials a les Fonolledes, l'Oliva, Púdol, Vilacolum).

Aquestes subsidències es donen en profunditat i en una ampla zona en la qual hi ha unitats de tipologia i edats diverses. Això provoca que es vegin afectats materials de característiques geotècniques diferents. Aquest fet demostra que les depressions estudiades no es concentren en un únic tipus de material, com seria el cas de les clàssiques estructures d'esfondrament càrstic. Per tant hi ha indicis que estan relacionats a processos profunds, desvinculats de la geologia superficial.

Amb l'anàlisi de la informació anterior, es pot acotar l'antiguitat màxima i mínima dels estanys, segons les unitats a les quals afecten. Aquesta estaria compresa entre una edat posterior al Plistocè mitjà i una edat preholocena.

5.2 Caracterització geotècnica dels materials

Per poder caracteritzar els diversos materials presents al subsòl de la zona, es va analitzar i desglossar la informació que prèviament s'havia recopilat dels estudis geotècnics. Cal destacar que la majoria d'aquests sondejos són poc profunds i només travessaven les capes més superficials del terreny (a la zona d'estudi són sediments quaternaris a la part més superficial i sediments neògens més avall, o bé sediments neògens directament desde la superfície). També cal destacar que aquests materials estan distribuïts de forma irregular. En la informació que es presenta a continuació, s'agrupen alguns conjunts de materials de característiques geològiques i geotècniques similars, en unitats. Les característiques de cada material es resumeixen a la taula 7.

Taula 7: Resum per unitats del tipus de materials predominants i les seves característiques geomecàniques que incideixen en el comportament davant la subsidència. Els valors de SPT corresponen al percentil 10 i 90%, i entre parèntesi el valor mitjà.

Unitat	Materials	Caràcter geomecànic	Rang SPT	Compacitat/ consistència	Resposta tenso-deformacional
NPsm	Sorres	Granular	20-46 (30)	Mitjana-densa	Incoherent-fràgil
NPm	Margues i llims	Cohesiu	-	Dura-roca tova	Fràgil
NPLm	Sorres	Granular	23-80 (52)	Mitjana-molt densa	Incoherent-fràgil
NPSs	Argiles, llims i sorres	Mixt	10-36 (20)	Rígida-roca molt tova	Incoherent-fràgil
NPLg	Argiles i sorres	Mixt	16-40 (29)	Molt rígida-dura	Incoherent-plàstica
NPFa	Argiles, llims i sorres	Cohesiu-mixt	33-46 (40)	Dura	Incoherent-plàstica
Qpmg	Graves i sorres	Granular	15-55 (36)	Mitjana-molt densa	Incoherent-fràgil
Qt3	Graves i sorres	Granular	17-52 (29)	Mitjana-molt densa	Incoherent
Qgt	Argiles i llims	Cohesiu	7-28 (17)	Rígida-molt rígida	Plàstica
Qt1	Sorres i graves	Granular	13-37 (25)	Mitjana-densa	Incoherent
Qac	Sorres llimargiloses	Granular-mixt	19-62 (42)	Mitjana-molt densa	Incoherent-plàstica
Qpa	Llims i sorres	Mixt	6-22 (13)	Mitjana-molt rígida	Incoherent-plàstica

- **Materials preneògens:** No existeix gaire informació sobre aquesta unitat, donat que a la zona d'estudi aquests materials només han estat reconeguts a una fondària d'uns 1000 metres al sondeig GEOT#1 (Lanaja, 1987). En canvi, a l'oest de Figueres, on aquests materials es troben en superfície, la unitat està formada majoritàriament per calcàries i guixos mesozoics, i presenta varies evidències de carstificació, entre les quals destaquen nombroses dolines (IGC-ICC, 2010 i 2011).

- **Roques volcàniques miocenes:** Els basalts miocens sí que afloren en algun punt, i també s'intercepten en el sondeig GEOT#1 entre 200 i 300 metres de profunditat (Lanaja, 1987). Tot i que no se'n disposa d'una caracterització geotècnica, aquests es poden assimilar a materials rocosos que en superfície es presenten amb grau de meteorització moderat.

- **Sediments neògens marins:** Aquesta unitat, només s'ha localitzat en 2 sondatges, a unes fondàries de 8,25 i 7,8 metres. Amb una litologia formada per llims i margues grises compactes amb algunes restes de conquilles (Unitat NPM). No se'n tenen dades de SPT ni de laboratori, però es poden assimilar a un material cohesiu molt dur, de naturalesa semirocosa .

- **Sediments neògens de transició:** Aquesta unitat es reconeix en 33 sondejors. Està formada bàsicament per sorres de gra fi a molt fi, amb llim i argila, que inclouen algunes intercalacions puntuals de sorres grolleres i graves, a més, localment es troben cimentades per carbonat (NPsm i NPLm). De mitjana es tracta de sediments granulars de compacitat mitjana a molt densa. A partir dels paràmetres de laboratori es pot dir que presenten una densitat seca d'1,75 g/cm³, amb predomini de la fracció sorrenca (55%) sobre la fina (45%). Els valors de plasticitat indiquen un estat semilíquid en estat natural, per bé que el límit de plasticitat es troba al voltant de 19,6-23,1%. Finalment cal dir que poden presentar una certa expansivitat en grau marginal.

- **Sediments neògens continentals:** Aquesta unitat es reconeix en 93 sondejors. Litològicament és molt diversa i de forma general està formada per llims i sorres fines de color marró clar, amb algunes graves mil·limètriques. A més es poden trobar algunes zones parcialment cimentades (NPSs, NPLg, NPILg i NPFa). De mitjana es tracta de sediments granulars de compacitat mitjana a densa. A partir dels paràmetres de laboratori es pot dir que presenten una densitat seca de 2,01 g/cm³, amb predomini de la fracció fina (59%) sobre la sorrenca (36%) i sobre la grava (5%). Els valors de plasticitat indiquen un estat semisòlid en estat natural. El seu límit de plasticitat es troba al voltant de 17 %.

- **Sediments quaternaris antics:** Aquesta unitat es reconeix en 81 sondejors. Litològicament està formada bàsicament per graves de mides mil·limètriques a centimètriques de color marró clar amb sorra i argila (Qpmg, Qt3 i Qgt). De mitjana es tracta de sediments granulars de compacitat mitjana a densa. A partir dels paràmetres de laboratori es pot dir que presenten una densitat seca de 2 g/cm³, amb predomini de la fracció fina (82%) sobre la sorrenca (17%). Els valors de plasticitat indiquen un estat de semilíquid a semisòlid en estat natural, per bé que el límit de plasticitat es troba de mitjana al 21,15 %. Finalment cal dir que poden presentar una certa expansivitat entre grau no crític i marginal.

- **Sediments quaternaris moderns:** Aquesta unitat es reconeix en 32 sondejors. Litològicament està formada bàsicament per sorres argiloses amb graves, de color marró clar. Aquests materials es poden

atribuir a les unitats cartogràfiques Qt1, Qac i Qpa. De mitjana es tracta de sediments granulars de compacitat mitjana a densa, amb intercalacions de sediments cohesius de consistència mitjana a rígida. Pel que fa als paràmetres de laboratori, per aquesta unitat no s'han trobat dades. A més, dintre d'aquesta unitat també hi ha els sediments endorreics (Qe) presents a dins dels estanys estudiats, els quals no s'han pogut caracteritzar, però se'ls hi assumeixen unes característiques geològiques extretes de la descripció dels materials observats en superfície. Es tracten bàsicament de materials cohesius amb consistència de molt tova a mitjana i que sovint es troben saturats en aigua.

5.3 Morfometria dels estanys i relació amb les estructures tectòniques en superfície

Els paràmetres morfomètrics estudiats es poden veure a la Taula 8. La superfície dels estanys està compresa entre 5,77 i 167,69 Ha. A efectes d'anàlisi, els que tenen una forma més irregular han estat dividits en dos lòbuls, partint de la premissa que deuen ser el resultat de la unió de més d'una depressió. La majoria d'estanys tenen l'eix llarg orientat en direcció propera a NO-SE, mentre que només un estany està orientat en direcció N-S, i dos en direcció O-E. Normalment la part més profunda en relació a les vores es troba propera al seu centre geomètric. A escala topogràfica es troben distribuïts de manera esglaonada en els tres nivells topogràfics que presenta el relleu de la zona: 1) per sobre dels 30 m (Estanyet, Passabords i Tonyà), 2) entre 10 i 30 m (Closa Gran, Fonolledes, Oliva i Palol), i 3) menys de 10 m (Canyà, Pradell, Púdol, Robert, Siurana i Vilacolum). La profunditat d'aquests estanys expressada com a relleu relatiu es troba compresa entre desnivells mínims de 2,7 m i desnivells màxims de 22,8 m.

