

Caracterització de la dinàmica de la intrusió marina en base a dades i paràmetres de camp.

Treball realitzat per:
Júlia Soler Capdevila

Dirigit per:
Albert Folch Sancho
Maria Pool Ramírez

Màster en:
Enginyeria Ambiental

Barcelona, **Juliol 2017**

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE MÀSTER

INDEX

Abstract.....	pg.1
Resum.....	pg.2
1. INTRODUCCIÓ.....	pg.3
1.1 La intrusió salina.....	pg.3
1.2 Interès del treball i objectius.....	pg.8
2. ÀREA D'ESTUDI.....	pg.9
2.1 Situació geogràfica i geològica.....	pg.9
3. METODOLOGIA DE TREBALL.....	pg.11
3.1 Xarxa de control.....	pg.11
3.2 Perfils de conductivitat.....	pg.14
3.3 Series temporals.....	pg.15
3.4 Assaig de bombeig.....	pg.16
3.5 Geofísica.....	pg.18
4. RESULTATS I DISCUSSIÓ.....	pg.20
4.1 Geologia de l'aqüífer.....	pg.20
4.2 Assaig de bombeig.....	pg.26
4.3 Perfils de conductivitat elèctrica.....	pg.28
4.3.1 Transsecte perpendicular a la línia de costa.....	pg.28
4.3.2 Transsecte paral·lel a la línia de costa inclou el PS25 i N4.....	pg.34

4.4 Evolució temporal de la intrusió salina.....	pg.35
4.4.1 Dades campanyes puntuals.....	pg.35
4.4.2 Series temporals.....	pg.40
4.5 Evolució espacial de la intrusió salina.....	pg.50
4.6 Geofísica.....	pg.56
4.6.1 Model de resistivitats.....	pg.56
4.6.2 Model de conductivitats.....	pg.58
5. CONCLUSIONS.....	pg.63
6. ANNEXES.....	pg.67
7.BIBLIOGRAFIA.....	pg. 106

LLISTA DE TAULES

Taula 3.1.- Taula amb les diferents característiques dels pous piezomètrics utilitzats en aquest estudi.**pg.13**

Taula 3.2.- Dates * campanyes realitzades en aquest treball.**pg.14**

Taula 4.1.- Nivells piezomètrics dels pous estudiats. Observis que els nivells dels piezòmetres N2_20, N2_25 son superiors als del N2_15 i que els nivells del N3_20 i N3_25 també son superiors al N3_15.**pg.24**

Taula 4.2.- Valors hidràulics de l'aqüífer obtinguts a partir de l'equació de Jacob.....**pg.27**

LLISTA DE FIGURES

Figura 1.1.- Detall d'un aquífer costaner mostrant la zona de mescla entre les aigües continentals i les marines, així com la zona de transició entre ambdues. Segons Barlow (2003).

.....**pg.3**

Figura 1.2.- Esquema mostrant un sistema d'intrusió marina en un aquífer lliure sota diferents contexts: a) sense bombament en condicions d'equilibri en que no hi ha intrusió marina; b) sota condicions de bombament en que la intrusió marina no afecta al pou de bombament i c) sota condicions de bombament en que la intrusió marina afecta al pou de bombament (USGS, 2000).

pg.5

Figura 1.3.- Esquema que mostra fenòmens d'intrusió d'aigua de mar, amb la ubicació de la falca de la salinitat (interfície) per sota de la línia de costa que indica dues condicions hidràuliques diferents: a l'esquerra, un escenari natural, i la dreta, els efectes d'un pou de bombament. A la part dreta, un pou de bombeig produeix un con de depressió que encara no genera la intrusió d'aigua de mar. Modificada de Mas-Pla et al. (2014)

pg.6

Figura 1.4.- Mapa d'Europa en el que es mostren les zones afectades per la sobre exploració de les aigües subterrànies i els punts d'intrusió marina. Extret de EEA, (2000).

pg.7

Figura 2.1.- Localització de la zona d'estudi.....

pg.9

Figura 2.2.- Mapa geològic de la zona d'estudi. Extret de Casanovas (2016)

pg.10

Figura 3.1.- Croquis mostrant la situació dels diferents pous piezomètrics utilitzats en aquest estudi, mostrant els dos transsectes, paral·lel i perpendicular a la línia de costa i les distàncies relatives entre els diferents punts i les profunditats. Extret del projecte MEDISTRAES.

.....**pg.11**

Figura 3.2.- Situació dels diferents piezòmetres estudiats, amb la seva distribució espacial, tot indicant els dos transsectes estudiats, perpendicular i paral·lel a la línia de costa. Els colors dels piezòmetres indiquen la seva fondària: groc 10 m, verd 15 m, vermell 25 m, i el color blau indica el pou utilitzat per posar la bomba durant l'assaig de bombeig. La base topogràfica correspon a la ortofoto aèria i topografia extreta del ICGC.

pg.12

Figura 3.3.- Piezòmetres situats en el transsecte perpendicular a la línia de costa, mostrant la situació dels diferents trams ranurats a cada un dels sondejos.

pg.13

Figura 3.4.- Esquema de l'assaig de bombeig. Extret de MEDISTRAES.....pg.17

Figura 3.5.- Fotografia de l'assaig de bombeig.....pg.17

Figura 4.1.- Perfils geològics dels diferents piezòmetres estudiats i perfils de radiació gamma (color blau) de la secció perpendicular a la línia de costa, a la que se ha fet la correlació estratigràfica amb la interpretació del perfil geològic. Font projecte MEDISTRAES. Els trams ranurats s'han marcat de color vermell.pg.22

Figura 4.2.- Perfils geològics dels diferents piezòmetres estudiats i perfils de radiació gamma (color blau) de la secció paral·lela a la costa. Font projecte MEDISTRAES. Els trams ranurats s'han marcat de color vermell.pg.23

Figura 4.3.- Gràfics del descens en els pous N3_15, N3_20 i N2_20, a partir dels quals s'ha extret el valor de la pendent i del temps d'inici del descens per tal de calcular els paràmetres hidràulics de l'aquífer de la taula 4.2.pg.27

Figura 4.4.- Perfils de conductivitat elèctrica mesurats en el pou piezomètric PP20.pg.28

Figura 4.5.- Perfils de conductivitat elèctrica mesurats en el pou piezomètric PP15.pg.29

Figura 4.6.- Perfils de conductivitat elèctrica mesurats en el pou piezomètric N1 en els tres trams ranurats que conformen aquest niu.....pg.30

Figura 4.7.- Perfils de conductivitat elèctrica mesurats en el pou piezomètric N3 en els tres trams ranurats que conformen aquest niu.....pg.31

Figura 4.8.- Perfils de conductivitat elèctrica mesurats en el pou piezomètric N2 en els tres trams ranurats que conformen aquest niu.....pg.32

Figura 4.9.- Perfils de conductivitat elèctrica mesurats en el pou piezomètric N4 en els tres trams ranurats que conformen aquest niu.....pg.34

Figura 4.10.- Perfils de conductivitat elèctrica mesurats en el pou piezomètric PS25 en els tres trams ranurats que conformen aquest niu.....	pg.35
Figura 4.11.- Precipitacions mensuals acumulades l'any 2015, 16 i 17. Dades extretes del Servei Meteorològic de Catalunya (http://www.meteo.cat).....	pg.36
Figura 4.12.- Gràfic de les variacions estacionals de la conductivitat elèctrica i de la pluviometria en el pou piezomètric PP20.....	pg.37
Figura 4.13.- Gràfic de les variacions estacionals de la conductivitat elèctrica i de la pluviometria en els diferents trams ranurats del niu N3.	pg.39
Figura 4.14.- Variacions temporals del nivell piezomètric des del 2015 al 2017 dels diferents pous estudiats. Veure annex C per més detall.	pg.42
Figura 4.15.- a) Variacions temporals dels nivells piezomètrics dels diferents pous estudiats mostrant la influència de les marees en el període comprès entre tal i qual. b) Oscil·lacions de les marees entre Juny-15 i Agost-15. Les dades de les marees s'han obtingut de "Ports de l'Estat".....	pg.44
Figura 4.16.A- Evolució temporal de la salinitat expressada com conductivitat elèctrica des del 2015 al 2017 dels diferents pous estudiats.	pg.46
Figura 4.16.B- Evolució del nivell del mar des del 2015 al 2017. En vermell s'han marcat els episodis en que el nivell del mar augmenta per l'efecte de les llevantades.....	pg.47
Figura 4.17.- Evolució temporal de la temperatura des del 2015 al 2017 dels diferents pous estudiats.	pg.49
Figura 4.18. Perfil d'isosalinitat elaborat a partir de les dades de conductivitat elèctrica dels diferents piezòmetres de la campanya de Maig 2015.....	pg.52
Figura 4.19.- Perfil d'isosalinitat elaborat a partir de les dades de conductivitat elèctrica dels diferents piezòmetres de la campanya de Maig 2015.....	pg.53

Figura 4.20A.- Mapa de iso-conductivitats de la zona d'estudi per una fondària de 11 metres. Els valors de conductivitat s'expressen en mS/cm.

.....pg.54

Figura 4.20B.- Mapa de iso-conductivitats de la zona d'estudi per una fondària de 21 metres. Els valors de conductivitat s'expressen en mS/cm.

.....pg.54

Figura 4.21.- Perfil d'isosalinitat elaborat a partir de les dades de conductivitat electrica dels diferents piezometres per l'estiu i hivern del 2015. Veure Annex D per la resta de mesos.

.....pg.55

Figura 4.22.- Perfil d'isosalinitat elaborat a partir de les dades de conductivitat electrica dels diferents piezometres per l'estiu i hivern del 2016. Veure Annex D per la resta de mesos.

.....pg.55

Figura 4.23.- Model de resistivitats realitzat l'any 2015 a la zona d'estudi, a partir de mesures des de la superfície.

.....pg.57

Figura 4.24.- Model de resistivitats realitzar l'any 2015 a la zona d'estudi a partir de mesures de tomografia elèctrica entre pous (CHERT).

.....pg.58

Figura 4.25.- Model calculat de conductivitats de la campanya del 3/7/15

.....pg.59

Figura 4.26.- Model calculat de conductivitats de la campanya del 8/9/15

.....pg.59

Figura 4.27.- Model calculat de conductivitats de la campanya del 30/9/15

.....pg.60

Figura 4.28. Representació de les variacions de conductivitat mensual calculades a partir de les dades dels models de conductivitat-profunditat de la zona compresa entre 15 i 20 m, per sostracció cada campanya de les dades de la campanya prèvia. Si les dades obtingudes son

negatives significa que l'última campanya ha augmentat la salinitat de l'anterior. Si el histograma és negatiu significa que en general augmenta la salinitat d'un mes a l'altre.

.....**pg.61**

Figura 4.29.- Comparativa entre els valors de pluviometria acumulada de 10 dies i la variació de les conductivitat entre els 15 i 20 de profunditat entre campanyes geofísiques consecutives considerant la variació de les conductivitat acumulades de les diferents campanyes

.....**pg.62**

ABSTRACT

Salt-water intrusion occurs in coastal freshwater aquifers when the different densities of both, the saltwater and freshwater allow the ocean water to intrude into the freshwater aquifer. This process, despite being a natural process, in recent years has increased its effect as a result of anthropogenic processes, mainly the extraction of groundwater in coastal aquifers. Seawater intrusion is a global issue, exacerbated by increasing demands for freshwater in coastal zones, where the population has increased. One of the most important scientific challenges in the investigation of seawater intrusion is the lack of knowledge on the management of coastal aquifers. Framed within this overall context, the main objective of this project is to deepen in the understanding of the dynamics of the saltwater intrusion in an experimental plot located on the Catalan coast, in order to understand how this dynamic is affected by different parameters: geological, hydrological (rainfall, seasonality, etc.) and coastal (storms, etc.). The results from several field surveys, continuous temporal evolution and geophysical surveys conducted show that seawater mixing zone is located between 15 and 20 meters deep, with horizontal development around 80 meters towards continent, a little further from the well 3. The situation of the mixing zone seems restricted below 12 m depth, just below a siltstone layer, which act as a lower transmissivity zone that hindering hydraulic vertical movement of the transition zone, thus confining the lower aquifer according the transmissivity values obtained in the test pumping. Also there is a low-salinity interface located in the area near the coast. In conclusion, the studied aquifer could be characterized as an aquifer consisting of two zones with different hydraulic behaviours separated by a silt layer. The higher aquifer unit have a behavior of unconfined aquifer and the lower aquifer unit have a semi-confined behaviour, hindering the dynamics of the transition zone with seawater. Conductivity and temperature data points out the influence of rain and storms in the transition zone location, this influence is different depending on the situation of the piezometer respect to the silt layer.

RESUM

En els aquífers costaners, les diferències de densitat permeten que l'aigua marina s'introdueixi sota l'aigua dolça donant lloc a una zona de mescla d'aigua dolça i salada. Aquest procés malgrat ser un procés natural, els darrers anys el seu efecte s'ha incrementat a conseqüència dels processos antropogènics, entre els quals destaca l'extracció d'aigües subterrànies dels aquífers costaners. La intrusió d'aigua del mar és un problema mundial, degut a la creixent demanda d'aigua dolça a les zones costaneres, en les qual ha augmentat la població. Un dels reptes científics més importants en la investigació de la intrusió marina és la manca de coneixement per la gestió dels aquífers costers. Dins d'aquest context general, s'emmarca, l'objectiu principal d'aquest treball, el qual pretén aprofundir en el coneixement de la dinàmica de la intrusió marina a escala local a partir d'una parcel·la experimental localitzada a la costa catalana, per tal d'entendre com aquesta dinàmica es veu afectada per diferents variables geològiques, hidrològiques (precipitacions, estacionalitat, etc.) i costaneres (llevantades, etc.). Per estudiar aquesta variabilitat s'utilitzaran dades de nivell piezomètric, conductivitat elèctrica, temperatura i geofísica obtingudes en diversos punts de la zona experimental. Els resultats de les diferents campanyes de camp, de l'evolució temporal realitzada i de les campanyes geofísiques han permès situar la fondària de la zona de mescla d'aigua marina, concretament entre 15 i 20 m de profunditat, amb un desenvolupament horitzontal de fins a 80 metres. La situació de la zona de mescla sembla restringida per sota dels 12 m de fondària, just per sota del nivell de llims, el qual podria actuar com a una zona de menor transmissivitat que dificultaria hidràulicament el moviment vertical de la zona de transició, confinant d'aquesta manera l'aquífer inferior tal com mostren els valors de les transmissivitats obtingudes en l'assaig de bombeig. També s'observa una interfase salina a menor profunditat situada a la zona propera de la costa. Finalment, a partir de totes les conclusions extretes, l'aquífer estudiat es podria caracteritzar com un aquífer constituït per dues zones amb diferents comportaments hidràulics separades per una capa de llims. La unitat aquífer superior tindria un comportament d'aquífer lliure i la unitat aquífer inferior presentaria un comportament de semi-confinat. Les dades de conductivitat i temperatura posen de manifest la influència de les precipitacions i de les pujades del nivell del mar en la situació de la zona de transició, aquesta influència es diferent en funció de la situació del tram estudiat respecte la cap de llims

1. INTRODUCCIÓ

1.1 LA INTRUSIÓ SALINA

Els aqüífers costaners han estat definits per Post (2005) com els equivalents del subsòl de les zones costaneres, on es troben les aigües subterrànies continentals i l'aigua de mar. Tots els aqüífers costaners comparteixen les següents característiques hidrogeològiques: la presència de gradients de densitat a causa de les diferències en la salinitat, zones de barreja, entorns geològics canvians, i fluctuacions del nivell del mar a curt i llarg termini (Post, 2005, Custodio, 1987a; 1978b). En aquests context, té lloc el que es coneix com a intrusió marina (Fig. 1.1) que consisteix en l'entrada, permanent o temporal, d'aigua del mar ocasionada per variacions de l'equilibri de la dinàmica entre l'aigua dolça que descarrega cap al mar, combinada amb la diferent densitat de l'aigua dolça i l'aigua salada (Escuder et al., 2009; López i Gómez., 2007).

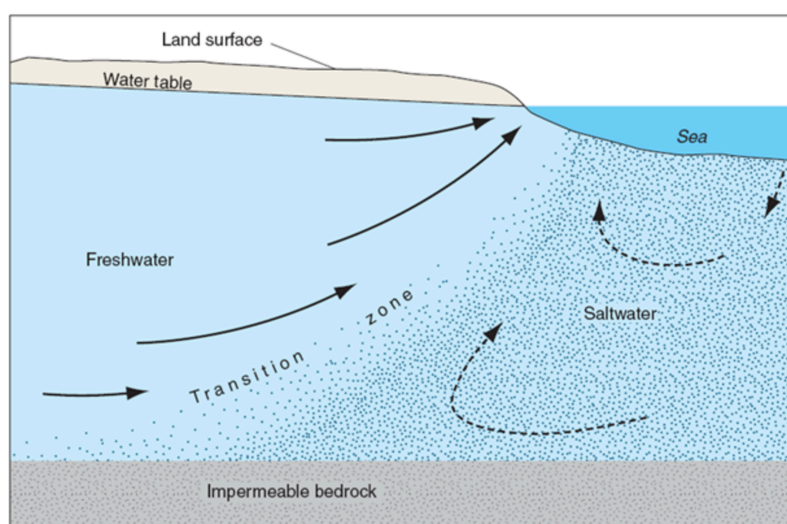


Figura. 1.1.- Detall d'un aqüífer costaner mostrant la zona de mescla entre les aigües continentals i les marines, així com la zona de transició entre ambdues. Segons Barlow (2003).

Són diversos els treballs dedicats a l'estudi de la intrusió marina, tant des d'un punt de vista hidrològic, geològic, de gestió dels recursos hídrics, relació amb el canvi climàtic com de modelització del seu funcionament (Huyakorn et al., 1987; Werner, 2010; Werner, 2017; Pool i Carrera, 2010; 2011; Werner et al., 2013, entre altres). D'entre aquests destaca la revisió de Werner et al., 2013 que realitza una extensa revisió de la bibliografia sobre intrusió marina i els reptes futurs de l'estudi d'aquesta.

CAPÍTOL 1: INTRODUCCIÓ

Els processos i els factors associats a la intrusió marina han estat descrits qualitativament per Custodio (1987a, 1987b). Aquest autor indica que els processos i els factors associats a la intrusió marina inclouen la dispersió per mescla, els efectes associats a les mareas, els efectes de densitat variable que inclouen la convecció inestable, la hidrologia superficial que dona lloc a la variabilitat de recàrrega, les condicions paleo-hidrogeològiques produïdes per aigües salines connates, les influències antropogèniques, i les característiques geològiques les quals influeixen en el grau de confinament i en les propietats hidràuliques i de transport de l'aqüífer. Les interaccions entre aquests i altres processos, com les reaccions geoquímiques, tsunamis i altres esdeveniments episòdics de l'oceà, el control morfològic de la platja, el flux de la zona no saturada, etc., proporciona una sèrie aparentment infinita de possibles situacions en les que pot tenir lloc intrusió marina (Custodio, 1987a, 1987b).

La intrusió marina és un procés dinàmic, en el qual el front d'aigua salada avança cap l'interior del continent en períodes de menor recàrrega de l'aqüífer, i retrocedeix cap el mar quan la recàrrega és major (López i Gómez, 2007). En els aqüífers costaners, les diferències de densitat permeten que l'aigua marina s'introdueixi sota l'aigua dolça donant lloc a una zona de mescla d'aigua dolça i salada. Aquesta zona de mescla pot ser brusca o tenir una zona de dispersió ampla, en funció de diversos factors, entre els quals cal destacar la diferència de densitat entre l'aigua dolça i la salada, la geometria de l'aqüífer, les propietats hidràuliques, velocitat de descàrrega al mar i els paràmetres de dispersió de l'aqüífer (Sakr, 1999). Les fluctuacions del nivell piezomètric en els aqüífers costaners principalment estan controlades pels processos de precipitació, mareas, onatge, tempestes i per la pressió atmosfèrica, que segons Vallejos et al., (2015) és la més important. Així, la zona de mescla també pot variar en funció dels nivells de l'aigua subterrània, els quals canvien en funció de les fluctuacions de les mareas i les precipitacions (Kim et al., 2007). A més, la seva caracterització depèn de la complexitat geològica i dels factors hidrodinàmics de l'aqüífer. Segons Guo et al. (2010) el procés que genera un impacte més important en les fluctuacions del nivell piezomètric són les mareas, donat que les oscil·lacions del mar disminuirien l'efecte de la recàrrega de la pluja, dominant d'aquesta manera el flux de les aigües subterrànies.

Si bé, hi ha diferents geometries d'intrusió salina en funció de la geologia de l'aqüífer, segons López-Geta (1995), la més freqüent per aqüífers lliures corresponen a l'avanç horitzontal de la interfase cap l'interior del continent en forma de falca (Fig. 1.1). Les activitats antròpiques com l'explotació d'aqüífers poden deformar aquesta interfície produint l'ascens vertical en forma de con ("upconing") de la interfase a favor dels pous o sondejos en els que té lloc un bombeig intensiu (Morell, 1989) (Fig. 1.2)

CAPÍTOL 1: INTRODUCCIÓ

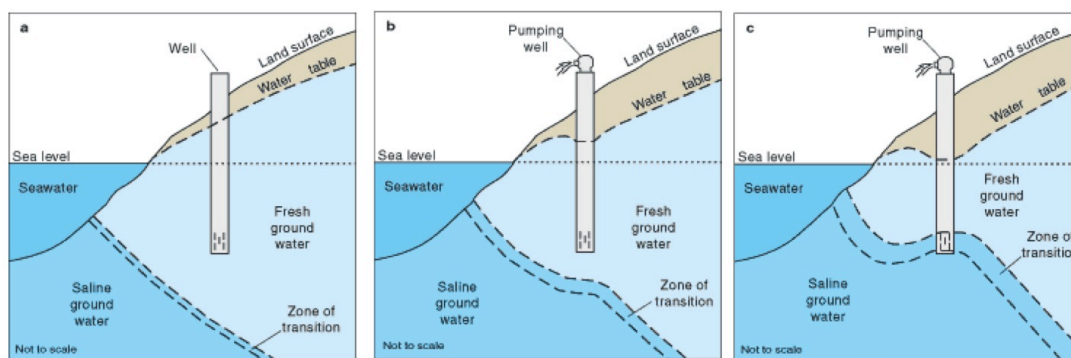


Figura 1.2.- Esquema mostrant un sistema d'intrusió marina en un aqüífer lliure sota diferents contextos: a) sense bombament en condicions d'equilibri en que no hi ha intrusió marina; b) sota condicions de bombament en que la intrusió marina no afecta al pou de bombament i c) sota condicions de bombament en que la intrusió marina afecta al pou de bombament (USGS, 2000).

Malgrat que la intrusió marina, es tracta d'un procés natural, el seu efecte s'ha incrementat a conseqüència dels processos antropogènics, entre els quals destaca l'extracció d'aigües subterrànies dels aqüífers costaners. En el cas de que els cabals d'extracció superin la pròpia capacitat de recuperació del aqüífer, dona lloc a la baixada del nivell freàtic a les proximitats de la costa per sota del nivell del mar, fent avançar la interfície entre l'aigua de mar i d'aigua dolça cap a l'interior del continent. Segons Mas-Pla et al. (2014) la geologia juga un paper important en el desenvolupament d'intrusió d'aigua de mar en les regions costaneres, ja que la litologia defineix el comportament hidrogeològic, i alhora l'equilibri entre el flux d'aigua des del continent cap al mar.

La zona de contacte entre les aigües continentals i les marines, al tractar-se de líquids miscibles, donen lloc a la formació d'una zona de transició entre l'aigua de mar i d'aigua dolça. L'heterogeneïtat de l'aqüífer i la dispersió hidrodinàmica determinaran la forma d'aquesta zona de transició. Les aproximacions comuns que estimen la ubicació i la forma del límit entre aigua de mar i aigua dolça es basen en la fórmula Ghyben Herzberg i les seves posteriors millores per molts autors (Bear, 1979; Bear i Cheng, 2010). El model conceptual de Ghyben-Herzberg (Herzberg, 1901; Ghyben, 1888) assumeix que el pes d'una columna d'aigua dolça s'estén fins a la interfase on s'equilibra per la columna d'aigua salada que s'estén des del nivell del mar fins la mateixa profunditat de la interfase, sempre que es consideri un equilibri estàtic de l'aigua dolça amb l'aigua de mar en estat estacionari, un flux horitzontal a l'aqüífer i una interfase (figura 1.3), expressada com:

$$\rho_s g Z_s = \rho_f g (Z_s + Z_f)$$

on, ρ és la densitat de l'aigua, g és l'acceleració deguda a la gravetat, Z_s és la profunditat de la interfície des del nivell del mar, Z_f és l'elevació del nivell freàtic per sobre del nivell del mar

CAPÍTOL 1: INTRODUCCIÓ

(Fig. 1.3). Els dos gruixos Z_s i Z_f estan relacionats amb les densitats respectivament de l'aigua dolça i l'aigua salada. Considerant una densitat d'1 g/cm³ per a l'aigua dolça a 20 °C i 1,025 g/cm³ per a l'aigua salada, l'equació pot ser simplificada a:

$$Z_f = 40 Z_s.$$

Per tant, la interfície natural imita la forma del nivell freàtic de l'aigua, i la seva ubicació per sota del nivell del mar a una distància donada des de la línia de costa és 40 vegades per sota de l'altura del nivell freàtic per sobre d'ella. La seva profunditat màxima està limitada pel límit inferior de l'aquífer. Malgrat tot, aquesta simple relació és una aproximació que ignora el component de flux vertical prop de la interfície, entre altres aspectes.

Segons Pool i Carrera (2011), l'estimació clàssica de Ghyben-Herzberg de la profunditat de la interfície aigua dolça-aigua salada juntament amb l'aproximació Dupuit és una eina útil per al desenvolupament de solucions analítiques a molts problemes d'intrusió d'aigua de mar. Sobre la base d'aquests supòsits, Strack (1976) desenvolupa una teoria d'un sol potencial per calcular les taxes de bombament crítics en un escenari de bombeig a la costa. Malgrat que aquestes aproximacions han estat àmpliament utilitzades per gestionar recursos costaners, descuiden la mescla i implícitament assumeixen que l'aigua salada es manté estàtica. En conseqüència, aquesta aproximació sobreestima la penetració del front d'aigua salada i subestima les taxes de bombament crítics que asseguren un subministrament d'aigua dolça. Pool i Carrera (2011), investiguem l'error introduït per l'adopció de l'aproximació interfície, i proposen incloure els efectes de la dispersió en la formulació de Strack (1976) posant de manifest que aquest factor pot ser utilitzat no només per estimar la velocitat de bombament crítica, sinó també per corregir l'estimació Ghyben-Herzberg de la profunditat de la interfície.

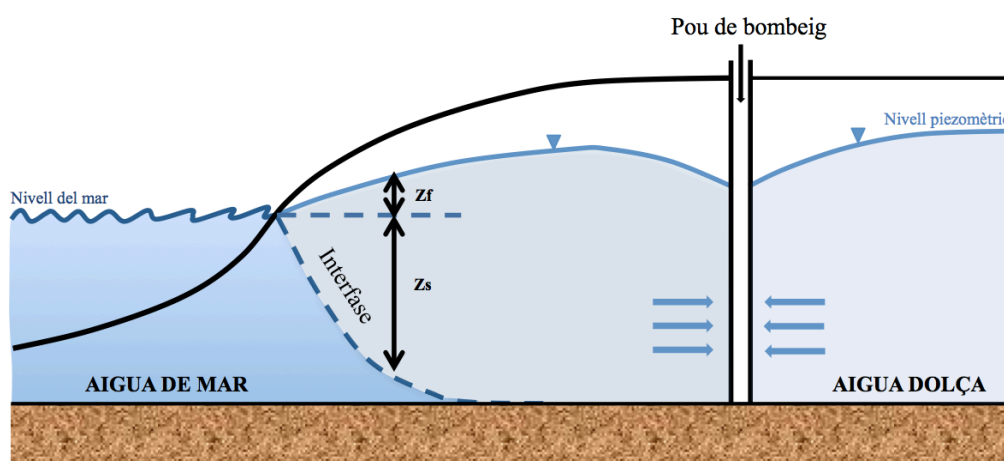


Figura 1.3.- Esquema que mostra fenòmens d'intrusió d'aigua de mar, amb la ubicació de la falca de la salinitat (interfície) per sota de la línia de costa que indica dues condicions hidràuliques diferents: a l'esquerra, un escenari natural, i la dreta, els efectes d'un pou de bombeig. A la part dreta, un pou de bombeig produeix un con de depressió que encara no genera la intrusió d'aigua de mar. Modificada de Mas-Pla et al. (2014)

CAPÍTOL 1: INTRODUCCIÓ

La intrusió d'aigua del mar és un problema mundial, degut a la creixent demanda d'aigua dolça a les zones costaneres, en les qual ha augmentat la població, i a causa de la influència de l'augment del nivell del mar degut al canvi climàtic (Werner et al., 2013).

Segons l'Agència Europea de Medi Ambient (EEA) 10 de cada 12 països en els que es produeix sobreexplotació dels aqüífers, tenen problemes d'intrusió d'aigua marina (Fig. 1.4). Són més de 100 àrees en 10 països les que han estat definides com afectades per intrusió d'aigua marina i en 16 àrees de 3 països la intrusió d'aigua marina es causada per l'augment de l'aigua minoritzada dels aqüífers profunds (Scheidleder et al., 2004). Concretament, al Mediterrani destaquen Itàlia, Espanya i Turquia com els tres països més afectats per processos la intrusió marina deguda principalment a la sobreexplotació dels aqüífers per la demanda d'aigua d'abastament públic i per regadiu agrícola.

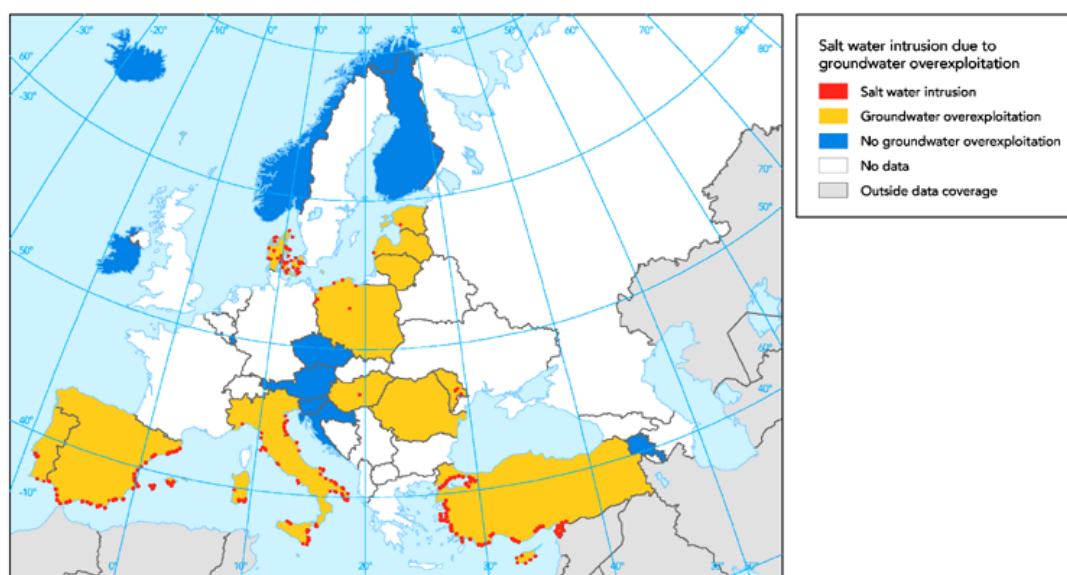


Figura 1.4.- Mapa d'Europa en el que es mostren les zones afectades per la sobre exploració de les aigües subterrànies i els punts d'intrusió marina. Extret de EEA, (2000).

La intrusió marina és una de les causes principals de contaminació dels aqüífers costaners al Mediterrani, a l'Estat Espanyol i Catalunya concretament. La salinització dels aqüífers costaners ha estat propiciada per la ubicació d'una part important de la població a la zona de costa i a més agreujada per les activitats turístiques que es van iniciar en la dècada dels anys 60 de manera descontrolada, sense cap model d'expansió urbana, ni consideració dels efectes ambientals. En aquest període no es va considerar la necessària planificació de la gestió dels recursos hídrics, ni el factor limitant de l'elevada demanda d'aigua. El resultat d'aquesta explotació descontrolada dels recursos hídrics, ha estat la pèrdua de disponibilitat i qualitat de l'aigua en els sectors costaners (Mas-Pla et al., 2014). La major dificultat de gestió dels recursos hídrics subterrànies en aquestes zones radica en assolir un equilibri sostenible que garanteixi el subministrament i al

CAPÍTOL 1: INTRODUCCIÓ

mateix temps preservi l'estat hidrològic i la qualitat de les aigües subterrànies (Mas-Pla et al., 2014). Entre els diferents processos que contribueixen al deteriorament dels recursos hídrics costaners, el procés més comú que afecta les aigües subterrànies de la Mediterrània és la salinització deguda a la intrusió marina (Fig. 1.4). Per resoldre aquesta problemàtica el Programa Mediambiental de les Nacions Unides ha realitzat diferents plans d'acció entre els quals destaca que els diferents països han d'establir una xarxa comuna de gestió integrada de la zona costera de la Mediterrània que hauria de comportar l'establiment d'una forta cooperació regional per prendre les mesures necessàries.

1.2 INTERÈS DEL TREBALL I OBJECTIUS

La majoria de la població a la costa mediterrània es sol concentrar a las zones de costa, fet que s'incrementa durant els períodes d'estiu, per aquest motiu l'estudi del procés d'intrusió marina en els aqüífers costaners esdevé un punt clau per a la millora de la gestió dels recursos hídrics en aquests sectors.

Werner et al. (2013) a la seva revisió de la intrusió marina, indica que un dels reptes científics més important en la investigació de la intrusió marina és l'aplicació dels coneixements en relació amb els processos hidrogeoquímics, els mètodes d'investigació i l'enfocament de la gestió, tot això des d'un punt de vista pràctic, remarcant que calen estratègies per reduir les diferències substancials entre el coneixement i la pràctica de gestió de la intrusió marina. Dins d'aquest context general, s'emmarca, l'objectiu principal d'aquest treball, el qual pretén aprofundir en el coneixement de la dinàmica de la intrusió marina a escala local a partir d'una parcel·la experimental localitzada a la costa catalana, prop de la població de Mataró. Els objectius secundaris d'aquest treball son: ⁽¹⁾ Caracteritzar la dinàmica de les zones d'interfase d'aigua dolça i aigua salada en aigües subterrànies en base a l'evolució temporal de dades de nivell piezomètric, conductivitat elèctrica i temperatura en diversos piezòmetres; ⁽²⁾ Entendre com aquesta dinàmica es veu afectada per diferents variants hidrològiques (precipitacions, estacionalitat, etc.) i costaneres (llevantades, etc.) i ⁽³⁾ Com l'estructura geològica i els paràmetres hidràulics de l'aqüífer poden afectar aquesta dinàmica a partir dels assajos de bombeig.

2. AREA D'ESTUDI

2.1 SITUACIÓ GEOGRÀFICA I GEOLÒGICA

La zona d'estudi es localitza a la província de Barcelona, concretament al municipi de Mataró situat a la comarca del Maresme al NE de Barcelona. La zona limita al nord amb Argentona, a l'est amb Sant Andreu de Llavaneres, a l'oest amb i Cabrera de Mar i al sud amb el Mar Mediterrani. La climatologia de l'àrea estudiada correspon a un clima mediterrani, el qual es caracteritza per presentar temperatures altes a l'estiu (mitjana 25°C) i temperatures suaus a l'hivern (mitjana 10°C). Respecte a les precipitacions, aquestes són escasses i irregulars (mitjana anual entre 500 i 800 mm) concentrades principalment durant les estacions de primavera i tardor. La zona es situa a la conca de la riera d'Argentona, essent aquesta la principal xarxa hídrica de la zona, la qual no presenta un flux continu d'aigua, i sols en els períodes de pluja és activa. La zona d'estudi ocupa una extensió d'aproximadament 35 Km² amb uns usos del sòl principalment agraris (Fig. 2.1).



Figura 2.1.- Localització de la zona d'estudi

CAPÍTOL 2 : ÀREA D'ESTUDI

Geològicament la zona estudiada es situa a la Cadena Litoral Catalana en el seu marge costaner amb el mar Mediterrani. La Cadena Costera Catalana està constituïda per una cobertura mesozoica-terciària afectada per la deformació Alpina dipositada discordantment sobre un sòcol paleozoic plegat i metamorfitzat durant l'orogènia Herciniana i intruït posteriorment per granitoides tardi-hercínians. En el seu sector nord, corresponen a la zona estudiada, la Cadena Costera Catalana mostra sòls el sòcol paleozoic representat principalment pels intrusius granítics. Els afloraments de la zona d'estudi estan constituïts per materials holocens, representats bàsicament de sorres amb components d'origen granodiorític que configuren el peu de mont de la Serralada Costera Catalana i terrasses fluvials que presenten petites intercalacions de llims, sorres i graves (Fig. 2.2). Aquests materials descasen sobre el basament de granits tardi-hercínians fortament afectats per processos d'alteració meteòrica a sauló. Els materials holocens passen lateralment per canvis de fàcies a sorres molt retreballades corresponents als sediments marins acumulats a la zona de platja, els quals estan representats principalment per sorres silíciques (Colombo & Rivero, 2017; IGME, 1976).

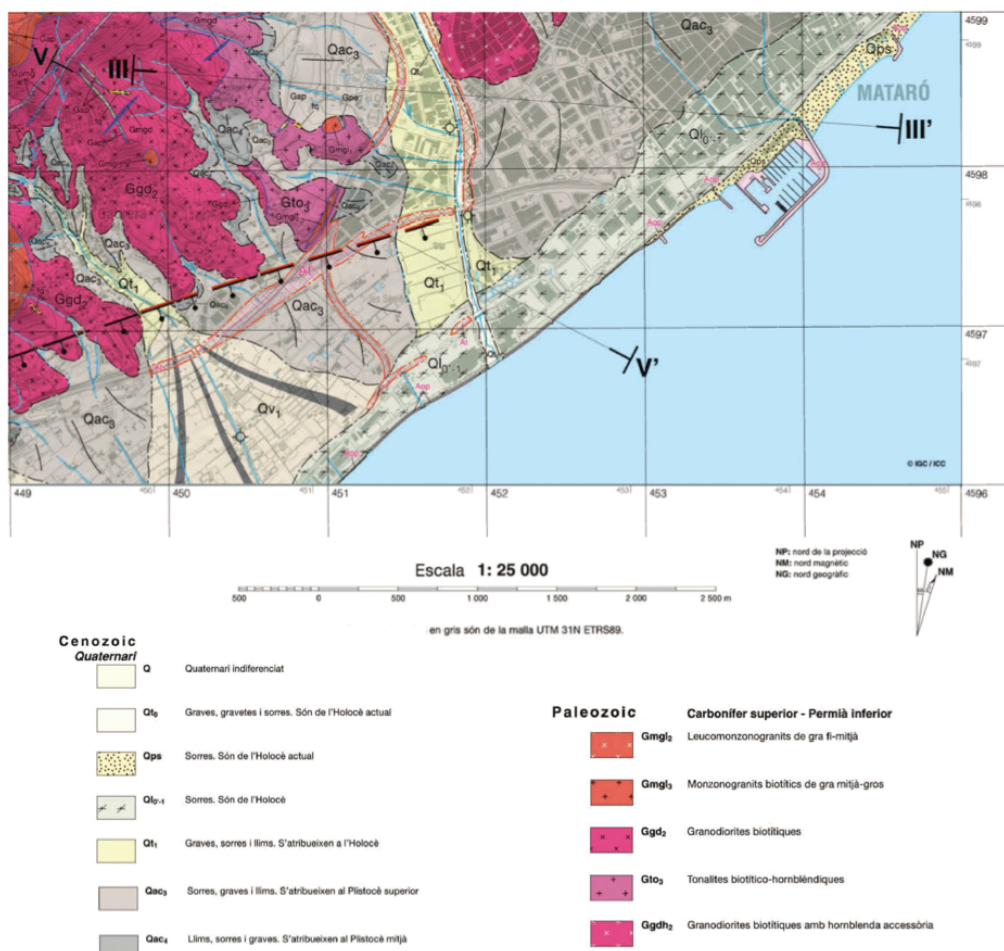


Figura 2.2.- Mapa geològic de la zona d'estudi. Extret de Casanovas (2016)

3. METODOLOGIA DE TREBALL

En aquest apartat es descriu la metodologia emprada per tal d'assolir els objectius d'aquest treball. En primer lloc es descriurà la infraestructura de pous piezomètrics utilitzats per realitzar les mesures de nivell piezomètric, temperatura, conductivitat elèctrica, etc. i seguidament es descriuran les metodologies emprades per obtenir les dades tant hidrològiques com geofísiques.

3.1 XARXA DE CONTROL

El present treball s'ha basat en una xarxa de monitoreig, que tal com ja s'ha indicat està situada prop de la població Argentona, consistent en un conjunt de 16 pous piezomètrics que permeten el control del nivell de l'aigua subterrània de l'aqüífer. Aquests pous estan distribuïts de manera que formen dos transectes, un perpendicular i un transecte paral·lel a la línia de costa. A la figura 3.1 es mostren les equidistàncies entre els diferents piezòmetres i les fondàries de cada un d'ells.

