

Desarrollo del modelo hidrogeológico conceptual del acuífero costero del SE del Camp Tarragona (NE Península Ibérica), integrando información hidrogeológica, hidrológica y geofísica.

Ingrid Julietd Cubides Grimaldos

Trabajo de Grado en modalidad de Trabajo de investigación para Optar al Título de Geóloga

Director

Dr. Albert Casas Posantí

Geólogo Catedrático – Universitat de Barcelona

Codirector

Dr. Alexandre Sendrós Brea-Iglesias

Geólogo PhD – Universitat de Barcelona

Tutor

Ángel Fabián Salazar Álvarez

Geo. Universidad Industrial Santander

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2021

### Dedicatoria

*Dedico este trabajo principalmente a Dios y a la virgen por haber escogido esta carrera tan bonita para mí.*

*A mi padre José Cubides y a mi madre Clara Grimaldos por el amor incondicional, sacrificios realizados y apoyo brindado toda la vida para mi crecimiento personal y profesional.*

*A mi perrito cronitos por ser la fiel compañía y dulce en este proceso.*

*A mis padrinos Danny Dueñas y Carolina Duarte por ser como mis segundos padres y siempre orientarme a ser mejor persona y a un futuro mejor.*

*A mis primos Sofía Dueñas, Daniel Dueñas y Samuel Dueñas por ser como mis hermanitos de vida, brindándome su cariño, amor y alegría.*

*A Carlos Pinilla, por ser mi fortaleza, compañía y colega durante estos seis años de obstáculos y felicidad.*

*A mis amigos Mery Ramos, Juliana Guerrero, Zayime Castellanos, Juan Ávila, Lina Sánchez, Pilar Rueda, María Cabrera, Ana Uribe, Laura Gómez, Anderson Moreno por la compañía, animo, motivación y aportes brindados en este proceso.*

*A todas las mujeres que aman la ciencia y que luchan cada día por un espacio en la comunidad científica.*

*A mi alma mater, la universidad industrial de Santander por darme la oportunidad de realizar uno de mis sueños en esta institución.*

*A la vida por permitirme seguir mis sueños, permitiéndome enfrentar todas las dificultades, tropiezos, desafíos y miedos durante este proceso de ser una mejor versión de mí tanto personal como profesional.*

### **Agradecimientos**

Mis mayores y gratos agradecimientos

A mi director el Dr. Albert Casas Posantí, por darme su voto de confianza creyendo en mí sin conocerme, brindándome la oportunidad de realizar un gratificante proyecto junto a él.

A mi Codirector Dr. Alexandre Sendrós Brea-Iglesias por el conocimiento compartido, gran disposición, acompañamiento, paciencia, comprensión, sugerencias y apoyo durante todo este proceso de trabajo y sobre todo por el tiempo dedicado a escucharme y a corregirme a pesar de los miles de kilómetros que nos separa.

A mi tutor Geol. Ángel Fabián Salazar y actual estudiante de maestría de geofísica de la Universidad Industrial de Santander, por brindarme su tiempo para guiarme, enseñarme y animarme a terminar este proyecto de la mejor manera.

A la Dr Rocío del Pilar Bernal Olaya por ser la persona quién me enseñó el amor por la geofísica demostrándome que es una rama versátil la cual es aplicable en toda situación, pero siempre en pro de la comunidad.

Al capítulo estudiantil SEG-CHAPTER, por brindarme la posibilidad de ser una mejor líder permitiéndome superar miedos y adversidades logrando contribuir en varias actividades en pro de la academia.

A cada docente de la escuela de geología de la universidad industrial de Santander por el conocimiento compartido para mi crecimiento profesional y personal.

A todos mis amigos, compañeros y colegas de carrera por trabajar y compartir los conocimientos científicos durante toda esta etapa universitaria, intercambiando experiencias, sonrisas, momentos de estrés, noches largas y miles de recuerdos que llevo en mi corazón.

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	18
1. Planteamiento del Problema .....	21
2. Objetivos .....	22
2.1 Objetivo General .....	22
2.2 Objetivos Específicos.....	22
3. Localización .....	23
4. Marco Teórico.....	24
4.1 Marco Geológico .....	24
4.1.1 Tectónica local .....	26
4.1.2 Litología local .....	27
4.1.3 Estratigrafía local .....	29
4.1.3.1 Jurásico – Cretácico .....	29
4.1.3.2 Mioceno – Plioceno. ....	30
4.1.3.3 Cuaternario.....	31
4.2 Marco Hidrogeológico .....	34
4.2.1 Unidades Hidrogeológicas .....	36
4.2.1.1 Acuífero Inferior. ....	36
4.2.1.1.1 Acuífero Jurásico-Cretácico.....	36
4.2.1.2 Acuífero Superior.....	37
4.2.1.2.1 Acuífero Mioceno. ....	37
4.2.1.2.2 Acuífero Cuaternario. ....	37