Taula 8: Síntesi dels paràmetres morfomètrics estudiats. Estanys dividits en dos lòbuls.*

<i>Nom estany</i>	<i>Superfície (Ha)</i>	<i>Longitud màx. (m)</i>	<i>Amplada màx. (m)</i>	<i>Relació longitud- amplada</i>	<i>Orientació eix llarg (Direcció)</i>	<i>Cota mín. interior (m)</i>	<i>Cota màx. exterior (m)</i>	<i>Cota mín. exterior (m)</i>	<i>Relleu relatiu (m)</i>
Canyà	42,73	835	751	1,11	90	8,1	16,3	11,6	8,2
Closa Gran	18,29	775	308	2,51	150	19,3	35,2	24,3	15,9
Estanyet	44,48	930	925	1,01	150	47,4	53,9	49,5	6,5
Passabords	15,92	374	336	1,11	114	32,2	49,9	34,1	17,7
Fonolledes	29,49	960	491	1,96	135	11,4	21,1	17,1	9,7
l'Oliva	23,53	840	409	2,05	149	17,5	24,2	18,4	6,7
Palol	20,16	715	345	2,07	149	12,9	35,7	15,2	22,8
Pradell	5,77	346	222	1,56	155	8,5	15,2	10,1	6,7
Púdol	30,04	925	490	1,88	144	5,2	19,7	9,4	14,5
Robert	6,06	366	208	1,75	132	3,6	6,3	5,1	2,7
Siurana*	59,63	1159 i 715	428 i 259	2,71 i 2,76	135 i 137	0,4	11,6	5,1	11,2
Tonyà	25,33	657	563	1,17	193	48,1	55,3	48,9	7,2
Vilacolum*	167,79	1632 i 1173	572 i 919	2,85 i 1,28	116 i 107	-1,1	6,8	0,2	7,9

En primer lloc, cal dir, que els estanys que no tenen una forma clarament ovalada o circular, es creu que són la unió de dos estanys més petits, ja que, d'aquesta manera la direcció i forma dels quals si que seria semblant a la resta, per tant s'han tractat com a depressions diferents. Pel que fa a la relació longitud-amplada, aquesta oscil·la entre 1,01 (forma circular) i 2,85 (forma elongada). Hi ha 4 estanys força circulars (Canyà, Estanyet, Tonyà, Passabords), i dos d'aquests pertanyen als tres

estanys que tenen una orientació diferent de la resta. En canvi, els que tenen una forma més allargada, tenen tots una orientació molt més similar entre ells. Aquest fet permet suposar que la forma està relacionada en gran mesura amb alguna estructura del subsòl que segueix aquesta orientació. Si s'accepta aquesta hipòtesi com a vàlida, es pot intuir que existeix una certa relació entre l'origen dels estanys i les falles normals que travessen aquest sector de la depressió empordanesa, ja que, en la majoria d'estanys, l'orientació de l'eix llarg és paral·lela a les fractures NO-SE que mostra la cartografia geològica existent (ITGE, 1994; ICC, 1996a, 1996b i 1996c).

Una altra característica que crida molt l'atenció, i que reforça la hipòtesi anterior, és que, en la majoria d'estanys la vora amb més pendent i desnivell se situa al costat oest o sud-oest. De l'observació del model digital de terreny (Figura 7), es pot apreciar una certa alineació dels estanys seguint les zones de fractura, adossats a aquestes, i en el bloc enfonsat relativament.

A partir d'aquesta informació es pot plantejar la hipòtesi que les depressions estudiades s'haurien format adossades al pla de falla d'aquestes fractures. Les falles serien zones preferencials de fluxos d'ascens d'aigües profundes que haurien induït processos de subsidència per subfusió (rentat de fins) en els materials neògens. Amb aquests fets, s'explicaria perquè els estanys tenen formes més o menys ovalades, estan situats a diferents intervals d'alçades, estan alineats i tenen un costat amb un relleu més accentuat.

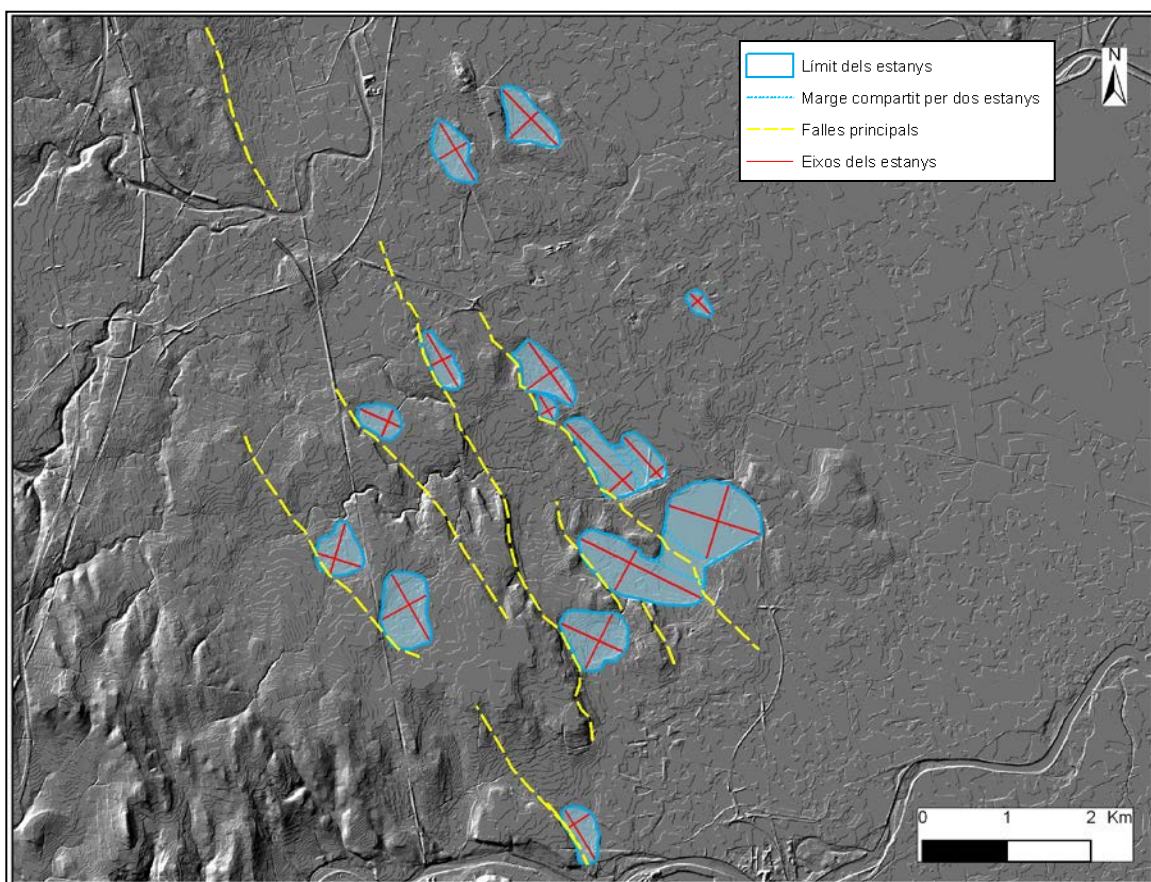


Figura 7: Localització de les fractures i orientació dels estanys (MDT: ICGC).

5.4 Perfils de tomografia elèctrica

A continuació es descriuen i interpreten els perfils de resistivitats obtinguts mitjançant l'aplicació del mètode de prospecció elèctrica (Figura 8). En tots es poden diferenciar 3 grans zones, les quals es corresponen amb la vora oest (esquerra), el centre i la vora est (dreta) de cada estany. Per clarificar i homogeneïtzar l'explicació en el text, s'ha optat per dividir la resistivitat en els intervals següents: 1,5-6 Ωm Molt baixa, 6-24 Ωm Baixa, 24-96 Ωm Mitja, 96-512 Ωm Alta i >512 Ωm Molt alta. La distribució de resistivitats segueix patrons molt semblants en cascuna d'aquestes tres zones, a tots els perfils. Això posa de manifest que la seva estructura interna és comparable, i per tant apunta cap a una estructura interna lligada a uns processos comuns.

- **Closa Gran:** Al marge esquerre del perfil, a la part superior i amb un gruix d'uns 8 m, es diferencia una unitat horitzontal amb unes resistivitats altes i molt contínues. Aquesta es correspondria amb els materials quaternaris antics presents a la superfície zona (Qp_{mg}). Per sota d'aquesta unitat s'observa una unitat de resistivitats mitjanes o baixes, amb un gruix d'uns 25 m, la qual es correspondria amb els materials neògens (NP_{sm}). El fet que aquesta sigui tant irregular i discontinua, es pot deure a l'efecte tant de les fractures de la zona, com a la distribució no homogènia de l'aigua subterrània.

Per sota de les unitats anteriors, s'observa una zona circular de resistivitats molt baixes, i al costat d'aquesta, s'observa una zona amb una forma convexa i resistivitats mitjanes. Aquesta zona es correspondria tant amb els efectes sobre les unitats anteriors de la falla que transcorre pel subsòl, com amb la presència d'aigua.

Pel que fa a la part central s'observa en superfície una unitat horitzontal d'uns 10 m de profunditat, molt discontinua i amb unes resistivitats entre mitjanes i molt baixes. Aquesta es correspondria amb els sediments quaternaris d'origen endorreic (Q_e). Aquests tenen una certa variació de resistivitat, a causa dels seu contingut en humitat. Dins d'aquets, s'interpreta el nivell freàtic a uns 7-8 m de profunditat i amb un gruix d'uns 7 m. Posteriorment, s'observa una altra unitat d'uns 20 m, també molt irregular pel que fa a la continuïtat horitzontal, amb zones de resistivitats des de molt baixa fins a mitja. Aquesta capa s'interpreta com els mateixos materials quaternaris antics (Qp_{mg}) que es troben en superfície a les bores del perfil, però que en el procés de subsidència, s'han fracturat. A més, presenten variacions d'humitat. En els últims 30 m, s'observa una zona molt heterogènia pel que fa a les resistivitats, on s'hi poden identificar en primer lloc dues àrees de forma convexa on la resistivitat és mitjana, resseguides per àrees de menor resistivitat. Aquestes anomalies es creu que es corresponen amb materials neògens (NP_{sm}), flexionats i desplaçats per fractures.