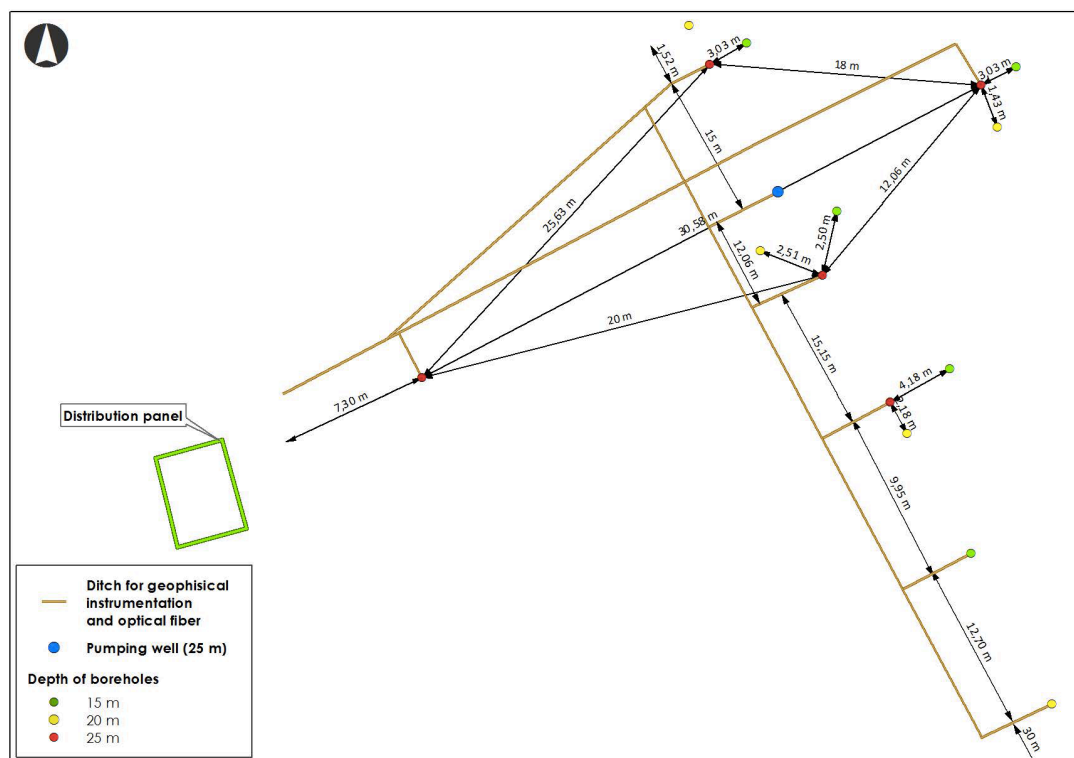


Figura 3.1.- Croquis mostrant la situació dels diferents pous piezomètrics utilitzats en aquest estudi, mostrant els dos transectes, paral·lel i perpendicular a la línia de costa i les distàncies relatives entre els diferents punts i les profunditats. Extret del projecte MEDISTRAES

CAPÍTOL 3: METODOLOGIA DE TREBALL

En el transsecte perpendicular a la costa, el pou piezomètric més proper a aquesta correspon al PP20, que es troba situat a una distància de 30 m de la línia de costa. Aquest pou es caracteritza per estar completament habilitat amb un tram ranurat de 3 a 18 m de fondària. El següent pou d'aquest transsecte perpendicular a la costa correspon al PP15 amb una fondària de 15 m i habilitat amb un tram ranurat entre 2-13 m, que es situa a una distància de 12,70 metres del pou anterior. La resta de pous piezomètrics d'aquest transsecte, es disposen en nius (N1, N2 i N3), cada un dels quals es caracteritza per tenir 3 pous piezomètrics amb profunditats de 15, 20 i 25 m i estar habilitats amb trams ranurats entre 10-12 m, 14-16 m i 18-20 m (Figs. 3.2 i 3.3). El niu N1 es situa a 9,95 m dels pou PP_15, el N3 a 9,95 m del N1 i el N2 a 27,06 m del N3 (Fig. 3.1). Entre els nius N2 i N3, es situa el pou PB, a 12,06 m del niu N3 i a 15 m del N2, que en aquest treball sols s'ha utilitzat per posar la bomba durant l'assaig de bombeig.

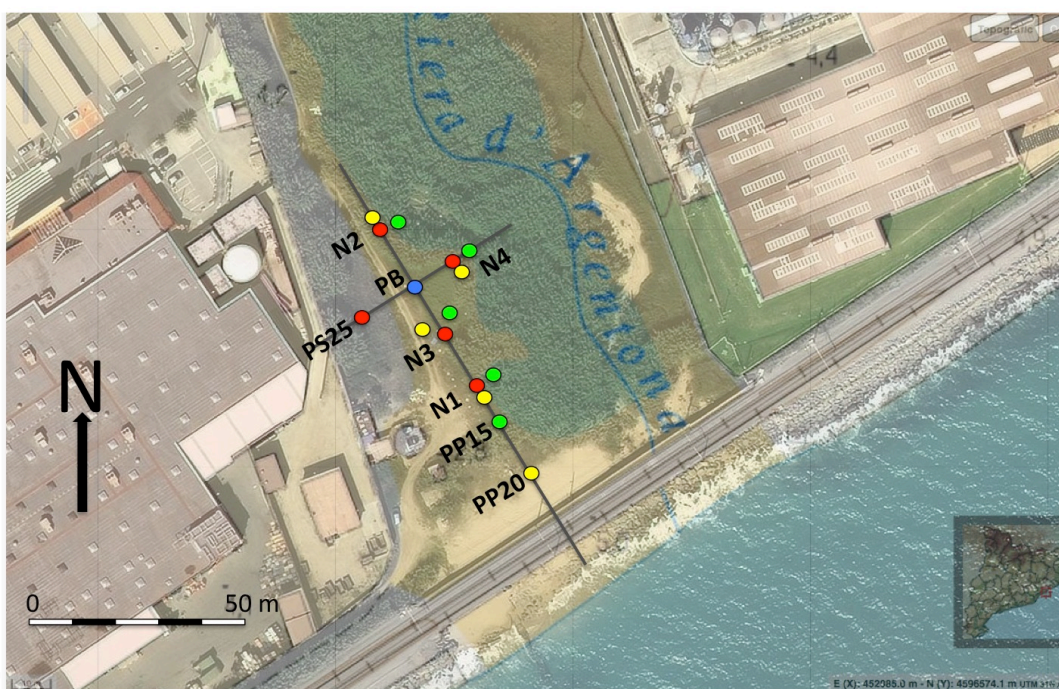


Figura 3.2.- Situació dels diferents piezòmetres estudiats, amb la seva distribució espacial, tot indicant els dos transsectes estudiats, perpendicular i paral·lel a la línia de costa. Els colors dels piezòmetres indiquen la seva fondària: groc 10 m, verd 15 m, vermell 25 m, i el color blau indica el pou utilitzat per posar la bomba durant l'assaig de bombeig. La base topogràfica correspon a la ortofoto aèria i topografia extreta del ICGC.

El transsecte paral·lel a la costa es situa a 80 m de la línia de costa i a 12,06 m al nord del niu N3. Està representat per dos nous pous, el N4 i el PS25, situats als extrems Est i Oest, respectivament (Fig. 3.1 i 3.2). El niu N4, presenta 3 piezòmetres amb profunditats de 15, 20 i 25 m, habilitats amb trams ranurats a les fondàries 10-12 m, 14-16 m i 18-20 m, respectivament. A una distància de 30,58 m del niu N4, en direcció Oest, es situa el pou PS25 de 22,2 m de fondària amb un tram ranurat de 18,4 a 20,1 m. (Taula 3.1).

CAPÍTOL 3: METODOLOGIA DE TREBALL

Per poder determinar la potencial influència de la geologia en l'evolució de la interfase salina a través de materials més o menys transmissius, s'ha realitzat una revisió de la caracterització geològica completa mitjançant les dades de testificació dels sondejos dels piezòmetres, les dades de radiació de gamma natural existents i les dades de transmissivitat obtingudes dels "slug tests" realitzats en el projecte MEDISTRAES.

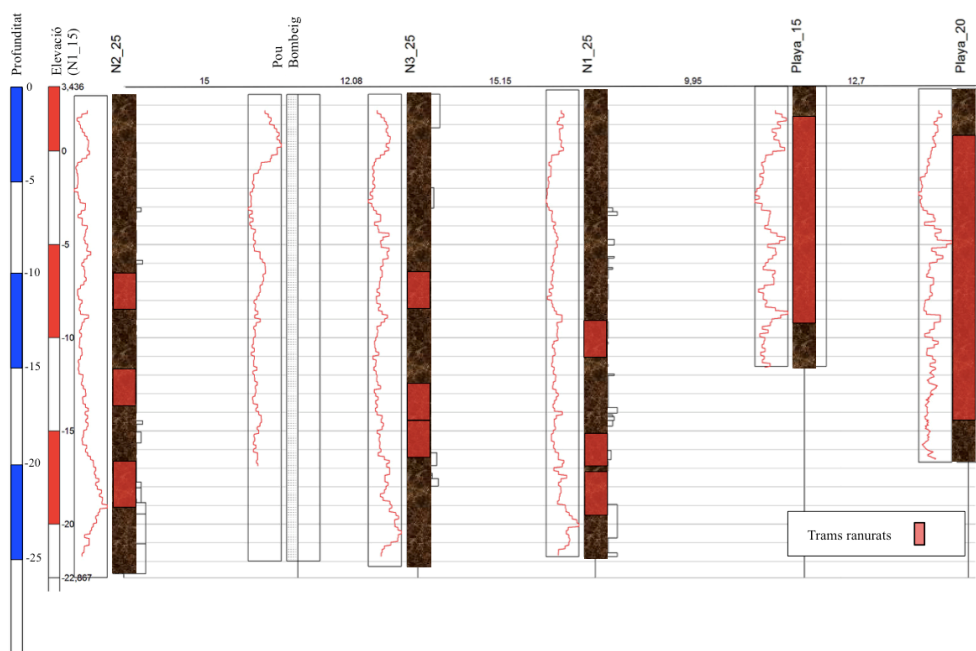


Figura 3.3.- Piezòmetres situats en el transsecte perpendicular a la línia de costa, mostrant la situació dels diferents trams ranurats a cada un dels sondejos.

Taula 3.1.- Taula amb les diferents característiques dels pous piezomètrics utilitzats en aquest estudi.

Tipus de pou	Referència piezòmetre (m)	Distància a la línia de costa (m)	Profunditat real (m)	Tram ranurat habilitat (m)
Piezòmetre	PP20	30	20	2,6-17,6
Piezòmetre	PP15	42,5	15	2,6-12,6
Piezòmetre	PS25	70	25,1	18,1-20,1
Niu	N125	52,65	24,85	20,87-22,86
Niu	N120	52,65	22,4	18,4-20,4
Niu	N115	52,65	16,5	12,5-14,5
Niu	N225	94,86	25,6	20-22
Niu	N220	94,86	19	15,1-17,1
Niu	N215	94,86	14	10-12
Niu	N325	67,8	25,3	17,9-19,9
Niu	N320	67,8	20	15,9-17,9
Niu	N315	67,8	14	9,8-11,8
Niu	N425	70	25,2	18,4-20,4
Niu	N420	70	19	14,2-16,2
Niu	N415	70	15,4	10,7-12,7

CAPÍTOL 3: METODOLOGIA DE TREBALL

3.2 PERFILS DE CONDUCTIVITAT

Amb la finalitat de poder establir una relació de la variació del tascó salí espacialment i veure la possible relació amb la climatologia, s'han realitzat una sèrie de campanyes de camp per tal de mesurar al llarg del tot els piezòmetres la variació de la conductivitat elèctrica, la temperatura i els diferents nivells piezomètrics i alhora descarregar les dades de les mesures contínues registrades pels Diver[®]. En concret s'han realitzat 15 campanyes de camp que comprenen un període des de 2015 fins 2017. Les dates de les campanyes de camp realitzades es mostren a la taula 3.2. Les mesures han estat realitzades mitjançant un CTD-Diver[®] de la marca *Schlumberger*[®]. Les mesures de temperatura i conductivitat elèctrica al llarg del pou s'han realitzat introduint el CTD-Diver[®] pou per pou, des del sostre fins la base, per tal de distorsionar el regim estacionari del piezòmetre el mínim possible.

La profunditat de les mesures obtingudes amb el CTD-Diver[®] ha estat calculada a partir del valor de la columna d'aigua calculat per diferència entre la pressió del sensor i la pressió atmosfèrica. Un cop conegut el valor de la columna d'aigua s'ha sumat al nivell piezomètric mesurat manualment mitjançant una sonda de nivell d'aigua.

$$^1 \text{Cota nivell freàtic} = \text{Cota sondeig} - \text{Profunditat nivell freàtic}$$

$$^2 \text{Factor correcció} = \text{Cota nivell freàtic} - \text{pressió Diver}$$

Taula 3.2.- Dates * campanyes realitzades en aquest treball.

Campanyes de camp 2015	Campanyes de camp 2016	Campanyes de camp 2017
21 de maig de 2015	29 de juny de 2016 *	6 de febrer de 2017 *
8 de juny de 2015	23 de setembre de 2016 *	3 de març de 2017 *
16 de juny de 2015	7 de novembre de 2016 *	
10 de juliol de 2015		
10 de setembre de 2015		
14 de setembre de 2015		
13 d'octubre de 2015		
27 d'octubre de 2015		

CAPÍTOL 3: METODOLOGIA DE TREBALL

3.3 SERIES TEMPORALS.

Les dades de nivell piezomètric de l'aigua subterrània s'han determinat de manera continua mitjançant Divers[®] o CTD-Divers[®] de la marca *Schlumberger*[®], instal·lats en tots els pous piezomètrics. Les mesures obtingudes presenten una exactitud de mesura en un rang entre 0,5-2cm H₂O i una resolució entre 0,1-1cm H₂O (*Schlumberger Water Services*[®], 2014).

S'ha mesurat de manera continua a cada pou piezomètric les dades de pressió i temperatura, amb l'excepció del PP_20, on sols s'ha mesurat la pressió. Puntualment en els pous N1_20, N1_25, N2_20, N2_25, P25, a més d'aquests paràmetres també s'ha mesurat la conductivitat elèctrica, mitjançant Divers[®] o CTD-Divers[®]. Els Divers[®] s'han programat per fer mesures cada 15 min, exceptuant el període de 2016 en que les mesures varen mesurar cada 2 min, i durant el mes de febrer del 2017 en que es varen mesurar cada minut.

Els Divers mesuren la pressió absoluta, per tant la pressió detectada pel sensor no sols mesura la pressió de la columna d'aigua, sinó també la pressió atmosfèrica que afecta a la superfície de l'aigua. Per tant, els canvis de pressió atmosfèrica influencien les mesures registrades pels Divers[®]. Per evitar el soroll d'aquestes variacions, s'ha instal·lat un Baro-Diver[®] que ha registrat les dades de pressió atmosfèrica en continu, fet que ha permès corregir la pressió atmosfèrica de manera continua en funció del temps a totes les mesures de pressió de l'aigua obtingudes dels Divers[®]. Per tal de realitzar aquesta correcció per a cada mesura s'ha restat la pressió atmosfèrica a totes les dades obtingudes.

Puntualment, durant les diferents campanyes de camp, les dades de nivell piezomètric obtingudes han estat verificades de manera manual amb una sonda manual de mesura del nivell piezomètric, la qual disposa d'una cinta mètrica muntada sobre un carret amb dos elèctrodes que quan toquen l'aigua fan contacte completant el circuit i activant una alarma sonora i lluminosa.

Les dades de pluviometria utilitzades per interpretar les variacions de la interfase salina, s'han obtingut del Servei Meteorològic de Catalunya i les dades del nivell del mar utilitzades per interpretar les variacions dels nivells piezomètrics dels pous s'han obtingut de "Ports de l'Estat".

CAPÍTOL 3: METODOLOGIA DE TREBALL

3.4 ASSAIG DE BOMBEIG

Els paràmetres de transmissivitat (T), el coeficient d'emmagatzematge (s) defineixen la capacitat dels aqüífers per emmagatzemar i transmetre aigua. El coneixement del valor d'aquests paràmetres és fonamental per a realitzar càlculs que són bàsics en hidrogeologia: filtracions entre aqüífers o des de la superfície del terreny, comunicació del pou amb altres captacions pròximes, cabals òptims de bombament, temps de trànsit de contaminants, existència de vores impermeables i zones de recàrrega, etc. Per tal de caracteritzar les propietats hidràuliques de l'aqüífer de la zona estudiada, s'ha realitzat un assaig de bombeig de llarga durada. En el nostre cas l'objectiu d'aquest assaig de bombeig ha estat per avaluar les característiques de l'aqüífer, i ha consistit en el bombeig amb un flux constant durant diversos dies d'un pou amb el cabal i temps suficient perquè tots els pous piezomètrics siguin afectats amb una resposta en els nivells piezomètrics i poder estimar els paràmetres hidràulics i la connectivitat.

L'assaig de bombeig s'ha realitzat aprofitant la realització d'una campanya de camp del grup de Hidrologia Subterrània de la UPC durant 3 dies (14/3/17 al 16/3/17) per tal de realitzar una prova de dissipació de calor en un flux controlat. Aquesta campanya de camp tenia uns objectius més amplis que el present treball, amb la realització d'un assaig de bombeig i de dissipació de calor, una prova de correcció de l'efecte pell, l'estudi geoquímic de la interfase salina, la geoquímica dels isòtops de Ra i Rd, entre altres. Malgrat tot, en aquest treball ens centrarem en l'assaig de bombeig, ja que és la que es va realitzar per interès d'aquest treball.

Concretament, la realització d'aquest assaig de bombeig s'ha realitzat de la manera següent: instal·lació d'una vàlvula de peu en el pou de bombeig, que en aquest cas ha estat el pou N3_20, la qual s'ha connectat mitjançant una mànega a la bomba de succió que s'ha posat amb un cabal d'uns 3,6 l/s (Fig. 3.4). A la mànega, s'hi ha instal·lat una aixeta per tal de recol·lectar les mostres que presentin volums petits mentre que les mostres de volum normal seran mostrejats al final de la canonada per tal de no pertorbar el cabal. En sèrie s'han col·locat els cabalímetres per mesurar el flux mecànic i electromagnètic, així com el mètode volumètric simple. Després dels cabalímetres s'ha instal·lat una derivació amb aixetes per poder connectar en continu els elèctrodes i la sonda multiparamètrica per tal de mesurar en continu els diferents paràmetres físic-químics (pH, T, conductivitat elèctrica, redox, etc.). L'aigua extreta durant el bombeig és descarrega directament al mar, si bé prèviament es realitza una mesura manual del cabal i el mostreig de mostres de gran volum.

CAPÍTOL 3: METODOLOGIA DE TREBALL

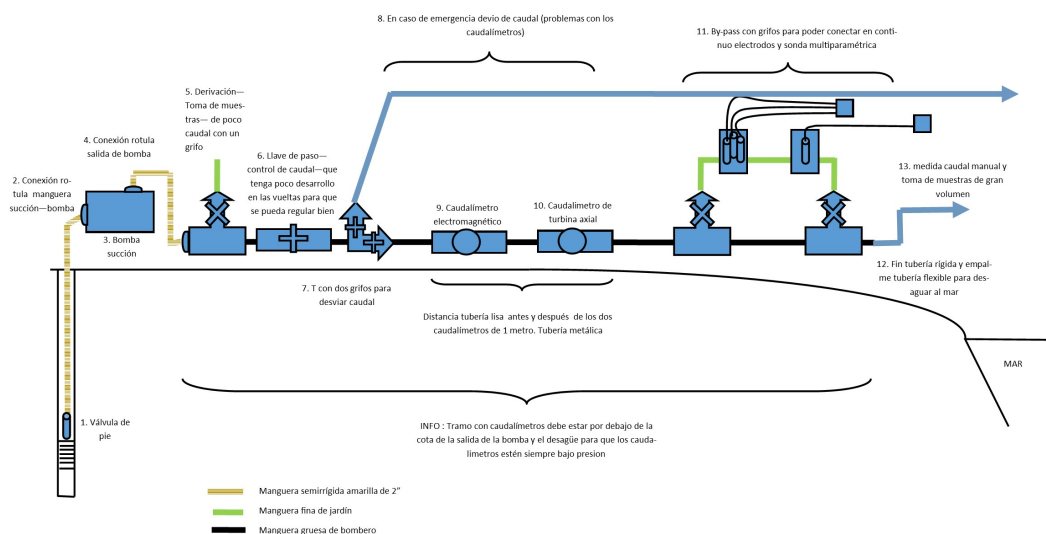


Figura 3.4.- Esquema de l'assaig de bombeig. Extret de MEDISTRAES



Figura 3.5.- Fotografia de la instal·lació de l'assaig de bombeig.

Concretament, en aquest treball ens hem centrat principalment en les dades de la pressió mesurada per els CTD-Divers instal·lats en els pous d'observació. Com a pous d'observació s'han escollit el N3_15, N3_25 donat que pertanyen al niu en el que s'ha realitzat l'assaig de bombeig i el N2_20 per la relació en fondària amb al pou de bombeig. A partir de les dades extretes dels Divers s'ha aplicat un conjunt de correccions i formules per tal de poder aplicar l'equació de Jacob i d'aquesta manera obtenir el valor de transmissivitat i el coeficient d'emmagatzematge de cada pou d'observació.

CAPÍTOL 3: METODOLOGIA DE TREBALL

El tractament de les dades ha consistit en una primera correcció de l'efecte de les marees, en la que s'ha intentat netejar el màxim les dades per poder aplicar l'equació de Jacob. L'equació de Jacob, és un mètode que es centra en els valors de descensos corresponents a temps grans ja que donen menys errors, i aquests valors dels descensos es representen respecte al temps en un gràfic semi-logarítmic. En el gràfic semi-logarítmic de descensos vers temps de bombeig si es descarten les primeres dades que correspondrien a temps petits, la resta de dades es disposen al llarg d'una recta (Escuder et al., 2009). Aquesta recta correspon a la fórmula de Jacob en la que la relació entre el descens i el logaritme del temps és lineal, sobre aquesta recta s'obtenen el pendent (m) i el punt que talla les abscisses (t_0). Per obtenir la pendent del gràfic semi-logarítmic es seleccionen dos punts que estiguin separats en un cicle logarítmic i es mesura la diferència entre les ordenades.

A partir del pendent i del temps inicial de descens, es pot calcular la transmissivitat i el coeficient d'emmagatzematge mitjançant les següents fórmules:

$$T = \frac{0,183 \cdot Q}{m} \text{ (m}^2\text{/dia)}$$

Formula ⁽¹⁾

T: transmissivitat, Q: cabal, m: pendent

$$S = \frac{2,25 \cdot T \cdot t_0}{r^2}$$

Formula ⁽²⁾

S: coeficient d'emmagatzematge, t_0 temps inici descens

r: distància al pou de bombeig

D'aquesta manera podrem obtenir els valors de la transmissivitat i del coeficient d'emmagatzematge per caracteritzar les propietats hidràuliques de l'aqüífer de la zona estudiada.

3.5 GEOFÍSICA

En aquest apartat s'inclou l'anàlisi de resistivitats i la variació de les conductivitats obtingudes mitjançant la tècnica geofísica de tomografia elèctrica. Concretament, consisteix en una tècnica geofísica no invasiva que permet analitzar la distribució real de resistivitats del subsòl mitjançant les mesures de resistivitats dels materials geològics subsuperficials per determinar el seu gruix i profunditat (Reynolds, 2011).

CAPÍTOL 3: METODOLOGIA DE TREBALL

Totes les tècniques geofísiques intenten diferenciar o reconèixer formacions geològiques que es troben en profunditat mitjançant algun paràmetre físic, en el cas de la prospecció elèctrica aquest paràmetre és la resistivitat, l'invers de la conductivitat. El mètode elèctric de prospecció és un dels més utilitzats en el camp de la geofísica i es fonamenta en l'anàlisi de la resistència que oposen els cossos geològics al pas d'una corrent elèctrica continua introduïda al terreny mitjançant elèctrodes.

Les tècniques de Tomografia Elèctrica en dos dimensions permeten obtenir un model força acurat de les variacions d'aquest paràmetre en el subsòl a partir d'un nombre molt elevat de mesures realitzades des de la superfície del terreny. Per assolir aquest nombre elevat de mesures, les mesures es realitzen utilitzant un elevat nombre d'elèctrodes (72 en el cas d'aquest treball) connectats a un cable multi-nucli. Un ordinador portàtil juntament a un connector electrònic seleccionen automàticament els elèctrodes corresponents per a cada mesura. L'equip utilitzat per adquirir les dades ha estat un Syscal Iris Pro, proveït de sistemes de filtrat i gravació en suport magnètic pel seu processat posterior.

La disposició i separació dels elèctrodes condiciona el grau de resolució i la profunditat d'estudi, de tal manera que a menor separació major resolució i a major separació major profunditat. En aquest cas, el dispositiu electròdic utilitzat ha estat "Wenner – Schlumberger" amb el qual s'obté una bona penetració, sense perdre resolució lateral. La separació electròdica ha sigut de 1.5 metres, permeten assolir profunditats màximes d'investigació d'entre 22 i 25 metres. Concretament, en aquest treball s'ha utilitzat la tomografia elèctrica estàndard (ERT) a partir d'elèctrodes des de la superfície per l'estudi de resistivitats, aquest tipus de tomografia de resistència elèctrica implica la mesura de les propietats elèctriques i permet determinar la distribució espacial de la resistivitat en el subsòl. L'altre mètode geofísic utilitzat ha estat la tomografia elèctrica en pous o sondejos (CHERT), que consisteix en mesures periòdiques entre el piezòmetre equipat amb elèctrodes donant lloc a seccions verticals paral·leles i perpendiculars de la zona d'estudi, aquest tipus de mètode geofísic permet una millor resolució per evitar la pèrdua de informació.

Les mesures de resistivitat obtingudes mitjançant l'equip de tomografia elèctrica han estat tractades posteriorment mitjançant algorismes d'inversió que permeten obtenir una imatge de resistivitats i profunditats anomenada pseudosecció. S'han utilitzat diferents paràmetres d'inversió per tal d'obtenir models geoelèctrics del terreny mitjançant el software Earthimager2D, el qual determina automàticament un model de resistivitats en dos dimensions del subsòl a partir de les dades obtingudes amb l'equip.

4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

Seguidament es presenten els diferents resultats obtinguts en aquest treball així com la interpretació d'aquests agrupats per les diferents metodologies emprades.

4.1 GEOLOGIA DE L'AQUÍFER

A continuació es presenten les dades de geologia, transmissivitat i les diagrames de gamma natural dels diferents trams ranurats de la xarxa de control, agrupades segons els dos transectes estudiats: ⁽¹⁾ un primer perpendicular a la línia de costa i ⁽²⁾ un segon paral·lel a la línia de costa situat a 80 m d'aquesta. El Transecte perpendicular a la línia de costa inclou els piezòmetres PP20, PP15 i els nius N1, N3 i N2, cada un dels quals es caracteritza per tenir 3 pous piezomètrics amb profunditats de 15, 20 i 25 m que es descriuen seguidament des de la costa cap al continent (Fig. 3.2). Aquestes dades han estat obtingudes del projecte MEDISTRAES, i en aquest apartat han estat descrites i interpretades. La testificació geofísica s'ha utilitzat per tal de completar la testificació geològica del sondeig, ja que en el cas dels pous PP20 i PP15 varen ser perforats a destrossa, és a dir sense obtenir testimoni continuu, deduint la geologia a partir dels fragments obtinguts al llarg de la perforació. La informació obtinguda mitjançant les diagrames de gamma natural proporciona una dada indirecta sobre els nivells amb més potassi, que han estat atribuïts, bé a nivells amb més contingut d'argiles, bé al basament granític o a l'alteració d'aquest a sauló. Les dades de situació dels trams ranurats, la geologia i les diagrames es presenten un cop corregida la cota topogràfica respecte a la cota del piezòmetre N1_15 (Fig. 4.1).

El piezòmetre PP20, presenta un únic tram ranurat continuu des de 2,7 a 17,7 m que es situa geològicament en materials sorrenes de granulometria mitjà, que corresponen a sediments interpretats com sediments de canvi de fàcies entre les fàcies sedimentaries holocenes i fàcies de dinàmica litoral tipus platja (Fig. 4.1). Malgrat la monotonia de sorres descrita durant la testificació del sondeig, el perfil de les diagrames de gamma natural indiquen diversos nivells amb valors més elevats de gamma natural (entre 6,5 i 8 m, al voltant de 13 m) que han estat interpretats com nivells més llimosos per la presència d'argiles. D'acord amb dades prèvies del projecte MEDISTRAES la transmissivitat d'aquest tram ranurat és alta, amb valors de 568 m²/d, fet que sembla indicar un predomini dels nivells sorrenes, d'acord amb la testificació (Taula 4.1).

CAPÍTOL 4: RESULTATS I DISCUSSIÓ

El pou piezomètric PP15, presenta el tram ranurat de 1,6 a 12,6 m (Fig. 4.1). El tram ranurat del pou piezomètric PP15 està representat pels mateixos materials geològics, sorres de gra mig. En aquest cas, a l'igual que en el PP20, la diagrafia de gamma natural indica també la presència de nivells amb valors més elevats de gamma natural entre 7 m i 13 m, amb senyals més intenses als 8, 11 i 12,5 m, que han estat interpretats com a nivells més llimosos per la presència d'argiles. D'acord amb dades prèvies del projecte MEDISTRAES aquest tram presenta una transmissivitat menor, amb valors mitjans de $250 \text{ m}^2/\text{d}$ (Taula 4.1).

El Niu 1 es caracteritza per presentar tres trams ranurats entre 12,5-14,5 m, 18,4-20,4 m i 20,8-22,8 m. El tram més superficial (N1_15), geològicament està situat en una alternança de nivells de sorres. El tram ranurat d'entremig (N1_20), es localitza a la discordança entre la base d'un paquet de graves i el sostre d'un paquet de llims i sorres. El tram més profund (N1_25) es situa a la discordança entre un paquet de graves i el sòcol granític (Fig. 4.1). El perfil de la diagrafia de gamma natural mostra valors alts fins als 4 m, seguint de manera més o menys creixent amb lleugeres inflexions prop dels 13 i 18 m, per mostrar un increment més pronunciat a partir dels 20 m fins al final del sondeig, mostrant un màxim als 22 m. Els pics de gamma natural per damunt dels 20 m han estat interpretats com un increment de la presència d'argiles i per tant de nivells llimosos. En concret, la senyal situada a 13 m s'ha interpretat com la continuació del nivell més llimós observat al PP15 i al PP20. L'augment de la senyal observada per sota dels 21 m, segons la testificació del sondeig s'ha relacionat amb el feldspat potàssic del granit. D'acord amb dades prèvies del projecte MEDISTRAES la transmissivitat de tram ranurat, de sostre a base del pou, és de 216, 243 i $5 \text{ m}^2/\text{d}$, respectivament (Taula 4.1). Els materials granítics són els que presenten una transmissivitat molt més baixa degut a la pròpia natura de la roca granítica.

El Niu 3, també presenta tres trams ranurats entre 9,9-11,9 m, 15,9-17,9 m i 17,9-19,9 m. El tram ranurat més superficial (N3_15) presenta una alternança de llims, sorres i graves. El tram ranurat d'entremig (N3_20) està situat en materials sorrencs, i el tram ranurat més profund (N3_25) es localitza en un tram compost per graves, llims i sorres (Fig. 4.1). El perfil de la diagrafia de gamma natural mostra valors creixents fins als 3,5 m, lleugeres inflexions prop dels 8 i 13 m, per mostrar un increment irregular a partir dels 20 m fins al final del sondeig. Els pics de gamma natural per damunt dels 20 m han estat interpretats com un increment de la presència d'argiles i per tant de nivells llimosos. La senyal situada a 13 m s'ha interpretat com la continuació del nivell més llimós observat al PP15 i al PP20. L'augment de la senyal observada per sota dels 21 m, segons la testificació del sondeig s'ha relacionat amb el feldspat potàssic del granit. D'acord amb dades prèvies del projecte MEDISTRAES, la transmissivitat varia en funció dels materials geològics de cada tram, presentant de sostre a base, valors de

CAPÍTOL 4: RESULTATS I DISCUSSIÓ

transmissivitat de 211, 621 i 223 m²/d, respectivament. L'elevada transmissivitat del tram més profund (N3_25) s'associa a la presència del nivell de graves (Taula 4.1).

El Niu 2, és el que es troba més lluny de la línia de costa, a uns 95 m de distància. Aquest pou, al igual que els anteriors, presenta tres trams ranurats entre 10-12 m, 15,1-17,1 m i 20-22 m. Geològicament el primer i segon tram ranurats (N2_15 i N2_20) és situen en un paquet sorrenc, presentant el segon tram un petit nivell de llims. El tercer tram ranurat (N2_25) es situa en a la discordança amb el sòcol granític presentant a sobre sorres i graves i a la base el granit (Fig. 4.1). El perfil de la diagrafia de gamma natural és molt semblant a la del niu N3 i N1, mostrant valors més alts al voltant dels 4 m, lleugeres inflexions fins als 19 m per acabar donant un màxim al voltant dels 22 m. Els pics de gamma natural han estat interpretats com un increment de la presència d'argiles i per tant de nivells llimosos. La tènue senyal situada a 12 m s'ha interpretat com la continuació del nivell més llimós observat als piezòmetres precedents. L'augment de la senyal observada per sota dels 22 m, d'acord amb la testificació del sondeig s'ha relacionat amb el feldspat potàssic del granit. D'acord amb dades prèvies del projecte MEDISTRAES, la transmissivitat de cada tram ranurat del N2_15 al N2_25 es de 97, 416 i 9 m²/d, respectivament. Si bé la baixa transmissivitat del tram N2_25 podria ser deguda a la presència dels materials granítics, aquests valors són poc coherents considerant que aquests ocupen menys de la meitat del tram (Taula 4.1).

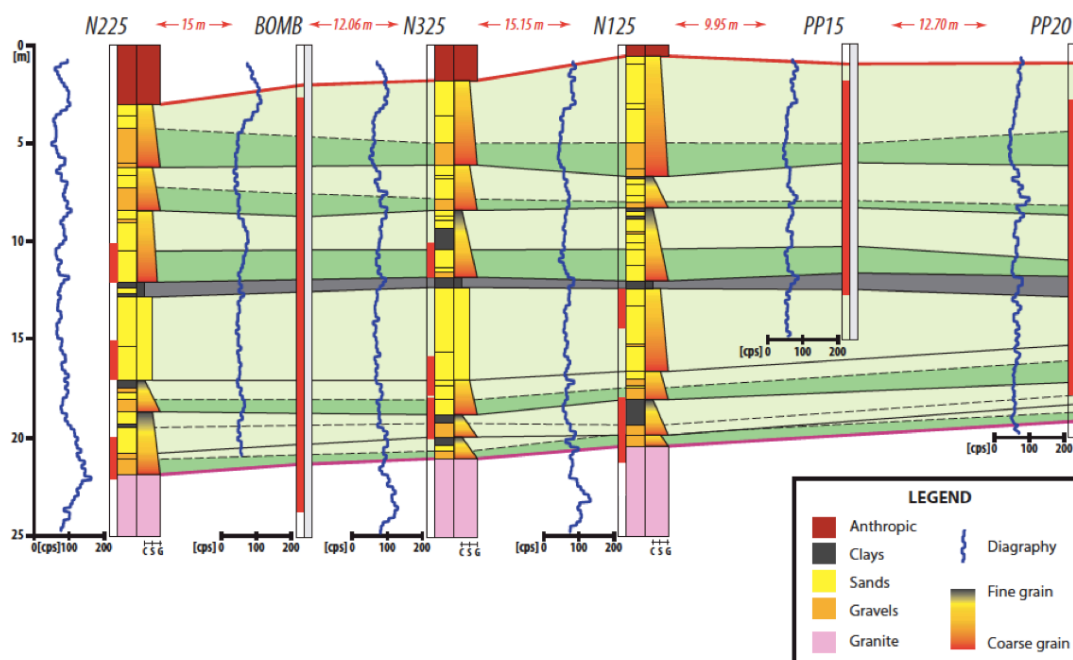


Figura 4.1.- Perfils geològics dels diferents piezòmetres estudiats i perfils de radiació gamma (color blau) de la secció perpendicular a la línia de costa, a la que s'ha fet la correlació estratigràfica amb la interpretació del perfil geològic. Font projecte MEDISTRAES. Els trams ranurats s'han marcat de color vermell.

CAPÍTOL 4: RESULTATS I DISCUSSIÓ

El Transsecte paral·lel a la línia de costa inclou els piezòmetres PS25 i N4. El niu N4 presenta tres trams ranurats entre 10,7-12,7 m, 14,2-16,2 m i 18,4-20,4 m, geològicament el primer (N4_15) i segon tram ranurat (N4_20) es situen en un paquet que alterna nivells de llims i sorres, el tercer tram (N4_25) també presenta nivells sorrencs però aquests s'alternen amb graves a la base (Fig. 4.2). D'acord amb dades prèvies del projecte MEDISTRAES, el tram que presenta una transmissivitat més baixa es el N4_15 amb un valor de $36 \text{ m}^2/\text{d}$, seguit per N4_25 amb un valor e transmissivitat de $535 \text{ m}^2/\text{d}$ i el N4_20 amb un valor de $155 \text{ m}^2/\text{d}$ (Taula 4.1). El perfil de la diagrafià de gamma natural és molt semblant a la del niu N3, mostrant valors més alts fins 3 m seguint amb inflexions fins al final del pou, amb un màxim al voltant dels 22 m (Fig. 4.2). Els pics de gamma natural per damunt dels 20 m han estat interpretats com un increment de la presència d'argiles i per tant de nivells llimosos. La tènue senyal situada als 11 m s'ha interpretat com la continuació del nivell més llimós observat als piezòmetres precedents. L'augment de la senyal observada per sota dels 22 m, d'acord amb la testificació del sondeig s'ha relacionat amb el feldspat potàssic del granit.

El pou piezomètric PS-25 presenta un tram ranurat des de 18,1 a 20,1 m, situant-se en un paquet de materials sorrencs que presenten una transmissivitat elevada de $327 \text{ m}^2/\text{d}$ (Taula 4.1). El perfil de la diagrafià de gamma natural és similar a la del pou N3, mostrant valors més alts fins 3 m seguint amb inflexions fins al final del pou, mostrant un increment significatiu a partir dels 17 amb màxims a 17, 20 i 24m (Fig. 4.2). Els pics de gamma natural per damunt dels 20 m han estat interpretats com un increment de la presència d'argiles, i per tant de nivells llimosos. L'augment de la senyal observada per sota dels 22 m, s'ha interpretat com deguda al feldspat potàssic del granit i potser de les sorres suprajacents.

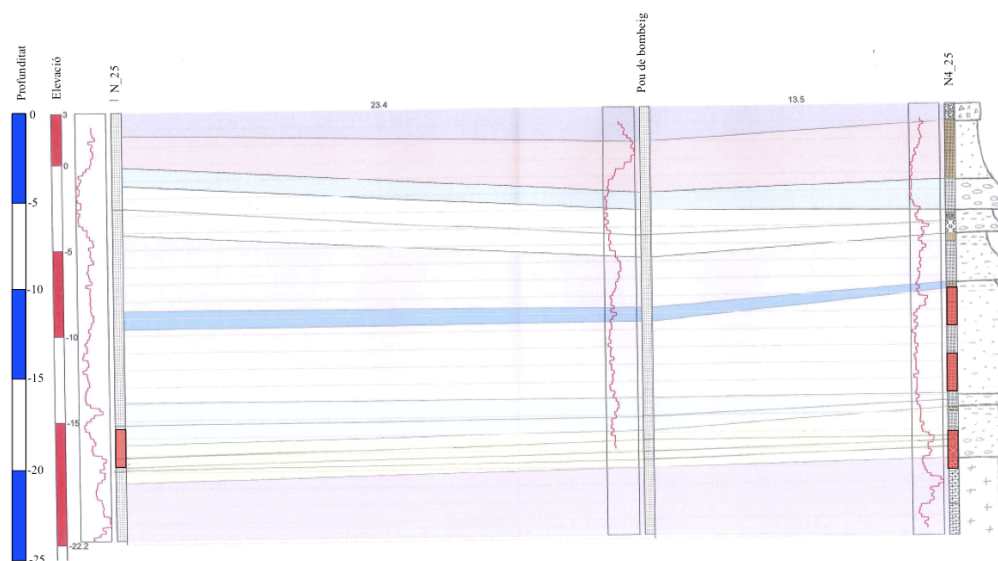


Figura 4.2.- Perfils geològics dels diferents piezòmetres estudiats i perfils de radiació gamma (color blau) de la secció paral·lela a la costa. Font projecte MEDISTRAES. Els trams ranurats s'han marcat de color vermell.

CAPÍTOL 4: RESULTATS I DISCUSSIÓ

Taula 4.1.- Taula de transmissivitats de cada tram ranurat. Font Projecte MEDISTRAES.