4.2.2 Contexto hidrogeoquímico.....	40
4.2.3 Evolución histórica de la intrusión marina .....	42
4.3 Marco Hidrológico.....	44
4.4 Marco Geofísico.....	46
4.4.1 Prospección Eléctrica.....	47
4.4.1.1 Principio teórico y físico.....	51
4.4.1.2 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV).....	57
4.4.1.2.1 Procedimiento de Adquisición de SEV.....	58
4.4.1.3 Tomografía de resistividad eléctrica (TRE).....	60
4.4.1.3.1 Procedimiento de Adquisición de TRE.....	61
5. Metodología .....	64
5.1 Etapa conceptual .....	65
5.1.1 Fase 1: Claridad sobre la problemática a desarrollar y objetivos a cumplir .....	65
5.1.2 Fase 2: Recopilación de información.....	65
5.1.3 Fase 3: Control de calidad de información recopilada.....	66
5.1.4 Fase 4: Selección de inventario de puntos .....	66
5.1.4.1 Hidrogeología. ....	67
5.1.4.1.1 Piezometría. ....	67
5.1.4.1.2 Hidrogeoquímica.....	69
5.1.4.2 Hidrología .....	70
5.1.4.3 Geofísica .....	71
5.2 Etapa Desarrollo.....	73
5.2.1 Fase 5: Procedimiento de datos Pre-Campo .....	73

5.2.1.1 Hidrogeología. ....	73
5.2.1.1.1 Piezometría. ....	73
5.2.1.1.2 Hidrogeoquímica.....	73
5.2.1.2 Hidrología. ....	76
5.2.1.3 Geofísica .....	78
5.2.2 Fase 6: Campo.....	79
5.2.3 Fase 7: Procesamiento de datos Post-Campo.....	81
5.3 Etapa de resultados .....	82
5.3.1 Fase 8: Integración y análisis de resultados.....	82
5.3.2 Fase 9: Elaboración de entregables.....	83
6. Análisis e interpretación de resultados .....	84
6.1 Caracterización hidrogeológica .....	84
6.1.1 Análisis e interpretación piezométrica.....	84
6.1.2 Análisis e interpretación hidrogeoquímica .....	87
6.1.2.1 Análisis estadístico descriptivo.....	87
6.1.2.2 Tipos de agua .....	89
6.1.2.3 Análisis de la distribución espacial hidrogeoquímica de las aguas subterráneas. ....	97
6.1.2.4 Análisis de los iones mayoritarios (CE, Cl, SO <sub>4</sub> , NO <sub>3</sub> y Na) según la normativa de la calidad del agua del consumo humano en España, 2020.....	100
6.1.2.5 Análisis de las primordiales relaciones iónicas. ....	104
6.1.2.5.1 Relación rCl/rHCO <sub>3</sub> . ....	104
6.1.2.5.2 Relación rCl/rCE.....	106
6.1.2.5.3 Relación rNa/rCl. ....	108

6.1.2.5.4 Relación $rNO_3/rSO_4$ .....	110
6.1.2.5.5 Relación $rSO_4/rCl$ .....	112
6.2 Caracterización hidrológica .....	114
6.2.1 Balance hídrico .....	115
6.3 Caracterización geofísica .....	117
6.3.1 Análisis e interpretación de sondeos eléctricos verticales (SEV) .....	117
6.3.1.1 Corte A-A' .....	121
6.3.1.2 Corte B-B' .....	122
6.3.1.3 Corte C-C' .....	123
6.3.2 Análisis e interpretación de tomografías de resistividades eléctricas (TRE) .....	124
6.3.2.1 Perfil 1, 2 y 5 .....	126
6.3.2.2 Perfil 3 .....	132
6.3.2.3 Perfil 6 .....	134
6.4 Modelo hidrogeológico conceptual .....	136
7. Conclusiones .....	139
8. Recomendaciones .....	145
Referencias Bibliográficas .....	147
Apéndices .....	155

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Resumen general hidrogeológico del área de interés.....	39
Tabla 2. Resistividades propias del agua en función al origen y composición de cada una.....	50
Tabla 3. Idoneidad general de las principales configuraciones o arreglos geométricos .....	56
Tabla 4. Datos de muestreo más recientes de niveles piezométricos del 2012.....	68
Tabla 5. Items necesarios para el balance hídrico con sus respectivas ecuaciones para el caso de estudio.....	77
Tabla 6. Parámetros estadísticos descriptivos de las características fisicoquímicas del agua subterránea del área de estudio durante la temporada secas de verano y otoño de 2015-2020 ....	88
Tabla 7. Resumen hidrogeoquímico de todos los puntos desde la A hasta la R localizados en el área de estudio.....	95
Tabla 8. Resultado de los cálculos del balance hídrico en el área de estudio.....	116
Tabla 9. Información de los perfiles SEV .....	120
Tabla 10. Información de los perfiles TRE.....	125