Pel que fa al costat NE del perfil, aquest segueix un esquema semblant al SO, és a dir, a la part superior del perfil i amb un gruix de 10 m, es diferencia una franja horitzontal amb unes resistivitats altes, que es correspondrien amb els materials quaternaris antics (Qp_{mg}), i per sota d'aquesta unitat, s'observa una capa de resistivitats mitjanes, amb un gruix d'uns 15 m i de forma molt irregular i discontinua, que es correspondria amb els materials neògens (NP_{sm}).

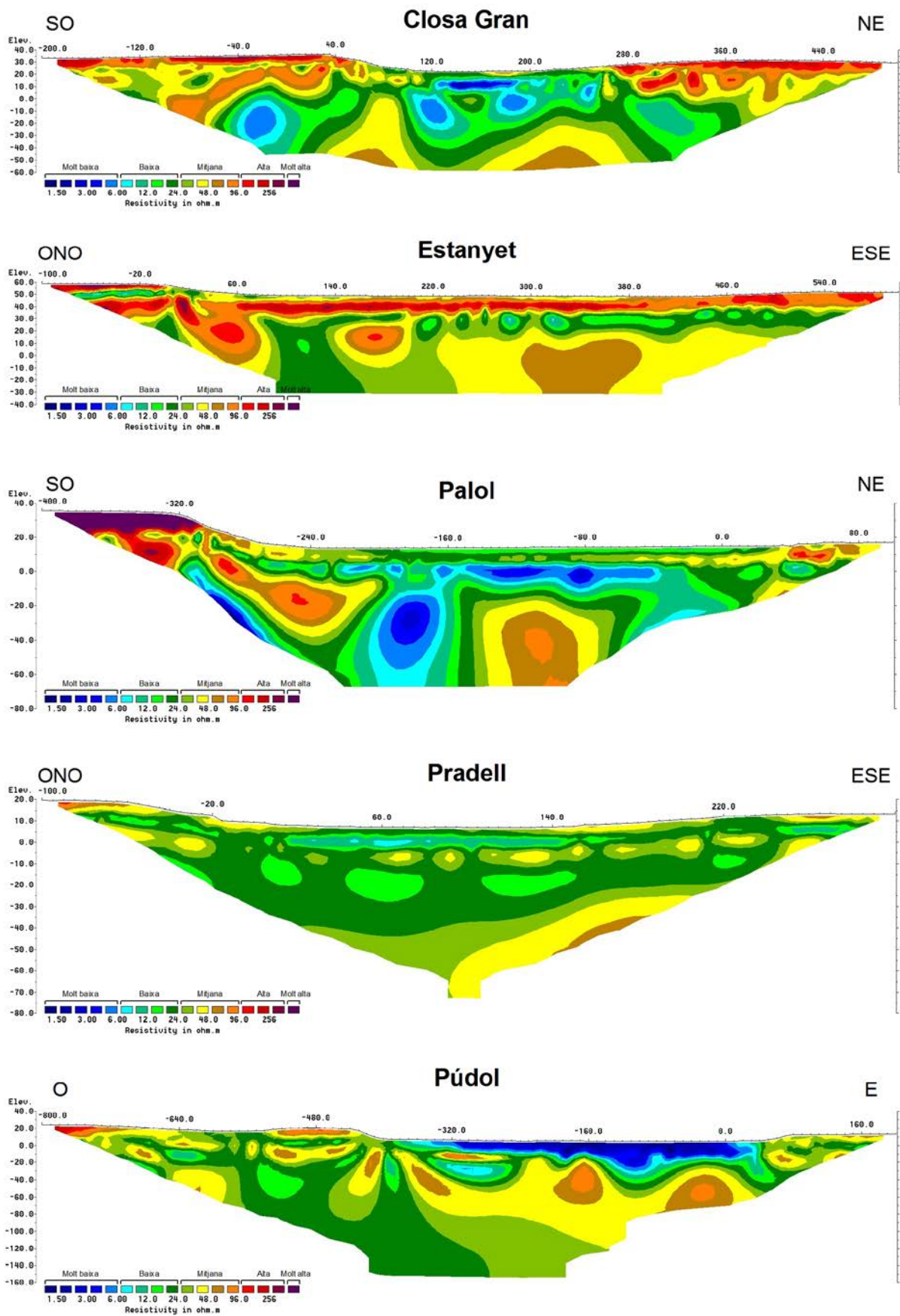


Figura 8: Perfils de resistivitats elèctrica de cada un dels estanys.

- **Estanyet:** Cal esmentar, que tot i que aquesta depressió segueix un model molt semblant a les altres, en aquesta no hi apareixen els materials quaternaris antics.

Pel que fa al marge situat a l'oest, s'observa una primera unitat horitzontal d'uns 5-6 m amb unes resistivitats altes. Per sota hi ha una altra unitat d'uns 7 m, però de resistivitats entre baixes i mitges, i encara per sota una altra capa de resistivitats altes d'uns 20 m de gruix. Aquestes tres unitats, es correspondrien amb els materials neògens detrítics (sorres i graves) presents a la zona (NPsm). El fet que aquests sediments neògens estiguin travessats per una zona de menor resistivitat i de forma molt horitzontal, s'interpreta com l'alternança de lutites, sorres i graves amb diferents graus d'humitat.

Seguidament, entre aquest marge i el centre de l'estany, s'hi distingeix una franja de resistivitats altes, amb una orientació subvertical en direcció cap al centre de l'estany, envoltada de resistivitats mitjanes. Aquesta s'interpreta com a materials neògens resistius (graves, sorres), fracturats, inclinats i enfonsats cap al centre de la depressió, i al costat dret d'aquesta, s'observa una franja vertical de baixes resistivitats, que seria una possible zona amb aigua a través dels materials fracturats.

A la zona central de la depressió en superfície, s'observa una unitat horitzontal d'uns 10 m de gruix, bastant uniforme i de resistivitats altes. Aquesta es correspondria amb els materials quaternaris d'origen endorreic (Qe) que rebleixen la depressió. Per sota, hi ha una franja d'uns 8-12 m de gruix, amb resistivitats baixes a mitjanes, que progressivament passen a mitjanes en fondària. Aquests darrers materials es correspondrien amb el substrat Neogen enfonsat.

Al marge dret del perfil, s'observen una sèrie de franges amb distribució de resistivitats bastant horitzontal i semblant a la del marge esquerre. En superfície hi ha una franja de resistivitat alta d'uns 12 m de gruix, seguida d'una nova franja de resistivitats baixes d'uns 12 m de gruix. Aquestes dues capes es correspondrien amb els materials neògens (NPsm).

-**Palol:** En primer lloc, al marge esquerre hi ha una unitat horitzontal d'uns 10 m de gruix i resistivitats molt altes, la qual es correspon amb els materials quaternaris antics (Qpfc) presents a la superfície de la zona. Per sota d'aquesta hi ha una unitat d'uns 10 m de gruix i resistivitats entre altes i mitjanes. Aquesta es correspondria amb materials neògens formats per sorres (NPsm). A continuació, entre aquest marge i la zona deprimida central, s'observa una àrea de resistivitats predominantment mitjanes, la qual es troba disposada de forma inclinada en direcció al centre del perfil. Aquesta, es correspondria amb el pla de falla d'una de les fractures que transcorren per la zona, i que delimita l'estany per l'oest.

Pel que fa a la zona central, hi ha una primera unitat horitzontal d'uns 7 m de gruix, amb resistivitats entre baixes i mitges. Aquesta es correspondria amb els rebliments quaternaris d'origen endorreic no saturats (Qe). Per sota hi ha una altra unitat, d'uns 10 m de gruix, amb resistivitats baixes i molt baixes, i amb un relleu molt horitzontal a la part més superficial, però ondulat en profunditat. Aquesta es correspondria amb materials quaternaris endorreics saturats (Qe). El fet que aquesta capa tingui un límit superior tan horitzontal i continu, s'interpreta com la presència del nivell freàtic a la zona. Seguidament, s'observa una franja horitzontal molt heterogènia, amb resistivitats entre baixes i altes, i un gruix d'uns 15 m. Aquesta es correspon amb els materials quaternaris antics (Qpfc)

fracturats i desplaçats. Tot seguit en profunditat, es poden diferenciar tres grans zones de mides semblats, les quals formarien una unitat. D'esquerra a dreta, aquestes tenen resistivitat mitjanes, molt baixes i de nou mitjanes. Es creu que la zona central amb resistivitats molt baixes, podria correspondre's amb una zona d'ascens d'aigües profundes mineralitzades o bé de descens d'aigua cap a l'aquífer profund de la zona. Les altres dues zones estarien formades pels mateixos materials, però sense humitat. Aquestes tres unitats s'interpreten com a materials neògens (NPsm) fracturats i enfonsats per efecte de les falles de la zona.

Finalment, al marge dret d'aquest perfil, s'observa en superfície una franja de resistivitats mitjanes, d'uns 10 m, i una segona franja més profunda, amb unes resistivitats més baixes, les quals presenten un cert esglaonament format per petites fractures que limiten la depressió. Aquestes unitats es correspondrien amb materials quaternaris (Qpfc) i neògens (NPsm) respectivament.