Referència piezòmetre	Transmissivitat (m ² /dia)	Referència piezòmetre	Transmissivitat (m ² /dia)
PP20	568,182	PP15	250
N125	5	N325	223,214
N120	243	N320	621,111
N115	216,45	N315	211
N225	9,374	N425	155
N220	416,667	N420	535
N215	97,656	N415	36
PS25	327		

La interpretació dels perfils de testificació i de les diagrafies gamma dels piezòmetres estudiats mostren que el sistema aquífer del sector estudiat està conformat per un basament granític, sobre el que descansa una sèrie sedimentaria dominada per sorres de diferent granulometries amb presència local de nivells més fins de materials argilosos. Concretament, destaca un nivell de llims entre 11 i 13 m, la continuïtat del qual pot ser discutible i sobre el que es tornarà a comentar en discutir els models geofísics. D'altra banda a partir dels perfils de diagrafia i de la testificació del sondeig N3, sembla haver-hi algun nivell, molt menys important, de llims entre els 7 i els 10 m de fondària, els quals es fan més palès al sector proper a la costa a partir de les diagrafies, desapareixent cap al continent. Aquest segon nivell sembla molt poc continuu al llarg del sector estudiat.

Les majors transmissivitats de l'aquífer estan controlades principalment pels materials detrítics, mentre que el basament granític és el menys transmissiu. Dels materials sedimentaris, els nivells de graves i sorres són els que presenten majors transmissivitats, mentre que aquells en que predominen els llims mostren transmissivitats menors. Aquest fet es pot observar, per exemple en els piezòmetres N2_15 i N4_15, en els quals la diagrafia de gamma natural mostra el predomini de fracció argilosa.

Des d'un punt de vista hidrogeològic el nivell piezomètric dels diferents pous mostra, a grans trets, poca variació degut segurament a la petita mida de la zona estudiada i al poc gradient de la zona. Així els piezòmetres més allunyats (N2 i N3) presenten una cota del nivell per sobre dels 3 m, mentre que els piezòmetres PP-15 i PP-20 es situen majoritàriament per sota dels 3 m de cota, indicant una línia de flux cap a la costa. Malgrat aquesta tendència de flux cap a la costa, els nivells del pou PP20 són quasi sempre superiors al PP15, fet que podria relacionar-se amb el caràcter més profund del PP20, tal com es comentarà tot seguit amb els nius N2 i N3. D'altra banda, destaquen els nius de multipiezòmetres que presenten diversos nivells piezomètrics en funció del tram ranurat. S'ha d'assenyalar que les cotes dels nivells dels piezòmetres N2_20, N2_25 són superiors als del N2_15 i que els nivells del N3_20 i N3_25 també són superiors al N3_15. Com que els piezòmetres N2_15 i N3_15 es situen per sobre de la capa de llims i els

CAPÍTOL 4: RESULTATS I DISCUSSIÓ

altres per sota, aquesta diferència de cota podria ser deguda a un caràcter lleugerament semi-confinat de l'aquífer per efecte de la capa de llims prèviament descrita a 13 m. Més endavant tornarem a discutir aquest fet. A la taula 4.2 es presenten les mesures del nivell piezomètric mesurades puntualment a les campanyes realitzades en el període comprès des del 2015 fins al 2017. El tractament realitzat a les dades per el seu posterior anàlisi s'ha explicat detalladament a l'apartat de metodologia (3.2).

Taula 4.2.- Nivells piezomètrics dels pous estudiats. Observis que els nivells dels piezòmetres N2_20, N2_25 són superiors als del N2_15 i que els nivells del N3_20 i N3_25 també són superiors al N3_15. Més detall Annex D.

Pous	N215	N220	N225	N315	N320	N325
Cota topogràfica	-0,041	-0,094	-0,067	0,126	0,022	0,019
21/5/15	3,171	3,304	3,277	2,854	3,088	3,221
8/6/15	3,391	3,454	3,387	3,059	3,248	3,351
16/6/15	3,311	3,414	3,337	2,994	3,198	3,281
10/7/15	3,361	3,444	3,347	3,024	3,218	3,301
10/9/15	3,272	3,314	3,387	3,296	3,685	3,517
14/9/15	3,311	3,454	3,387	3,29	3,42	3,485
13/10/15	3,568	3,198	3,948	-	-	-
27/10/15	3,064	3,141	3,043	-	-	-
24/11/15	3,291	3,374	3,317	2,964	3,168	3,221
29/6/16	3,331	3,434	3,257	3,014	3,198	3,241
23/9/16	3,321	3,414	3,277	2,994	3,208	3,201
7/11/16	3,171	3,314	3,267	2,824	3,058	3,081
21/12/16	3,071	3,224	3,077	2,754	3,008	3,011
6/2/17	3,351	3,454	3,317	3,024	3,298	3,251
3/3/17	3,316	3,384	3,242	3,181	3,168	2,974

CAPÍTOL 4: RESULTATS I DISCUSSIÓ

4.2 ASSAIG DE BOMBEIG

Per tal de caracteritzar l'aquífer a partir dels valors de transmissivitat i el coeficient d'emmagatzematge de l'aquífer estudiat, s'ha realitzat un assaig de bombeig en el pou N3_20, que es localitza al centre del transsecte perpendicular a la línia de costa. Per l'estudi del descens del nivell piezomètric, s'han escollit com a pous d'observació el N3_25 i N3_15 per situar-se en el mateix niu de piezòmetres que el de bombeig, i el N2_20 donat que està a la mateixa fondària.

A la figura 4.3 es presenten els gràfics del descens de cada pou respecte el temps de bombeig (dies), podent-se observar que si es descarten les primeres dades que correspondrien a temps petits, la resta de dades es disposen al llarg d'una recta. El resultat obtingut per als tres pous estudiats es mostren a la taula 4.2. La transmissivitat del N3_25 i el N2_20 és la mateixa, amb un valor de $1569 \text{ m}^2/\text{dia}$, i en el cas del el N3_15 aquest pou presenta un valor de $1495 \text{ m}^2/\text{dia}$. Respecte al coeficient d'emmagatzematge, els piezòmetres N3_25 i N2_20 mostren valors de 0,02 i 0,06 respectivament, aquests valors de magnitud de 10^{-2} s'associarien a un aquífer semi-confinat (Alfaro et al., 2006). En canvi, el N3_15 presenta un coeficient d'emmagatzematge de 0,1, associant-se a un aquífer lliure (Alfaro et al., 2006).

Per tant, els resultats obtinguts de l'assaig de bombeig posarien de manifest dos comportaments en l'aquífer, un comportament com aquífer lliure observat en el tram ranurat estudiat que es localitza sobre el nivell de llims (N3_15) i un comportament com aquífer semi-confinat en els trams ranurats estudiats que es localitzen sota de la capa de llims (N3_25 i N2_20). Aquest comportament confirmaria la importància de la capa de llims posada de manifest a partir de la geologia i les diagrames de gamma natural.

Els valors de transmissivitat obtinguts a partir de l'assaig de bombeig són molt majors que els obtinguts en el projecte de MEDISTRAES a partir d'assaigs de "slug test". En aquest sentit, Meier et al., (1999), estudien l'heterogeneïtat natural dels aquífers i conclouen que els valors de transmissivitat estimats a partir de temps de bombeig curts o intermedis, semblen sistemàticament subestimar la transmissivitat efectiva en aquífers heterogenis. Per tant, aquesta disparitat de valors de transmissivitat entre els obtinguts en aquests treball i en els assaigs de "slug test" del projecte MEDISTRAES pot ser explicada pel fet que l'assaig de bombeig té una llarga duració obtenint transmissivitats regionals i en el "slug test" al ser de curta durada els valors obtinguts són més locals.

CAPÍTOL 4: RESULTATS I DISCUSSIÓ

Taula 4.2.- Valors hidràulics de l'aquífer obtinguts a partir de l'equació de Jacob

Equació de Jacob	N315	N325	N220
Pendent (m)	0,042	0,04	0,04
Cabal (m^3/dia)	343,13	343,13	343,13
Transmissivitat (m^2/dia)	1495,08	1569,84	1569,84
Temps inicial (t_0) (dies)	0,0003	0,00008	0,0002
Distància al pou de bombeig (m)	2,51	3,5	3,39
Coefficient d'emmagatzemament	0,1601854	0,0230670	0,061471

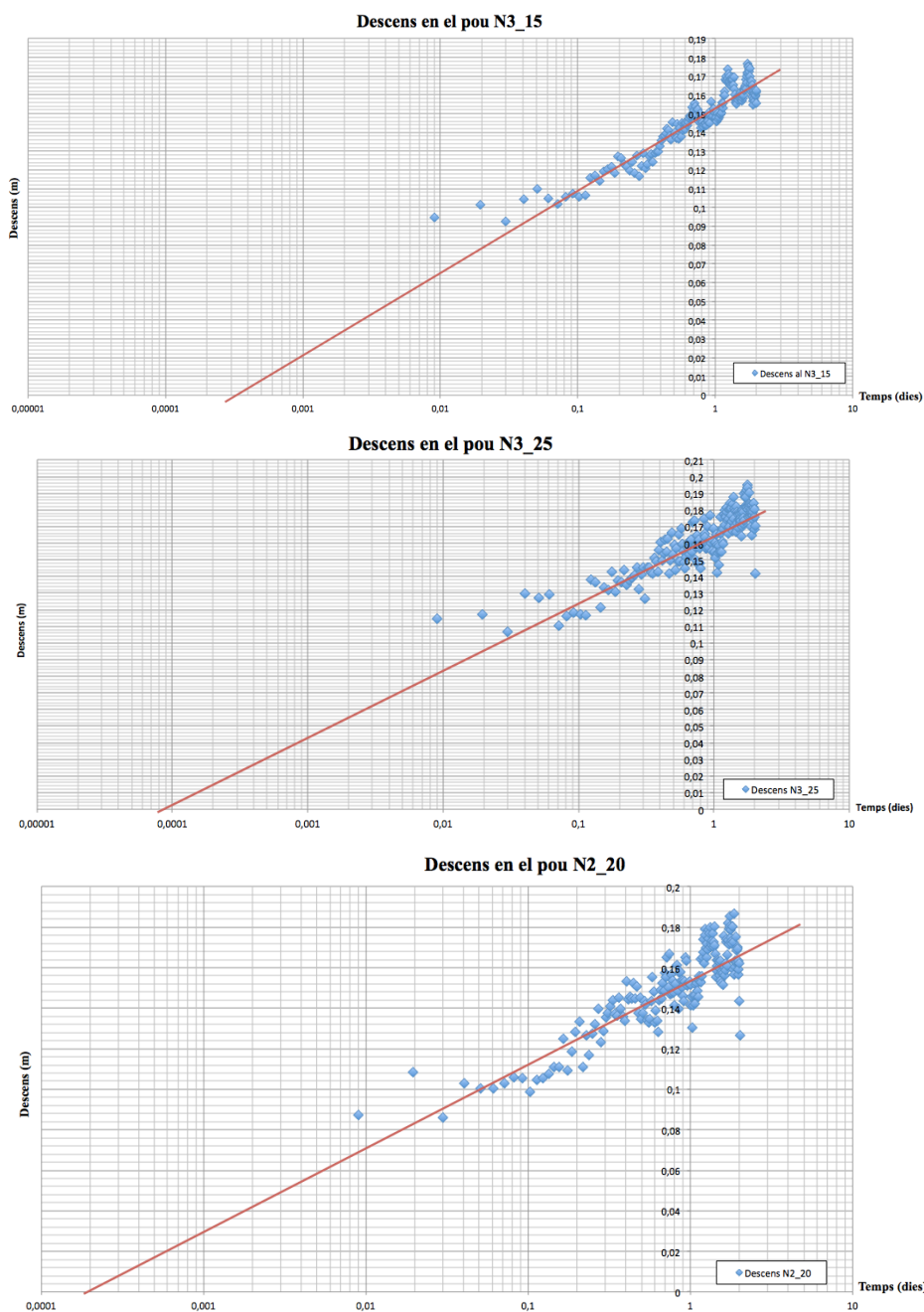


Figura. 4.3.- Gràfics del descens en els pous N3_15, N3_20 i N2_20, a partir dels quals s'ha extret el valor de la pendent i del temps d'inici del descens per tal de calcular els paràmetres hidràulics de l'aquífer de la taula 4.2.

CAPÍTOL 4: RESULTATS I DISCUSSIÓ

4.3 PERFILS DE CONDUCTIVITAT ELÈCTRICA

En aquest apartat es presenten els resultats obtinguts dels perfils de conductivitat mesurats puntualment a les campanyes realitzades en el període comprès des del 2015 fins al 2017 (taula 3.2). El tractament realitzat a les dades per el seu posterior anàlisi s'ha explicat detalladament a l'apartat de metodologia (3.2).

Els resultats es presenten agrupats segons els perfils dels dos transectes estudiats: ⁽¹⁾ un primer perpendicular a la línia de costa i ⁽²⁾ un segon paral·lel a la línia de costa situat a 80 m d'aquesta. Per representar la intrusió salina, s'ha considerat la interfase salina com la barreja constituïda per aproximadament 50% d'aigua dolça i 50% d'aigua de mar, assumint per tant conductivitats elèctriques de l'aigua properes als 30 mS/cm.

4.2.1. Transecte perpendicular a la línia de costa

Aquesta secció inclou els pous piezomètrics PP20, PP15, N1, N3 i N2. Els perfils amb conductivitats elèctriques més elevades corresponen als mesos de Setembre-16, Novembre-16, Febrer-17 i Març-17. La variabilitat de la conductivitat és podria relacionar amb l'efecte de la precipitació o tempestes fet que discutirem més endavant (apartat 4.4). Seguidament, es descriuen els diferents perfils des del més proper a la costa cap al continent.

El piezòmetre PP20 és el situat més proper a la línia de costa, trobant-se concretament a 30 m de distància del mar. A la Figura 4.4, es mostren tots els perfils mensuals d'aquest piezòmetre, els quals presenten un comportament similar amb conductivitats baixes al sostre del tram ranurat que incrementen en profunditat marcant clarament la zona d'interfase de l'aigua marina. Els mesos de Setembre-16, Novembre-16, Febrer-17 i Març-17 presenten els valors de conductivitat més elevats, arribant a assolir aquests mesos valors de conductivitat elèctrica compresos entre 10 i 20 mS/cm a la part superior del tram ranurat. A partir dels 12,7 m, on es localitza la interfase salina, la

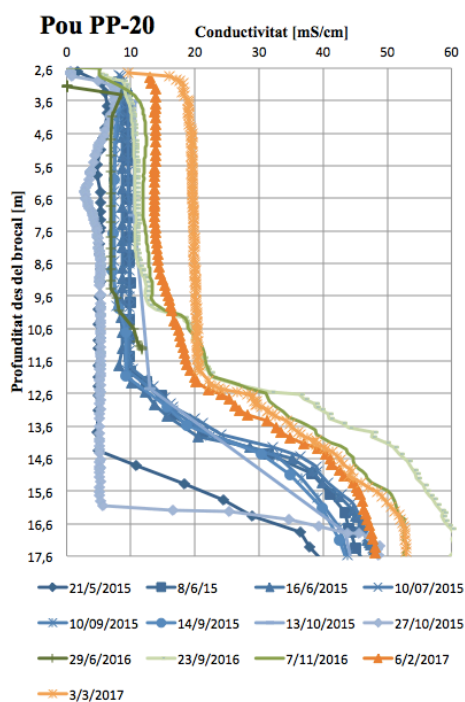


Figura 4.4.- Perfils de conductivitat elèctrica mesurats en el pou piezomètric PP20. Per més detall veure Annex A.

CAPÍTOL 4: RESULTATS I DISCUSSIÓ

conductivitat augmenta gradualment fins assolir valors de 30 a 60 mS/cm a la base del tram ranurat. Els mesos de Juny-15, Agost-15, Setembre-15 i Octubre-15, presenten la interfase a 14,5 m, assolint valors de fins a 50 mS/cm a la base del tram (Fig. 4.4). Els mesos de Maig-15 i Octubre-15 són els que presenten la interfase a més profunditat, concretament a 16,6 m, assolint valors màxims a la base de 40 i 50 mS/cm respectivament. Destaca el mes de Setembre-16 en que s'assoleix un 100 % d'aigua de mar a la base amb valors de 60 mS/cm. Tots els perfils, amb l'excepció dels Maig-15 i Octubre-15, mostren un canvi sobtat de la salinitat prop dels 12 m, coincidint amb la localització del nivell de llims descrit prèviament (apartat 4.1), fet que fa palesa l'efecte hidràulic d'aquest nivell sobre l'evolució de la zona de mescla.

Els perfils del pou piezomètric PP15 presenten un comportament similar amb valors de conductivitat que varien entre 2,6 i 9,4 mS/cm (Fig. 4.5). No s'observa la interfase salina en tot el perfil, però sí un increment de conductivitat els mesos de Febrer-17 i Març-17 amb conductivitats de 7 i 10 mS/cm que correspondrien a un 13% i 18% d'aigua de mar, respectivament. La campanya del Setembre-16 presenta un increment de la conductivitat a la base del tram, concretament a 11,5 m, coincidint amb la base del nivell de llims. Per tant aquest increment de salinitat, podria correspondre a l'inici de la interfase salina per sota del nivell llims.

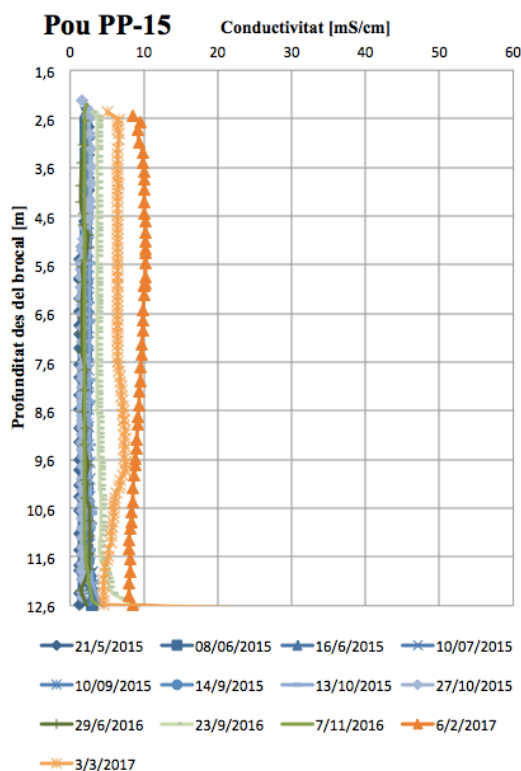


Figura 4.5.- Perfils de conductivitat elèctrica mesurats en el pou piezomètric PP_15. Per més detall veure Annex A.

CAPÍTOL 4: RESULTATS I DISCUSSIÓ

El niu N1 es caracteritza per presentar tres trams ranurats (Fig. 4.6). El tram ranurat més superficial, és el N1_15 que presenta valors de conductivitat elèctrica baixos entre 1,2 i 3,8 mS/cm que semblen augmentar gradualment a partir de 14 m, amb un augment més significatiu en la campanya de Març-17 que assoleix 11 mS/cm, fet que permet ubicar la zona de mescla en aquest període.

El segon tram ranurat és el N1_20, en el qual els perfils ja són pràcticament tots constants amb conductivitats properes a l'aigua de mar, exceptuant els mesos de Setembre-15 (campanya 14/9/15) i Maig-15, els quals encara presenten un increment de la conductivitat arribant a un valor constant a partir de 19 m a la campanya Setembre-15 (Fig. 4.6). Per contra a la campanya de Maig-15 la conductivitat segueix incrementant fins a la base del tram ranurat. Destaca la campanya de Setembre-16 que presenta valors de conductivitat molt elevats pràcticament de 100% aigua de mar (60 mS/cm). Vistes les dades d'ambdós perfils, sembla que la interfase salina es situaria entre ambdós trams ranurats, es a dir en el tram sec situat entre 14,5 i 18m.

El tercer tram ranurat és el N1_25, en el qual els diferents perfils de cada campanya no mostren canvis significatius en fondària. Es de senyalar que les conductivitats elèctriques són quasi la meitat de les observades en el tram immediatament superior (Fig. 4.6). Aquesta disminució de la conductivitat podria relacionar-se amb la baixa transmissivitat dels materials que conformen aquest tram, si bé es discutirà en més detall (apartat 4.4.2).

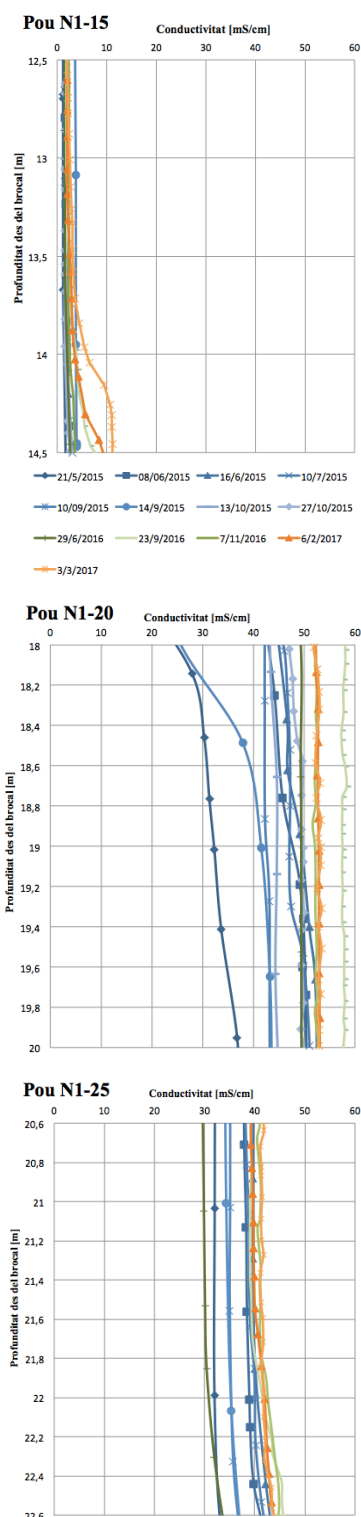


Figura 4.6.- Perfils de conductivitat elèctrica mesurats en el pou piezomètric N1 en els tres trams ranurats que conformen aquest niu. Per més detall veure Annex A.

CAPÍTOL 4: RESULTATS I DISCUSSIÓ

El niu N3, al igual que el pou piezomètric anterior, està format per tres trams ranurats (Fig. 4.7). En el primer tram ranurat, el N3_15, els perfils mensuals mostren un comportament constant similar al llarg de tot el tram amb conductivitats molt baixes en un rang entre 1,2-1,8 mS/cm. Aquest tram, a diferència del N1_15, mostra un comportament molt homogeni i constant al llarg de tots els perfils i campanyes, fet que es podria associar a la seva posició per sobre del nivell de llims.

En el segon tram ranurat, N3_20, en funció dels mesos la conductivitat varia entre 7 i 40 mS/cm (13 i 72% d'aigua de mar). Tots els perfils mostren valors força constants, exceptuant el Març-17 en que la conductivitat va augmentant de sostre a base progressivament assolint un valor constant en la vertical a partir de 16,8 m. Les dades de la campanya del 14/9/15 (Setembre-15) mostren un comportament similar arribant a un valor constant a partir de 16,5m. Les dades de la campanya del 10/9/15 (Setembre-15) semblen mostrar un lleuger increment de la salinitat, estabilitzant-se a 16 m. Les dades del mes de Juny-16 malgrat mostrar una evolució constant a partir de 17,6 m també mostra una suau progressió creixent de conductivitat (Fig. 4.7). Les campanyes del Maig-15 i Juny-15 són les que presenten les conductivitats més baixes, amb valors entre 9 i 11 mS/cm (aproximadament un 20 % d'aigua de mar), si bé a partir dels 17 m presenten un suau increment de conductivitat.

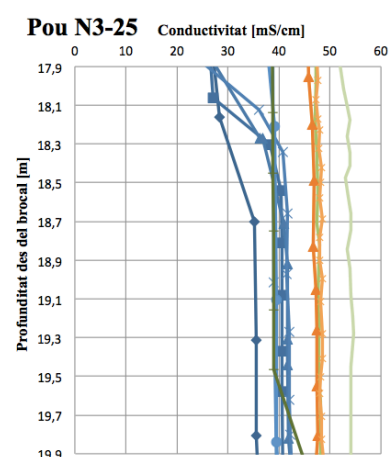
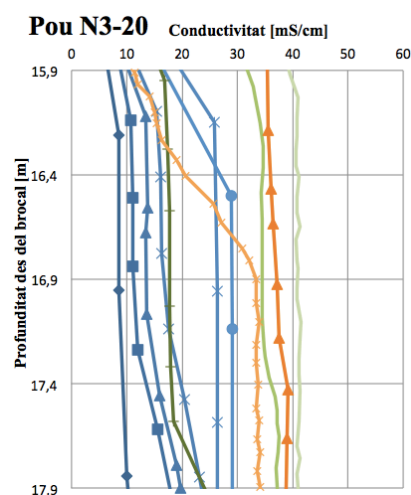
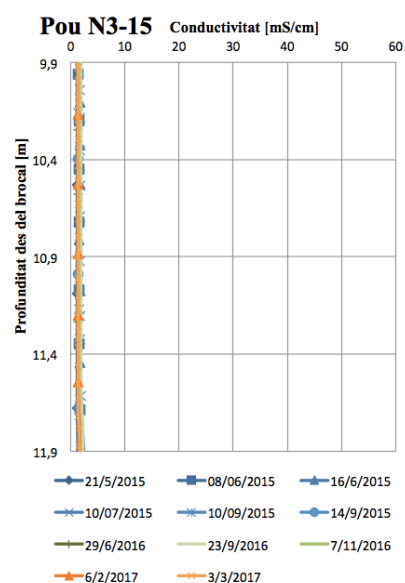


Figura 4.7.- Perfils de conductivitat elèctrica mesurats en el pou piezomètric N3 en els tres trams ranurats que conformen aquest niu. Per més detall veure Annex A.

CAPÍTOL 4: RESULTATS I DISCUSSIÓ

En el tercer tram ranurat, N3_25, la majoria dels perfils presenten un valor de conductivitat elèctrica poc variable comprès entre 28 i 55 mS/cm, amb l'excepció de les campanyes de Maig-15, Juny-15 i Juliol-15, les quals mostren un increment bruscat de la conductivitat que s'estabilitza prop dels 18,4 m (Fig. 4.7). En el cas de la campanya de Maig-15, l'increment és més suau i s'estabilitza a 18,6 m, prop dels 35 mS/cm (63% d'aigua de mar). A la part baixa del tram ranurat, les mesures de la campanya del Juny-16 mostren un suau increment de conductivitat fins valors propers a 48 mS/cm (87 % d'aigua de mar) a la part baixa del tram ranurat.

El niu N2 és el niu que es troba més lluny de la línia de costa a uns 80 m de distància. A la figura. 4.8 es mostra l'evolució de la conductivitat elèctrica al llarg dels diferents piezòmetres d'aquest pou. El primer tram ranurat (N2_15) mostra valors de conductivitats molt baixos per sota dels 2 mS/cm amb una evolució constant al llarg de tot el perfil. De manera similar al N3_15, aquest comportament homogeni i constant al llarg de tots els perfils i campanyes, es pot associar a la seva posició per sobre del nivell de llims.

En el segon tram ranurat (N2_20) es pot observar una gran variabilitat de la conductivitat elèctrica, des de valors de 3 a 40 mS/cm (5 i 72 % d'aigua de mar). La campanya del Febrer-17 mostra els valors de conductivitat més elevats (30-40 mS/cm), els quals augmenten progressivament fins estabilitzar-se als 16,6m (Fig. 4.8). La campanya del Setembre-16 (23/9/16) mostra una progressió des de 14 fins 28 mS/cm a 15,8m, estabilitzant-se en aquest valor fins als 16,6 m en que torna a augmentar fins assolir els 30 mS/cm (54 % d'aigua de mar) a la base del tram

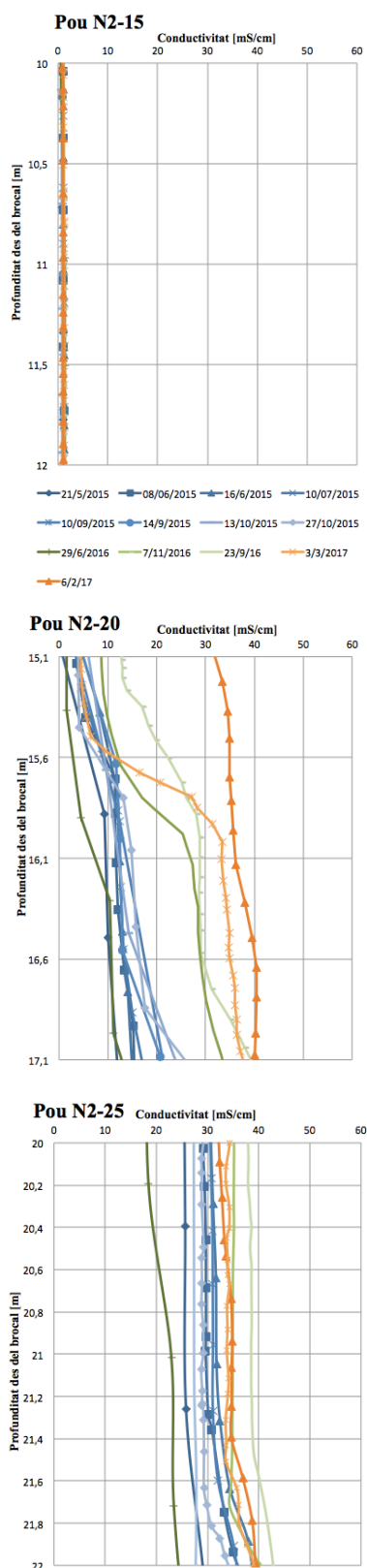


Figura 4.8.- Perfils de conductivitat elèctrica mesurats en el pou piezomètric N2 en els tres trams ranurats que conformen aquest niu. Per més detall veure Annex A.

CAPÍTOL 4: RESULTATS I DISCUSSIÓ

ranurat. La campanya de Març-17 mostra un increment de la salinitat suau a la part alta del tram que passa a augmentar de forma brusca en el sectors dels 15,5 – 16 m, arribant a assolir valors superiors als 30 mS/cm (54 % d'aigua de mar), per seguir amb una evolució d'increment de la conductivitat de manera molt suau. Les dades de la campanya del Juny-15 presenten un comportament similar al perfil anterior. Les dades de la campanya de l'Octubre-15 mostren un increment de la conductivitat en dues etapes, una primera des de la part alta del tram fins als 15,8 m, en que s'estabilitza prop dels 15 mS/cm i un altre a partir dels 16,8 m en que torna a mostrar un increment de conductivitat sobtat fins la part final del tram en que s'aproxima a valors de 28 mS/cm (51% d'aigua de mar). La resta de perfils mostren una evolució gradual des de conductivitats entre 10-20 mS/cm de manera progressiva (Fig. 4.8). Les campanyes dels mesos de Setembre-16, Novembre-16, Febrer-17 arriben a assolir valors de 30 mS/cm passant de manifest que la interfase es troba al mig del tram. A la resta de campanyes no s'observa la interfase en el tram, motiu pel que es pressuposa que la interfase es situa en el tram sec entre aquest i el tercer tram.

En el tercer tram ranurat, N2_25, tots els perfils de les diferents campanyes mostren un valor homogeni de conductivitat comprès entre 20 i 40 mS/cm, sense mostrar variacions destacables. Els perfils amb valors més alts de conductivitat corresponen a les campanyes de Setembre-16, Novembre-16, Febrer-17 i Març-17, mentre que els que presenten valors més baixos són les campanyes de Maig-16, Juny-16 i Octubre-15. Els perfils de les campanyes d'Octubre-15, Juny-15, Juny-16, Setembre-16, Novembre-16, Febrer-17 i Març-17 mostren un lleuger increment de la salinitat expressada com a conductivitat elèctrica a partir dels 21,7 m (Fig. 4.8).

CAPÍTOL 4: RESULTATS I DISCUSSIÓ

4.2.2. Transsecte paral·lel a la línia de costa inclou el PS25 i N4.

El niu N4 es troba a la part oest de l'eix perpendicular a la línia de costa, concretament a 10 m de distància respecte el N3. El primer tram ranurat (N4_15) mostra un comportament similar a tots els perfils de les diferents campanyes amb valors de conductivitat elèctrica molt baixos i constants de sostre fins la base (< 2 mS/cm) (Fig. 4.9).

El segon tram ranurat, N4_20, mostra els valors més elevats per a la campanya del Setembre-16. El perfil d'aquesta campanya presenta un increment brusc de la conductivitat a la base del tram ranurat, arribant a assolir valors 45 mS/cm (82% d'aigua de mar). Les campanyes dels mesos de Novembre-16, Febrer-17 i Març-17 presenten una evolució similar, amb valors baixos al sostre del tram ranurat (< 7 mS/cm) i alts a la base en que arriben a assolir valors de 35 a 45 mS/cm, amb la interfase situada a uns 15 m (Fig. 4.9). La resta de campanyes els perfils presenten una evolució similar, amb valors baixos de conductivitat elèctrica (< 7 mS/cm) que es mantenen en estats estacionari fins aproximadament 15,5 m en que comencen a augmentar suaument la conductivitat fins valors de 15 mS/cm (27 % d'aigua de mar). Aquesta evolució fa pensar que la interfase es situaria en el tram sec situat entre el segon i el tercer tram ranurat.

En el tercer tram ranurat, N4_25, tots els perfils de les diferents campanyes mostren un valor constant en la vertical de conductivitat comprès entre 32 i 55 mS/cm (58 i 100% d'aigua de mar), exceptuant la campanya de l'Octubre-15 (13/10/15) que presenta un increment elevat de la salinitat amb la interfase situada a 19 m, mantenint una salinitat constant a partir de 19,4 m (Fig. 4.9).

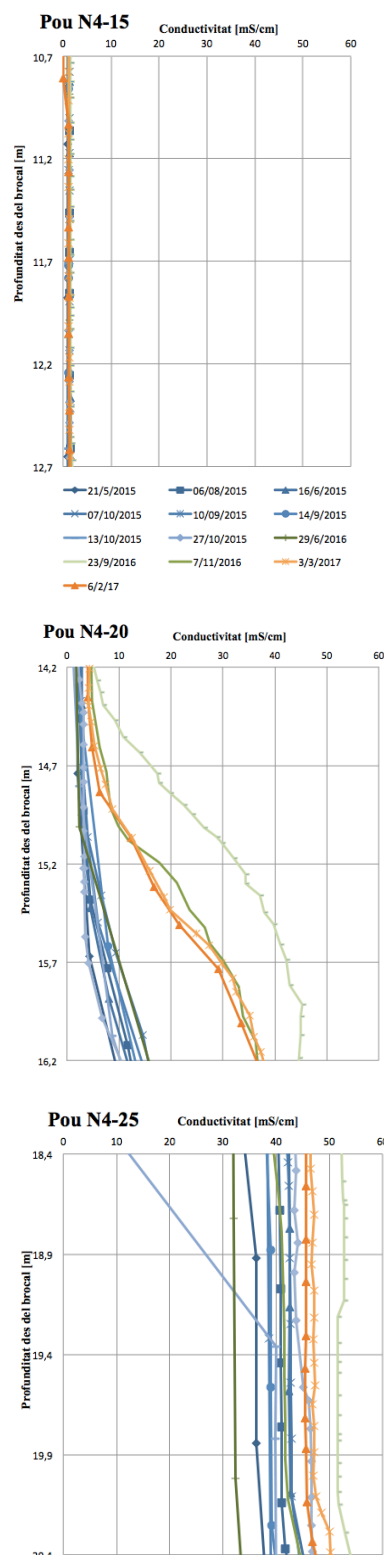


Figura 4.9.- Perfils de conductivitat elèctrica mesurats en el pou piezomètric N4 en els tres trams ranurats que conformen aquest niu. Per més detall veure Annex A.

CAPÍTOL 4: RESULTATS I DISCUSSIÓ

El pou piezomètric PS25 es localitza al costat est del N3, concretament a 20,58 m de distància d'aquest. La majoria de perfils presenten una evolució de la conductivitat constant al llarg del tram (Fig. 4.10), amb valors de conductivitat elèctrica elevats compresos entre 30 i 57 mS/cm (55 i 100%). Les mesures de les campanyes dels mesos de Setembre-15, Octubre-15 i Juny-15 semblen assolir un valor constant a partir dels 19 m.

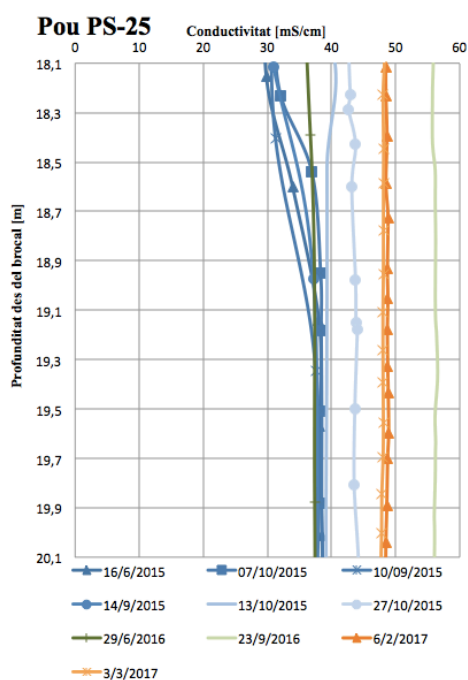


Fig. 4.10.- Perfils de conductivitat elèctrica mesurats en el pou piezomètric PS25 en els tres trams ranurats que conformen aquest niu. Per més detall veure Annex A.

4.4 EVOLUCIÓ TEMPORAL DE LA INTRUSIÓ SALINA

L'evolució estacional de la zona de transició o interfase es discutirà a partir de les dades puntuals obtingudes a les diferents campanyes de camp realitzades i mitjançant les sèries temporals mesurades de manera continua al llarg del temps.

4.4.1. Dades campanyes puntuals

El comportament de la conductivitat pot estar influenciat per les precipitacions, ja que segons el model conceptual de Ghyben-Herzberg, es pot deduir que la ubicació de la interfase natural imita la forma del nivell freàtic de l'aigua, situant-se per sota del nivell del mar a una profunditat 40 vegades l'altura del nivell freàtic respecte al nivell del mar (Bear, 1979; Bear i Cheng, 2010; Pool i Carrera 2011). Per tant, teòricament les pujades del nivell piezomètric haurien d'implicar baixades de la interfase. Per aquest motiu, primerament presentarem les dades pluviomètriques de la zona d'estudi per després analitzar les dades de salinitat recollides a cada campanya juntament amb les dades pluviomètriques.

CAPÍTOL 4: RESULTATS I DISCUSSIÓ

A la figura 4.11, es mostren les dades pluviomètriques des de l'any 2015 al 2017, obtingudes del Servei Meteorològic de Catalunya (<http://www.meteo.cat>) a l'estació meteorològica de Cabrils, la més propera a la zona d'estudi. Es pot observar que els mesos que presenten una precipitació acumulada mensual més elevada són: març, maig, agost, setembre, octubre i novembre, amb unes precipitacions acumulades de cada mes de: 63.2 mm, 32.7, 74.7, 38.7, 50.9 i 28.9 mm, respectivament (Fig. 4.11). Destaca el mes d'agost seguit del de març, com els mesos amb més precipitacions acumulades. La precipitació acumulada al llarg de tot l'any 2015, va ser de 355,2 mm. La pluviometria de l'any 2016 mostra que els mesos que destaquen amb majors precipitacions són els mesos de febrer, abril i octubre, donat que presenten unes precipitacions mensuals acumulades de 94.3, 94.8 i 276.5 mm, respectivament (Fig. 4.11). La resta de mesos presenten precipitacions, però aquestes no superen els 37 mm. Si bé l'any 2016 no van haver-hi precipitacions rellevants tots els mesos, la precipitació acumulada és molt major (642,3 mm/m²) que la de l'any 2015. Per l'any 2017, sols s'ha disposat de dades del primer trimestre (gener a març). D'aquest període, el mes que presenta una precipitació mensual acumulada més elevada és el de març amb un valor de 76,7 mm, seguit pel mes de gener amb un 34,5 mm i el de febrer amb un 30,2 mm (Fig. 4.11).

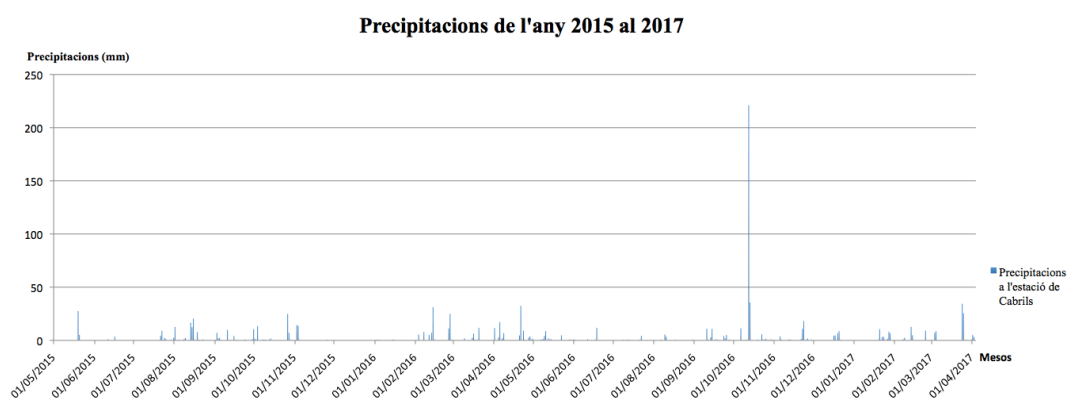


Figura 4.11.- Precipitacions mensuals acumulades l'any 2015, 16 i 17. Dades extretes del Servei Meteorològic de Catalunya (<http://www.meteo.cat>).