-Pradell: En el marge esquerre s'observa una unitat superficial d'uns 5 m de gruix i resistivitats mitjanes, que es correspon amb materials quaternaris (Qpmg) formats per graves. Per sota d'aquesta, hi ha una segona unitat d'uns 15 m gruix mínim i resistivitats entre mitjanes i baixes, que serien materials neògens sorrencs (NPsm).

Pel que fa a la zona central, el primer que s'observa és una estreta franja d'uns 5 m, amb resistivitats mitjanes, que estaria formada per quaternaris d'origen endorreic no saturats (Qe). Per sota d'aquesta i amb un gruix d'uns 7 m hi ha una altra unitat molt horitzontal de resistivitats baixes, que estaria formada per materials quaternaris saturats (Qe), i que marcaria el nivell freàtic. Després s'observa una altra unitat horitzontal bastant discontinua i esglaonada, de resistivitats mitjanes, amb uns gruixos d'uns 12 m. Aquesta es correspondria amb materials quaternaris antics (Qpmg). En profunditat s'observa una nova zona de menor resistivitat que en el cas anterior, amb uns gruixos de 10 a 30 m, que es correspondria amb materials neògens (NPsm), els quals estarien formats per sorres que en fondària passarien a ser margues.

Pel que fa al marge dret, s'observa una primera franja superficial d'uns 5 m de gruix i resistivitats mitjanes, que estaria formada de materials quaternaris antics (Qpmg). Després una unitat d'uns 15 m de gruix i resistivitats mitjanes, que es correspondrien amb materials neògens (NPsm). A més, cal destacar la presència d'algunes fractures menors que limiten la depressió entre aquest marge i el centre del perfil, les quals estan evidenciades per l'enfonsament dels materials quaternaris (Qpmg).

-Púdol: Al marge esquerre, s'observa una unitat superficial amb de 8 m de gruix, no gaire regular i de resistivitats més aviat altes. Aquesta es correspondria amb materials quaternaris (Qpmg). Per sota d'aquesta, s'observa una franja d'uns 12 m de gruix, amb resistivitats baixes, força irregular i discontinua. Aquesta es correspondria amb materials neògens formats per sorres (Npsm). El fet que la distribució de la resistivitat de les dues capes anteriors sigui tant irregular, s'interpreta com l'efecte de diverses fractures, que provoquen desnivellaments entre materials.

Pel que fa a la zona situada entre el marge anterior i el centre del perfil, s'observen un seguit de zones de resistivitat entre mitjana i alta, que es disposen de forma vertical o inclinada. Aquestes

correspondrien a materials quaternaris i neògens fortament fracturats i inclinats per els efectes de la falla que passa per aquesta zona.

Al centre del perfil, s'observa una zona amb un marge superior molt recte i horitzontal, i un marge inferior lleugerament ondulat i irregular, amb unes resistivitats molt baixes i uns gruixos que varien dels 5 als 15 m. Aquesta unitat es correspondria amb el rebliment de sediments quaternaris d'origen endorreic (Qe). Per sota s'observa un nivell horitzontal discontinu i de resistivitats d'altas a mitjanes amb un gruix d'uns 16 m. Aquests es correspondria amb els materials quaternaris antics (Qp_{mg}), de nou molt fracturats, enfonsats de forma diferencial i amb variacions d'humitat. Finalment, per sota d'aquesta, hi ha una zona que s'estén fins al fons del perfil, de resistivitats mitjanes. Aquesta es correspondria amb els materials neògens del subsòl (NPsm), els quals estan formats inicialment per sorres i més avall margues.

Pel que fa al marge dret, s'observa una fina franja de resistivitats mitges i uns 6 m de gruix, que es correspondria amb materials quaternaris (Qp_{fc}), i posteriorment una altra franja força irregular i discontinua de resistivitats també mitges i uns 10 m de gruix, que es correspondria amb materials neògens (NPsm). A més, cal esmentar, la presència entre la zona central del perfil i el marge dret, d'una falca de baixes resistivitats que s'endinsa sota els materials quaternaris i neògens en direcció est, la qual es pot interpretar com la infiltració d'aigües cap a l'aqüífer Neogen seguint una zona de fractures.

5.5 Perfils de refracció sísmica

La tècnica geofísica de refracció sísmica s'ha dut a terme en tres dels estanys estudiats (Closa Gran, Palol i Pradell). Amb la seva aplicació, s'ha vist com tots tres presenten una distribució de capes quasi idèntica, consistent en dues capes sísmiques (Figura 9). En el conjunt dels tres estanys, les velocitats sísmiques de la capa 1 han estat de 234 a 339 m/s, i els seus gruixos de 2 a 4 m. Per a la capa 2 les velocitats han estat de 1679 a 1882 m/s, i les fondàries mínimes entre 10 i 15 m.

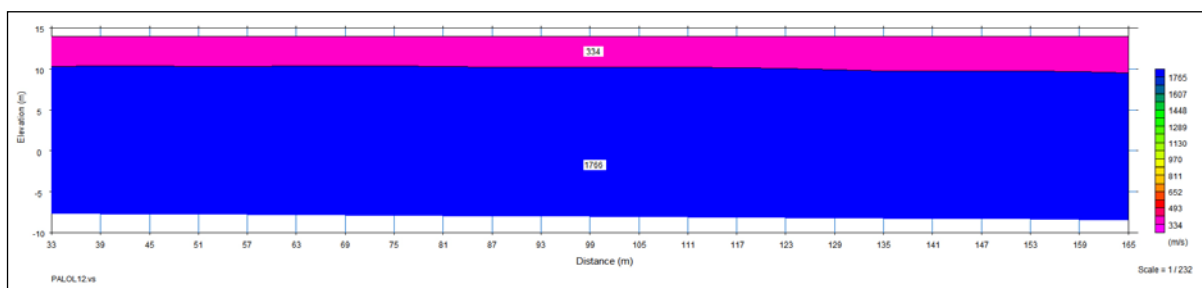


Figura 9: Model de capes sísmiques a l'estany de Palol.

Pel que fa a l'atribució litològica de les capes detectades, es pot dir que les dues estan formades per materials com llims i sorres argiloses en general de gra fi, els quals són típics d'aquestes zones endorreiques. Cal dir que aquestes dues franges pertanyen a la unitat formada per sediments quaternaris endorreics (Qe). En moments d'inundació, els sediments de la capa 1 poden quedar en suspensió temporal i això fa que es trobi molt poc consolidada, fet que s'accentua per l'activitat

agrícola, per la presència d'arrels i nombroses cavitats provocades per animals. A la capa 2, s'interpreta que al estar més profunda, es trobarien els mateixos materials però en estat de consolidació natural.

Una limitació del mètode ha estat la poca penetració obtinguda, amb fondàries de reconeixement màxim de l'ordre de 15 m. Per tant això no ha permès detectar la base dels sediments endorreics. Tot i això, ha servit per saber que hi ha un gruix mínim major als 10 m en els tres estanys estudiats. A més, aquest gruix és coherent amb el que s'ha obtingut als perfils elèctrics.

5.6 Piezometria

Pel que fa a la piezometria general de la zona (Figura 10), es pot dir que l'aigua subterrània es troba a unes cotes màximes compreses entre els 85 i 95 m a la zona oest de l'àrea estudiada, i mínimes entre els 5 i -5 m a la zona est. Això fa que s'estableixi un flux descendent en direcció O-E, a través de les formacions neògenes en direcció als sediments quaternaris fluviodeltaics. Els nivells d'aigua han anat fluctuant lleugerament al llarg de les diferents campanyes, però la direcció del flux regional d'aigua subterrània sempre s'ha mantingut. Durant totes les campanyes el nivell freàtic de la zona s'ha mantingut per sota de la cota topogràfica mínima interior dels estanys, per això aquests no es solen trobar inundats per la intersecció del nivell freàtic.

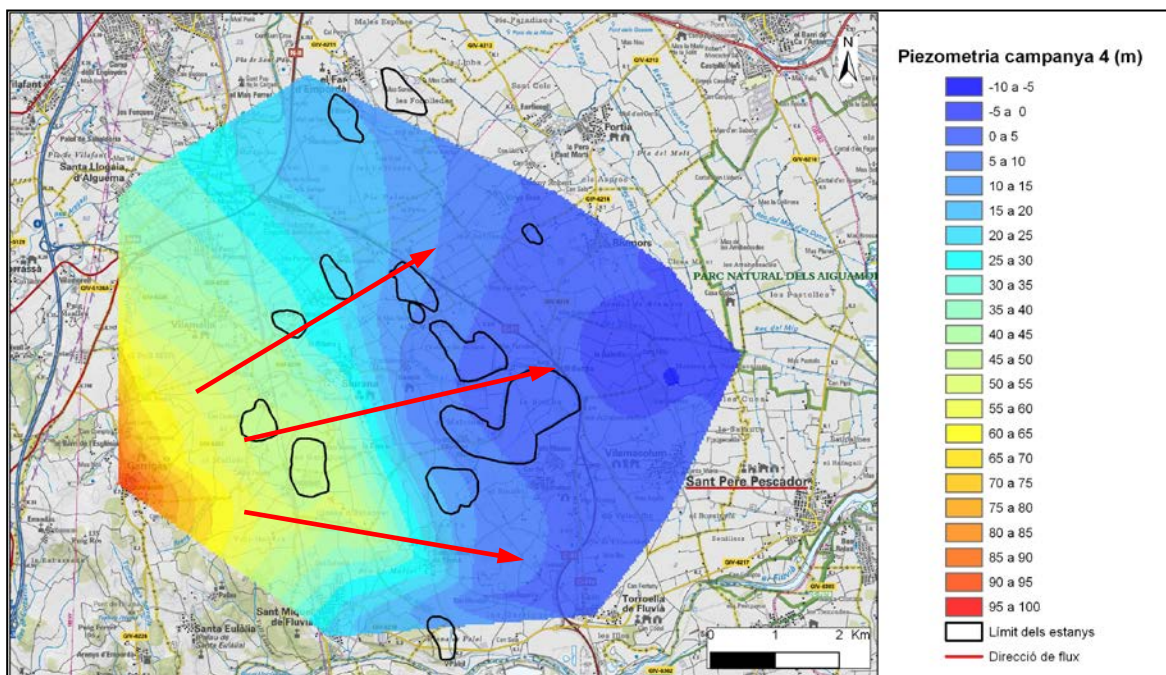


Fig. 10: Mapa il·lustratiu del nivell piezomètric de la zona i la direcció predominant dels fluxos d'aigua.

Mitjançant l'observació de la Figura 11, es pot dir que de la campanya 1 a la 5 (de juny a setembre), hi va haver un cert descens de nivell piezomètric (menor als 0,5 m), generalitzat a tota l'àrea d'estudi. Aquest s'atribueix al fet que durant aquest període, la precipitació en conjunt va ser escassa i les temperatures altes (Figura 6), fet que va reduir la infiltració a la vegada que augmentava la demanda

per a usos agrícoles. Aquest va ser més notable entre les campanyes 3 i 5 (d'agost a setembre), sobretot a les zones de plana deltaica, que és on hi ha més pous actius.

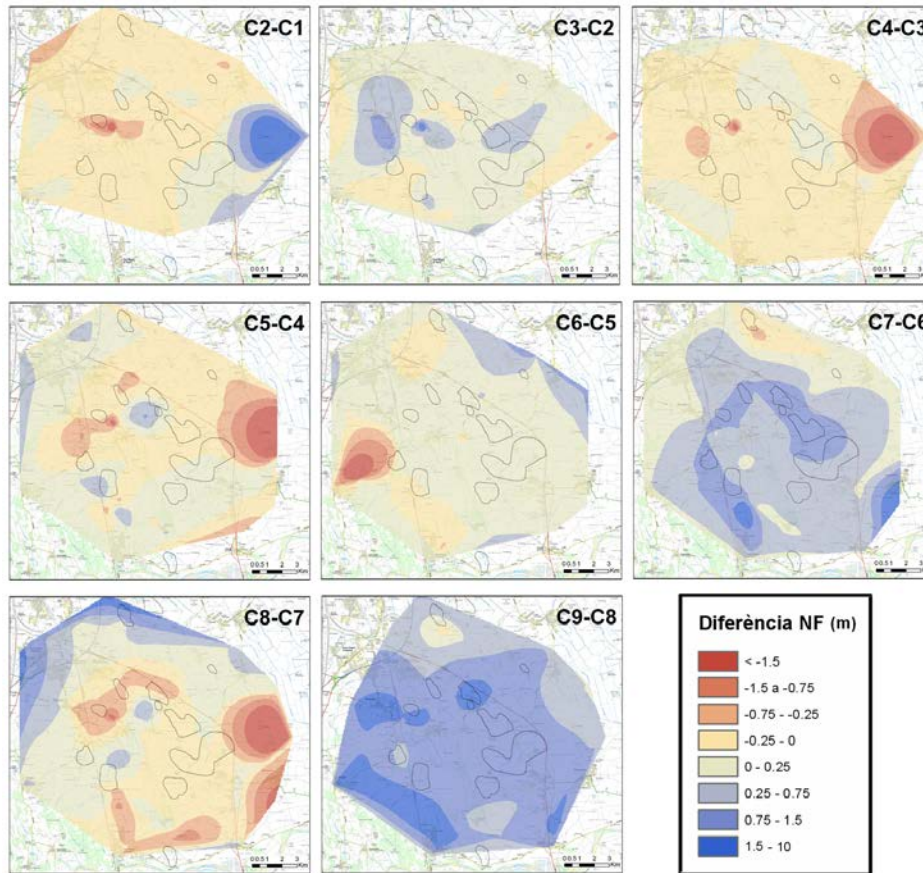


Figura 11: Mapes de representació de la variació del nivell freàtic entre campanyes successives.

Posteriorment, entre les campanyes 6 i 9 (de setembre a desembre), es va donar una recàrrega generalitzada dels aqüífers, la qual de forma general es deu a la disminució de les temperatures i l'augment de les precipitacions (Figura 6), i també a la disminució de les captacions per a usos agrícoles. Més en detall, entre les campanyes 5 i 6 (setembre) es va observar com el nivell piezomètric ja no disminuïa, però tampoc augmentava notablement. Després, entre la 6 i la 7 (de setembre a octubre) sí que hi va haver un augment generalitzat del nivell piezomètric, de l'ordre de 0,25 i 0,75 m, localitzat majoritàriament a la zona dels estanys. Aquest augment s'atribueix a l'episodi de precipitacions dels dies 28 i 29 de setembre, que va donar unes precipitacions acumulades de 81 mm (Figura 7). En aquesta situació, els sediments endorreics dels estanys van retenir temporalment l'aigua al subsòl, fet que va contribuir a la recàrrega progressiva dels aqüífers al seu voltant durant els dies successius.

Entre les campanyes 7 i 8 (d'octubre a novembre), la recàrrega de l'aqüífer es devia donar bàsicament per l'aportació lateral del riu Manol cap als aqüífers quaternaris de la plana. I entre les campanyes 8 i 9 (de novembre a desembre), va tornar a produir-se un augment generalitzat del nivell piezomètric, amb uns valors compresos entre 0,75 i 1,5 m, degut a un seguit d'episodis de fortes pluges, amb un total acumulat durant de 119 mm, i amb un màxim de 74 mm el dia 30 de novembre del 2014. Aquest episodi va causar la inundació total de tots els estanys, fet que es va perllongar

durant unes quantes setmanes. De nou, els estanys van actuar com a zones de recàrrega dels aqüífers circumdants.

5.7 Hidroquímica

A nivell hidroquímic es poden diferenciar dos grans grups d'aigües: un que presenta fàcies bicarbonatades càlciques i un que presenta fàcies bicarbonatades sòdiques. La Figura 12 mostra la projecció de les mostres d'aigua estudiades en el diagrama de Piper.

La fàcies bicarbonatada càlcica comprèn 40 mostres, que es troben distribuïdes pels aqüífers neògens superficials, els aqüífers quaternaris, i també en una font. Aquestes aigües serien atribuïbles a una recàrrega local (precipitacions o aportacions fluvials). Dins d'aquestes s'hi distingeixen tres tipologies: una amb uns paràmetres típicament d'aigües bicarbonatades (33 mostres), unes que tendeixen a ser de tipus més sulfatat (8 mostres), i unes altres de tipus més clorurat (2 mostres). A la depressió de l'Empordà, el sulfat es pot considerar com un indicador de recàrrega profunda lligada a fluxos regionals, mentre que el clorur es pot atribuir tant a influència d'aigua marina en zones properes al litoral, com a pol·lució antròpica (Mas-Pla *et al.*, 2013).

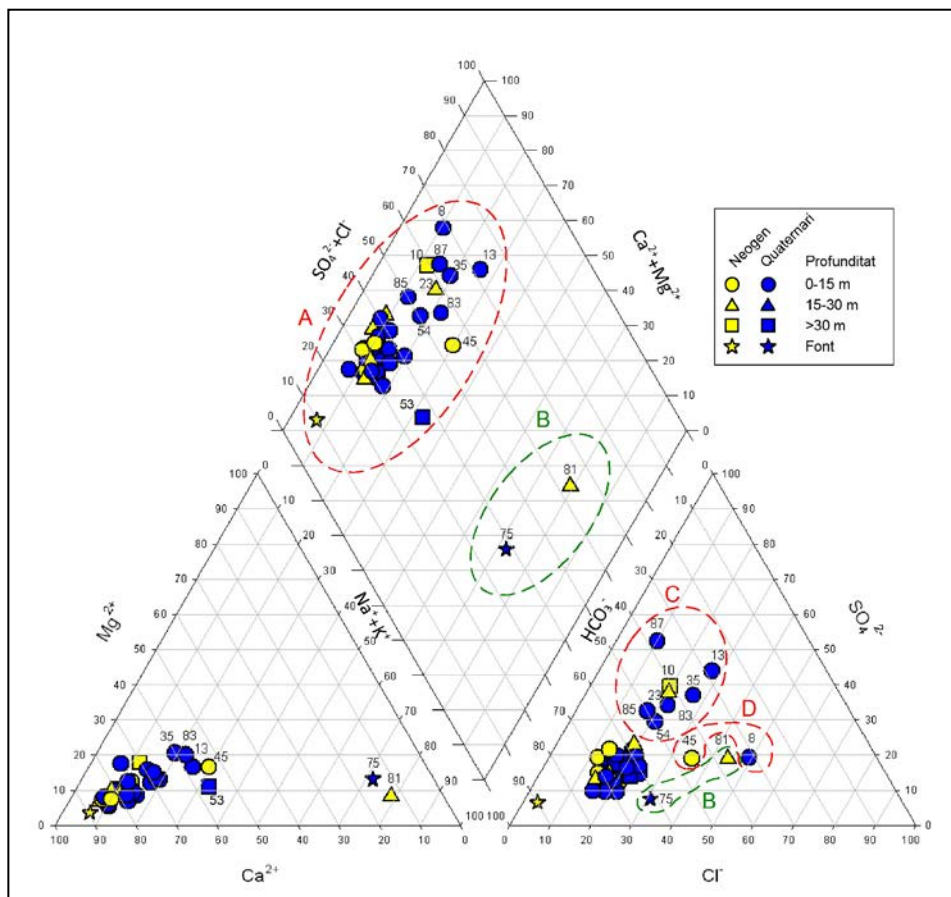


Figura 12: Diagrama de Piper de les mostres analitzades. A) fàcies bicarbonatada càlcica, B) fàcies bicarbonatada sòdica, C) fàcies bicarbonatada càlcica sulfatada, D) fàcies bicarbonatada càlcica clorurada.