La distribució mensual de les precipitacions mostra que els mesos més plujosos corresponen a la tardor-hivern, sobretot els mesos d'octubre i desembre, a diferència dels mesos d'estiu en que les precipitacions són molt baixes, principalment al mes de juliol i els mesos de primavera les precipitacions diàries són elevades però la mitjana mensual no. Si ens centrem en la distribució de les precipitacions a la zona d'estudi durant el període del 2015-2017, es pot observar que les precipitacions diàries coincideixen amb la distribució mensual de precipitacions típica en que els mesos més plujosos són a l'hivern i tardor, i els mes secs corresponen a l'estiu, no obstant destaquen les precipitacions del Agost-15.

CAPÍTOL 4: RESULTATS I DISCUSSIÓ

Els gràfics de conductivitat mensual i precipitacions que es presenten a l'annex (Annex B), es pot observar una tendència en disminuir o augmentar els valors de conductivitat en funció de les precipitacions del mes. Donat que a tots els perfils s'observa la mateixa evolució de la conductivitat respecte les precipitacions, s'ha escollit els piezòmetres que esta al centre del transecte i el que esta més proper a la costa per representar aquesta evolució, aquests pous són el PP20 (més proper a la línia de costa) i el niu 3 (al centre del transecte perpendicular a la línia de costa). Per la representació de les dades de conductivitat mensual s'ha escollit una profunditat fixe que correspondria a la base de cada tram ranurat.

A la figura 4.12, es mostra la relació de la variació de la salinitat amb la pluviometria en el piezòmetre PP20, observant-se l'augment de la conductivitat durant els mesos de maig, juny i juliol del 2015 en els quals hi ha escasses precipitacions. Aquesta relació també s'observa durant la campanya de l'Agost-15, en que té lloc un període d'altres precipitacions amb una màxima mensual de 20,4 mm, i conseqüentment té lloc una disminució de la conductivitat al Setembre-15 (Fig. 4.12). Aquesta conductivitat augmenta gradualment de valors de 38,3 mS/cm (70 % d'aigua de mar) el mes de Setembre-15, a valors de 48,67 mS/cm (88 % d'aigua de mar) el Novembre-15. En el mateix sentit, a la campanya del Setembre-16, el valor de conductivitat es d'aproximadament de 60 mS/cm (100 % aigua mar), disminuint a 53 mS/cm al Novembre-16, degut a les altes precipitacions del mes d'octubre que assoleixen un valor màxim de 220 mm diaris. Seguidament la conductivitat continua disminuint a les següents campanyes trobant valors de 48 mS/cm durant la campanya de Febrer-17 per augmentar significativament a 53 mS/cm durant la campanya de Març-17.

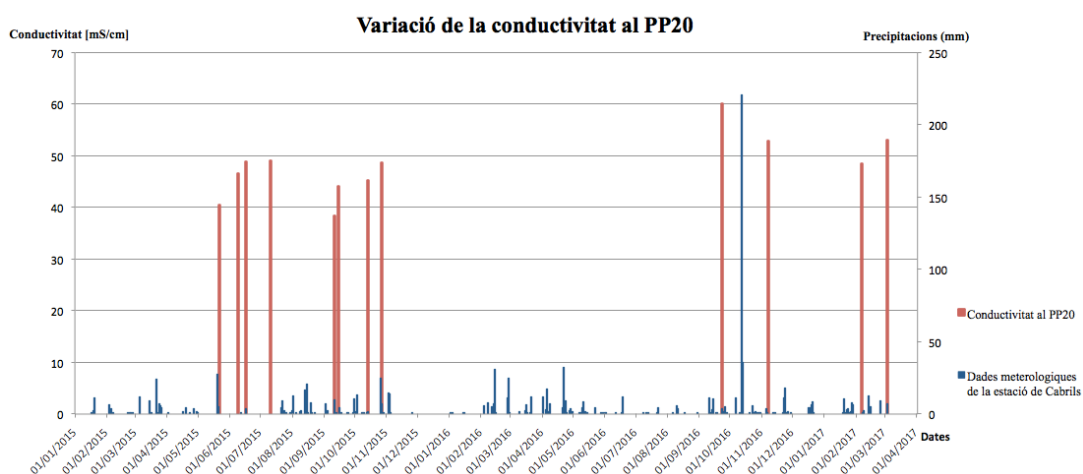


Figura 4.12.- Conductivitat elèctrica i pluviometria en el pou piezomètric PP20 al llarg del període d'estudi. En detall a l'annex B.

CAPÍTOL 4: RESULTATS I DISCUSSIÓ

En el cas del niu N3, si bé té lloc una variació de la conductivitat versus les precipitacions es poden observar algunes diferències entre els tres trams ranurats. Aquestes diferències estan relacionades amb la resposta de la conductivitat en funció de la profunditat a la que es troba el tram ranurat (Fig. 4.13).

L'evolució de la conductivitat al tram N3_15, al llarg de l'any hidrològic, mostra un augment des de la campanya del Maig-15 fins a la del Juliol-15, a partir de les quals la conductivitat de la campanya del Setembre-15 disminueix respecte els mesos anteriors com resposta a les altes precipitacions del mes d'Agost-15. Durant el període de tardor-hivern del 2015 al 2016 falten dades dels perfils mensuals, però les altes precipitacions, dels mesos de Abril, Maig i Juny-16 podrien ser les responsables dels baixos valors de la conductivitat de la campanya del Juliol-16. A la campanya del Setembre-16 es pot observar un increment significatiu de la conductivitat que pot ser explicat per les escasses pluges dels mesos anteriors, mentre que la disminució des de valors de conductivitat de 2,2 mS/cm a 1,7 mS/cm a la campanya de Novembre-16 pot ser explicat per les altes precipitacions del mes d'octubre d'aquest any. A partir del mes de novembre sembla que la conductivitat va augmentant de manera gradual.

El N3_20, a l'igual que el tram ranurat anterior, mostra un increment gradual de la conductivitat els mesos de Maig, Juny i Juliol de 2015, però a diferència del N3_15 la conductivitat segueix augmentant fins la campanya d'Octubre-15 on es redueix. A la campanya de Juliol-16, la conductivitat elèctrica és d'aproximadament de 25 mS/cm, passant a augmentar quasi el doble a la del Setembre-16, fet que pot ser explicat per les escasses pluges dels mesos anteriors. El mes d'Octubre presenta una alta pluviometria, motiu pel qual disminueix la conductivitat a la campanya del Novembre-16. Al llarg de l'any 2017, segueix observant-se una bona relació entre pluviometria i evolució de la salinitat. En aquest sentit les escasses pluges de principis de l'any 2017 donen lloc a un augment de la salinitat (conductivitat) durant la campanya de Febrer-16. Aquesta salinitat disminueix a principis de la campanya de Març-17 degut a les precipitacions de finals del mes de febrer.

El N3_25 mostra un comportament similar al N3_15, amb un augment de conductivitat als mesos de Maig, Juny i Juliol-15, que disminueix al Setembre-15 per les precipitacions del mes d'Agost. El increment de la conductivitat observat en el període Juliol-16 - Octubre-16, s'inverteix a disminuir per la influència de les precipitacions del mes d'Octubre-16, i torna a augmentar significativament a partir de principis del 2017.

CAPÍTOL 4: RESULTATS I DISCUSSIÓ

Per tant l'estudi de l'evolució temporal de les campanyes de camp puntuals mostren una tendència a l'increment o disminució de la salinitat en funció de les precipitacions, posant de manifest una clara correlació amb les precipitacions.

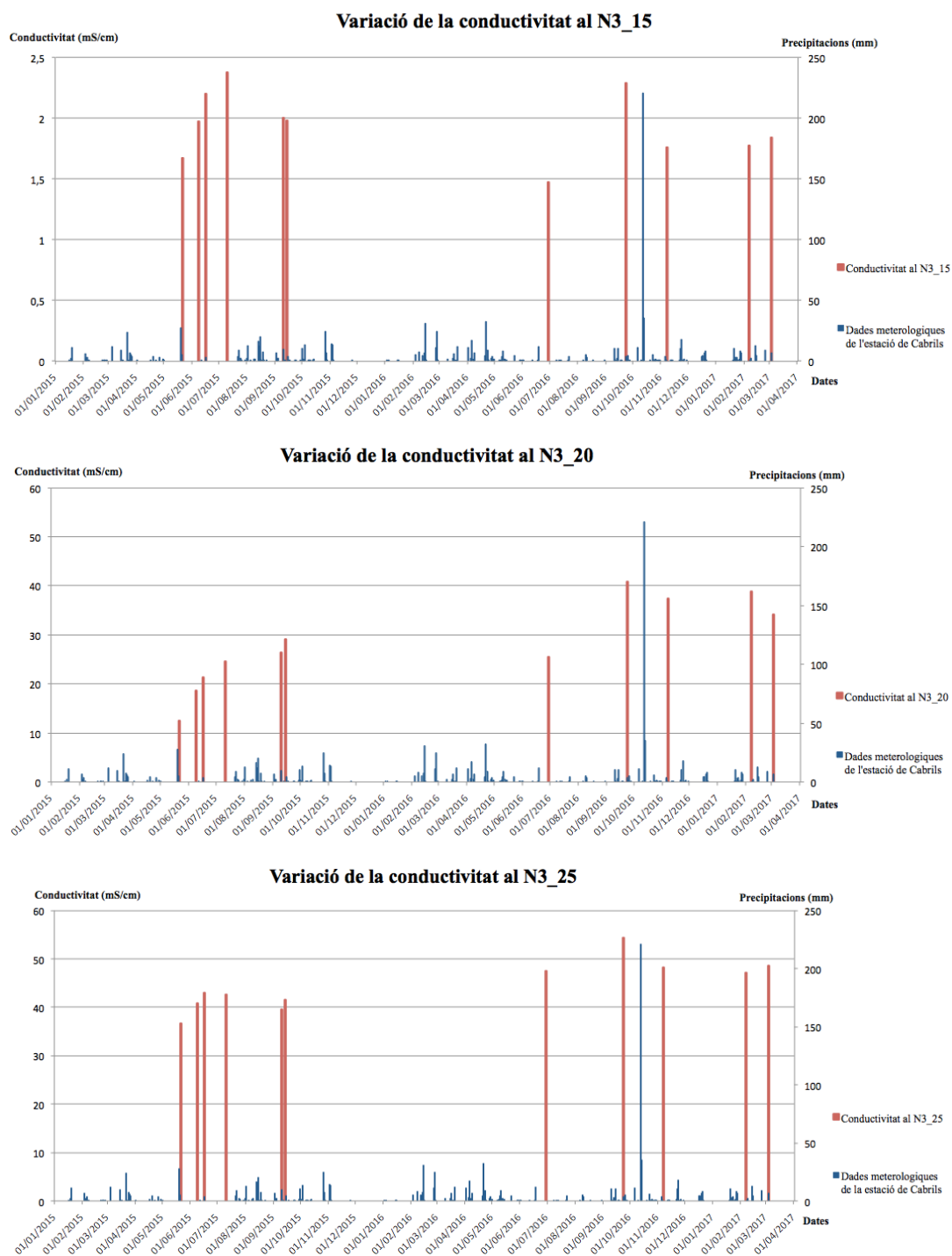


Figura 4.13.- Gràfic de les variacions estacionals de la conductivitat elèctrica i de la pluviometria en els diferents trams ranurats del niu N3. En detall a l'annex B.

CAPÍTOL 4: RESULTATS I DISCUSSIÓ

4.4.2. Series temporals

L'evolució temporal s'ha caracteritzat mitjançant mesures contínues (cada 15 minuts), els perfils de les diferents campanyes de camp realitzades i les dades pluviomètriques al llarg del període estudiat. Les dades de nivell piezomètric, temperatura i conductivitat elèctrica obtingudes de manera contínua amb els Divers® o CTD-Divers® han estat corregides per tal d'eliminar els errors de mesura, tals com els moments d'extracció per a la descàrrega de dades, calibrat amb les mesures puntuals mesurades a les campanyes de camp del nivell piezomètric, etc. A l'annex C es mostren els resultats obtinguts, un cop realitzades les diferents correccions esmentades a l'apartat de metodologia (3.3). Concretament s'han seleccionat vuit dels pous estudiats, que corresponen al PP20, PP15, i els piezòmetres del Niu 1 i 2 amb la finalitat de obtenir mesures dels pous en una secció perpendicular a la línia de costa.

A la figura 4.14 es presenta la variació dels nivells piezomètrics al llarg del temps per els diferents pous estudiats. Del conjunt de pous estudiats en aquest apartat, els pous PP20, PP15, N1_20, N1_25 presenten el nivell piezomètric més baix entre 2,3 i 2,7 m i el N1_15, N2_15, N2_20 i N2_25 corresponen als pous que presenten el nivell piezomètric més alt entre 3 i 3,5 m. Tal y com ja s'ha comentat prèviament (apartat 4.1) els diferents piezòmetres dels nius 2 i 3 presenten cotes del nivell més alt quan estan ranurats per sota de la capa de llims, i lleugerament més baixes per als trams que es situen per sobre. Així, en el cas del N_2 la mitjana de la cota piezomètrica d'aquest tram que està ranurat per sobre la capa de llims (N2_15) és de $3,29 \pm 0,13\text{m}$, mentre que els dos trams que es situen per sota del nivell de llims, el N2_20 i el N2_25 presenten un valor mitjà de la cota de $3,35 \pm 0,10\text{m}$ i $3,32 \pm 0,20\text{m}$, respectivament (Taula 4.2). Malgrat que no tenim dades del seguiment temporal del niu N3, les dades obtingudes de les diferents campanyes de nivells piezomètrics mesurades al camp mostren que el tram que es situa per sobre la capa de llims (N3_15) presenta valors de la mitjana de la cota piezomètrica de $3,02 \pm 0,16\text{m}$, inferiors als valors de $3,23 \pm 0,17\text{m}$ i $3,24 \pm 0,16\text{m}$, dels altres dos trams que és situen per sota del nivell de llims, el N3_20 i el N3_25, respectivament (Taula 4.2). Aquestes diferents cotes piezomètriques en un mateix niu de piezòmetres, podria correspondre a un comportament lleugerament semi-confinat de l'aquífer per sota la capa de llims. Aquest fet, és coherent amb les observacions en els perfils de conductivitat, en els quals la capa de llim semblava acotar l'evolució vertical de la interfase salina.

CAPÍTOL 4: RESULTATS I DISCUSSIÓ

El niu 1 presenta un comportament diferent a l'observat en els altres dos nius (N2 i N3). En aquest cas, el tram ranurat que presenta valors piezomètrics més elevats correspon al més superficial (N1_15) amb una mitjana de la cota piezomètrica de $3,13 \pm 0,18$, mentre que en els altres trams ranurats N1_20 i N1_25 les mitjanes són inferiors ($2,69 \pm 0,31$ i $2,79 \pm 0,12$ respectivament). Aquest diferent comportament el podríem associar al fet que aquest niu presenti tots els trams ranurats per sota la capa de llims i a la presència de fluxos verticals a través dels piezòmetres deguda a la intersecció de diferents equipotencials a cada un dels piezòmetres.

A la figura 4.14 també es pot observar que la cota piezomètrica més elevada del PP20 respecte al PP15, es manté al llarg de tot el període d'estudi, posant de manifest que aquest fet no es un fet aïllat. Aquest fet es podria explicar perquè el PP20 presenta el tram ranurat per sota de la capa de llims, produint-se fluxos verticals a través del piezòmetre, mentre que el PP15 al ser més curt pràcticament no arriba a l'aquífer més profund i no presenta aquesta influència.

Respecte a la pluviometria, es pot veure un comportament similar en tots els piezòmetres, observant-se una clara tendència a reaccionar per l'efecte de les precipitacions (Fig. 4.14.). Així, en els punts en que hi ha pujades significatives del nivell piezomètric solen correspondre a un períodes de pluja, confirmant-se les observacions realitzades a partir de les campanyes puntuals (apartat 4.4.1). En general, el comportament en tots els piezòmetres és similar, podem observar una clara tendència a reaccionar per l'efecte de les precipitacions, donat que en els punts en que observem augments del nivell piezomètric, corresponen a un períodes de pluja (Fig. 4.14). Així per exemple les pluges abundants del mes d'Octubre-16 donen lloc a una pujada brusca de tots els nivells piezomètrics. Aquesta pujada és molt significativa en els piezòmetres que localitzen els seus trams ranurats per sobre la capa de llims. En aquest sentit, els pous PP-15 i N2_15 que presenten el tram ranurat per damunt dels llims mostren pujades del nivell piezomètric de 0,39 i 0,4 m, respectivament. Per contra els pous N2_20, N2_25, N1-20, N1_25 i N1_15 mostren variacions molt més petites, entre 0,1 i 0,2 m. Malauradament, en aquest episodi per un problema de mesura no es disposa de les dades del PP20. Malgrat tot, durant l'episodi de pluges dels mesos d'Agost-15, Octubre-15, Novembre-15, s'observa un comportament similar amb pujades del nivell piezomètric molt significatives per als pous PP15, PP20 i N2_15 i molt menors per a la resta. Aquest comportament diferencial entre els pous situats sota i per sobre dels llims confirma que els llims actuant com un petit aquífer que semi-confina l'aquífer per sota la capa de llims.

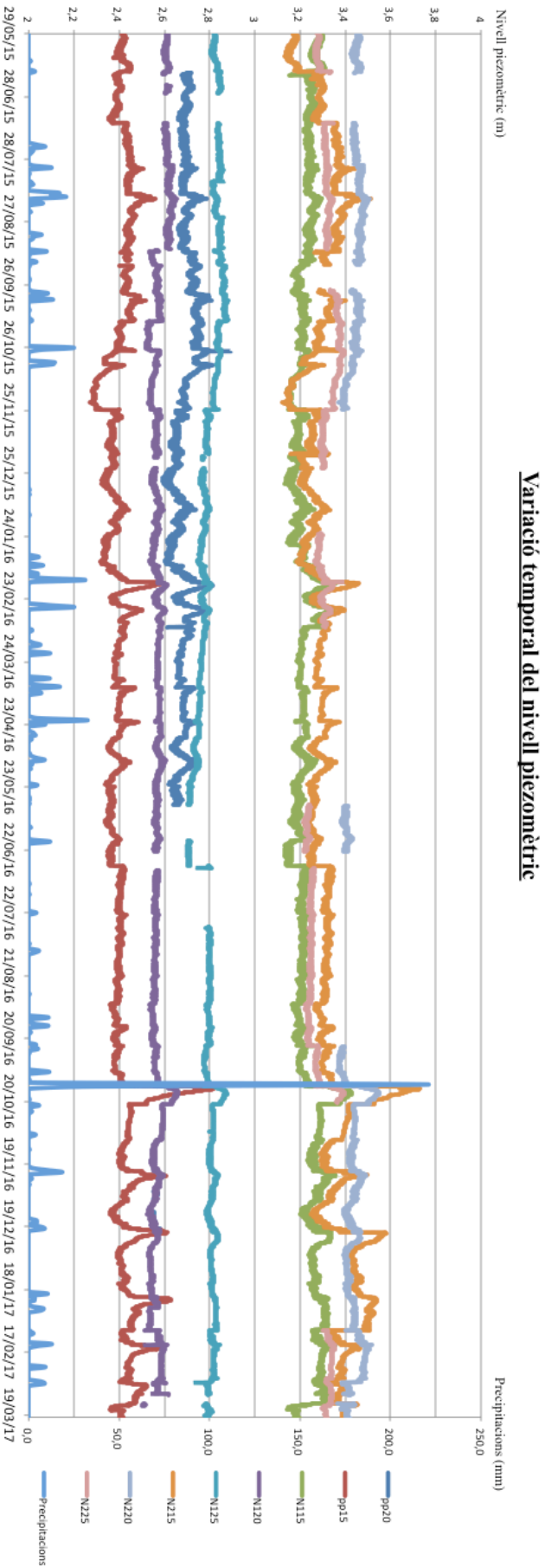


Figura 4.14.- Variacions temporals del nivell piezomètric des del 2015 al 2017 dels diferents pous estudiats. Veure annex C per més detall.

CAPÍTOL 4: RESULTATS I DISCUSSIÓ

Una observació detallada dels nivells piezomètrics, mostra clarament les oscil·lacions de les marees, fins i tot en els moments de pujada o baixada dels nivells piezomètrics deguts a les recarregues per pluges (Fig.4.14). Per tant, l'estudi de les series temporals confirma l'observació obtinguda amb les diferents campanyes de camp de que la variació del nivell piezomètric està directament influenciada per l'efecte de les precipitacions, fent que després d'episodis de pluja el nivell augmenti, i en períodes de sequera disminueixi.

El Mediterrani és un mar petit i molt aïllat de la resta d'oceans, de manera que les marees són modestes, entre 10 i 30 cm. Les variacions més importants venen relacionades amb les llevantades que donen onades de gran recorregut marítim impulsades pels vents de l'est que baten contra la costa catalana que amplifiquen les marees, i les minves de gener que són baixades del nivell del mar a causa de les altes pressions atmosfèriques que acostumen a donar-se al gener. Aquestes variacions anuals del nivell del mar es poden observar a la figura 4.16B on s'observa les variacions anuals, amb els nivells més alts a l'hivern (mes d'octubre 2015 i 2016) amb les llevantades i els nivells mínims als mesos de gener – març (2015 i 2016) corresponents als períodes d'altres pressions.

A la mediterrània, les marees a part de les baixamar i plenamar diàries, solen presentar cada mes dues alçades màximes del nivell de mar, una plenamar principal coincidint amb la lluna plena i una plenamar secundària en lluna nova, molt visibles en els mesos estivals (Figura 4.15A). Les oscil·lacions del nivell del mar relacionades amb les marees haurien de comportar una variació del nivell piezomètric de l'aquífer afectat per la interfase. En aquest sentit un detall de la figura 4.14 mostra clarament la variació diària dels nivells piezomètrics de tots els pous deguda a l'afecte de les marees (Fig. 4.15B).

CAPÍTOL 4: RESULTATS I DISCUSSIÓ



Figura 4.15.- a) Variacions temporals dels nivells piezomètrics dels diferents pous estudiats mostrant la influència de les mareas en el període compres entre Juny-15 al Agost-15. En detall Annex C. b) Oscil·lacions de les mareas entre Juny-15 i Agost-15. Les dades de les mareas nivell del mar s'han obtingut de "Ports de l'Estat".

Respecte les variacions de la salinitat (conductivitat elèctrica) dels pous estudiats, sols tenim dades dels piezòmetres N1_15, N1_20, N1_25, N2_20, N2_25, els quals es situen tots per sota de la capa de llims (Fig. 4.16A). El pou N1_15 és el que presenta els valors més baixos de conductivitat, els quals es mantenen força constants al llarg de tota la sèrie temporal amb valors al voltant dels 12 mS/cm. Aquest valor de la sèrie temporal d'aquest piezòmetre és més elevat que l'observat als perfils de les diferents campanyes de camp realitzades, on es varen mesurar conductivitats compreses entre 1,2 i 11,6 mS/cm, degut a que el Diver® es va col·locar a la base del tram ranurat.

CAPÍTOL 4: RESULTATS I DISCUSSIÓ

A la figura 4.16 es pot observar que el pou N1_20 mostra una evolució regular al llarg de tota la sèrie amb un rang de conductivitats compres entre 40 i 45 mS/cm, valors que concorden coherentment amb les mesures dels perfils puntuals realitzats a les diferents campanyes de camp.

En el cas del pou N2_20 sols es disposa de mesures fins al desembre del 2015, les quals mostren un increment progressiu de la conductivitat al llarg del temps, passant de 12 mS/cm (22 % d'aigua de mar) al principi de la sèrie a 22 mS/cm (40 % d'aigua de mar) al final de la sèrie. Aquest rang de valors es coherent amb els valors observats en els perfils de les diferents campanyes de camp de l'any 2015 (Fig. 4.16A).

Les dades del piezòmetre N2_25 tampoc són completes al llarg de tota la sèrie temporal (Fig. 4.16A) acabant-se al novembre del 2016. Aquestes mostren una evolució de la conductivitat força regular amb petites variacions entre 28 i 31 mS/cm, exceptuant tres intervals de la sèrie (Febrer-16, Maig-16 i Octubre-16) en que la conductivitat augmenta bruscament assolint valors entre 40 i 45 mS/cm (72 i 82 % d'aigua de mar). Aquests increments de la conductivitat observats per aquest piezòmetre (N2_25) són coherents amb els obtinguts en els perfils puntuals observats a les diferents campanyes de camp (rang de conductivitat compres entre 20 i 40 mS/cm o 36,5 i 73 % d'aigua de mar).

El N1_25 presenta una evolució similar a la del pou N2_25, amb valors de conductivitat força regulars que oscil·len entre 30 i 35 mS/cm, amb un augment brusc en els tres intervals (Febrer-16, Maig-16, Octubre-16) en que la conductivitat pot arribar a valors de 45 mS/cm (82 % d'aigua de mar). El rang general de la sèrie comprendria valors de conductivitat entre 30 i 40 mS/cm (Fig. 4.16A), valors que serien coherents amb les mesures puntuals dels perfils.

Els increments de la salinitat d'aquests dos pous (N1_25 i N2_25) durant el Febrer-16, Maig-16 i Octubre-16, corresponen a períodes de pluja, fet que hauria d'implicar una disminució de la salinitat i no un augment tan marcat. Per tant, sembla haver-hi altres factors que controlen l'evolució de la salinitat. Tal i com es mostra a la figura 4.16.B, durant els períodes en que tenen lloc aquestes pujades de la conductivitat també té lloc un augment del nivell del mar. Concretament durant el Febrer del 2016 el nivell del mar va augmentar de 25 a 58 cm, al Maig del 2016 de 32 cm a 64 cm i al Octubre 2017 de 41 cm a 75 cm. Pràcticament en aquests períodes el nivell del mar augmenta el doble coincidint amb períodes de fortes pluges, fet que posa de manifest que aquestes pujades tan brusques correspondrien a períodes de tempestes de llevant. Per tant, el factor que explicaria aquests increments tan bruscos de la conductivitat seria l'augment del nivell del mar, i la causa principal d'aquest serien les tempestes de llevant.

Variació temporal de la conductivitat

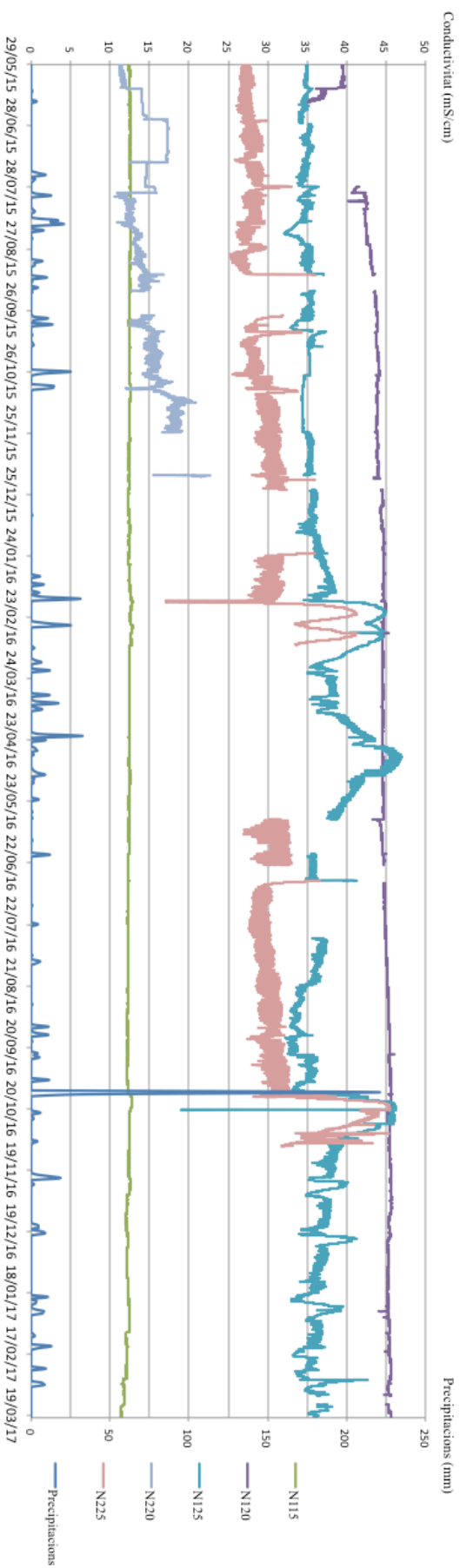


Figura. 4.16.A- Evolució temporal de la salinitat expressada com conductivitat elèctrica des del 2015 al 2017 dels diferents pous estudiats. En detall Annex C.

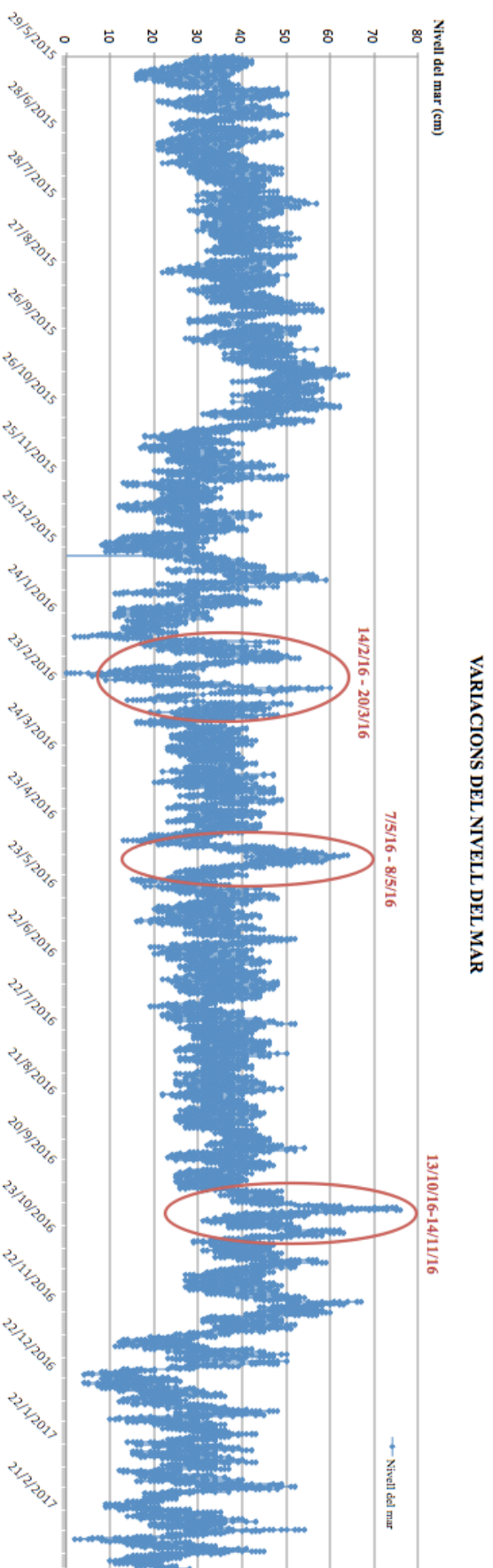


Figura. 4.16.B- Evolució del nivell del mar. En vermell s'han marcat els episodis en que el nivell de mar augmenta relacionats amb llevantades.

CAPÍTOL 4: RESULTATS I DISCUSSIÓ

Respecte la evolució de la temperatura en els pous piezomètrics estudiats, es poden diferenciar tres grups en funció de la seva evolució. El primer grup està format pel N1_15 i N2_15 els quals presenten una evolució molt similar, malgrat que el N1_15 es situa per sota la capa de llims i el N2_15 es situa per sobre d'aquesta (Fig. 4.17). Aquesta evolució tant similar indica que la capa de llims no arriba a desconnectar les dues parts de l'aquífer tèrmicament.

Un altre grup està conformat per els piezòmetres N1_20, N1_20 i N2_25 els quals mostren un monòton decreixement en el temps de la temperatura des de valors superiors a 18,7°C fins a 17,5°C, sense observar-se cap variació estacional, ni respecte estiu-hivern, ni respecte pluges. Aquesta variació no es correspon amb les variacions observades a les campanyes puntuals, possiblement per algun problema tècnic del Diver (Fig. 4.17). Malgrat tot, les dades de les sèries temporals no mostren canvis massa significatius amb temperatures. Així el pou N1-20 mostra valors de la temperatura compresos entre 18,8 i 19,2 °C, amb una temperatura superior sols el mes de Juny-16 de 19,7 que disminueix en fondària. El pou N2_20 i N2_25 mostren temperatures entre 18,5 i 20°C.

Finalment, el darrer grup està format pels piezòmetres més propers a la costa (PP15 i PP20) els quals presenten una evolució irregular amb canvis bruscs de la temperatura que s'esmoreeixen lentament amb el temps (Fig.4.17). Aquests canvis són tant per increment, com per disminució de la temperatura. Aquests canvis bruscs de temperatura d'aquests piezòmetres s'associen clarament als episodis de pluja, tant les pujades com les baixades de temperatura. En el cas de les pluges de Novembre-15, Octubre-15 i agost-15 els episodis de pluja donen com a resposta pujades de temperatura, possiblement per la temperatura ambient d'aquest període. Per contra, les pluges que tenen lloc en períodes freds, aporten aigua més freda que l'ambient a l'aquífer donant lloc a davallades brusques de la temperatura de l'aquífer. Aquests canvis de temperatura, tant els increments, com les davallades tenen una forma típica de increment/decreixement brusca i recuperació lenta, fet que s'explicaria per l'entrada d'aigua en desequilibri tèrmic a l'aquífer i el seu equilibri lentament a l'interior de l'aquífer. A més el fet de que aquests piezòmetres estiguin ranurats completament fa que connectin directament les diferents equipotencials induint fluxos verticals dins del mateix piezòmetre que també ajudarien a esmoreir els canvis de temperatura després dels episodis de pluja. Finalment es de senyalar que semblen tenir una major resposta les petites pluges que els grans episodis de pluja, al menys el episodi més important de pluja del Octubre-16 mostra un canvi molt més significatiu que la resta de pluja. Aquest fet, podria estar relacionat amb la seva proximitat al mar i amb el fet que bona part de la pluja s'hagi perdut per escorrentia.

Variació temporal de la temperatura

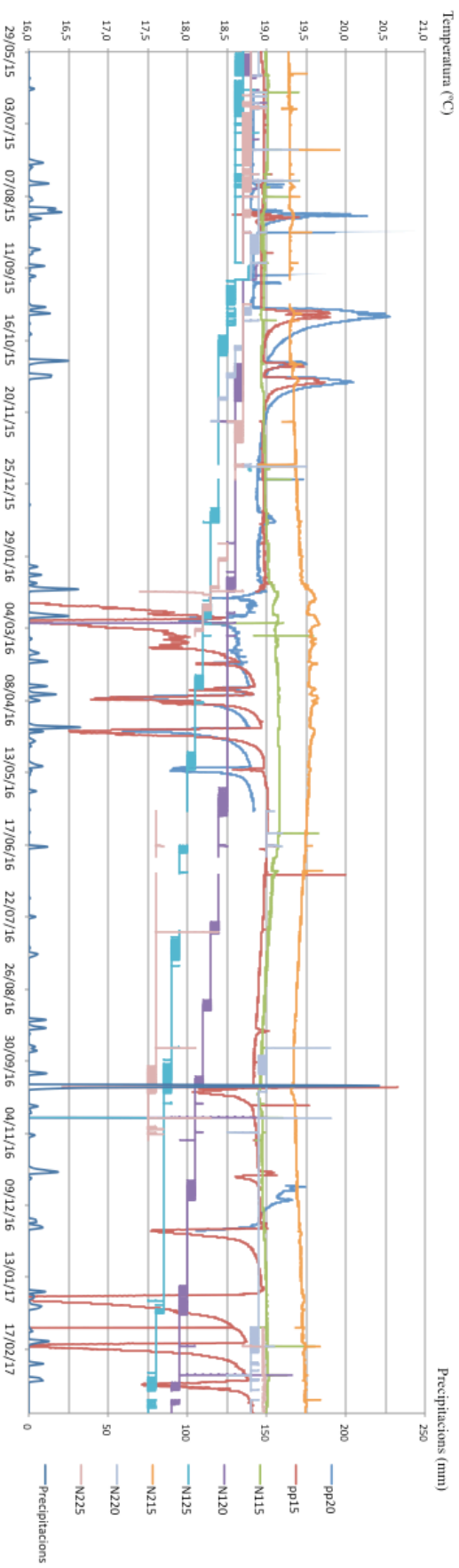


Figura. 4.17.- Evolució temporal de la temperatura des del 2015 al 2017 dels diferents pous estudiats. En detall Annex C

4.5. EVOLUCIÓ ESPACIAL DE LA INTRUSIÓ SALINA

En aquest apartat ens centrarem en la dinàmica de la intrusió marina, la qual tal com hem vist prèviament, incideix amb més o menys intensitat en funció de les precipitacions, de les mareas i del nivell del mar. Concretament estudiarem la seva evolució en aquells mesos en que tenim perfils de conductivitat realitzats durant les diferents campanyes de camp. Per la interpretació dels resultats, s'ha considerat que la zona de mescla correspon a un 50% d'aigua dolça i un 50% d'aigua marina, de tal manera que suposant que la conductivitat de l'aigua marina es de 55 mS/cm, la conductivitat de la zona de mescla serà d'aproximadament 30 mS/cm. D'aquesta manera s'han escollit els valors de conductivitats que representen aproximadament el 5%, 25%, 50% i 75% d'aigua marina, que correspondrien a conductivitats elèctriques de 3, 15, 30 i 45 mS/cm respectivament. S'han escollit aquests percentatges amb la finalitat de poder posar de manifest de manera gràfica a cada pou piezomètric, per a les diferents campanyes puntuals de camp, la profunditat a la que es localitza la zona de mescla, i així poder observar les variacions estacionals i espacials.

Dels dotze perfils mensuals estudiats (Annex D) es poden agrupar en dos tipus d'evolució de la salinitat. S'han seleccionat les dades de les campanyes del Maig-15 i Setembre-16, ja que aquestes representen a grans trets aquests dos tipus d'evolució. Concretament, la campanya del Maig-15 mostra la següent evolució per als diferents percentatges d'aigua marina (Fig. 4.18):

- ⁽¹⁾ La mescla del 5 % de l'aigua marina en el perfil es localitza al sostre del tram ranurat del PP20 a uns 2,8 m, a partir del qual evoluciona bruscament fins la base del tram N1-15 en que es troba a una profunditat de 14 m. A partir d'aquest últim pou s'estabilitza fins el N2 en que passa entre el tram sec del N2_15 i N2_20.
- ⁽²⁾ La mescla del 25 % de l'aigua marina presenta una evolució suau al llarg del perfil passant d'una profunditat de 16,4 m al PP20 a uns 19 m en el tram sec del N2.
- ⁽³⁾ La zona de mescla pròpiament, considerada com un 50% d'aigua de mar, presenta un comportament similar a l'anterior fins al N3, a partir del qual passa bruscament d'una profunditat de 18,2 m, a uns 22,5 m sota el tram ranurat del N2_25.
- ⁽⁴⁾ No s'observen, a cap dels trams ranurats, mescles amb predomini d'aigua de mar (> 75% d'aigua de mar), situant-se aquestes a més profunditat dels trams ranurats disponibles.

CAPÍTOL 4: RESULTATS I DISCUSSIÓ

D'altra banda, la campanya del Setembre-16 mostra la següent evolució per als diferents percentatges d'aigua marina (Fig. 4.19):

- (¹) La mescla del 5 % de l'aigua marina es localitza per sobre del tram ranurat dels piezòmetres PP20 i PP15, per evolucionar en fondària de manera brusca fins la base del tram N3_15, a partir del qual s'estabilitza fins el N2_15.
- (²) La mescla al 25 % d'aigua de mar presenta una evolució suau al llarg del perfil passant d'una profunditat de 10,1 m en el pou PP20, a prop dels 15 m en el pou N2.
- (³) La zona pròpiament de mescla, considerada com un 50% d'aigua de mar, presenta un comportament similar a l'anterior passant de una profunditat de 12,5 m al pou PP20, a 16,7 m al pou N2.
- (⁴) La mescla d'aigua amb predomini d'aigua de mar (> 75% d'aigua de mar), mostra una evolució molt diferent a la de la campanya anterior de Maig-15, caracteritzant-se per presentar menys salinitat el tram N1_25 que el N1_20, indicant la presència d'aigua més dolça que s'ha quedat retinguda. Aquesta bossa d'aigua més dolça es pot explicar com deguda a la heterogeneïtat dels materials que conformen els trams N1_20 i N1_25. Aquesta heterogeneïtat correspon a la presència de granit en el tram ranurat del N1_25, amb menor conductivitat hidràulica que el tram superior que es situa en graves. Aquest fet, comportaria una major mobilitat de la interfase en els materials més transmissius (N1_20) i més lentament en el N1_25. En general l'evolució d'aquesta zona passa de 13,7 m al PP20, a 22,4 al N1_25, disminuint la profunditat fins el tram sec entre el N3_20 i N3_25 i augmentant fins el N2_25 en que passa per uns 22 m.

Comparant els perfils de les figures 4.18 i 4.19, sembla presentar-se una relació entre la transmissivitat de l'aqüífer i la dinàmica del tasco salí. Així, en els trams que presenten transmissivitats més altes (PP20, N3_20, N2_20 i N4_20) el tasco salí baixa al tram ranurat inferior durant els períodes de pluja. Això s'observa en els trams ranurats dels nius N2 i N3, però no en el niu N1, donat que la seva transmissivitat és molt més baixa. En tots els perfils estudiats (Fig. 4.19 i figures Annex D), s'observa la presència de la bossa d'aigua més dolça en el niu N1_25 per sota d'una zona de mescla més salina en el nivell N1_20, excepte en els perfils dels mesos 21/5/2015 i 14/9/2015. En aquests mesos, malgrat no observar-se la aquesta bossa d'aigua més dolça, la salinitat del tram ranurat N1_20 és sempre superior a la del tram N1_25 evidenciant la seva presència en tot el període d'estudi.