Pel que fa a les bicarbonatades càlciques sulfatades (mostres 10, 13, 23, 35, 54, 83, 85 i 87), la presència a l'aigua de la zona de l'anió sulfat podria tenir diferents orígens. Es pot donar per la circulació de l'aigua per roques evaporítiques, però aquesta opció es pot descartar, ja que no es té

constància de l'existència d'aquest tipus de roques aflorant o a poca fondària a la zona. També podria aparèixer sulfat a l'aigua a partir de disseminacions de minerals sulfatats (guix, celestina) o per de l'oxidació de pirita, les quals es podrien trobar localitzada a les margues de Siurana (aquestes afloren en alguns punts, però normalment estan a certes profunditats). Aquest origen seria atribuïble a les mostres 10, 13, 23, 35 i 85. En últim lloc, els sulfats podrien tenir un origen lligat a cursos fluvials procedents d'àrees font riques en materials sulfatats. D'aquest tipus serien les mostres 54, 83 i 87, que estarien influenciades pel riu Fluvià (Mas-Pla *et al.*, 2013).

Pel que fa a les bicarbonatades càlciques clorurades, es troben les mostres 8 i 45. La mostra 45 es troba situada a l'est de la zona d'estudi i propera al mar, per tant, el seu alt contingut en clorurs s'interpreta que prové de la intrusió d'aigua marina a la zona. La mostra 8, com que conté un nivell de nitrats alt (204 mg/l), es pensa que els seus clorurs poden tenir un origen antròpic.

La fàcies bicarbonatada sòdica comprèn tan sols les mostres 75 i 81. La mostra 81 pertany a un sondeig de 73 m de profunditat, situat dins del perímetre de l'estany de Vilacolum, i del qual en brolla aigua de forma natural. Té un contingut molt baix de nitrats (9 mg/l) i alt en clorurs (164 mg/l) i sulfats (27 mg/l). El seu pH el més alt de totes les mostres analitzades (8,69). En base a això, es podria considerar aquesta mostra com a provinent d'una recàrrega profunda per fluxos regionals. En referència a la mostra 75, tot i tenir característiques hidroquímiques semblants, correspon a una font que sorgeix del contacte entre sediments quaternaris i neògens, i s'interpreta que correspondria a una recàrrega local de tipus superficial, amb poc recorregut i influència antròpica.

La conductivitat elèctrica i el pH no han resultat ser paràmetres indicadors del possible origen profund de les mostres d'aigua. Totes les mostres interessants tenen conductivitats entre 800 i 1600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ i valors de pH propers a la neutralitat, i no predominen uns valors concrets en cada grup.

6 DISCUSSIÓ

Els resultats obtinguts mitjançant els diferents aspectes tractats en el treball, permeten plantejar un model comú dels estanys quant a la seva estructura interna, edat de formació i rebliment, així com el seu funcionament hidrogeològic actual i passat. A partir d'aquí es poden plantejar hipòtesis sobre la relació existent entre els estanys, l'estructura tectònica regional i els fluxos d'aigua subterrània a escala de la depressió de l'Empordà, així com dels processos que els haurien generat.

6.1 Síntesi de l'estructura interior comuna

La interpretació del perfils geofísics realitzats, posa de manifest que les depressions estudiades tenen al seu interior uns materials de rebliment, que omplen el relleu dels materials que tenen a sota, i que no es troben deformats pels processos de subsidència. Aquests tenen unes edats entre holocenes i plistocenes superiors. Per sota d'aquest rebliment, s'observen materials quaternaris antics del Plistocè mitjà, que a l'interior de les depressions es troben fracturats, mentre que a l'exterior no. Sota les unitats anteriors, a totes les depressions hi ha el substrat neogen, el sostre del qual defineix formes

còncaves i convexes, que denoten una subsidència repartida irregularment, donant com a resultat blocs més i menys enfonsats.

A més, totes les depressions, tenen la vora oest a una cota superior que la est. El gruix de materials de rebliment sol ser superior als sectors centre-oest que no pas als centre-est, cosa que seria un indicatiu que hi ha hagut una subsidència diferencial en el si de cada depressió. Això té relació amb el fet que al límit oest dels estanys s'observen anomalies verticals d'alta i baixa resistivitat, que apunten a la presència d'un o més plans de fractura que desplacen els materials, enfonsant-los cap a la depressió. També hi ha altres fractures a la vora est, però que produeixen un menor desplaçament, i igual que les altres, aquestes també estan inclinades cap al centre de les depressions. Aquests sistemes de fractures tendeixen a confluïr a unes fondàries sota la superfície dels estanys estudiats, de l'ordre de 100-200 m en els més petits (Palol, Pradell) i fins a uns 300-400 m en els majors (Estanyet i Púdol).

6.2 Edat de formació i rebliment

Es pot estimar que les depressions es van formar entre el període de temps comprès entre el final del Plistocè mitjà i el Plistocè superior, mentre que el seu rebliment sedimentari hauria succeït entre el Plistocè superior i l'Holocè. No es disposa d'informacions més precises, com ara datacions absolutes de sediments, que permetrien acotar millor aquesta assignació. En base als gruixos estimats de sediments endorreics a partir de l'anàlisi en detall dels gradients verticals de resistivitat en els perfils ERT, es poden calcular les taxes de sedimentació i subsidència mitjanes (Taula 9).

Taula 9: Síntesi de les taxes de sedimentació i subsidència per al període de temps estimat de formació i rebliment dels estanys. (): A l'estany d'Estanyet no hi ha presència de sediments quaternaris antics, i els càlculs consideren el sostre dels sediments neògens.*

Estany	Gruix estimat sediments endorreics	Taxa sedimentació endorreica	Desnivell sostre sediments quaternaris	Taxa subsidència (mm/a)	Ràtio sedimentació /subsidència	Ràtio subsidència/ sedimentació
Closa Gran	8,8-11,5	0,07-0,09	22,6-25,7	0,18-0,20	0,39-0,45	2,22-2,57
Estanyet (*)	7,6-9,6	0,06-0,08	15,1-16,3	0,12-0,13	0,50-0,61	1,63-2,00
Palol	14,5-17,9	0,12-0,14	30,5-37,0	0,24-0,29	0,48-0,50	2,00-2,07
Pradell	7,6-9,6	0,06-0,08	8,9-10,9	0,11-0,17	0,47-0,55	1,83-2,13
Púdol	13,4-17,3	0,11-0,14	29,6-34,2	0,23-0,27	0,48-0,52	1,93-2,09

Com es pot observar a la taula anterior, la taxa de sedimentació és molt baixa i similar en tots els estanys. Els que tenen valors una mica més alts són Palol i Púdol, on hi desemboquen petits torrents que poden haver afavorit una major arribada de sediments. En el cas de Closa Gran, cal recordar que el perfil no passa per la zona central de l'estany, on deu haver major gruix de sediments. El Pradell, al ser tan petit i amb una conca de recepció mínima, rebria molt poca aportació. L'Estanyet està en cotes altes i amb poc relleu al seu voltant, per tant també hi deu haver anat arribant poc sediment.

Pel que fa a la taxa de subsidència, és semblant i baixa en tots els estanys, però major que la de sedimentació (aproximadament el doble). Els estanys més subsidents són Palol i Púdol, i els que menys, Estanyet i Pradell. Aquest valors es poden considerar baixos en comparació als obtinguts en àrees actives on es produeix subsidència per fenòmens càrstics relacionats amb evaporites (Gutiérrez

et al., 2009; García Moreno i Mateos, 2011; Carbonel *et al.*, 2014b). Les dades reforcen la hipòtesi que han tingut una evolució simultània en el temps, i que han experimentat processos sedimentaris i d'enfonsament comparables.

6.3 Funcionament hidrogeològic actual

S'han observat dos tipus de situacions pel que fa a la relació dels estanys amb la piezometria de la zona, que es corresponen amb els períodes en què estan secs i aquells en què estan inundats. En condicions seques, l'aigua de l'aqüífer superficial queda retinguda en el subsòl poc permeable dels estanys, atesa la concavitat que hi defineix el substrat enfonsat. Es desconeix si es produeix infiltració descendent cap a aquífers més profunds, al llarg de les fractures, però presumiblement serien volums petits. En aquells estanys en què es detecten anomalies geofísiques possiblement relacionables amb fluxos ascendents (Estanyet, Palol i Púdol), es donaria una mescla d'aigües a certa fondària dins del rebliment endorreic i la zona alta del substrat deformat. En aquesta situació, les aigües profundes no contribuirien a la millora de la qualitat hidroquímica dels aquífers superficials.

En condicions d'inundació dels estanys, aquestes zones actuen com a magatzems temporals d'aigua, i durant el temps en que l'aigua es troba retinguda al seu interior, els estanys poden alimentar lateralment l'aqüífer superficial de la zona. Cal dir que el fet que tinguin construïts drenatges, provoca que el temps que l'aigua quedi retinguda és molt menor al que seria de forma natural. Per altra banda, també és possible que davant l'augment de la làmina d'aigua, possibles fluxos descendents tinguin una major capacitat de recàrrega dels aquífers profunds. Amb aquesta situació, la qualitat hidroquímica d'aquestes aigües profundes es podria veure afectada negativament.

6.4 Relació dels estanys amb l'estructura geològica i els fluxos d'aigua regionals

Es coneix que a la zona d'estudi, en fondària se situa la làmina encavalcant Figueres-Montgrí, formada per nivells de guixos i calcàries que permeten la circulació d'aigua. Aquesta làmina aflora a l'oest de Figueres, s'aprofundeix en direcció sud-est per sota els sediments neògens (uns 1000 m a la vertical del sondeig GEOT#1), i aflora de nou al massís del Montgrí. La zona de recàrrega hídrica es situaria a la zona de Figueres, on afloren els materials i hi estan intensament carstificats. A més, per aquest sector de la depressió de l'Empordà transcorren diversos plans de falla amb una orientació NO-SE (ITGE, 1994; ICC, 1996c). Això faria que els fluxos d'aigües regionals profunds, circulïn de forma preferent per aquestes zones més fracturades i/o carstificades.

El fet que en general tots els estanys tinguin una forma ovalada amb la mateixa orientació (NO-SE) que les falles de la zona, deixa entreveure que la formació dels estanys estudiats tindria relació amb la circulació de fluxos d'aigua a través d'aquestes fractures. L'alineació i orientació dels ressalls morfològics que s'observen en la topografia de la zona constitueix un indicatiu d'activitat tectònica recent (plioquaternària) d'aquestes falles normals (ITGE, 1994; Saula *et al.*, 1994), afavorint la circulació de l'aigua a través seu.

6.5 Model de formació i evolució dels estanys estudiats

Sintetitzant tota la informació analitzada fins ara, s'arriba a la hipòtesi que les depressions estudiades serien dolines de flexió relacionades amb fenòmens de subfusió càrstica, tal i com es descriu al mapes geològics d'aquesta zona (ITGE, 1994; IGC-ICC, 2010 i 2011; IGC-ACA-ICC, 2013 i 2014). La interpretació que es dona de la seva formació i evolució és la següent (Figura 13). Durant l'espai de temps comprès entre el final del Plistocè mitjà i el Plistocè superior, s'haurien donat una sèrie de fluxos d'aigua per les capes de guixos i calcàries mesozoics de la làmina encavalcant de Figueres-Montgrí. Aquests fluxos d'aigua a pressió haurien ascendit per les fractures de la zona fins a trobar nivells neògens permeables (materials detrítics poc consolidats, predominantment sorrencs), en els quals podien estendre's lateralment en moments de nivell hidràulic alt del sistema. En els moments de descens del nivell d'aigua, això hauria propiciat l'arrossegament cap avall dels materials més fins i l'esfondrament dels materials situats per damunt. Des de fondàries d'alguns centenars de metres, un sistema de plans de trencament s'hauria propagat de manera divergent cap amunt, a través dels materials neògens i quaternaris, provocant les estructures de subsidència en superfície. Es desconeix quin paper hauria jugat en aquest procés l'activitat tectònica de les falles normals plioquaternàries.

Durant i després de la seva formació, aquestes depressions es van anar reomplint de sediments procedents de l'erosió de les pròpies vessants, aportats per petits torrents, o bé per acció eòlica. L'acumulació de tots aquest sediments endorreics hauria creat una capa molt poc permeable dins de les zones estudiades i així moltes va acabar esdevenint petits llacs permanents.

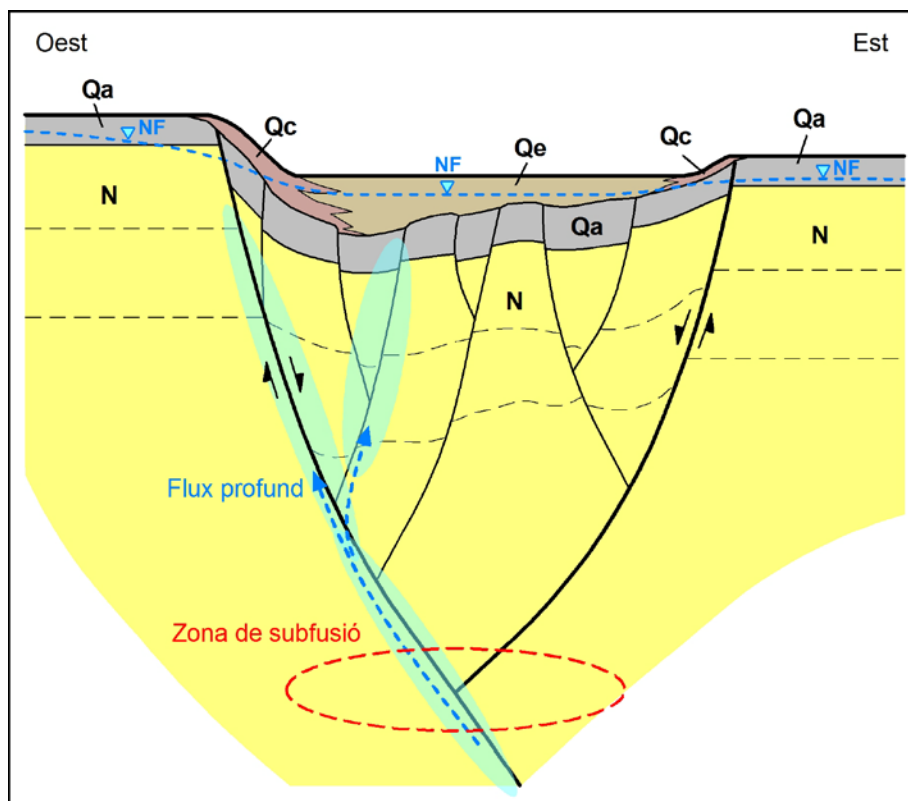


Figura 13: Model conceptual de l'estructura interna dels estanys estudiats i la seva dinàmica hidrogeològica. Qa: Quaternaris antics; Qc: Quaternaris moderns col·luvials; Qe: Quaternaris moderns endorreics; N: Neogen; NF: Nivell freàtic.

7 CONCLUSIONS

En aquest treball s'han estudiat una sèrie de depressions endorreiques del terreny localitzades en zones interiors de l'Alt Empordà, corresponents a antics estanys. En aquestes s'han caracteritzat els materials geològics, la estructura subsòl al seu interior, i la seva relació hidrogeològica amb les aigües subterrànies dels aquífers superficials i profunds.

La metodologia aplicada a estat de tipus geològic, geofísic i hidrogeològic. Ha consistit en una síntesi geològica, mitjançant la cartografia i el registre de sondejos de la zona, amb la qual s'han identificat i caracteritzat geotècnicament els materials que formen les diverses unitats del subsòl. Un anàlisi morfomètric de les depressions ha permès determinar les variables relatives a la seva forma en planta i el seu relleu, amb el qual s'ha establert una relació directa entre les depressions i les estructures tectòniques de la zona. Amb la realització de cinc perfils de tomografia elèctrica als estanys Closa Gran, Estanyet, Palol, Pradell i Púdol, s'ha caracteritzat l'estructura interna dels materials geològics presents que és comparable en tots ells, i que consisteix en un rebliment endorreic a la part superficial de la pròpia depressió, per sota del qual es troben les unitats litològiques presents a les vores, fragmentades i desplaçades de forma diferencial en profunditat. La realització de tres perfils de sísmica de refracció als estanys Closa Gran, Palol i Pradell, ha servit per determinar el gruix mínim dels sediments endorreics de l'interior dels estanys. La prospecció geofísica també ha permès estimar el període de temps en què els fenòmens de subsidència i rebliment haurien estat actius (final del Plistocè mitjà a Plistocè superior, i Plistocè superior a Holocè, respectivament), així com la velocitat a la que haurien tingut lloc (0,11-0,29 mm/any i 0,06-0,14 mm/any, respectivament).

S'ha efectuat un seguiment dels nivells piezomètrics a la zona on es troben els estanys, consistent en nou campanyes espaiades regularment en el temps (juny a desembre de 2014). Aquesta tasca ha servit per identificar un flux general d'oest a est a través dels aquífers superficials. Això s'ha complementat amb un estudi hidroquímic de les aigües de la zona, que ha permès confirmar la presència d'un flux d'aigua profund que gairebé no té manifestació en superfície. Les depressions poden funcionar de dues maneres a nivell hidrogeològic. Quan estan sense aigua interfereixen en el nivell freàtic més proper, creant un petit descens d'aquest, i quan estan plenes, recarregaren l'aquífer superficial i probablement el profund.