CAPÍTOL 4: RESULTATS I DISCUSSIÓ

De tots els perfils realitzats (Fig. 4.18, 4.19 i resta de figures de l'Annex D), la interfase es situa sempre restringida per sota dels 12 metres en els nius N1, N3 i N2, i fins i tot la mescla al 5% d'aigua de mar es situa sempre per sota d'aquesta profunditat, amb l'excepció dels mesos de Setembre-15 i Setembre-16. Aquest fet podria estar relacionat amb l'existència de la capa de llims observada en la interpretació de la geologia i de les diagrames de gamma natural comentat prèviament. Un fet similar observem al pou PP15, en el qual sols els mesos de Setembre-16, Febrer-17 i Març-17 mostren la mescla isolínia del 5% d'aigua de mar per sobre del tram ranurat, estan per la resta de campanyes amb salinitats inferiors al 5% d'aigua de mar. A diferència dels anteriors, el pou PP20 sempre es mostra la part superficial molt més salinitzada que la resta de piezòmetres. Aquest fet defineix una morfologia de la zona de transició amb una interfase a la part superior de l'aquífer (per sobre de la capa de llims) a la zona propera a la costa, que ràpidament desapareix cap al continent. Més endavant tornarem a comentar aquest fet a l'apartat de geofísica.

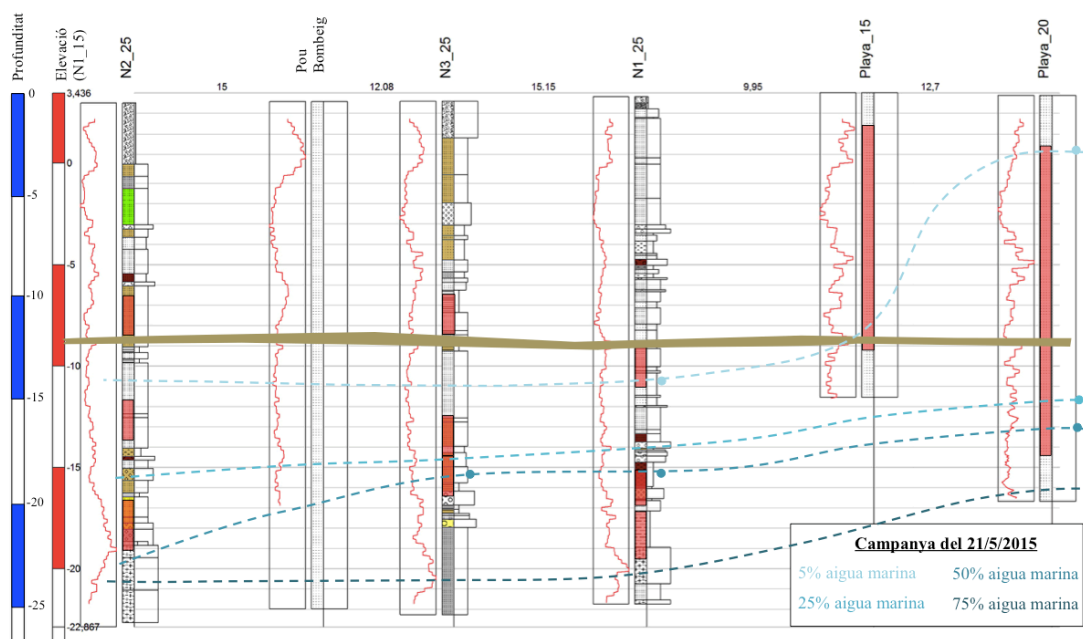


Figura 4.18. Perfil d'isosalinitat elaborat a partir de les dades de conductivitat elèctrica dels diferents piezòmetres de la campanya de Maig 2015. Veure Annex D per la resta de mesos.

CAPÍTOL 4: RESULTATS I DISCUSSIÓ

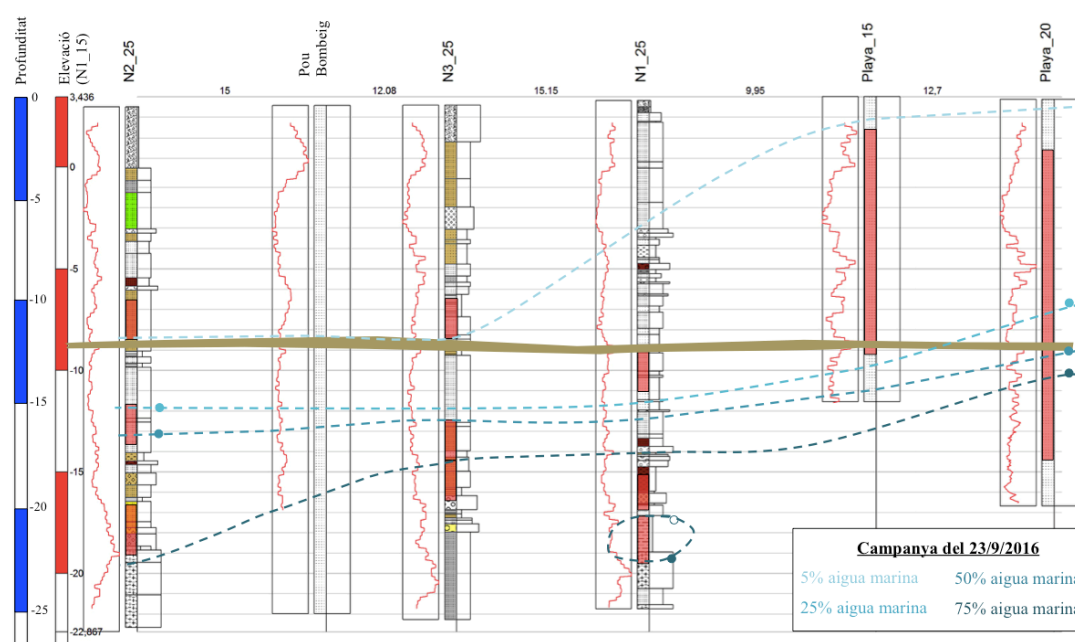


Figura 4.19.- Perfil d'isosalinitat elaborat a partir de les dades de conductivitat elèctrica dels diferents piezòmetres de la campanya de Maig 2015. Veure Annex D per la resta de mesos.

A la figura 4.20.A i figura 4.20.B, es mostra l'evolució de la salinitat en planta per la campanya de Maig del 2015. S'han escollit les fondàries de 11 i 21 metres per tal de disposar del màxim de trams ranurats. A 11 metres de fondària s'intercepten els trams ranurats dels pous PP15, PP20 i els nius N3, N2 i N4 i a 21 metres fondària els dels pous N1 i N2. En general, en tots els perfils i a les dues profunditats, s'observa de manera lògica una disminució de la conductivitat a mesura que ens allunyem del mar. En el mapa d'iso-conductivitats per una profunditat de 11 m es pot observar que el piezòmetre amb valors de conductivitats més elevats és el PP20, que correspon al més proper a la línia de costa, i que aquesta conductivitat disminueix ràpidament vers el piezòmetre N2. En el cas de les iso-conductivitats a 21 metres de fondària, es pot observar una tendència similar, però per a conductivitats molt més elevades, situant-se la interfase a l'alçada del piezòmetre N3. A aquesta profunditat, la conductivitat disminueix més lentament que a 11 m.

CAPÍTOL 4: RESULTATS I DISCUSSIÓ

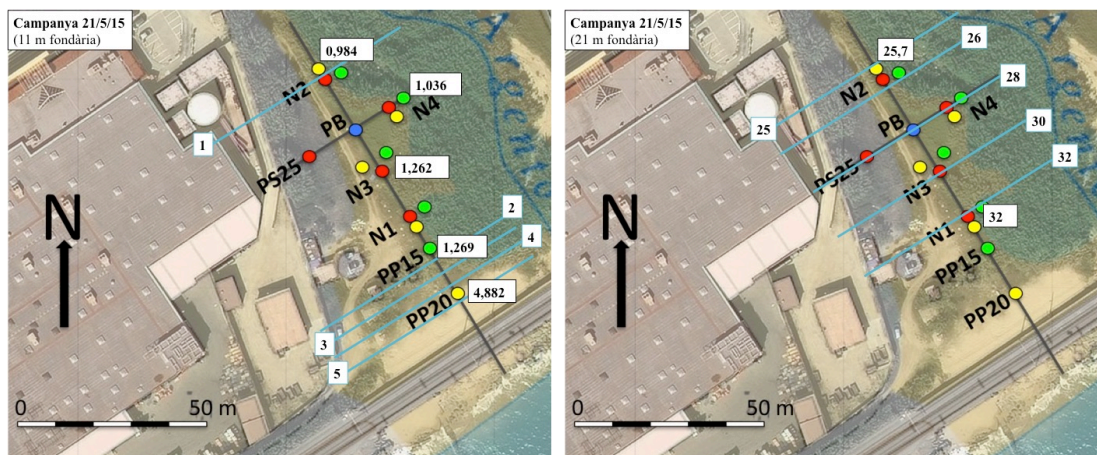


Figura 4.20.-A Mapa de iso-conductivitats de la zona d'estudi per una fondària de 11 metres. Els valors de conductivitat s'expressen en mS/cm.

Figura 4.20.-B Mapa de iso-conductivitats de la zona d'estudi per una fondària de 21 metres. Els valors de conductivitat s'expressen en mS/cm.

Teòricament, a l'estiu les precipitacions són mínimes, en canvi a la tardor i la primavera les precipitacions són abundants. Per aquest motiu i per estudiar l'efecte que té l'estacionalitat respecte la dinàmica de la interfase, s'ha seleccionat un mes representatiu de l'estiu i un representatiu de la tardor dels tres anys estudiats (2015 i 2016). Els perfils escollits han estat: 17/7/2015 i 23/9/2016 per l'estiu i els perfils del 13/10/2015, 7/11/2016 per l'hivern (Fig. 4.21 i 4.22). En principi seria d'esperar un ascens de la zona de mescla als estius i un retrocés a l'hivern. Per als dos anys, s'observa que la zona de mescla a l'estiu es situa més superficialment que en els respectius hiverns, tal com seria d'esperar. Malgrat tot, si comparem la situació de la interfase als hiverns entre si, podem observar que l'hivern del 2016 està per sobre de la situació a l'estiu del 2015. Aquesta fet es conseqüència de que l'estiu del 2015 va ser un període molt plujós, i per tant podem reafirmar que la zona de mescla està molt controlada per la pluviometria.

CAPÍTOL 4: RESULTATS I DISCUSSIÓ

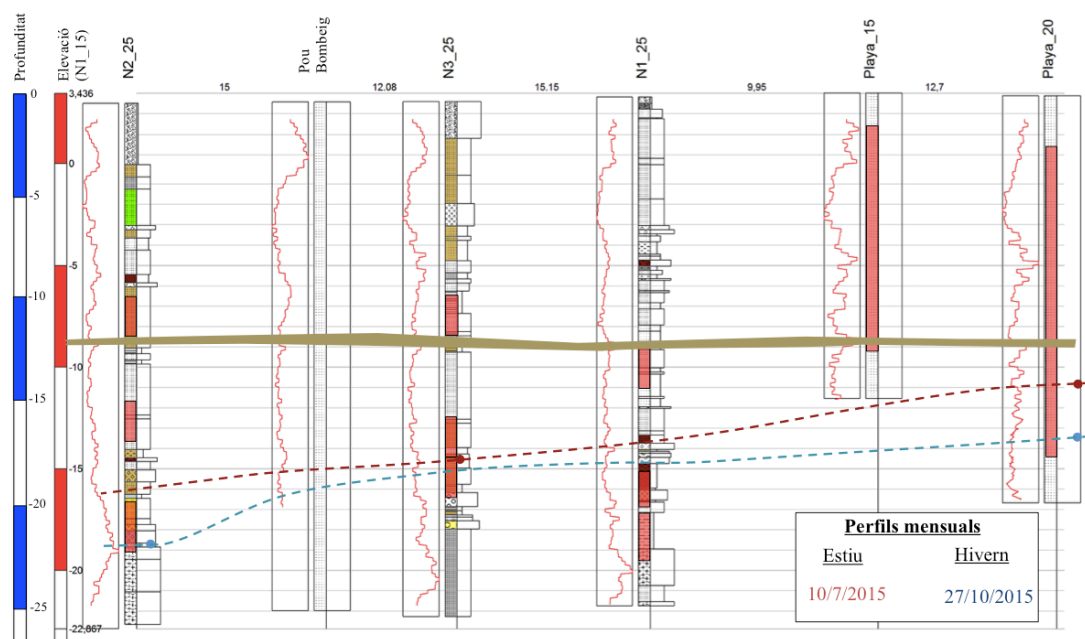


Figura.- 4.21.- Perfil d'isosalinitat el.laborat a partir de les dades de conductivitat elèctrica dels diferents piezòmetres per l'estiu i hivern del 2015. Veure Annex D per la resta de mesos.

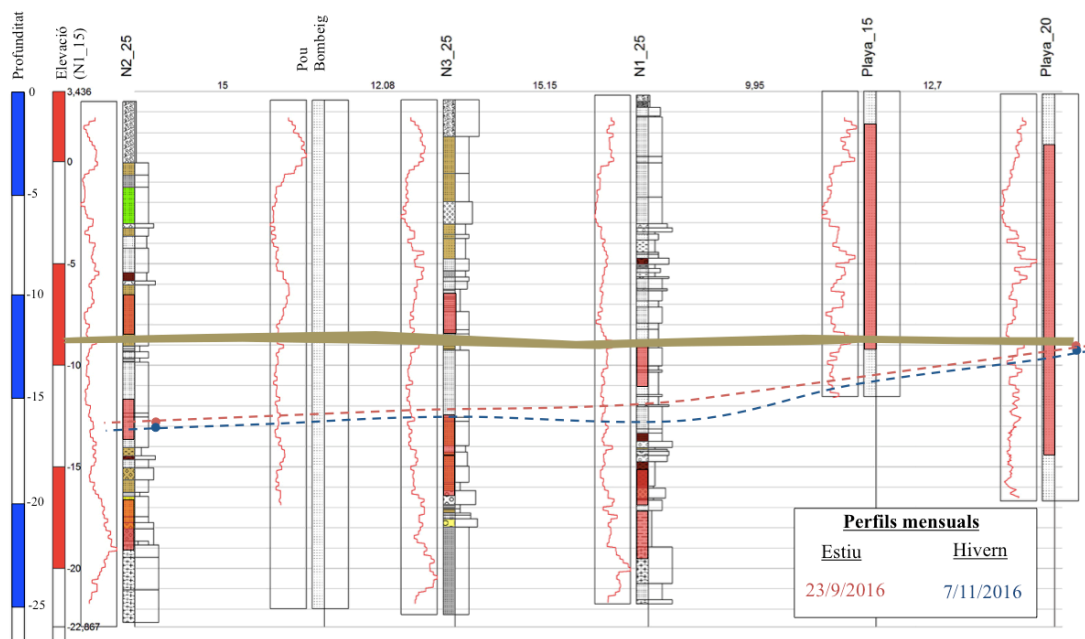


Figura.- 4.22.- Perfil d'isosalinitat elaborat a partir de les dades de conductivitat elèctrica dels diferents piezòmetres per l'estiu i hivern del 2016. Veure Annex D per la resta de mesos.

CAPÍTOL 4: RESULTATS I DISCUSSIÓ

4.6 GEOFISICA

En aquest estudi, s'han utilitzat les dades obtingudes a partir d'una campanya de camp de geofísica realitzada l'any 2015 en l'entorn del projectes MEDISTRAES, en la que es va obtenir un model geofísic de resistivitats i varies campanyes mensuals de seguiment. Amb aquestes dades s'ha analitzat la variació de conductivitat elèctrica en profunditat per tal de comparar l'evolució del tascó salí amb les dades obtingudes d'aquest estudi. La metodologia emprada s'ha presentat a l'apartat 3.5. Seguidament es mostren els perfils de resistivitat obtinguts un cop realitzades les inversions oportunes. Les simbologies dels valors de resistivitat s'han homogeneïtzat pel que fa a la gama de colors que representen cada interval per tal de facilitar la interpretació, mentre que les elevacions s'han establert en relació a la cota topogràfica sobre el nivell del mar .

A partir del coneixement geològic regional de la zona i l'anàlisi de les pseudo-seccions realitzades, es pot establir una relació d'interval de resistivitat elèctrica que caracteritzen els diferents materials presumiblement identificables a la zona d'estudi i que han estat utilitzats per a la descripció geofísica de cada perfil:

Intervals de resistivitat	Materials
< 50 Ω m	Argiles
50– 400 Ω m	Llims i Sorres
400– 2500 Ω m	Sorres grolleres i graves
2500 – 5000 Ω m	Blocs i graves
> 2500 Ω m	Granit
0,1 – 10 Ω m	Aigua Salada

Malgrat tot, la posició del nivell piezomètric situat entre 2 i 3 m, i la presència del tascó d'aigua salada, fa que els valors resistius hagin estat interpretats majoritàriament com a propis de la interfícies salina, i per tant les diferents seccions haurien de permetre interpretar l'evolució d'aquesta al llarg del temps.

4.6.1 Model de resistivitats

El model de resistivitats mostra la resistivitat real del subsòl, fet que permet determinar la geometria i potències de les diferents unitats geològiques. La resistivitat es relaciona amb si el material es bo o mal conductor, essent els materials de baixa resistivitat els que són més bons conductors. Considerant que l'aigua marina és molt conductora i presenta resistivitats baixes entre 10^{-1} i 10^1 Ohm-m, en el model de la figura 4.23 s'observa que la zona de mescla d'aigua marina es localitza entre 15 i 20 m de profunditat, i sembla arribar en horitzontal fins als 80

CAPÍTOL 4: RESULTATS I DISCUSSIÓ

metres vers el continent, una mica més enllà del niu 3. La situació de la zona de mescla sembla restringida per sota dels 12 m de fondària, just per sota del nivell de llims, el qual podria actuar com a una zona de menor transmissivitat que dificultaria hidràulicament el moviment vertical de la zona de transició. Igualment s'observa una interfase a menor profunditat a la zona propera de la costa del PP_20 i PP_15. Aquests resultats són coherents amb les observacions realitzades a partir dels perfils en profunditat realitzats a les campanyes puntuals de camp, i amb les observacions de les series temporals.

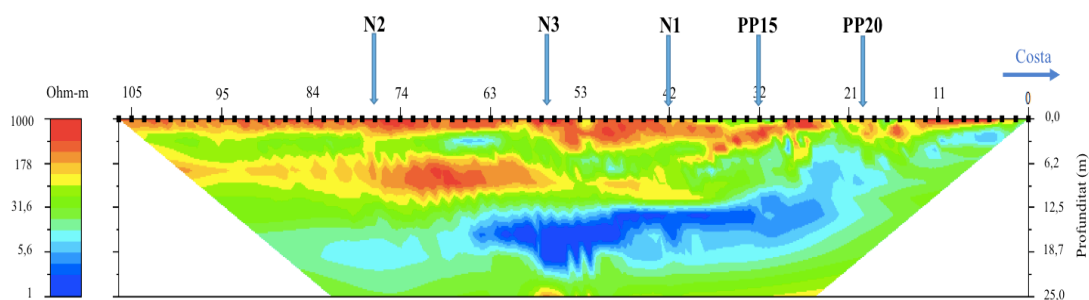


Figura 4.23.- Model de resistivitats realitzat l'any 2015 a la zona d'estudi, a partir de mesures des de la superfície (ERT). Obtingut de (J. Ledo)

Així, el comportament de la zona de mescla en tot el perfil estudiat confirmaria l'efecte de la capa de llims, la qual explicaria el fet que es diferenciïn dues zones amb comportaments hidràulics diferents. A més, la presència d'una capa de llims explicaria la morfologia de la interfase delimitada per sota dels 12-13 metres sense presentar irregularitats en tota la seva longitud (figura 4.23).

A la figura 4.24, es mostra un detall del model de la figura 4.23, en el qual es pot diferenciar dos zones amb diferents comportaments hidràulics. La primera zona, més superficial, comprèn de 0 a 12 m i presenta valors de resistivitat alts, i per tant els materials que la conformen són poc conductors. La segona zona englobaria els materials més profunds de l'aqüífer, entre 12 i 25 m, i està representada per baixes resistivitats i per tant conductors que marquen la interfase salina. Podem observar que el límit entre les dos zones és molt marcat i es manté força constant en tota la longitud, fet que reafirmaria l'efecte de l'existència d'una capa de llims que actua com a barrera. En aquest model també es pot observar com a la zona més superficial i prop de la costa la interfase arriba a cotes properes al nivell del mar. Aquest fet és coherent amb les observacions fetes a l'apartat 4.3 a partir de les dades de les campanyes puntuals.

CAPÍTOL 4: RESULTATS I DISCUSSIÓ

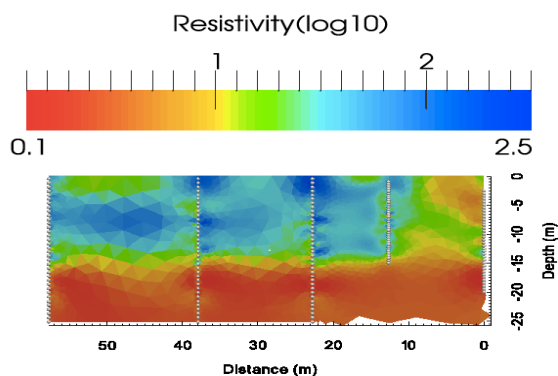


Figura 4.24.- Model de resistivitats realitzat l'any 2015 a la zona d'estudi a partir de mesures de tomografia elèctrica entre pous (CHERT). Segons J. Ledo comunicació personal.

4.6.2 Model ERT de conductivitats

En els models de conductivitats s'ha considerat només la franja entre 15-20 metres que és on s'observa la zona de mescla, de tal manera que tot el que hi ha per sobre de 15 metres s'ha saturat per evitar que generi interferències. Els models s'han realitzat amb una escala de colors de blau a vermell, essent els materials amb conductivitats més altes els que es representen de color vermell. Entre els diferents models s'han escollit tres que coincideixen amb campanyes puntuals de camp, aquests són els models de Juliol-15, Setembre-15 i Setembre-16.

Si comparem els resultats que mostren els models de conductivitats amb els obtinguts en els perfils de conductivitat (apartat 4.3) es pot observar una clara relació entre ambdós.

El primer model correspon al Juliol-15, aquest presenta els valors més alts de conductivitats al pou PP20 i als nius 1 i 3. El niu 2 presenta conductivitats molt més baixes que els altres dos nius (Fig. 4.25). Si comparem aquest resultat amb els perfils de conductivitat del Juliol-15 podem observar un comportament molt similar en el qual el pou PP20 presenta un increment de salinitat a la base a partir de 15 m fet que seria coherent amb els valors del model. En els perfils, el niu 1 estava salinitzat a partir del tram ranurat N1_20 a uns 18 m, aquesta profunditat concordant amb la del model geofísic. En el cas del niu 3 el tram N3_25 ja estava totalment salinitzat, a partir d'uns 18 m fet que també es coherent amb el model. En el model, el niu 2 presenta valors més baixos de conductivitat respecte als altres nius, al igual que s'observa als perfils on ja no supera els 35 mS/cm.

El model de conductivitats del Setembre-15, presenta una evolució similar al del Juliol-15, presentant conductivitats altes al pou PP20 i als nius 1 i 3, tot i així a diferència del model anterior en aquest s'assoleixen valors de conductivitats més alts al niu 2 (Fig. 4.26). Aquest resultat és coherent amb els perfils donat que la conductivitat al niu 2 és una mica més alta que la del Juliol-15.

CAPÍTOL 4: RESULTATS I DISCUSSIÓ

Per últim, com mostra la figura 4.27, en el cas del model ERT la campanya de Juny-16, els valors de salinització són més alts que els dels models anteriors. Aquest fet, és coherent amb les dades dels perfils de conductivitat en que s'observava que al Setembre-16 s'havien mesurat els nivells més alts de conductivitat, sobretot en els nius 1 i 3.

Per tant, els models ERT de conductivitats són coherents amb els resultats observats en els perfils de conductivitats realitzats. A més, aquest models mostren que la zona de mescla al igual que mostraven els resultats del model de resistivitats es localitza entre 15 i 20 metres de profunditat, fet que també s'observava en els perfils de iso-salinitat (apartat 4.5). Malgrat que la interfase es mòbil i com hem comentat aquesta alguns mesos retrocedeix en funció de les precipitacions, la seva fondària sempre es manté entre 15 i 20 m (figura 4.25 i 4.26 i 4.27).

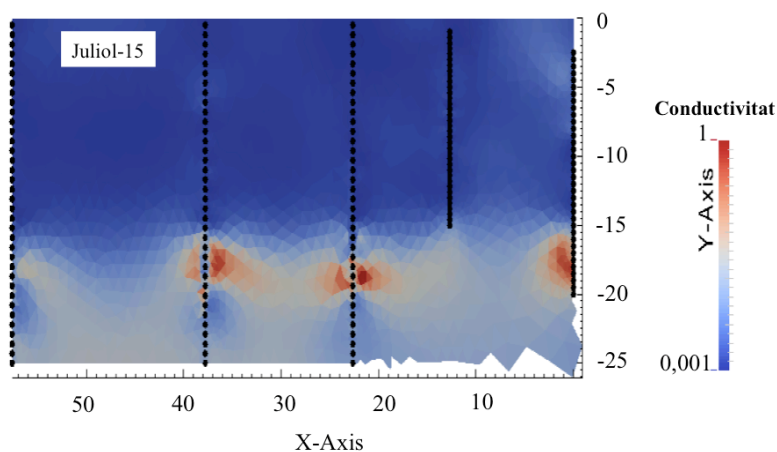


Figura 4.25.- Model calculat de conductivitats de la campanya del 3/7/15

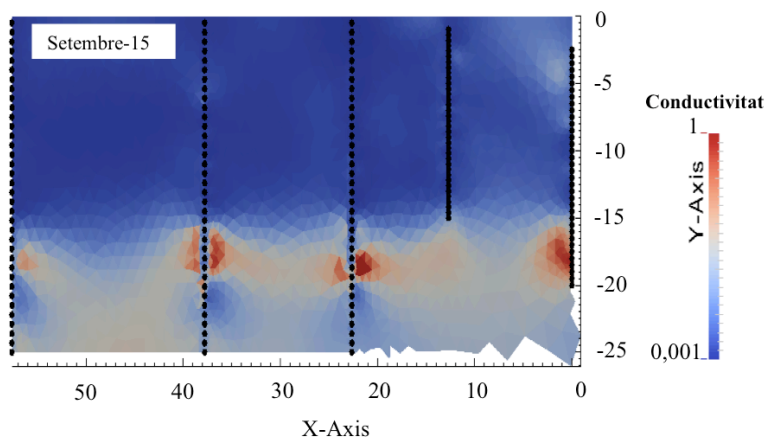


Figura 4.26.- Model calculat de conductivitats de la campanya del 8/9/15

CAPÍTOL 4: RESULTATS I DISCUSSIÓ

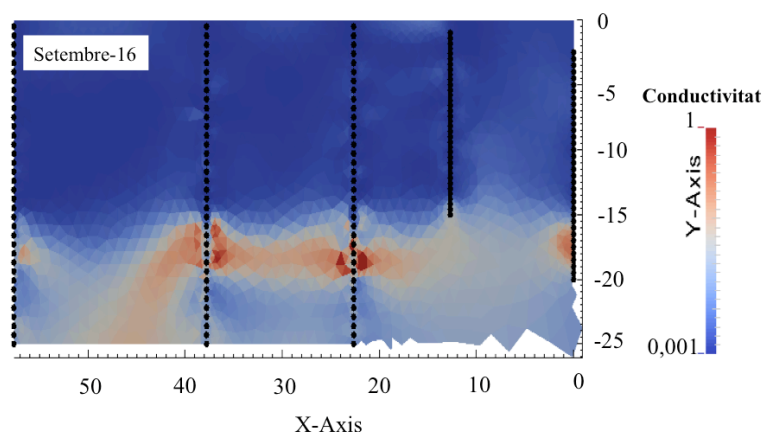


Figura 4.27.- Model calculat de conductivitats de la campanya del 30/9/16

Per tal de mostrar les variacions de conductivitat mensual, amb les dades dels models de conductivitat-profunditat de la zona compresa entre 15 i 20 m, s'ha restat a les dades de cada campanya de les dades de la campanya prèvia. Així, si les dades obtingudes són negatives significa que l'última campanya ha augmentat la salinitat de l'anterior. A la figura 4.28, es mostra la representació gràfica d'aquesta diferència, on el color blau indica un augment de la salinitat. També s'ha fet la distribució d'aquestes variacions en un histograma i després s'ha calculat la variació total de conductivitat a la zona entre 15 i 20 metres al llarg del perfil, de tal manera que si aquest és negatiu significa que en general augmenta la salinitat d'un mes a l'altre. Per mostrar aquestes variacions s'han escollit les campanyes del Novembre-15 respecte Desembre-15, la del Desembre-15 respecte Gener-16 i la de Gener-16 respecte Març-16. A la figura 4.28, es pot observar que la salinitat ha augmentat en el període Novembre-15 a Desembre-15 donat que predominen els colors blaus i a l'histograma predominen els valors negatius. Aquest fet està d'acord la pluviometria ja que coincideix en un període sec, a més és coherent amb l'evolució de la conductivitat en les series temporals en que durant aquest període augmenta lleugerament la conductivitat (Fig. 4.11). En el període entre Desembre-15 i Gener-16 es pot observar que la salinitat s'ha mantingut força constant segons les variacions totals de conductivitats, donat que no presenta un color predominant i l'histograma és simètric (Fig. 4.28). Aquesta evolució concorda amb les dades pluviomètriques i amb les series temporals en les quals durant aquest període no s'observen canvis significatius. Finalment en el període del Gener-16 al Març-16, es pot observar una clara disminució de la salinitat, d'acord amb les pluges, representat per la gama de colors vermells en el model de conductivitats i el histograma amb predomini de valors positius. Tot i això les series temporals mostren el contrari, donat que durant aquest període tenim un increment bruscat de la conductivitat que comportaria un augment de la salinitat, però considerant que el model s'aplica amb dades puntuals i aquestes dades corresponen a dies previs i posteriors al increment de conductivitat permet explicar que no s'observi aquesta variació de la salinitat al model.

CAPÍTOL 4: RESULTATS I DISCUSSIÓ

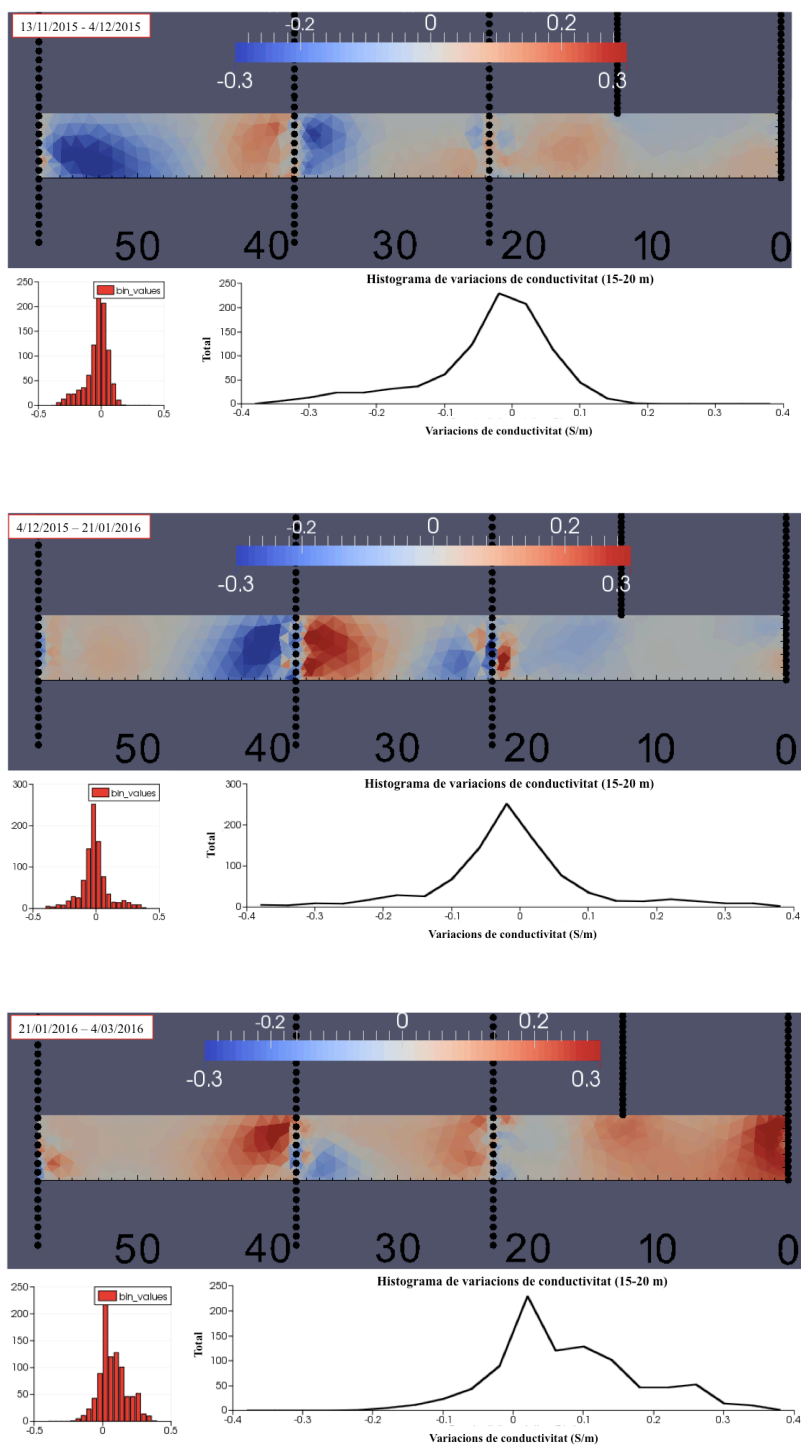


Figura. 4.28. Representació de les variacions de conductivitat mensual calculades a partir de les dades dels models de conductivitat-profunditat de la zona compresa entre 15 i 20 m, per sostracció cada campanya de les dades de la campanya prèvia. Si les dades obtingudes són negatives significa que l'última campanya ha augmentat la salinitat de l'anterior. Si el histograma és negatiu significa que en general augmenta la salinitat d'un mes a l'altre.

CAPÍTOL 4: RESULTATS I DISCUSSIÓ

Els resultats de la geofísica són coherents amb les dades obtingudes de mesures puntuals a les campanyes de camp i seguiment temporal dels piezòmetres. Això permet confirmar que la capa de llims controla la dinàmica de la intrusió salina, dividint l'aquífer en dos zones amb diferents comportaments hidràulics. També confirma, segons el model de resistivitats, la presència d'una petita interfase a la part alta de l'aquífer en el sector dels pous PP15 i PP20. Els models de variació de la conductivitat permeten identificar que la zona d'interfase entre aigua de mar i aigua dolça es situa a partir dels 15 m, fet que ja s'havia observat amb les mesures de conductivitat puntuals i en els perfils de iso-salinitat. A més la relació entre les dades dels models entre diferents campanyes mostra que la interfase es dinàmica i varia en funció del període estudiat.

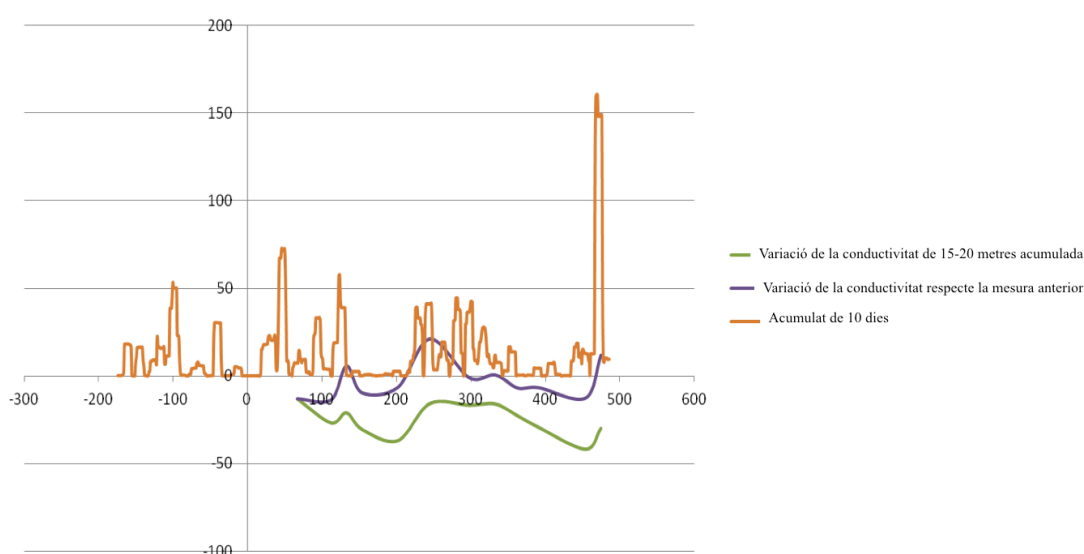


Figura. 4.29.- Comparativa entre els valors de pluvimetria acumulada de 10 dies i la variació de les conductivitat entre els 15 i 20 de profunditat entre campanyes geofísiques consecutives considerant la variació de les conductivitat acumulades de les diferents campanyes

Per tal d'acabar de confirmar la importància de la pluvimetria en l'evolució de la zona de transició, s'ha realitzat una comparativa entre els valors de pluvimetria acumulada de 10 dies i la variació de les conductivitat entre els 15 i 20 de profunditat entre campanyes geofísiques consecutives, i amb la variació de les conductivitat acumulades de les diferents campanyes (Fig. 4.29). En aquesta figura, es pot observar una clara relació entre la pluvimetria i l'evolució de la salinitat de l'aquífer, fet ja observat a partir de les sèries puntuals i temporals. Per tant, es pot confirmar la clara relació entre pluvimetria i avanç o retrocés de la interfase salina.

5.- CONCLUSIONS

Aquest treball ha permès aprofundir en el coneixement de la dinàmica de la intrusió marina a escala local en una parcel·la experimental que ha estat caracteritzada geològica i hidrogeològicament, determinant la dinàmica de les zones d'interfase d'aigua dolça i aigua salada en aigües subterrànies en base a la evolució temporal de dades de conductivitat elèctrica i temperatura en diversos piezòmetres, determinant la relació amb diferents variants hidrològiques (precipitacions, estacionalitat, etc.). Les conclusions concretes trobades han estat:

La interpretació dels perfils de testificació i de les diagrames gamma dels piezòmetres estudiats mostren que el sistema aquífer del sector estudiat està conformat per un basament granític, sobre el que descansa una sèrie sedimentaria dominada per sorres de diferent granulometries amb presència local de nivells més argilosos. Destaca un nivell de llims a una fondària entre 11 i 13 m, continuo al llarg de tot el sector estudiat, i localment altres nivells amb un caràcter més discontinuo entre els 7 i els 10 m de fondària.

Dels pous estudiats, la transmissivitat del N3_25 i el N2_20 és la mateixa, amb un valor de 1569 m²/dia, i el pou N3_15 presenta un valor de 1495 m²/dia. Respecte al coeficient d'emmagatzematge, els piezòmetres N3_25 i N2_20 situats sota el nivell de llims mostren valors de 0,02 i 0,06 respectivament, aquests valors s'associarien a un aquífer semi-confinat. En canvi, el piezòmetre N3_15 situat per sobre del nivell de llims, presenta un coeficient d'emmagatzematge de 0,1, associant-se a un aquífer lliure.

Els valors de transmissivitat obtinguts a partir de l'assaig de bombeig són molt majors que els obtinguts en el projecte de MEDISTRAES a partir d'assaigs de "slug test". Aquesta disparitat pot ser explicada pel fet que l'assaig de bombeig té una llarga duració obtenint transmissivitats a escala major comparada amb els "slug test" que al ser de curta durada els valors obtinguts són de paràmetres a nivell més local.

Els nivells piezomètrics superiors dels piezòmetres que es situen per sota de la capa de llims, respecte als que es situen per sobre d'aquesta, sembla indicar un caràcter lleugerament semi-confinat de l'aquífer per efecte de la capa de llims.

CAPÍTOL 5: CONCLUSIONS

L'estudi de les sèries temporals indica que la variació del nivell piezomètric està directament influenciada per l'efecte de les precipitacions. El seguiment temporal mostra una clara tendència entre el nivell piezomètric i les precipitacions, amb una resposta molt més marcada dels nivells piezomètrics dels piezòmetres que localitzen els seus trams ranurats per sobre la capa de llims, respecte dels que els presenten per sota. Aquest fet, sembla indicar també un caràcter lleugerament semi-confinat de l'aquífer inferior per efecte de la capa de llims.

A tots els pous estudiats, el nivell freàtic mostra una variació oscil·lant deguda al efecte de les mareas diàries.