Com a model de formació i evolució, es pot concloure l'existència d'un flux profund d'aigua a través de la làmina encavalcant de Figueres-Montgrí que, en condicions de major pressió hidràulica, hauria ascendit per les discontinuïtats que representen les falles normals d'aquesta zona, arribant fins als materials neògens. En moments de descens d'aquest nivell hidràulic haurien tingut lloc processos de subfusió per eliminació de la fracció fina dels sediments. Això hauria provocat un col·lapse per gravetat dels materials situats per damunt, condicionat per les falles ja existents. La manifestació en superfície d'aquests fenòmens donaria lloc a les depressions estudiades.

CONCLUSIONS

This work studies a series of endorheic depressions of the ground, located in inland areas of Alt Empordà (NE Catalonia), corresponding to ancient lakes. On these depressions we characterized the geological materials, their subsoil structure, and their hydrogeological connection with the surficial groundwater and deep aquifers.

Geological, geophysical and hydrogeological methodologies have been applied. They consisted in a compilation of the available published geological literature and cartography, and existing geotechnical reports in the area. This has allowed to identify and to characterize the different units of materials that are present in the subsoil. After a morphometric analysis of the depressions, several variables relative to shape and relief have been quantified. This revealed a direct relationship between depressions and tectonic structures in the area. Five electrical resistivity tomography profiles were carried out in the lakes Closa Gran, Estanyet, Palol, Pradell and Púdol, in order to characterize their internal geological structure and the geological materials present in them. A common pattern has been revealed. It consists in a superficial fill of fine endorheic sediments overlying fragmented and vertically displaced lithological units also present on the external surroundings. Three seismic refraction profiles in Closa Gran, Palol and Pradell have led to determine the minimum thickness of sediments inside of the depressions. The interpretation of the geophysical profiles has been used to estimate the period of time that the subsidence and filling phenomena could have been active (late Middle Pleistocene to Upper Pleistocene and Upper Pleistocene to Holocene, respectively), and also the corresponding subsidence rate (0.11 to 0.29 mm/year) and sedimentation rate (0.06 to 0.14 mm/year).

Between June and December (2014) nine campaigns of piezometric levels survey in the area where the lakes are located have been done. This has led to identify a general flow from west to east through the shallow aquifers. The hydrogeological study has been complemented by a hydrochemical analysis of water samples. Apart from the shallow waters related to local recharge, the presence of a deep water flow has been found, which has not a significant surface expression. Two different hydrogeological behaviours can be distinguished regarding to the studied depressions. Under dry conditions, they only interfere with the water table at a local scale, dropping its position. When flooded, they act as a recharging area for the surficial, and probably deep, aquifers.

As a model of formation and evolution, we can conclude the existence of a deep water flow across the Figueres-Montgrí thrust sheet, which is present at depths up to 1000 m under the depressions. Due to increased hydraulic pressure, deep waters flowed up across a system of normal faults of plioquaternary age, reaching the Neogene materials. During periods of decline of this hydraulic level, descending water could have induced suffosion processes in the sediments which, because of the loss of the fine fraction, collapsed. The surface expression of these phenomena would have generated the studied depressions

8 BIBLIOGRAFIA

- ACA (2004a) “*Massa d’aigua subterrània de Catalunya, Empordà 06*”. Agència Catalana de l’Aigua, Generalitat Catalunya: 23 p.
- ACA (2004b) “*Massa d’aigua subterrània de Catalunya, Fluviodeltaic del Fluvià-Muga, 32*”. Agència Catalana de l’Aigua, Generalitat de Catalunya: 20 p.
- Bondesan, A; Meneghel, M; Sauro, U. (1992). “Morphometric analysis of dolines”. *Int. J. Speleol.* 21 (1-4), 55 p.
- Carbonel, D; Rodríguez- Tribaldos, V; Gutiérrez, F; McCalpin, J.P; Linares, R; Roqué, C; Zarroca, M; Guerrero, J i Sasowsky, I. (2014a). “Evaluation of trenching, ground penetrating radar (GPR) and electrical resistivity tomography (ERT) for sinkhole characterization”. *Earth Surf. Process. Landforms* 39, 214–227.
- Carbonel, D; Rodríguez-Tribaldos, V; Gutiérrez, F; Galve, J.P; Guerrero, J; Zocorra, M; R; Roqué, Linares, R; McCalpin, J.P; Acosta, E. (2014b). “Investigating a damaging buried sinkhole cluster in an urban area (Zaragoza city, NE Spain) integrating multiple techniques: Geomorphological surveys, DInSAR, DEMs, GPR, ERT, and trenching”. *Geomorphology* (2014), 14 p. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.02.007>
- García-Moreno, I; Mateos, R.M (2010). “Sinkholes related to discontinuous pumping: susceptibility mapping based on geophysical studies. The case of Crestatx (Majorca, Spain)”. *Environ Earth Sci* 64: 523–537.
- González de Vallejo, L.I; Ferrer, M; Ortuño, L; Otero, C. (2002). “*Ingeniería Geológica*”. Pearson educación, Madrid: 744 p.
- Gutiérrez, F; Cooper, A.H; Johnson, K.S. (2008). “Identification, prediction, and mitigation of sinkhole hazards in evaporite karst areas”. *Environ Geol* 53: 1007–1022.
- Gutiérrez, F; Galve, J.P; Lucha, P; Bonachea, J; Jordá, L; Jordá, R. (2009) “Investigation of a large collapse sinkhole affecting a multi-storey building by means of geophysics and the trenching technique (Zaragoza city, NE Spain)”. *Environ Geol* 58:1107–1122. Zaragoza.
- ICC (1996a). “*Mapa geològic de Catalunya 1:25 000 Navata 258-1-2*”. Institut Cartogràfic de Catalunya, Servei Geològic de Catalunya, Barcelona.
- ICC (1996b). “*Mapa geològic de Catalunya 1:25 000 Sant Pere Pescador 258-2-2*”. Institut Cartogràfic de Catalunya, Servei Geològic de Catalunya, Barcelona.
- ICC (1996c). “*Mapa geològic de Catalunya 1:25 000 Figueres 258-1-1*”. Institut Cartogràfic de Catalunya, Servei Geològic de Catalunya, Barcelona.
- ICGC, ACA (2014). “*Mapa geològic de Catalunya 1:25 000. Geotrell V. Mapa hidrogeològic, Navata 258-1-2*”. Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, Agència Catalana de l’aigua, Barcelona.
- IGC, ACA, ICC (2013). “*Mapa geològic de Catalunya 1:25 000. Geotrell V. Mapa hidrogeològic, Figueres 258-1-1*”. Institut Geològic de Catalunya, Agència Catalana de l’aigua, Institut Cartogràfic de Catalunya, Barcelona
- IGC, ICC (2010). “*Mapa geològic de Catalunya 1:25 000, Geotrell II. Mapa geotèrmic Figueres 258-1-1*”. Institut Cartogràfic de Catalunya, Servei Geològic de Catalunya, Barcelona.
- IGC, ICC (2011). “*Mapa geològic de Catalunya 1:25 000, Geotrell II. Mapa geotèrmic Navata 258-1-2*”. Institut Cartogràfic de Catalunya, Servei Geològic de Catalunya, Barcelona.
- ITGE (1994). “*Mapa geològic de España Escala 1:50.000, Figueres 258 39-11*”, Instituto Tecnológico GeoMinero de España, Madrid.
- Lanaja, J.M. (1987). “*Contribución de la exploración petrolífera al conocimiento de la geología de España*”. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid: 465 p.
- Loke (2015). “*Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys*”. Geotomo Software (<www.geotomosoft.com>). Extret 16/03/2015.
- Mas-Pla, J; Menció, A; Bach, J; Garcia-Bernat, X; Galan, M; Boy-Roura, M; Folch, A; Roqué, C; Soler, D; Zamorano, M; Brusi, D (2013). “Identificación de flujos entre acuíferos a nivel regional en base a datos hidroquímicos (Alt Empordà, NE España)”. En: González, N, E.E. Kruse, M.M. Trovatto i P. Laurencena (eds.) *Agua Subterránea, Recurso Estratégico*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata: 100-106.
- Matas, J.(1986). “Els estanyes eixuts”. *Quaderns de la Revista de Girona*, Núm. 7. Diputació de Girona/Caixa d’Estalvis Provincial, Girona: 95 p.
- Picart, J; Solà, J; Montaner, J; Mató, E; Llenas, M; Losantos, M; Berástegui, X; Agustí, J. (1996). “La sedimentación neógena en los márgenes de la cuenca del Empordà”. *Geogaceta*, 20 (1): 4 p.
- Rivero, L; Vilas, M; Pinto, V; Casas, A. (2001). “Modelización gravimétrica 2D de la fosa de l’Empordà (NE de la Península Ibérica)”. *Acta Geol. Hispánica*, 36(1-2): 97-113.
- Romagosa, C. (2009) “El procés històric de dessecació d’estanyes a la plana empordanesa”. *Doc Anàl. Geogr.* 53: 71-90.
- Saula, E; Picart, J; Mató, E; Llenas, M; Lozanitos, M; Berástegui, X; Agustí, J. (1994). “Evolución geodinámica de la fosa de l’Empordà y las Sierras Transversales”. *Acta Geol. Hispánica*, 29(2-4):55-75 (Pub. 1996).
- SMC (2015), “*CLIMATOLOGIA. L’ALT EMPORDÀ. 1961-1999*”, Servei Meteorològic de Catalunya, Generalitat de Catalunya. (<<http://static-m.meteo.cat/wordpressweb/wp-content/uploads/2014/11/13083422/AltEmporda.pdf>>). Extret 16/03/2015.