La variació de la temperatura en els pous N1_15 que es situa per sota la capa de llims i el N2_15 que es situa per sobre d'aquesta, és molt similar indicant que la capa de llims no arriba a fer de barrera tèrmica. La variació de la temperatura en els pous més propers a la costa (PP15 i PP20) mostra una evolució irregular amb canvis bruscs de la temperatura amb una recuperació lenta, fet que s'explicaria per l'entrada d'un aigua en desequilibri tèrmic a l'aquífer i el seu equilibri lentament a l'interior de l'aquífer. Aquests canvis són el resultat de la recàrrega deguda a episodis de pluja, les quals en funció de la temperatura ambient del moment queden registrades com pujades o baixades de la temperatura. Aquesta resposta no s'observa en els altres piezòmetres degut a que es tracta de piezòmetres completament ranurats captant aigua a diferent fondària i a través del qual es produeixen fluxos verticals.

Els gràfics de conductivitat de les diferents campanyes de camp de tots els perfils mostren clarament una tendència d'increment o disminució de la salinitat en funció de les precipitacions, posant de manifest la relació entre pluviometria i moviment de la zona de mescla. Els increments de la salinitat dels pous N1_25 i N2_25 en períodes de pluja, sembla indicar que hi ha altres factors que controlen l'evolució de la salinitat, com les pujades del nivell del mar que correspondrien a períodes de tempestes de llevant.

En general, tots els perfils mostren de manera lògica una disminució de la conductivitat en planta a mesura que ens allunyem del mar.

En el pou PP20, tots els perfils estudiats, amb l'excepció dels Maig-15 i Octubre-15, mostren un canvi sobtat de la salinitat prop dels 12 m, coincidint amb la localització del nivell de llims, fet que fa palesa l'efecte hidràulic d'aquest nivell sobre l'evolució de la zona de mescla en aquest sector de la parcel·la estudiada.

CAPÍTOL 5: CONCLUSIONS

A tots els perfils estudiats, s'observa la presència de una bossa d'aigua més dolça en el niu N1_25 per sota d'una zona de mescla més salina en el nivell N1_20, que seria el resultat de la heterogeneïtat dels materials que conformen els trams N1_20 i N1_25. Aquesta heterogeneïtat comporta una menor transmissivitat del granit en el tram ranurat del N1_25, respecte a les sorres detrítiques del tram superior (N1_20) fent que la dinàmica de la intrusió salina en aquests materials sigui més lenta que a les sorres donant com a resultat aquestes diferències

La zona de mescla a l'estiu es situa més superficialment que en els respectius hiverns, tal com seria d'esperar. Malgrat tot, canvia de manera significativa entre els diferents hiverns i estius en funció de la pluviometria, posant de manifest que l'evolució de la zona de mescla està molt controlada per la pluviometria.

El model de resistivitats mostra que la zona de mescla d'aigua marina es localitza entre 15 i 20 m de profunditat, i sembla arribar en horitzontal fins als 80 metres vers el continent, una mica més enllà del niu 3. La situació de la zona de mescla sembla restringida per sota dels 12 m de fondària, just per sota del nivell de llims, el qual podria actuar com a una zona de menor transmissivitat que dificultaria hidràulicament el moviment vertical de la zona de transició, malgrat no acabar de confinar l'aquífer inferior. També mostra una interfase a menor profunditat a la zona propera de la costa del PP_20 i PP_15. Aquests resultats són coherents amb les observacions realitzades a partir dels perfils en profunditat realitzats a les campanyes puntuals de camp, i amb les observacions de les series temporals dels piezòmetres.

Els models de conductivitats elaborats a partir dels models de resistivitats posen de manifest que la zona de mescla es localitza sempre entre 15 i 20 metres de profunditat. Malgrat que alguns mesos aquesta retrocedeixi, la fondària de la interfase sempre es manté a aquesta fondària.

Els resultats de la geofísica són coherents amb les dades prèvies de mesures de camp puntuals i seguiment temporal dels piezòmetres, permeten confirmar que la capa de llims controla la dinàmica de la intrusió salina. També confirmen la presència d'una petita interfase de baixa salinitat a la part de l'aquífer en el sector dels pous PP15 i PP20. Els models de variació de la conductivitat permeten identificar que la zona d'interfase entre l'aigua de mar i l'aigua dolça es situa a partir dels 15 m, fet que ja s'havia observat amb les mesures de conductivitat puntuals i temporals. Es de destacar que la major resolució espacial de la geofísica permet estudiar aquests canvis a nivell de tota la zona i no només d'on es disposa de piezòmetres.

Les dades de conductivitat elaborades a partir dels perfils geofísics mostren també una clara relació entre la pluviometria i l'evolució de la salinitat de l'aquífer, fet ja observat a partir de les

CAPÍTOL 5: CONCLUSIONS

series puntuals i temporals. Es de destacar que la major resolució espacial de la geofísica permet estudiar aquests canvis a nivell de tota la zona i no només d'on es disposa de piezòmetres, fet que fa aquesta tècnica molt útil i recomanable per al seguiment de l'evolució de la zona de mescla.

Finalment, a partir de totes les conclusions extretes, l'aqüífer estudiat es podria caracteritzar com un aquífer constituït per dues zones amb diferents comportaments hidràulics separades per una capa de llims. La unitat superior tindria un comportament d'aqüífer lliure i la inferior presentaria un lleuger comportament de semi-confinat, que controlaria la dinàmica de la zona de transició amb l'aigua de mar.

ANNEX A

PERFILS DE CONDUCTIVITAT

CAPÍTOL 6: ANNEX

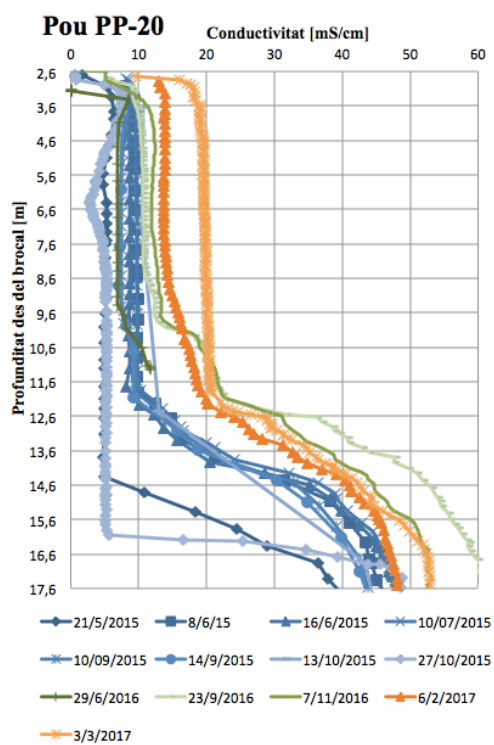


Figura A.2.- Perfils de conductivitat elèctrica mesurats en el pou piezomètric PP15.

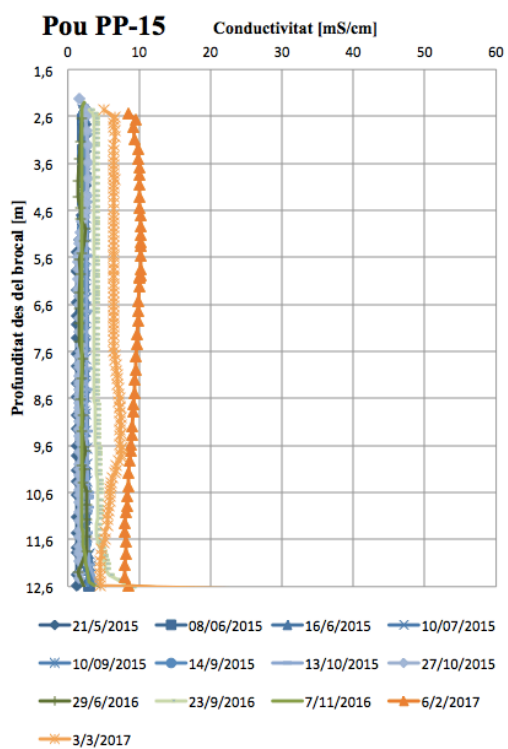
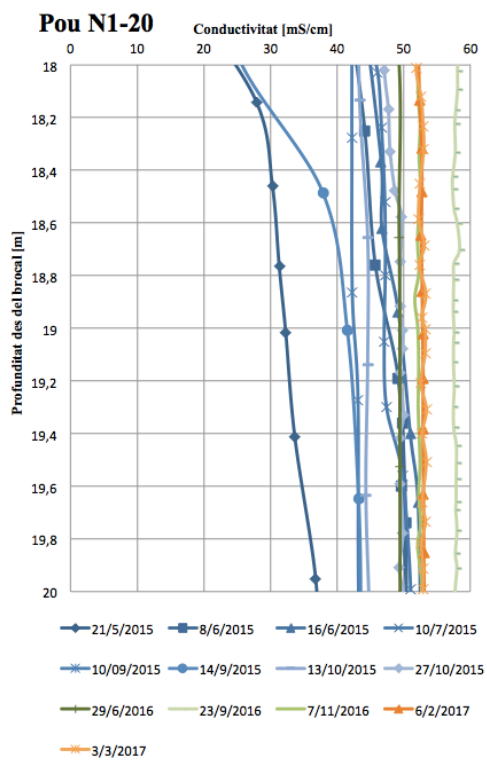
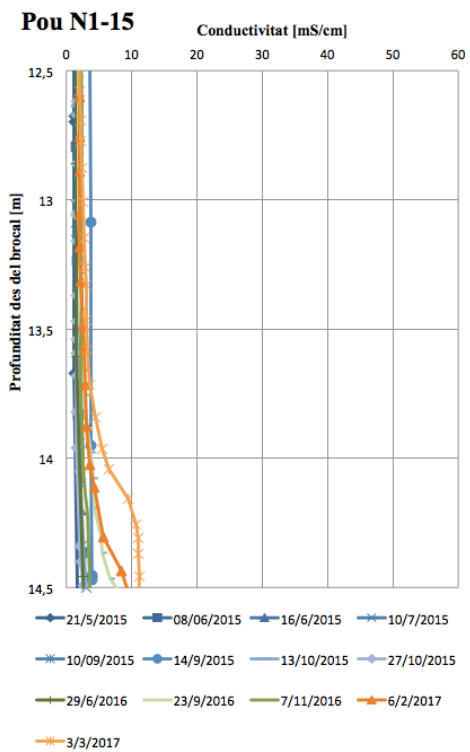


Figura A.3.- Perfils de conductivitat elèctrica mesurats en el pou piezomètric N1 en els tres trams ranurats que conformen aquest niu.

CAPÍTOL 6: ANNEX



CAPÍTOL 6: ANNEX

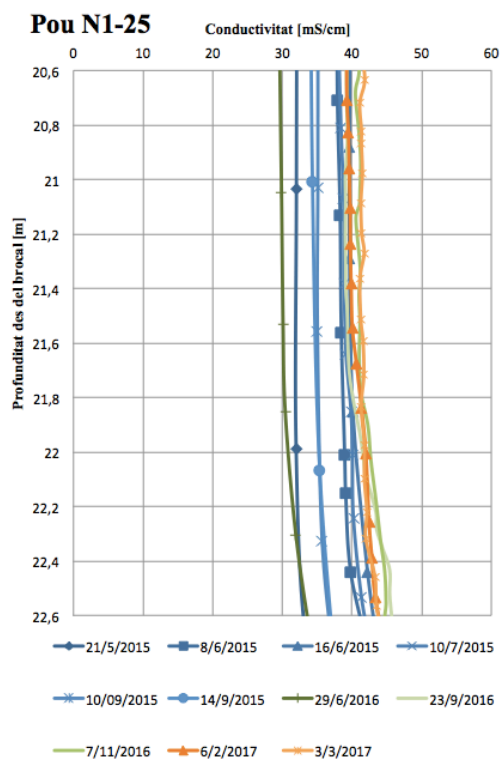
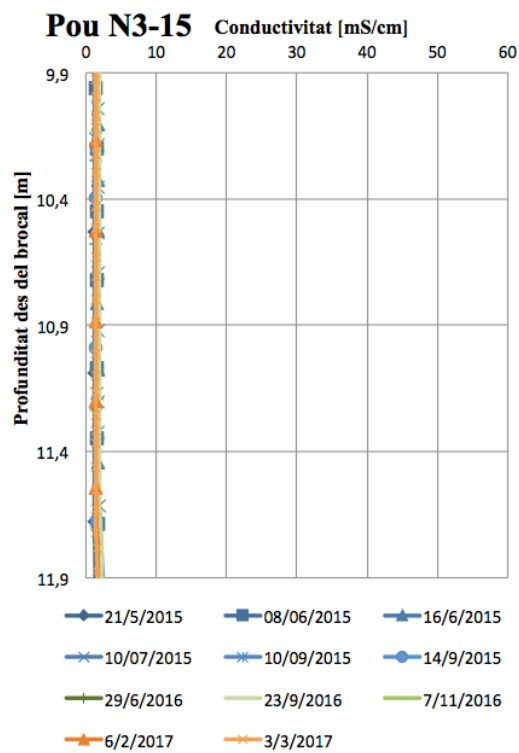
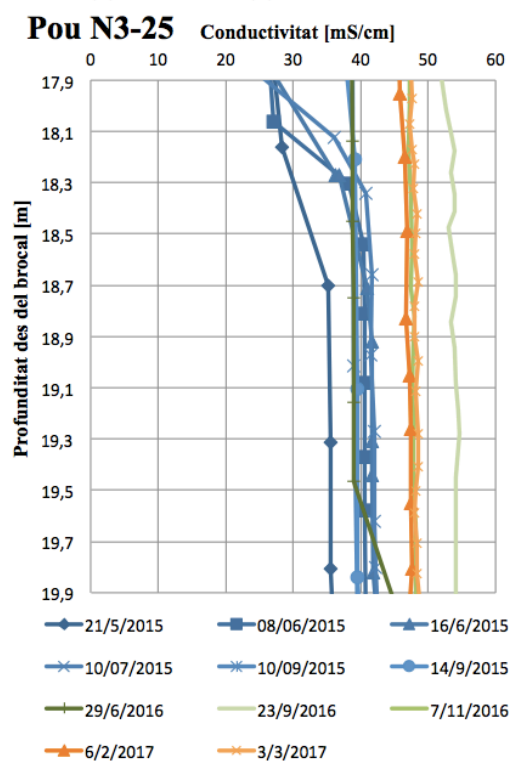
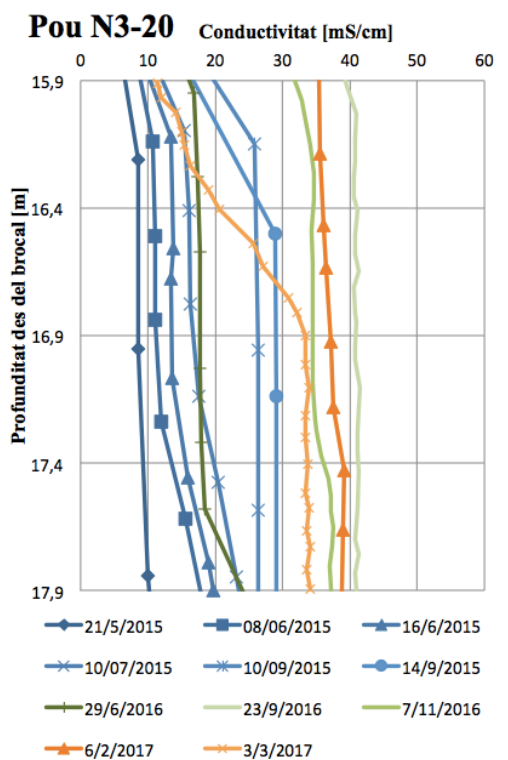


Figura A.4.- Perfils de conductivitat elèctrica mesurats en el pou piezomètric N3 en els tres trams ranurats que conformen aquest niu.

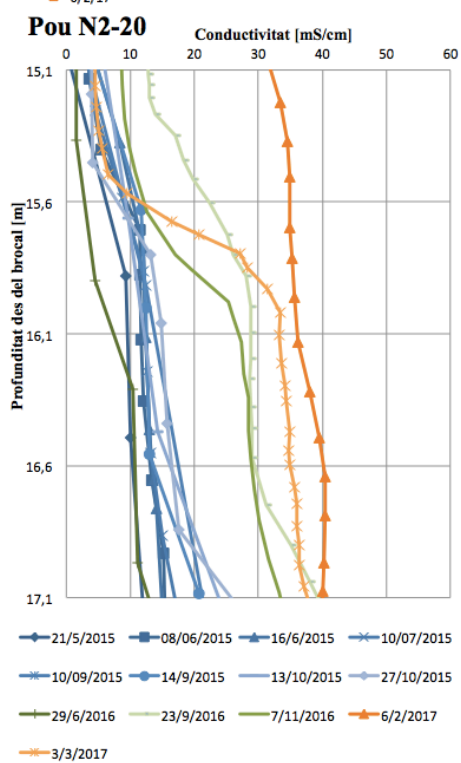
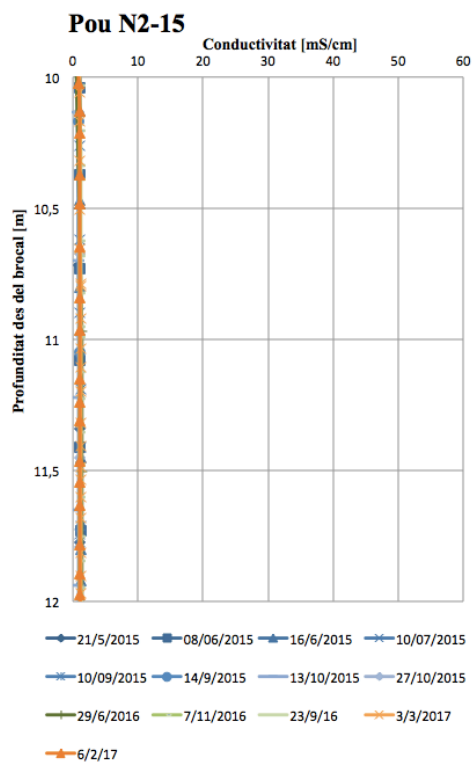


CAPÍTOL 6: ANNEX



CAPÍTOL 6: ANNEX

Figura A.5.- Perfils de conductivitat elèctrica mesurats en el pou piezomètric N2 en els tres trams ranurats que conformen aquest niu.



CAPÍTOL 6: ANNEX

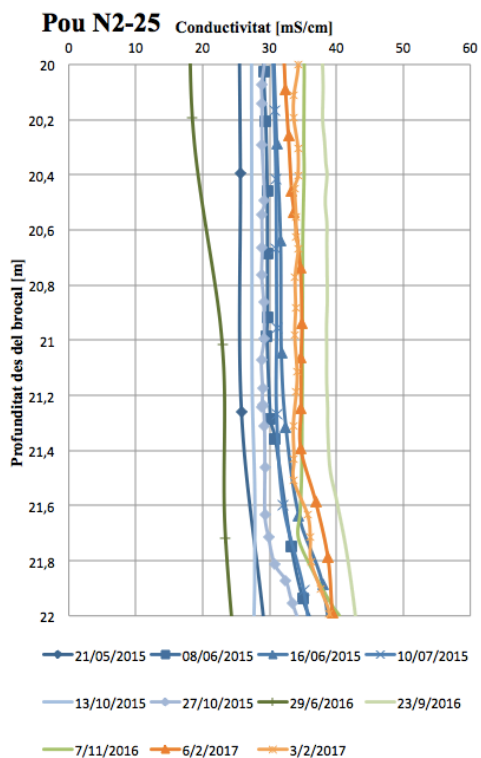
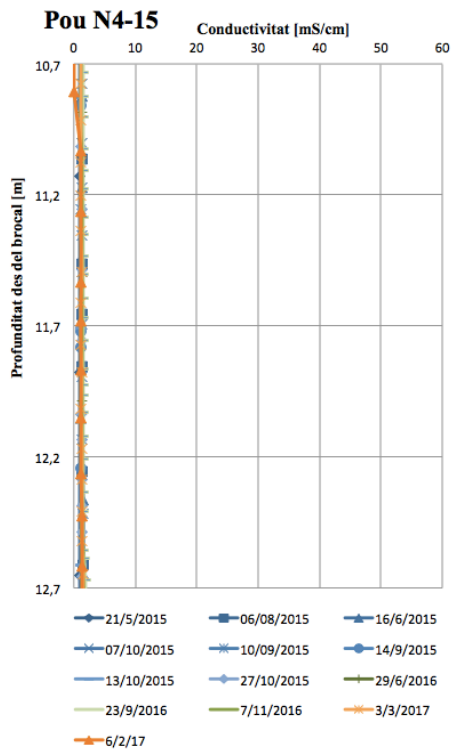
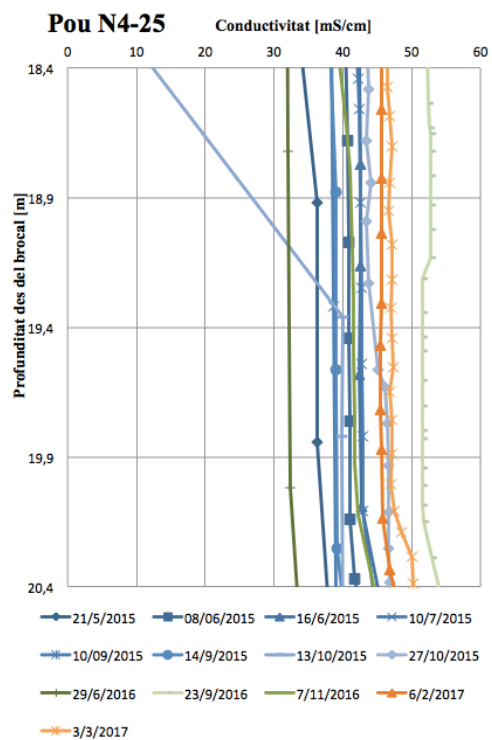
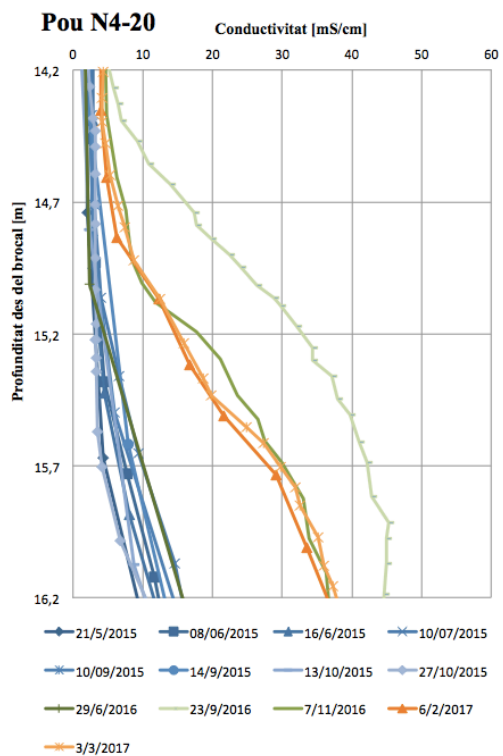


Figura A.6.- Perfils de conductivitat elèctrica mesurats en el pou piezomètric N4 en els tres trams ranurats que conformen aquest niu. Per més detall veure Annex (A).

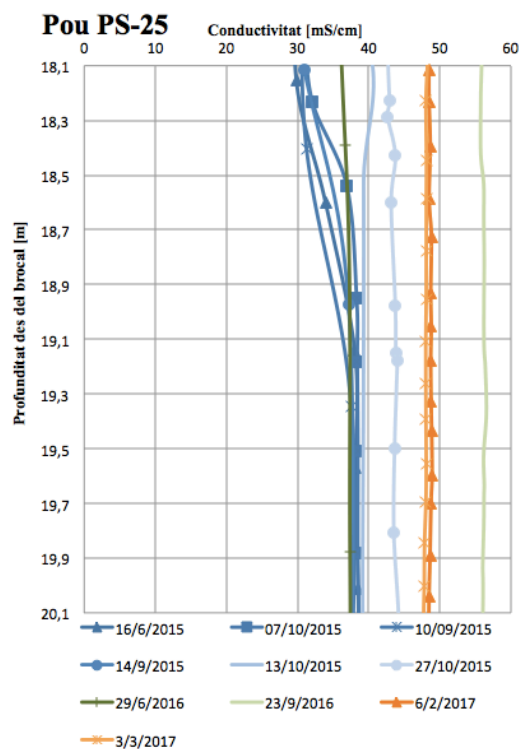


CAPÍTOL 6: ANNEX



CAPÍTOL 6: ANNEX

Figura A.7.- Perfils de conductivitat elèctrica mesurats en el pou piezomètric PS25 en els tres trams ranurats que conformen aquest niu.



ANNEX B.-

CAMPANYES PUNTUALS

CAPÍTOL 6: ANNEX

Figura B.1- Gràfic de les variacions estacionals de la conductivitat elèctrica i de la pluviometria en el pou piezomètric PP20.

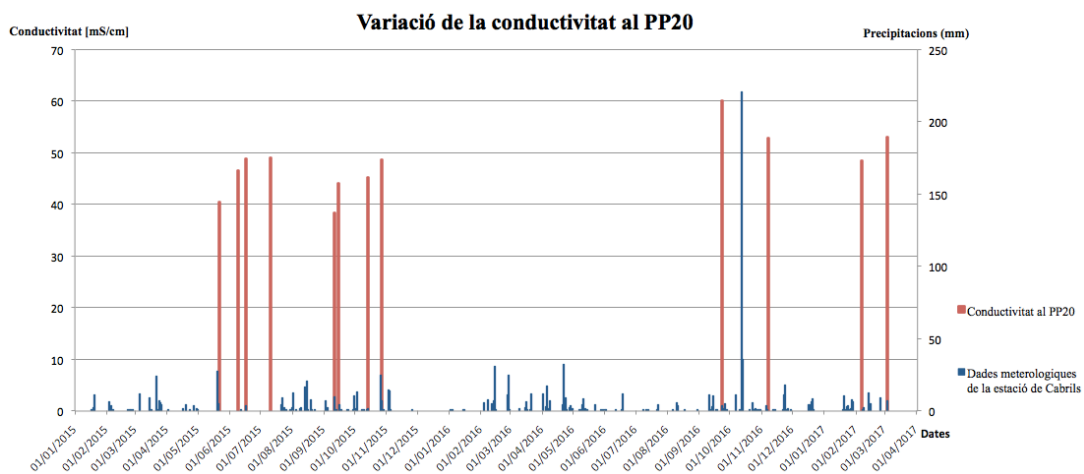
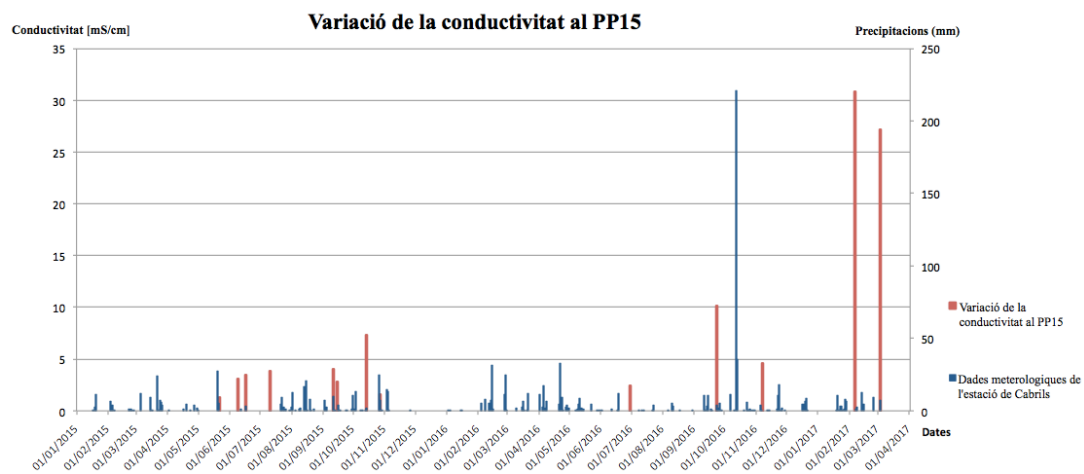
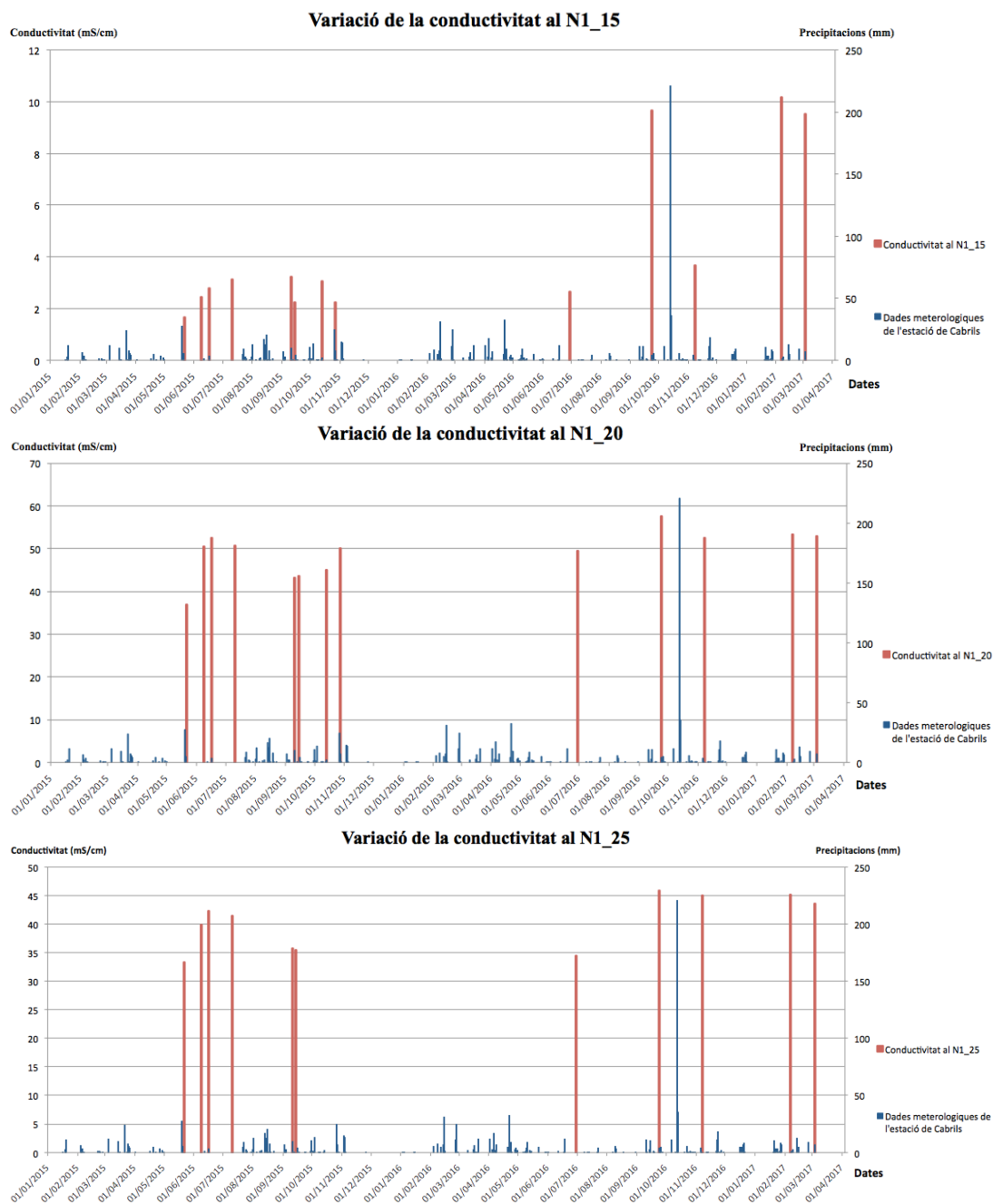


Figura B.2- Gràfic de les variacions estacionals de la conductivitat elèctrica i de la pluviometria en el pou piezomètric PP15.



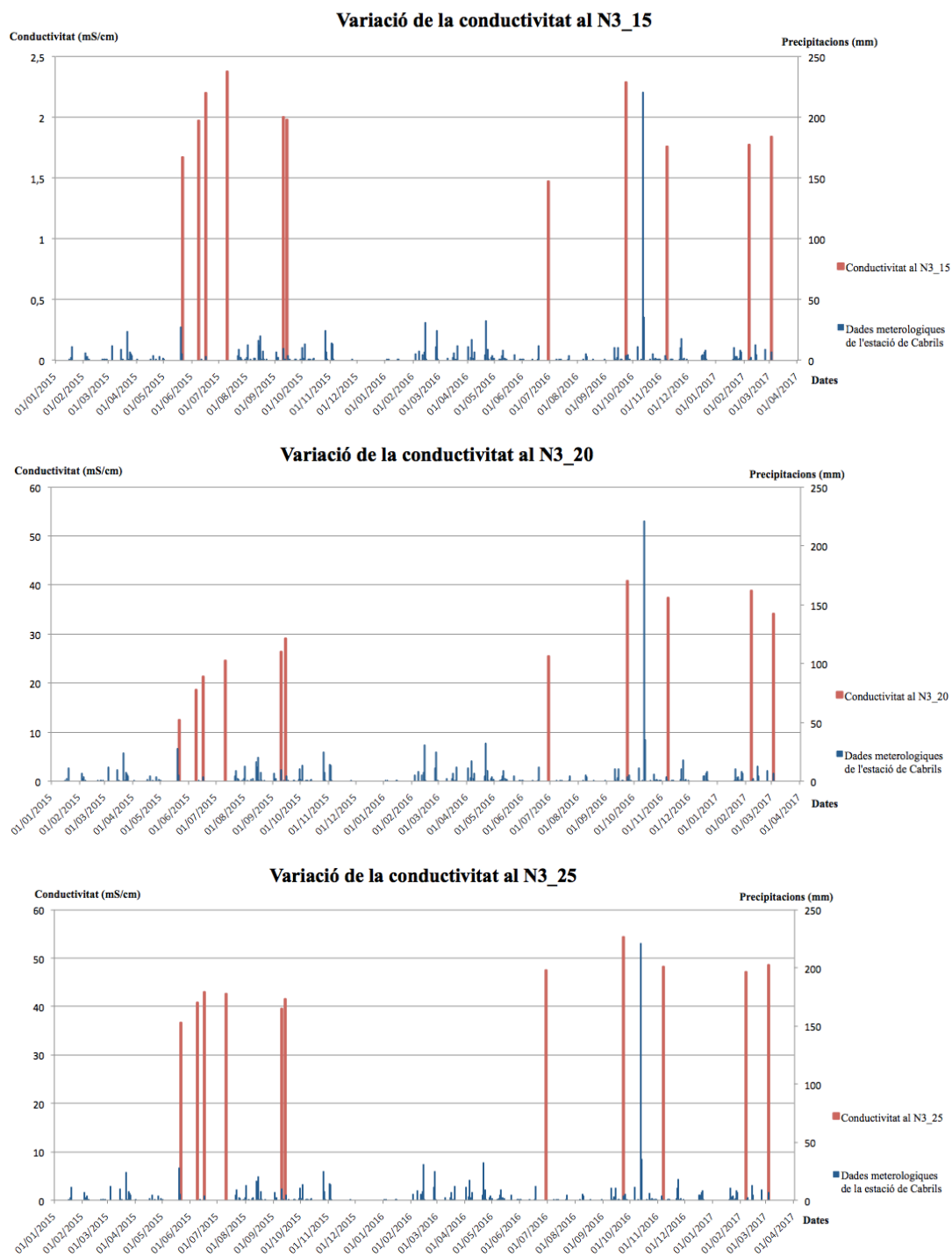
CAPÍTOL 6: ANNEX

Figura B.3- Gràfic de les variacions estacionals de la conductivitat elèctrica i de la pluviometria en els diferents trams ranurats del pou piezomètric N1.



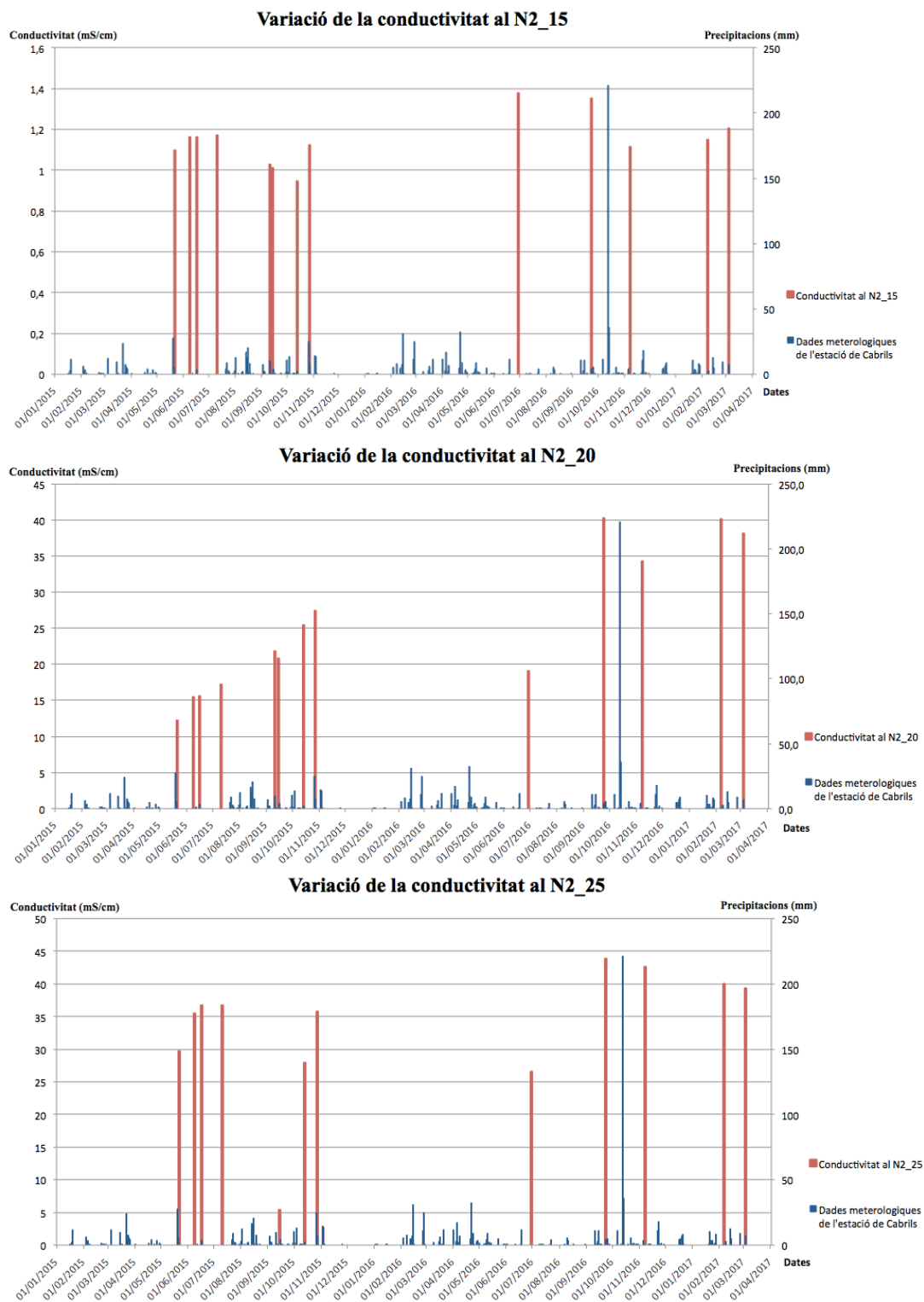
CAPÍTOL 6: ANNEX

Figura B.4- Gràfic de les variacions estacionals de la conductivitat elèctrica i de la pluviometria en els diferents trams ranurats del pou piezomètric N3.



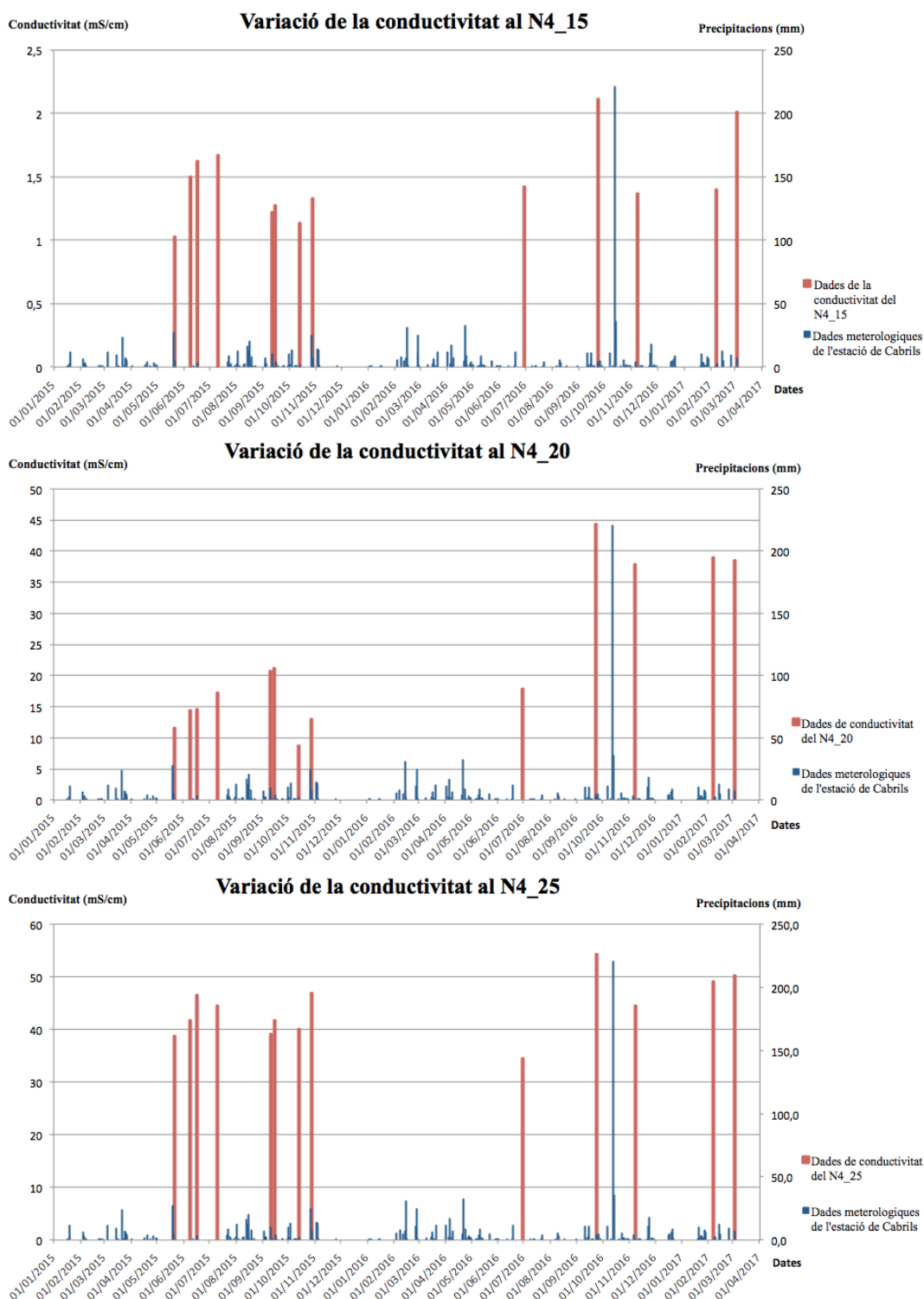
CAPÍTOL 6: ANNEX

Figura B.5- Gràfic de les variacions estacionals de la conductivitat elèctrica i de la pluviometria en els diferents trams ranurats del pou piezomètric N2.



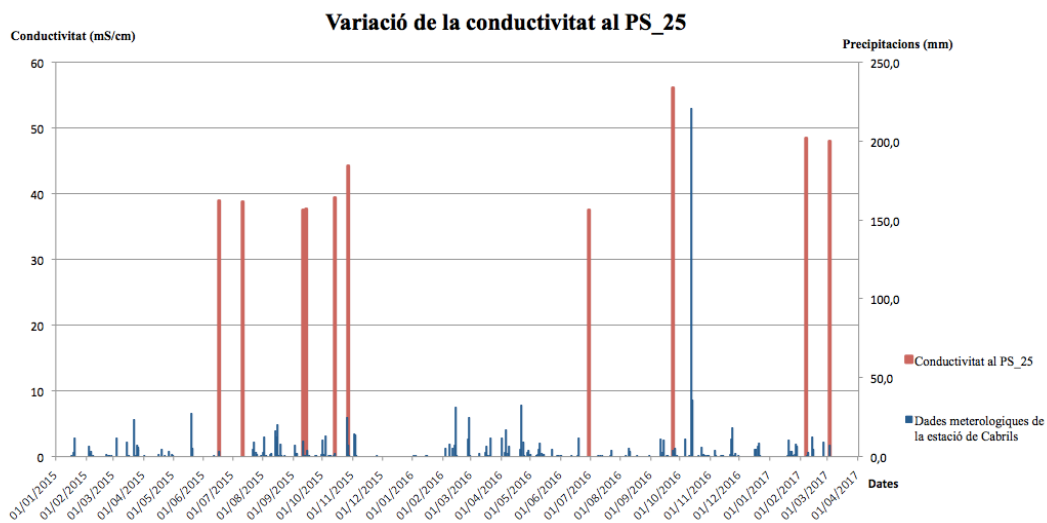
CAPÍTOL 6: ANNEX

Figura B.6- Gràfic de les variacions estacionals de la conductivitat elèctrica i de la pluviometria en els diferents trams ranurats del pou piezomètric N4.



CAPÍTOL 6: ANNEX

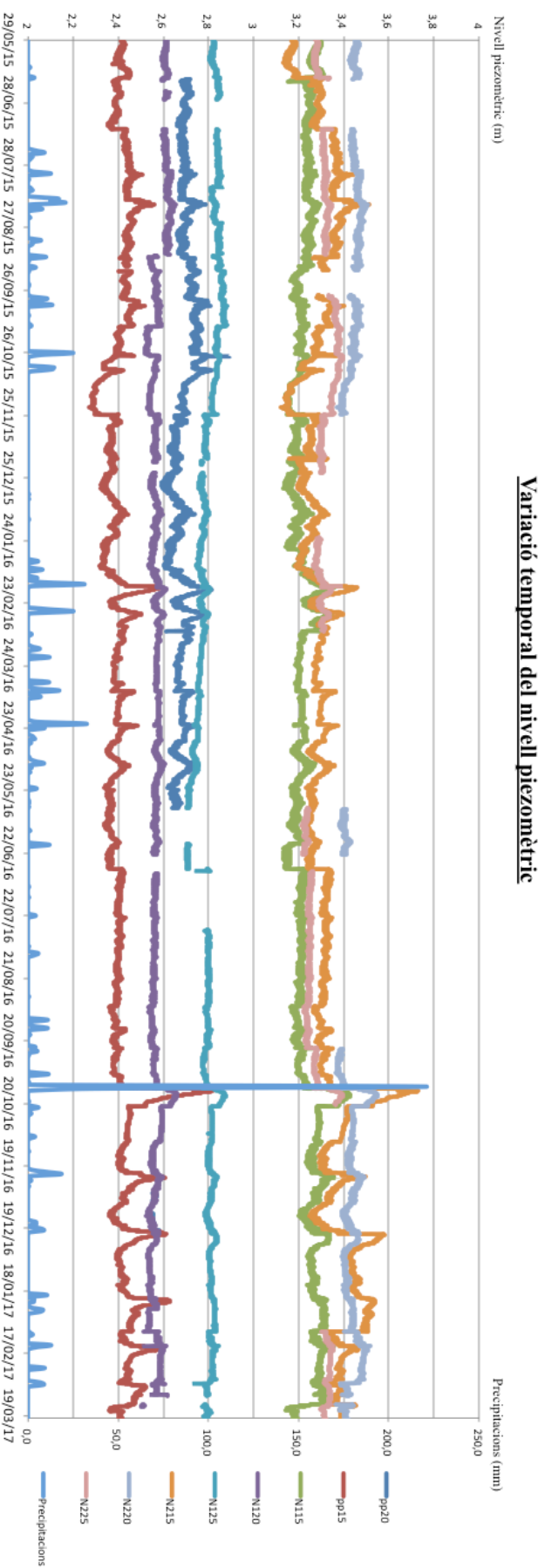
Figura B.7- Gràfic de les variacions estacionals de la conductivitat elèctrica i de la pluviometria en el pou piezomètric PS_25.



ANNEX C.-

SERIES TEMPORALS

Figura C.1- Variacions temporals del nivell piezomètric des del 2015 al 2017 dels diferents pous estudiats.



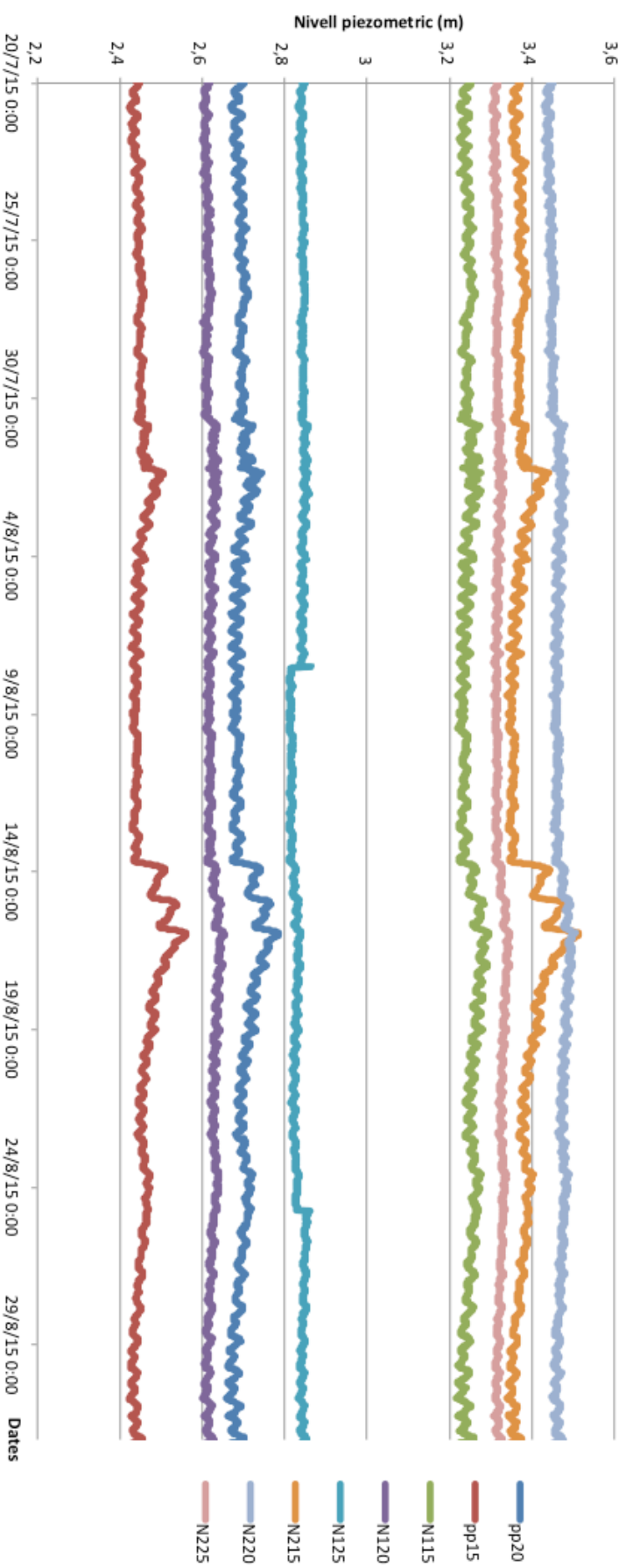


Figura C-2- Variacions temporals dels nivells piezomètrics dels diferents pous estudiats mostrant la influència de les mareas en el període compres entre Juliol-15 i Agost-15.

Figura C-3- Variacions temporals dels nivells piezomètrics dels diferents pous estudiats mostrant la influència de les mareas en el període compres entre Juliol-15 i Agost-15.

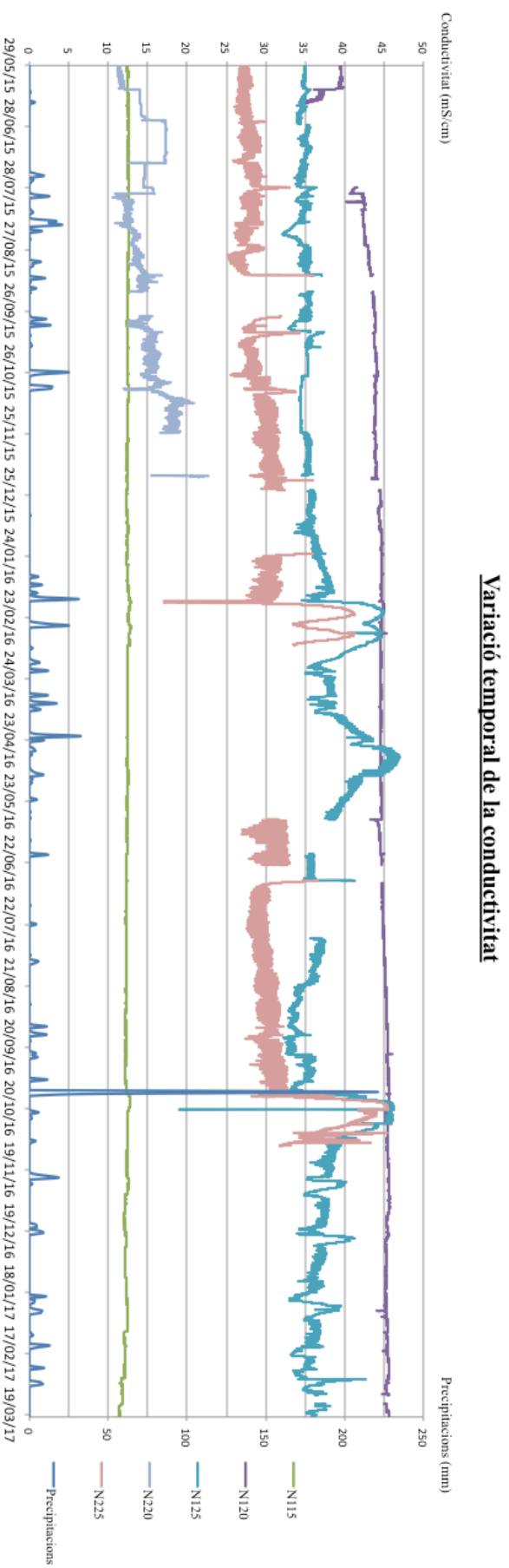
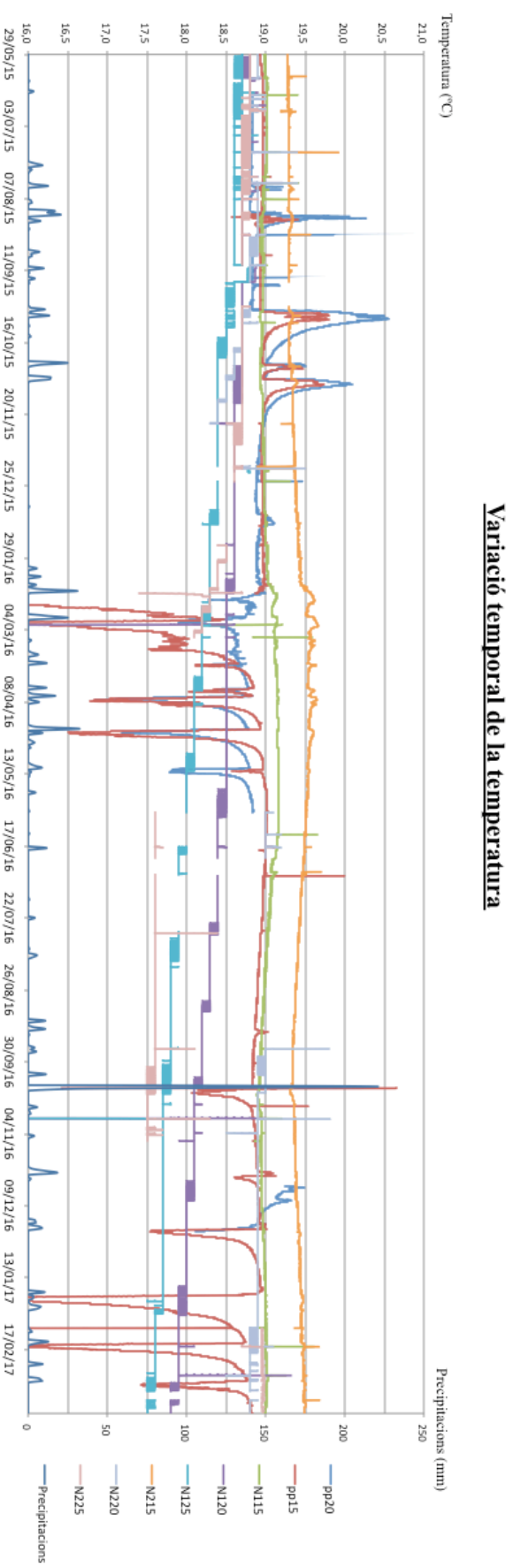


Figura C.4- Variacions temporals dels nivells piezomètrics dels diferents pous estudiats mostrant la influència de les mareas en el període compres entre Julio-15 i Agosto-15.



ANNEX D.-

EVOLUCIÓ DE LA INTRUSIÓ SALINA

Figura D.1- Perfil d'isosalinitat elaborat a partir de les dades de conductivitat elèctrica dels diferents piezòmetres de la campanya de Maig 2015.

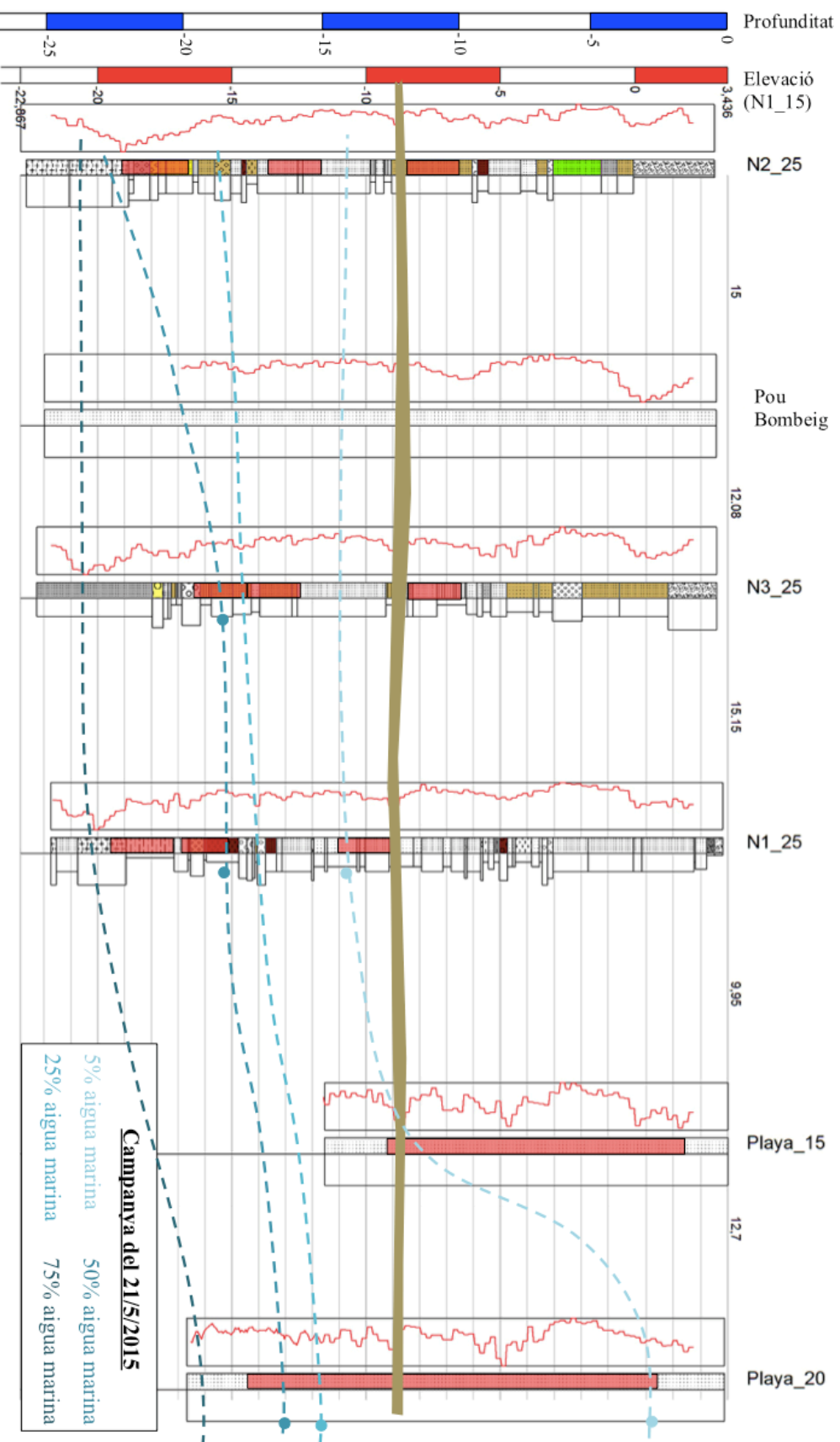


Figura D-2- Perfil d'isosalinitat elaborat a partir de les dades de conductivitat electrica dls diferents piezometres de la campanya de Juny 2015.

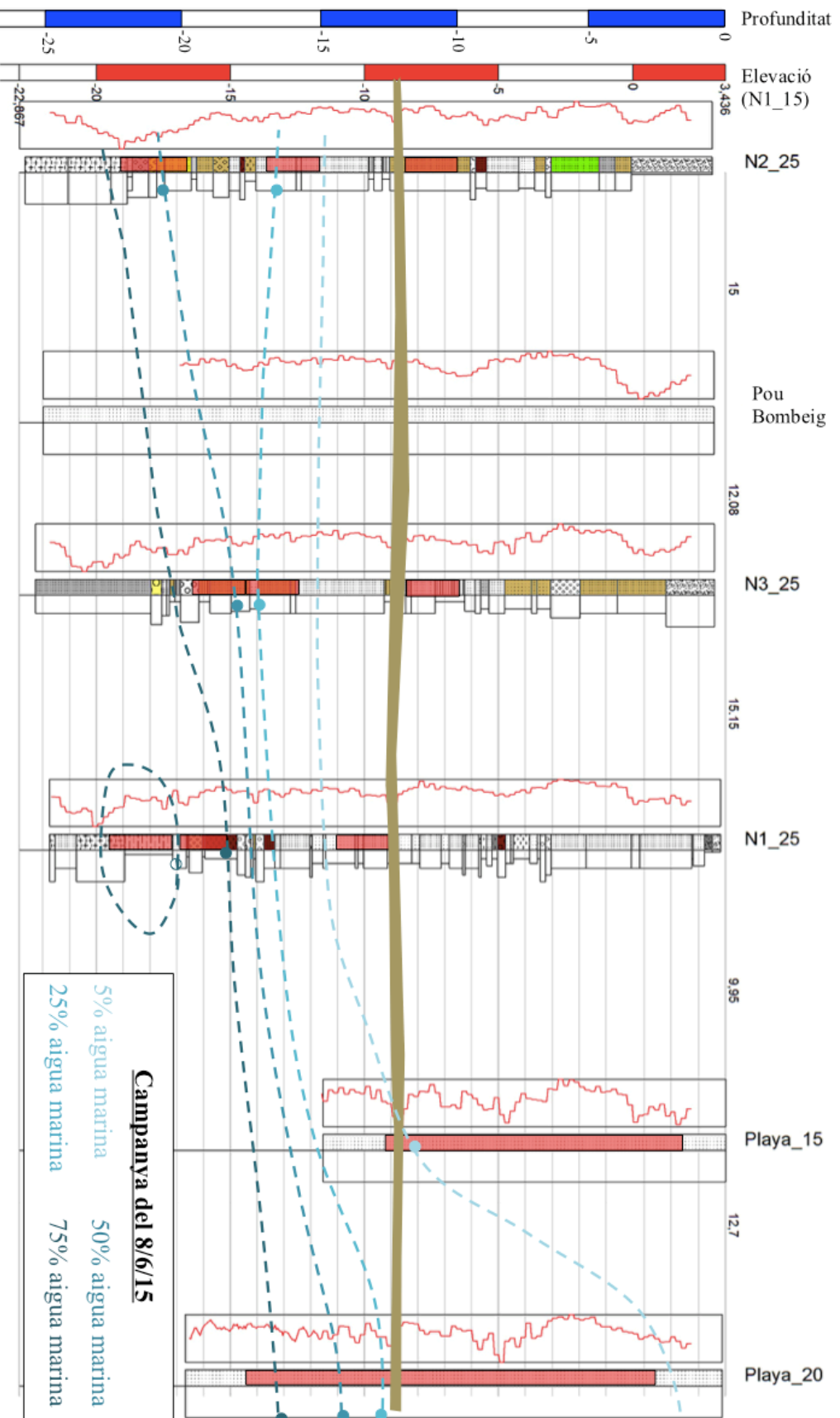


Figura D.3- Perfil d'isosalinitat elaborat a partir de les dades de conductivitat electrica dels diferents piezometres de la campanya de Juny 2015.

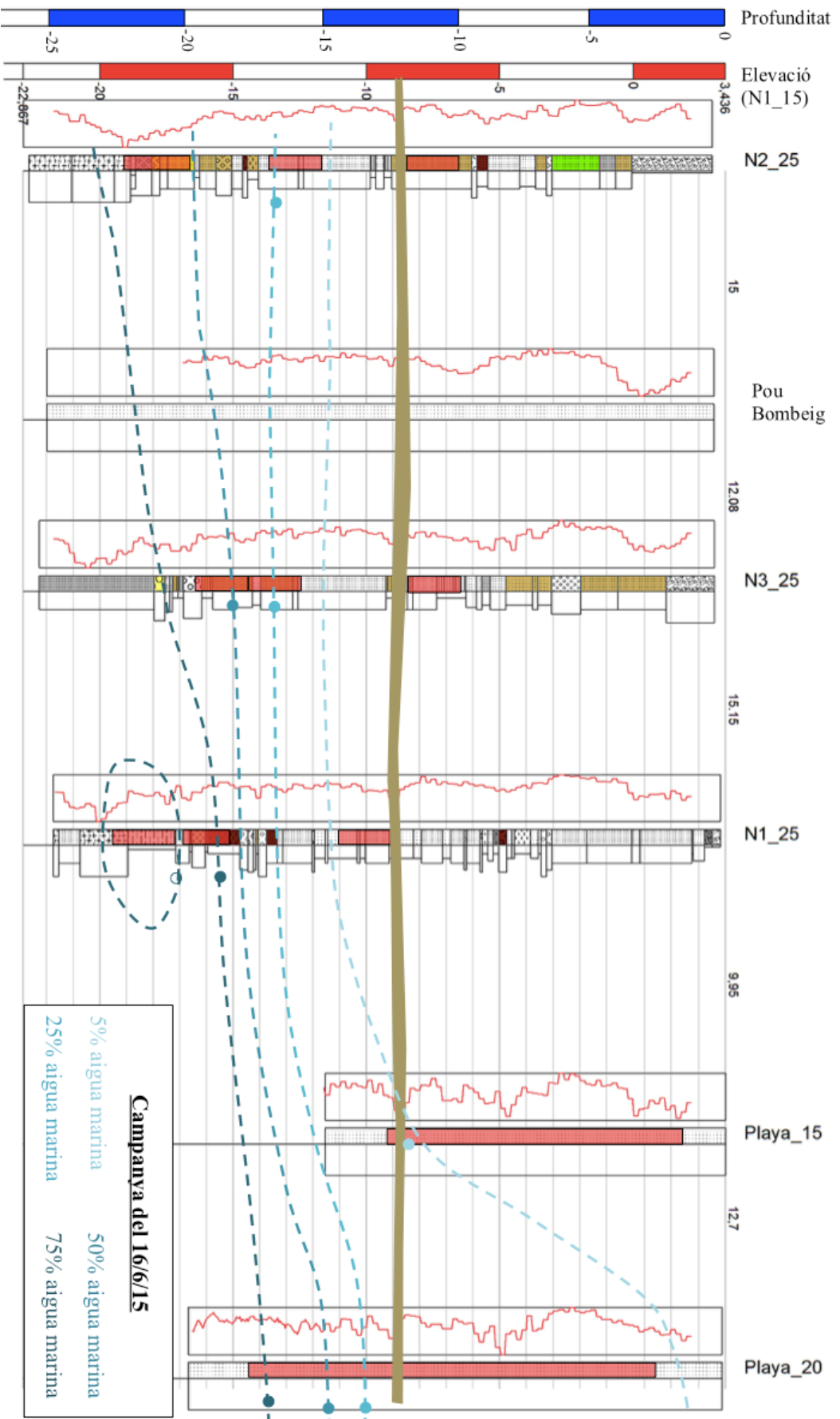


Figura D.4- Perfil d'isosalinitat elaborat a partir de les dades de conductivitat elèctrica dels diferents piezòmetres de la campanya de Juliol 2015.

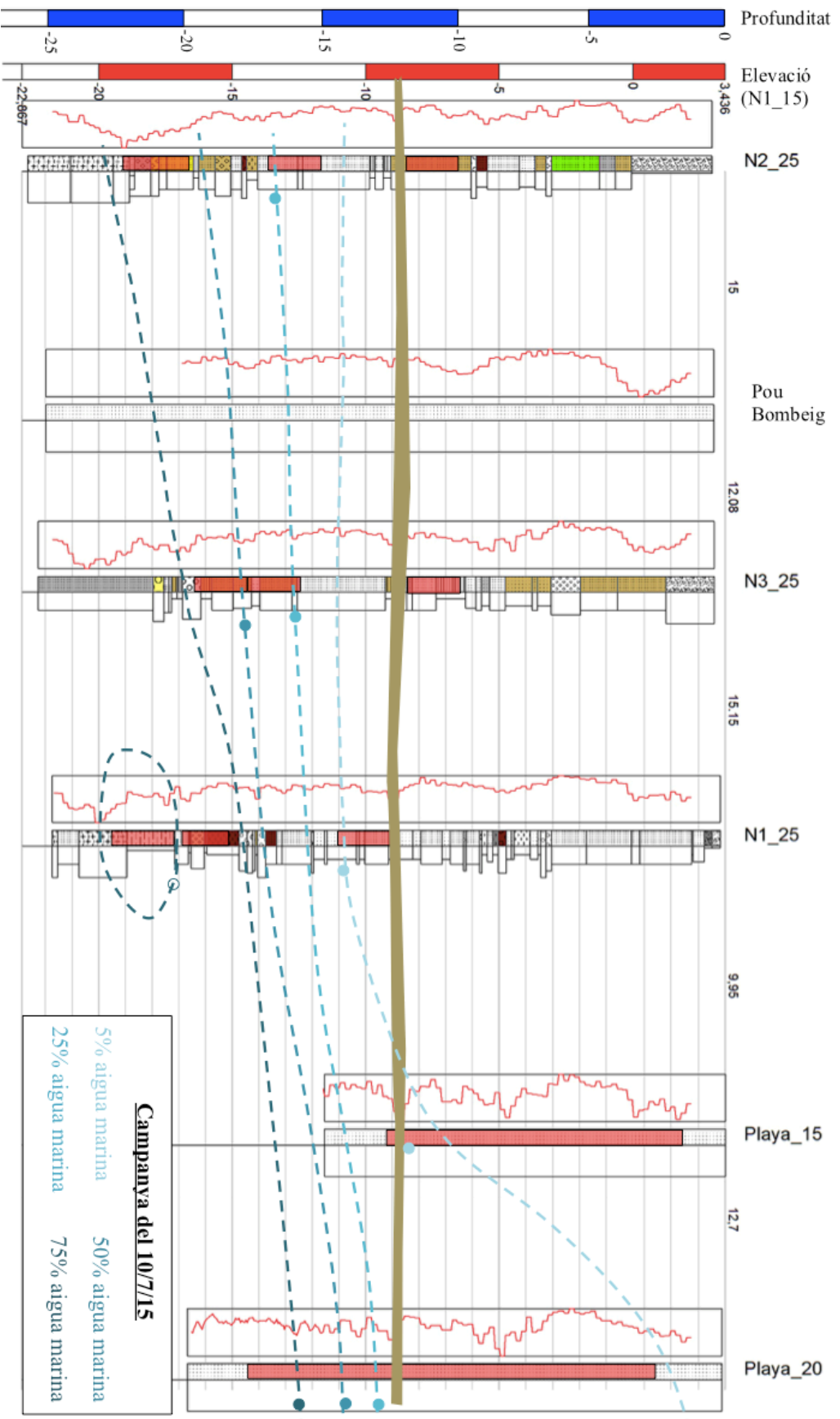


Figura D.5- Perfil d'isosalinitat elaborat a partir de les dades de conductivitat elèctrica dels diferents piezometres de la campanya de Setembre 2015.

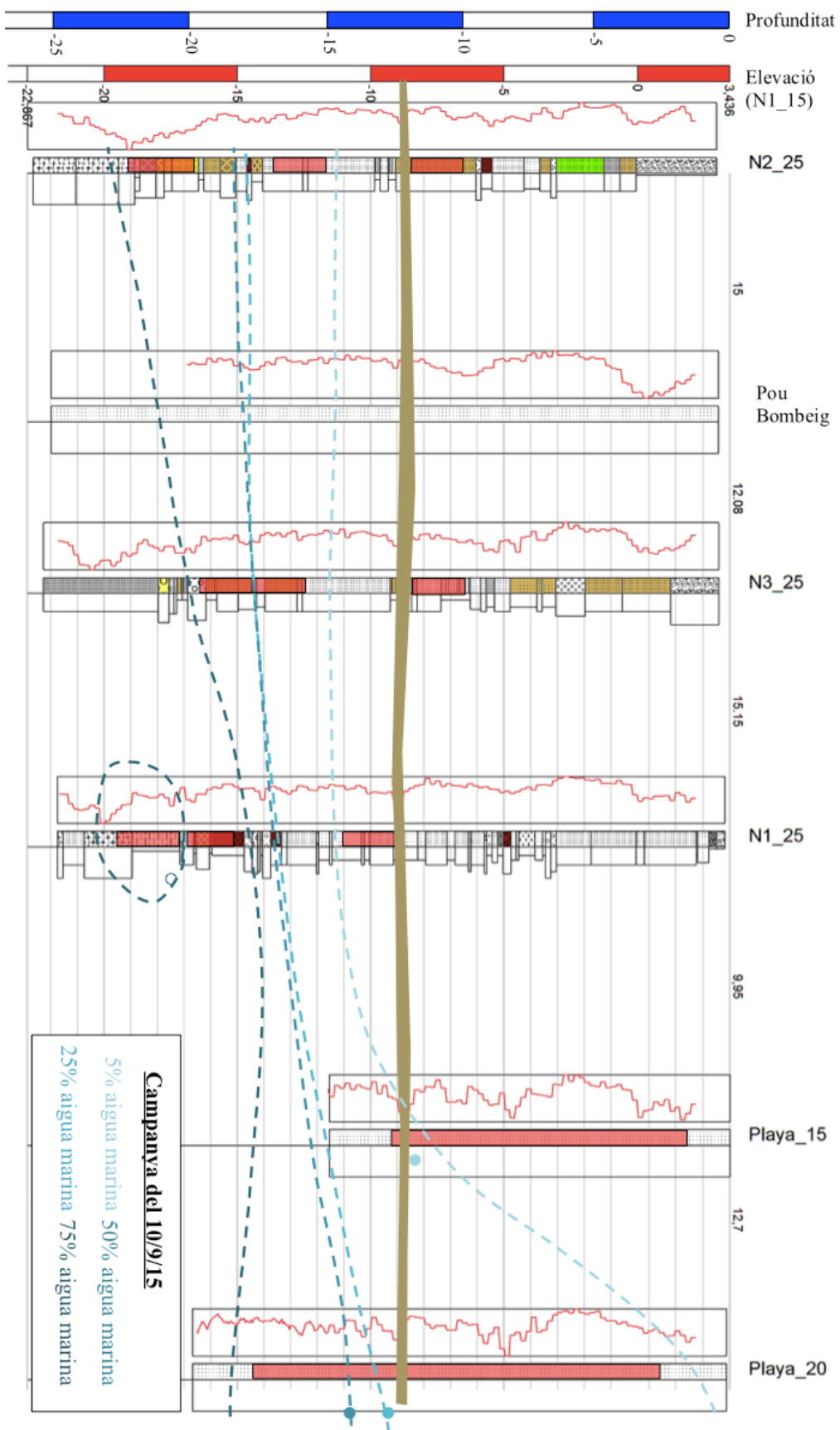


Figura D.6- Perfil d'isosalinitat elaborat a partir de les dades de conductivitat elèctrica dels diferents piezòmetres de la campanya de Setembre 2015.

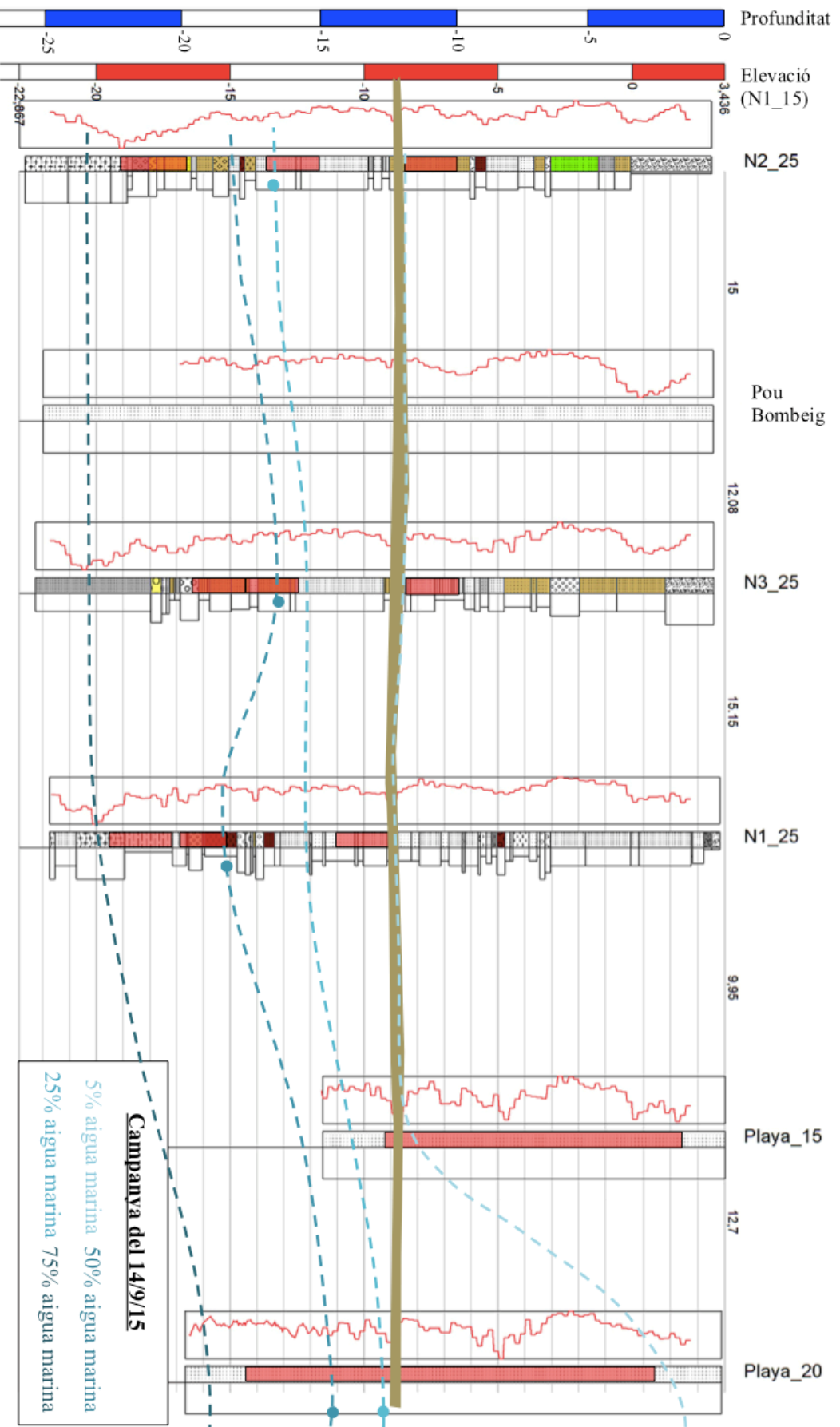


Figura D.7 - Perfil d'isosalinitat elaborat a partir de les dades de conductivitat elèctrica dels diferents piezometres de la campanya de Octubre 2015.

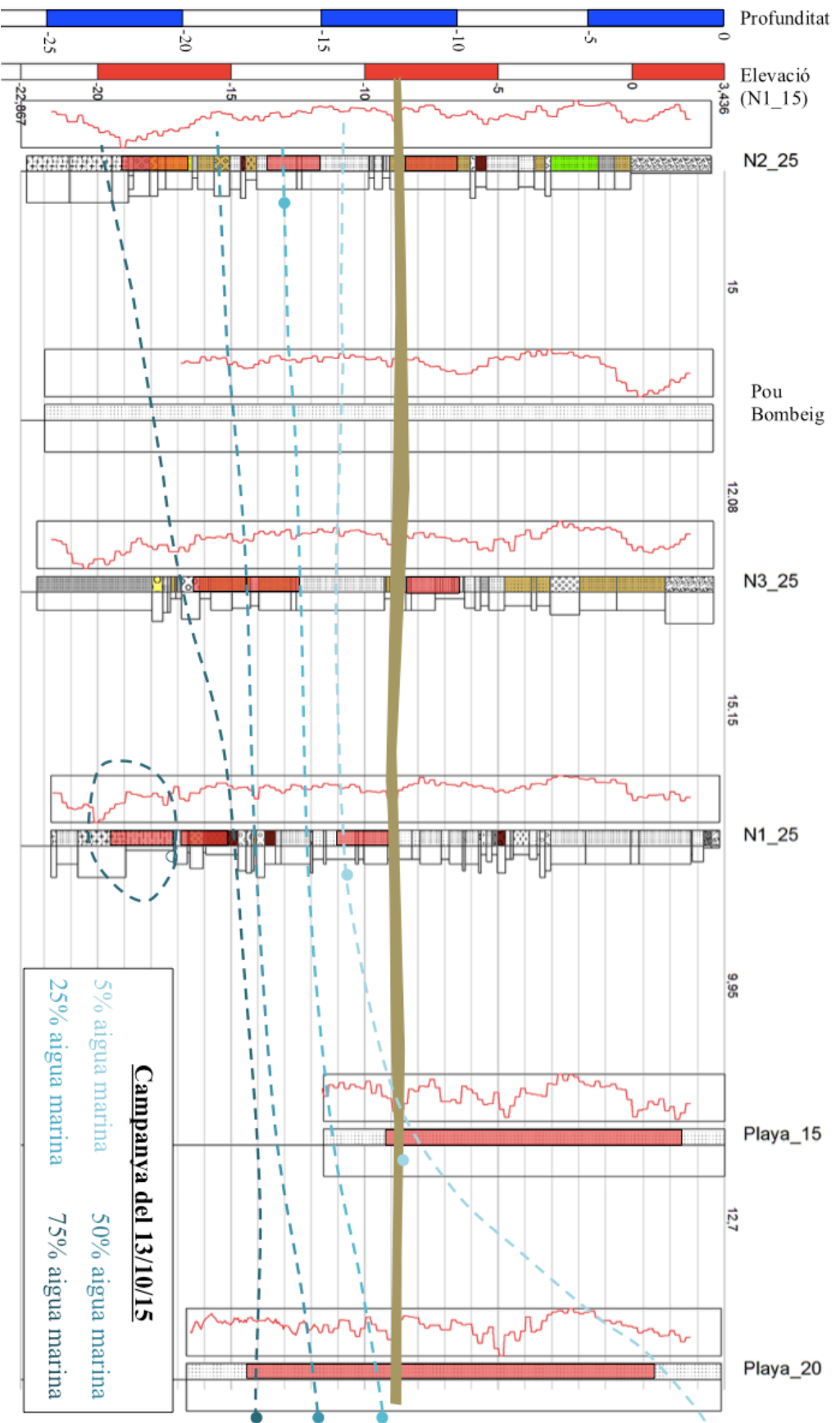


Figura D.8- Perfil d'isosalinitat elaborat a partir de les dades de conductivitat elèctrica dels diferents piezometres de la campanya de Octubre 2015.

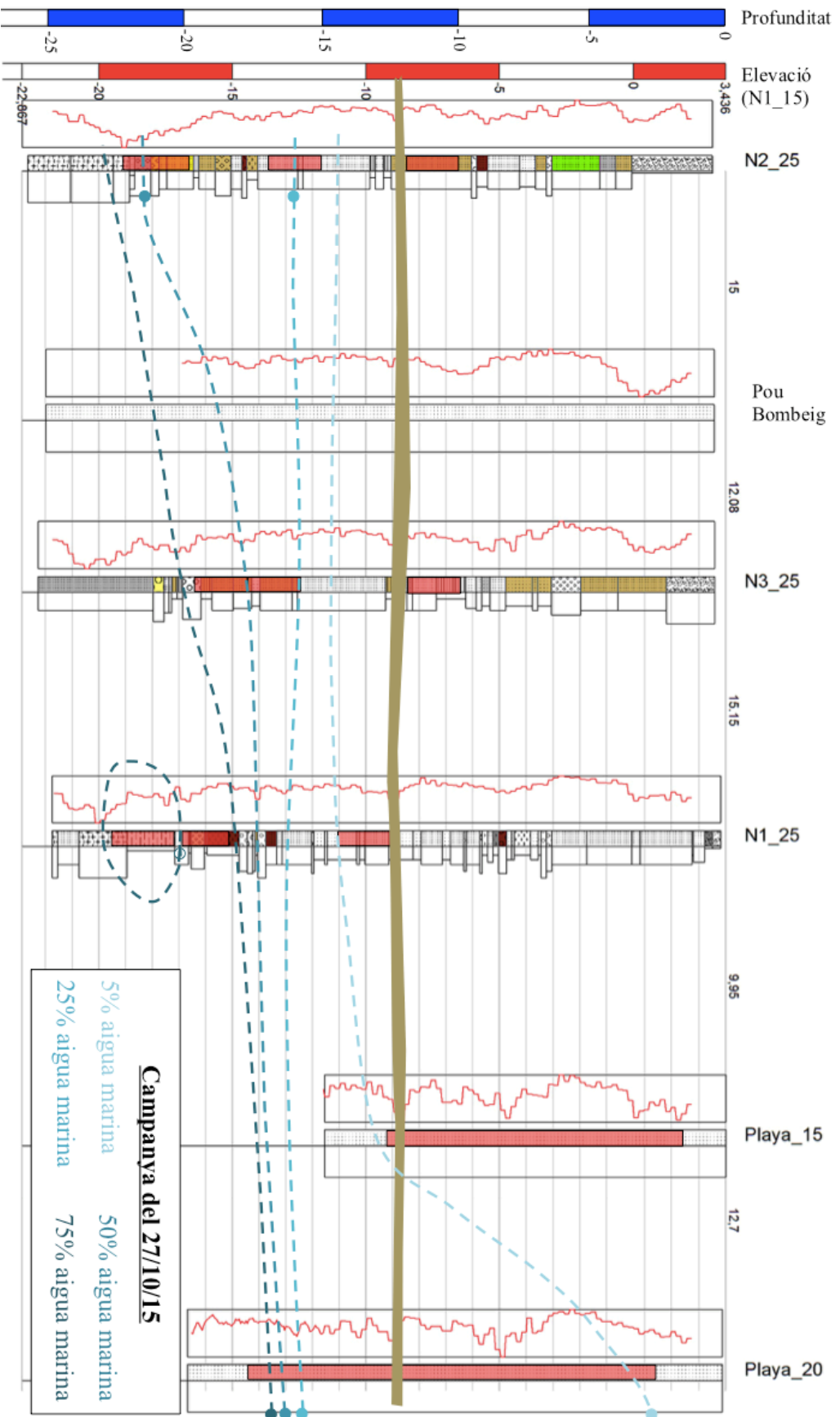


Figura D.9- Perfil d'isosalinitat elaborat a partir de les dades de conductivitat elèctrica dels diferents piezòmetres de la campanya de Setembre 2016.

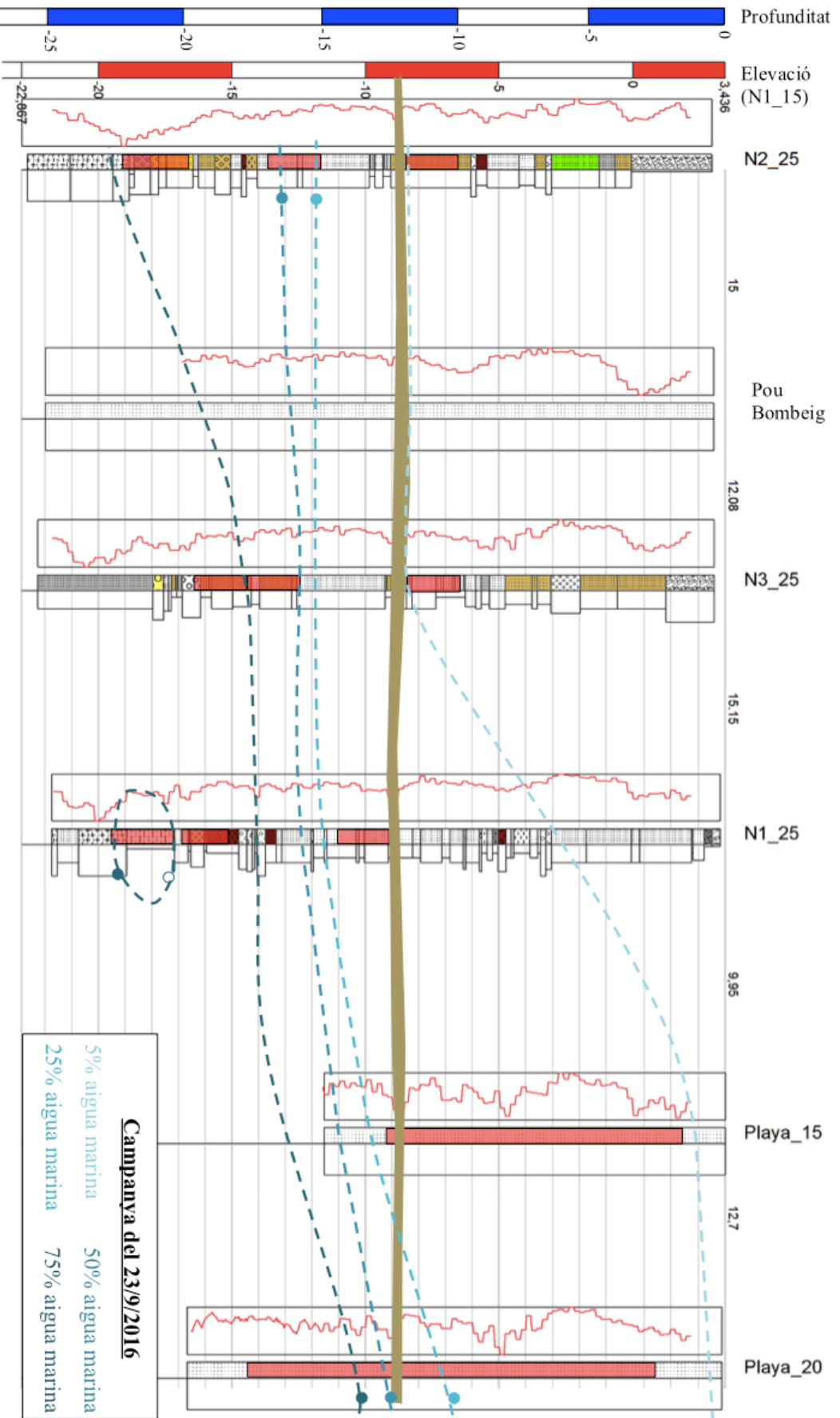


Figura D.10- Perfil d'isosalinitat elaborat a partir de les dades de conductivitat elèctrica dels diferents piezometres de la campanya de Novembre 2016.

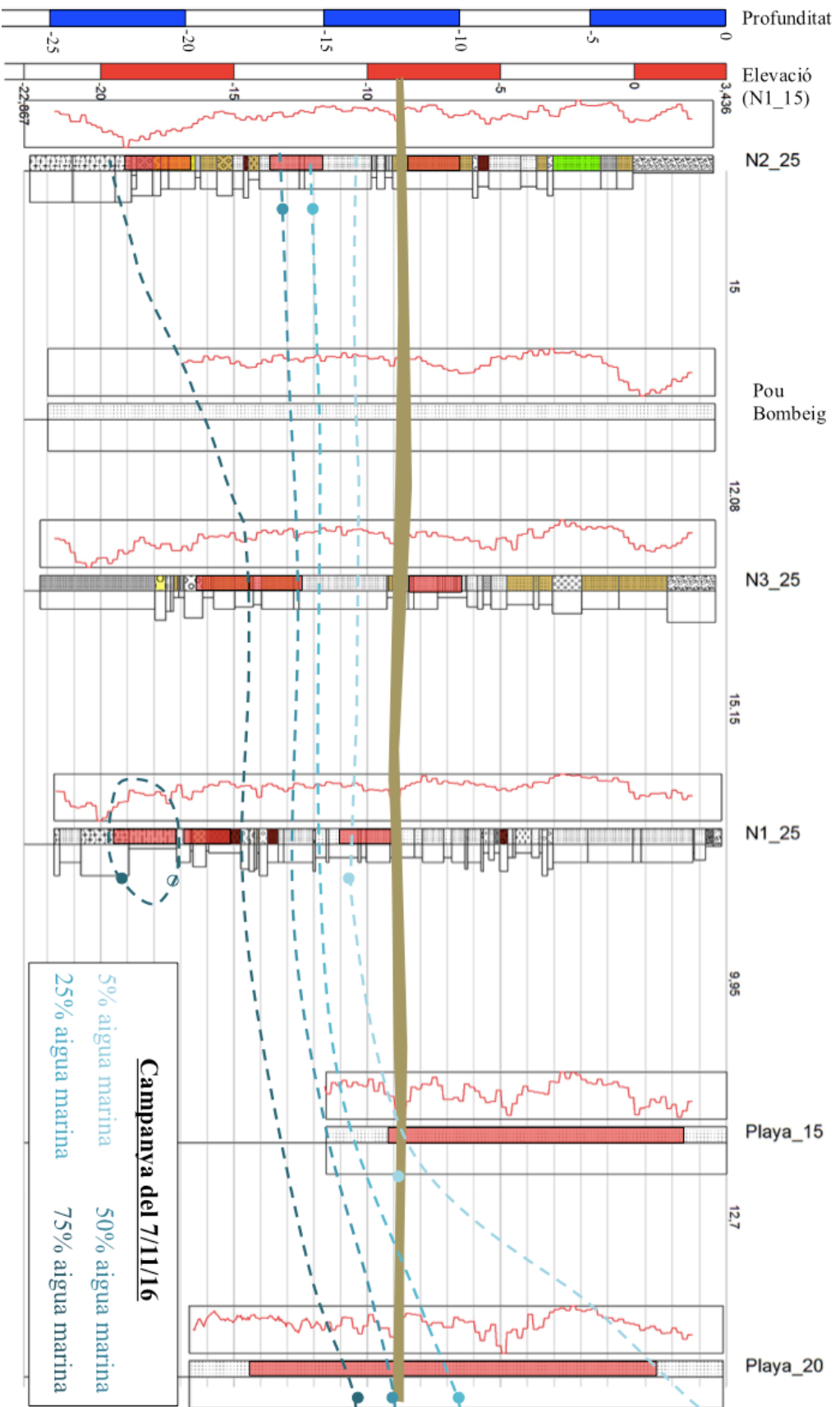


Figura D.11 - Perfil d'isosalinitat elaborat a partir de les dades de conductivitat elèctrica dels diferents piezòmetres de la campanya de Febrer 2017.

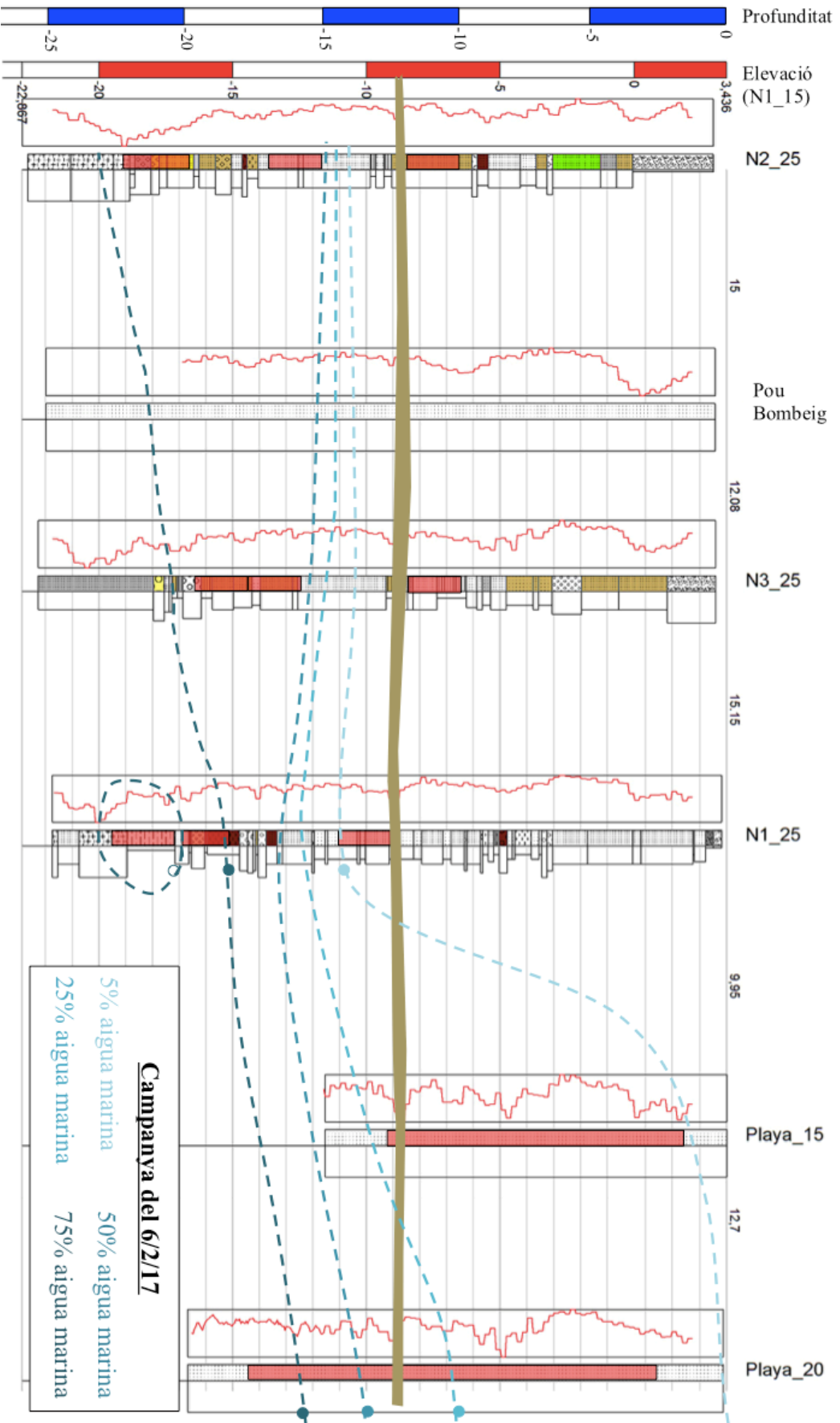


Figura D.12- Perfil d'isosalinitat elaborat a partir de les dades de conductivitat elèctrica dels diferents piezometres de la campanya de Març 2017.

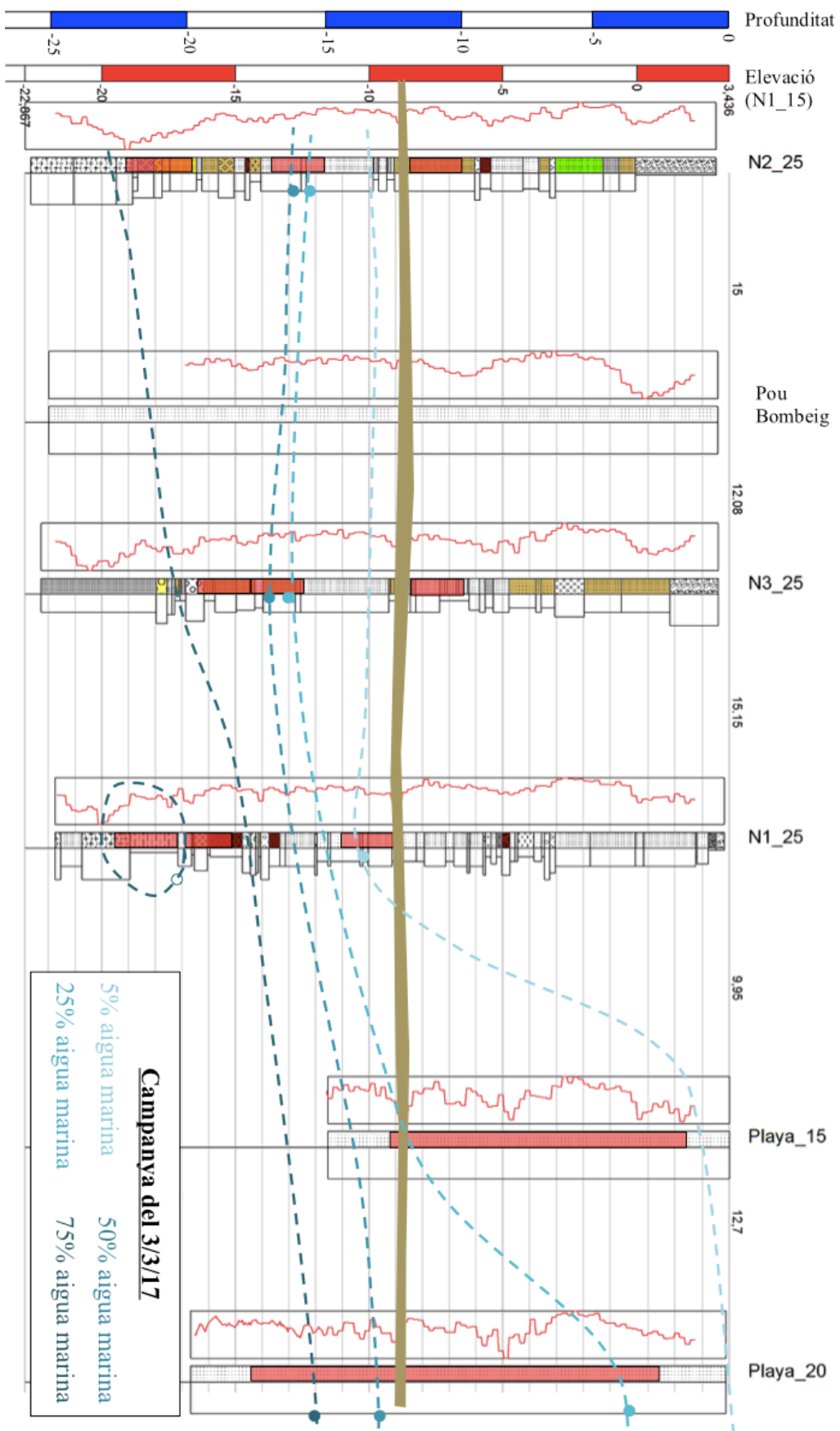


Figura D.13- Perfil d'isosalinitat elaborat a partir de les dades de conductivitat elèctrica dels diferents piezometres per l'estiu i hivern del 2015.

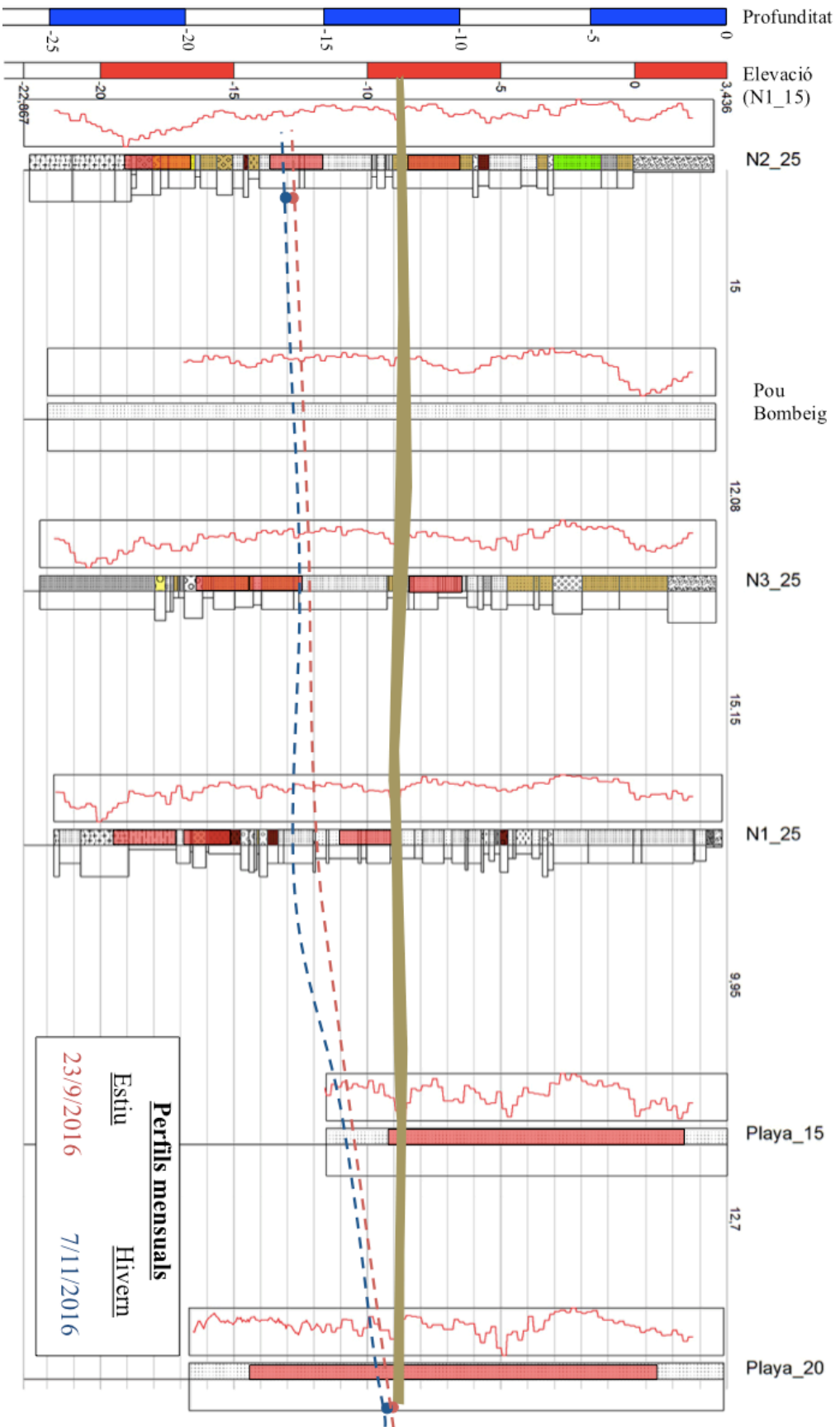


Figura D.14- Perfil d'isosalinitat elaborat a partir de les dades de conductivitat elèctrica dels diferents piezòmetres per l'estiu i hivern del 2016.

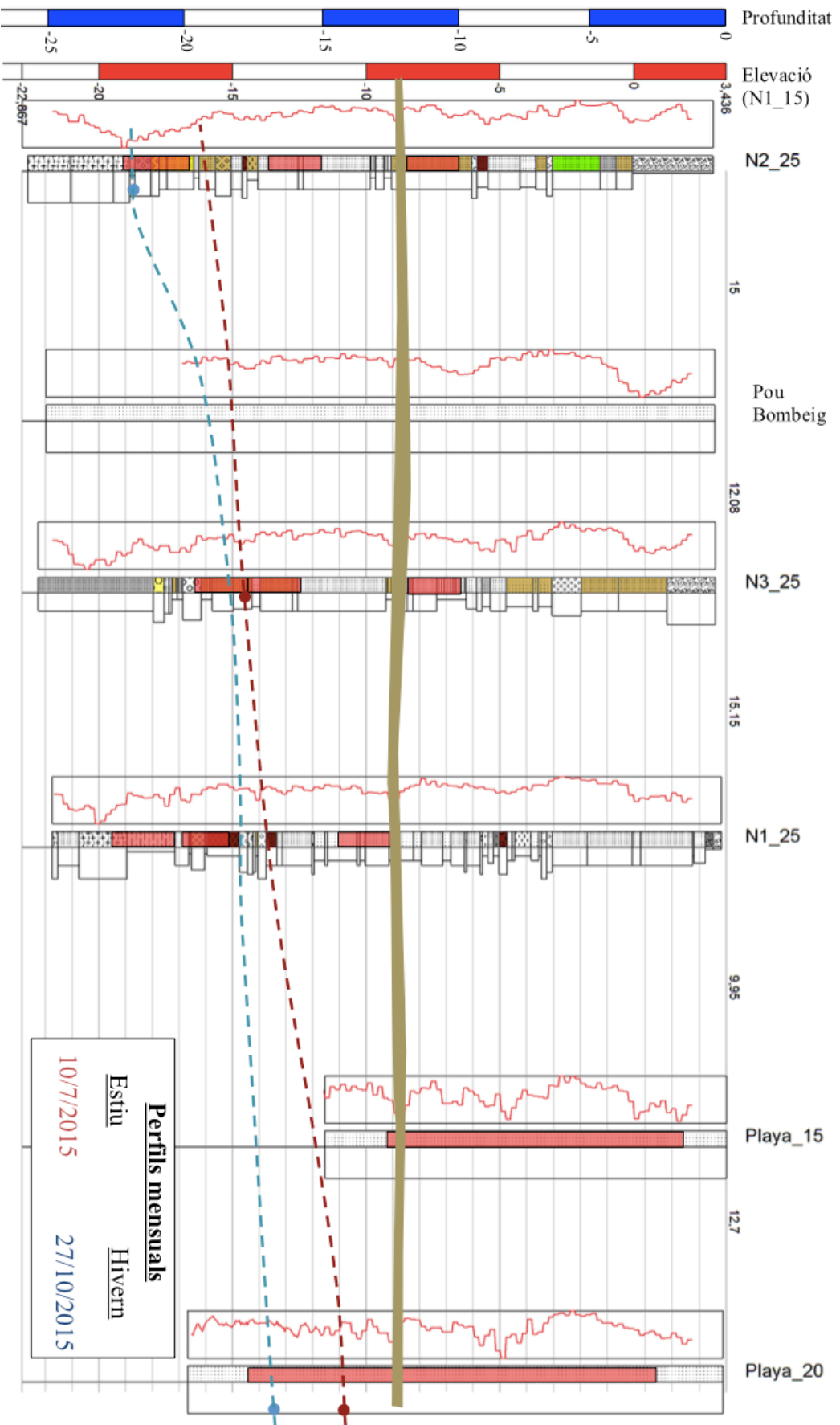


Figura D.15- Taula dels valors de conductivitat al 5%,25%,50% i75% d'aigua marina per a cada campanya de camp per tots els pous estudiats.

CAPITOL 6: ANNEX

	Campanyes	PP20	PP15	N1	N3	N2
Conductivitat 3 mS/cm (5% d'aigua marina)	21/5/2015	2,8	-	14	-	-
	8/6/2015	-	12,5	-	-	-
	16/6/2015	-	12,3	-	-	-
	10/7/2015	-	12	14,45	-	-
	10/9/2015	-	12,1	-	-	-
	14/9/2015	-	-	-	-	-
	13/10/2015	-	12,2	14,5	-	-
	27/10/2015	2,9	-	-	-	-
	23/9/2016	-	-	-	-	-
	7/11/2016	-	12,5	14,15	-	-
Conductivitat 15 mS/cm (25% d'aigua marina)	6/2/2017	-	-	13,8	-	-
	3/3/2017	-	-	13,3	-	-
	21/5/2015	15,1	-	-	-	-
	8/6/2015	12,8	-	-	17,5	16,9
	16/6/2015	13,2	-	-	17,2	17,1
	10/7/2015	12,7	-	-	16	16,8
	10/9/2015	12,8	-	-	-	16,2
	14/9/2015	12,8	-	-	-	16,7
	13/10/2015	12,9	-	-	-	16,5
	27/10/2015	16	-	-	-	16,1
23/9/2016	10,1	-	-	-	15,3	
7/11/2016	10	-	-	-	15,7	
6/2/2017	9	-	-	-	-	
3/3/2017	2,8	-	-	-	16,1	15,65
21/5/2015	16,4	-	-	18,4	18,2	-

CAPITOL 6: ANNEX

Conductivitat 30 mS/cm (50% d'aigua marina)	8/6/2015	14,2	-	-	18,1	21,2
	16/6/2015	14,3	-	-	18	-
	10/7/2015	14,2	-	-	18	-
	10/9/2015	14,2	-	-	-	-
	14/9/2015	14,5	-	-	16,5	-
	13/10/2015	15,1	-	-	-	-
	27/10/2015	16,3	-	-	-	21,7
	23/9/2016	12,5	-	-	-	16,7
	7/11/2016	12,5	-	-	-	16,6
	6/2/2017	12,7	-	-	-	-
3/3/2017	12,6	-	-	16,6	15,9	
Conductivitat 45 mS/cm (75% d'aigua marina)	21/5/2015	-	-	-	-	-
	8/6/2015	17,4	-	18,6	-	-
	16/6/2015	16,2	-	18	-	-
	10/7/2015	16	-	-	-	-
	10/9/2015	-	-	-	-	-
	14/9/2015	-	-	-	-	-
	13/10/2015	17,2	-	-	-	-
	27/10/2015	16,9	-	-	-	-
	23/9/2016	13,7	-	22,4	-	-
	7/11/2016	14,7	-	-	-	-
6/2/2017	15,2	-	-	-	-	
3/3/2017	15,2	-	-	-	-	

Figura D.16- Taula amb les diferents característiques dels pous piezomètrics utilitzats en aquest estudi

CAPITOL 6: ANNEX

Pous	N115	N120	N125	N215	N220	N225	N315	N320	N325	N415	N420	N425	PP15	PP20	PS25
Cota topografica	0	0,351	0,239	-0,041	-0,094	-0,067	0,126	0,022	0,019	-0,394	-0,251	-0,281	0,436	0,302	-0,111
PROFUNDITAT DEL NIVELL PIEZOMETRIC															
21/5/15	3,14	2,82	2,711	3,171	3,304	3,277	2,854	3,088	3,221	3,244	3,021	3,151	2,254	2,568	-
8/6/15	3,285	2,599	2,891	3,391	3,454	3,387	3,059	3,248	3,351	3,424	3,181	3,311	2,494	2,768	-
16/6/15	3,23	2,579	2,851	3,311	3,414	3,337	2,994	3,198	3,281	3,364	3,264	3,301	2,414	2,698	3,481
10/7/15	3,24	2,609	2,841	3,361	3,444	3,347	3,024	3,218	3,301	3,404	3,141	3,311	2,434	2,708	3,501
10/9/15	3,2	3,22	3,001	3,272	3,314	3,387	3,296	3,685	3,517	3,411	3,172	3,344	2,412	2,702	3,574
14/9/15	3,169	3,502	2,905	3,311	3,454	3,387	3,29	3,42	3,485	3,394	3,16	3,332	2,856	2,672	3,534
13/10/15	3,072	2,535	-	3,568	3,198	3,948	-	-	-	3,844	3,592	3,772	2,946	3,146	3,461
27/10/15	3,021	2,468	-	3,064	3,141	3,043	-	-	-	3,844	3,592	3,772	2,2	2,672	3,419
24/11/15	3,22	2,579	2,781	3,291	3,374	3,317	2,964	3,168	3,221	3,334	3,091	3,151	2,399	2,688	3,461
29/6/16	3,22	2,469	2,791	3,331	3,434	3,257	3,014	3,198	3,241	3,354	3,101	4,171	2,414	3,148	3,551
23/9/16	3,22	2,569	2,781	3,321	3,414	3,277	2,994	3,208	3,201	3,334	3,091	3,221	2,424	2,708	3,481
7/11/16	3,3	2,399	2,611	3,171	3,314	3,267	2,824	3,058	3,081	3,204	2,971	2,921	2,264	2,558	-
21/12/16	3,06	2,369	2,571	3,071	3,224	3,077	2,754	3,008	3,011	3,154	2,961	2,881	2,394	2,428	3,311
6/2/17	2,92	2,819	2,801	3,351	3,454	3,317	3,024	3,298	3,251	3,424	3,171	3,171	2,464	2,758	3,511
3/3/17	2,579	2,849	2,776	3,316	3,384	3,242	3,181	3,168	2,974	3,334	3,081	3,131	2,434	2,688	3,511

7. BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA CIENTÍFICA

- Alfaro, P. E. M., Santos, P. M., & Castaño, S. C. (2006). *Fundamentos de hidrogeología*. Ed. Mundi-Prensa Libros. 284 pp.
- Barlow, P.M. (2003). Groundwater in Freshwater-Saltwater Environments of the Atlantic Coast". USGS Circular 1262, United States Geological Survey, Reston, VA. 88 pp.
- Bear, J. (1979) Hydraulics of groundwater. McGraw-Hill, New York. 569 pp.
- Bear, J. & Cheng, A. H. D. (2010). *Modeling groundwater flow and contaminant transport* (Vol. 23). Springer Science & Business Media.
- Bear, J., (1979). Hydraulics of Groundwater. McGraw-Hill Inc., New York. 563 pp.
- Casanovas, C. (2016). *Determination of groundwater flow based on temperature data. Treball final de Màster*. Universitat Politècnica de Catalunya. 82 pp.
- Colombo, F. & Rivero, L. (2017). Quaternary over-elevated torrential channels. Characteristics and depositional significance: the Maresme model (Catalonia, NE Spain). *International Journal of Earth Sciences*, 1-14.
- Custodio, E. (1987a). Salt-fresh water interrelationships under natural conditions. In: *Groundwater Problems in Coastal Areas, Ed. (UNESCO).- Studies and Reports in Hydrology*, 45, 14-96.
- Custodio, E. (1987b). Effects of human activities on salt–fresh water relationships in coastal aquifers. In: *Groundwater Problems in Coastal Areas, Ed. (UNESCO).- Studies and Reports in Hydrology*, 45, 97-117.
- EEA (2000). Groundwater quality and quantity in Europe. Environmental assessment report No 3. European Environment Agency. Copenhagen.
- Escuder, R., Fraile, J., Jordana, S., Ribera, F., Sánchez-Vila, X. & Vázquez-Suñé, E. (2009). Hidrogeología, conceptos básicos de hidrología subterránea. *Barcelona. Editorial. Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea*, Barcelona. 768 pp.
- Ghyben, B. W. (1888). Nota in Verband met de Voorgenomen Putboring Nabij Amsterdam, Amsterdam, Tijdschr. Kon. Inst. Ing., 9, 8–22.
- Guo, H., Jiao, J. J. & Li, H. (2010). Groundwater response to tidal fluctuation in a two-zone aquifer. *Journal of Hydrology*, 381(3), 364-371.
- Herzberg, A. (1901). Die Wasserversorgung Einiger Nordseebäder, *Jour. Gasbeleuchtung und Wasserversorgung*, 44, 815–819, 842–844.

CAPÍTOL 7: BIBLIOGRAFIA

- Huyakorn, P. S., Andersen, P. F., Mercer, J. W., & White, H. O. (1987). Saltwater intrusion in aquifers: Development and testing of a three-dimensional finite element model. *Water Resources Research*, 23(2), 293-312.
- IGME, 1976. Mapa Geológico de España, escala 1:50.000, hoja de Mataro 393.
- Kim, K. Y., Chon, C. M. & Park, K. H. (2007). A simple method for locating the fresh water–salt water interface using pressure data. *Ground Water*, 45(6), 723-728.
- López-Geta, J. A. (1995). La gestión de los acuíferos costeros como fuente de un recurso importante y estratégico; progreso y futuro. *Las aguas subterráneas en la Ley de aguas española: un decenio de experiencia*. Ed. AIH. Madrid, 221-237.
- López-Geta, J. A. & Gómez-Gómez, J.D. (2007). La intrusión marina y su incidencia en los acuíferos españoles. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 15, (15.3), 266-273.
- Mas-Pla, J., Ghiglieri, G. & Uras, G. (2014). Seawater intrusion and coastal groundwater resources management. Examples from two Mediterranean regions: Catalonia and Sardinia. *Contributions to Science*, 10, 171-184.
- Meier, P. M., Carrera, J., & Sanchez-Vila, X. (1999). A numerical study on the relationship between transmissivity and specific capacity in heterogeneous aquifers. *Ground Water*, 37(4), 611-617.
- Morell, I. (1989). Salinización por intrusión marina. Aspectos teóricos y metodológicos. Aplicación a los acuíferos costeros de la provincia de Castellón. Diputación de Castellón. Castellón. 211pp.
- Pool, M., & Carrera, J. (2010). Dynamics of negative hydraulic barriers to prevent seawater intrusion. *Hydrogeology journal*, 18(1), 95-105.
- Pool, M., & Carrera, J. (2011). A correction factor to account for mixing in Ghyben-Herzberg and critical pumping rate approximations of seawater intrusion in coastal aquifers. *Water Resources Research*, 47(5). W05506
- Post, V. E. A. (2005). Fresh and saline groundwater interaction in coastal aquifers: Is our technology ready for the problems ahead?. *Hydrogeology Journal*, 13(1), 120-123.
- Reynolds, J.M. (2011). An introduction to applied and environmental geophysics. 2nd Edition. Ed. John Wiley and Sons, 712pp.
- Sakr, S. A. (1999). Validity of a sharp-interface model in a confined coastal aquifer. *Hydrogeology Journal*, 7(2), 155-160.

CAPÍTOL 7: BIBLIOGRAFIA

- Scheidleder, A., Grath, J. & Lindinger, H. (2004). The European Environment Agency indicator-based reporting about saltwater intrusion due to groundwater over-exploitation. *Proceedings 18th SWIM, Cartagena*, 609-616.
- Schlumberger Water Services, S. (2014). Manual de Diver. Ed. Schlumberger. 22 pp.
- Strack, O.D.L., 1976. A single-potential solution for regional interface problems in coastal aquifers. *Water Resour. Res.* 12 (6), 1165–1174.
- USGS (2000). Is Seawater Intrusion Affecting Ground Water On Lopez Island, Washington? USGS Fact Sheet 057-00, 9 pp.
- Vallejos, A., Sola, F. & Pulido-Bosch, A. (2015). Processes influencing groundwater level and the freshwater-saltwater interface in a coastal aquifer. *Water Resources Management*, 29 (3), 679-697.
- Werner, A. D. (2010). A review of seawater intrusion and its management in Australia. *Hydrogeology journal*, 18(1), 281-285.
- Werner, A. D. (2017). On the classification of seawater intrusion. *Journal of Hydrology*, versió “on line” pendent de publicar.
- Werner, A. D., Bakker, M., Post, V. E., Vandenbohede, A., Lu, C., Ataie-Ashtiani, B., Simmons, C. T. & Barry, D. A. (2013). Seawater intrusion processes, investigation and management: recent advances and future challenges. *Advances in Water Resources*, 51, 3-26.

REFERÈNCIES WEBS

- Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya. Departament de Territori i Sostenibilitat. Generalitat de Catalunya. Base topogràfica i Ortofoto aèria. (Consultat l'any 2017)
Disponible a: <http://www.icc.cat/vissir3/>
- Servei Meteorològic de Catalunya, S. (Consultat 2017). Climatologia del Maresme.
Disponible a: <http://meteo.cat>
- Ports de l'estat. Govern d'Espanya. Ministeri de Foment. Dades mareograf de Barcelona. (Consultat 2017).
Disponible a: <http://www.puertos.es/ca-es>