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Localización del área de estudio en la comarca de Tarragonés.....	23
Figura 2. Geología Regional del sistema orográfico de catalánides .....	25
Figura 3. Proceso tectónico que originó la cuenca del Camp de Tarragona.....	26
Figura 4. Mapa geológico de la comarca de Cataluña a escala 1:50.000, Tarragonés 26 .....	28
Figura 5. Columna estratigráfica base del área de estudio.....	33
Figura 6. Subsistemas y unidades hidrogeológicas del sistema No 74.....	35
Figura 7. Corte hidrogeológico general y esquemático del área de interés .....	38
Figura 8. Gráfico básico de intrusión marina.....	41
Figura 9. Representación gráfica del balance hídrico .....	45
Figura 10. Relación entre la resistividad ( $\Omega m$ ) y la concentración (g/L) de NaCl en el agua (salinidad) .....	49
Figura 11. Rangos generales de la variación de la resistividad eléctrica ( $\Omega m$ ) de las rocas y minerales más comunes presentes en el planeta tierra.....	51
Figura 12. Distribución y funcionamiento básico y general de la prospección eléctrica .....	52
Figura 13. Resistividad real y aparente de acuerdo con el medio natural en el que se encuentre	54
Figura 14. Líneas equipotenciales (Verdes) y líneas de corriente o de flujo (Naranja) en un medio homogéneo.....	54
Figura 15. Diversas distribuciones de los electrodos sobre la superficie acorde a las principales configuraciones o arreglos geométricos en la toma de la resistividad eléctrica .....	56
Figura 16. Resistividad del subsuelo en área geológicamente formada por estratos horizontales .....	58

Figura 17. Configuración básica sobre el terreno distribuida de forma treta puntual para la adquisición de sondeos eléctricos verticales..... 59

Figura 18. Resistividad del subsuelo en área con geología / anomalía medianamente compleja 61

Figura 19. Adquisición de tomografías de resistividades eléctricas ..... 62

Figura 20. Proceso de adquisición de tomografías de resistividad eléctrica en campo ..... 63

Figura 21. Esquema general de las etapas principales correspondientes a la metodología del proyecto..... 64

Figura 22. Localización de los puntos de muestreo hidrogeoquímicos seleccionados para el área de interés ..... 69

Figura 23. Formatos base de organización del estado del arte para datos hidrogeoquímicos ..... 70

Figura 24. Selección de la información a partir de las bases de datos digitales existentes y formato de organización de dicha información ..... 71

Figura 25. Localización de los puntos de líneas SEV seleccionados para el área de interés..... 72

Figura 26. Plataforma del programa de Easy\_Quim v 5.0..... 74

Figura 27. Diagramas químicos principales para aguas subterráneas..... 75

Figura 28. Datos hidrogeoquímicos digitales procesados..... 76

Figura 29. Plataforma del programa de Easy\_Bal ..... 77

Figura 30. Diagrama ilustrativo de proceso para el procesamiento de datos sev. .... 79

Figura 31. Diagrama ilustrativo de proceso para la adquisición en campo de datos TRE ..... 80

Figura 32. Diagrama ilustrativo de proceso para el procesamiento de los datos obtenidos mediante los perfiles TRE..... 81

Figura 33. Mapa piezométrico ..... 86

Figura 34. Diagramas hidrogeoquímicos del punto A durante los años del 2015 hasta el 2020. 91

Figura 35. Diagramas hidrogeoquímicos de las concentraciones constantes durante 2015-2020 de todos los puntos extraído del ACA ..... 96

Figura 36. Mapa hidrogeológico con los diagramas de stiff correspondientes a cada uno de los puntos hidrogeoquímicos seleccionados del ACA ..... 99

Figura 37. Gráficas estadísticas de los iones mayoritarios principales vs la altura y distancia hacia el mar ..... 102

Figura 38. Gráficas estadísticas del sulfato vs la altura y distancia hacia el mar ..... 103

Figura 39. Gráficas estadísticas y mapa de la relación  $rCl/rHCO_3$ ..... 105

Figura 40. Gráficas estadísticas y mapa de la relación  $rCl/rCE$  ..... 107

Figura 41. Gráficas estadísticas y mapa de la relación  $rCl/rCE$  ..... 109

Figura 42. Gráficas estadísticas y mapa de la relación  $rNO_3/rSO_4$  ..... 111

Figura 43. Gráficas estadísticas y mapa de la relación  $rSO_4/ rCl$  ..... 113

Figura 44. Precipitaciones medias mensuales para el periodo 2015-2020 ..... 115

Figura 45. Información de las resistividades acorde a la litología existente en el área de estudio ..... 117

Figura 46. Localización de los sondeos eléctricos verticales en el área de estudio..... 119

Figura 47. Corte de sondeos eléctricos verticales de Sev To 14, Sev To 13, Sev To 10, Sev To 20 y Sev To 32 ..... 122

Figura 48. Corte de sondeos eléctricos verticales de Sev To 15, Sev To 13, Sev To 7, Sev To 8 y Sev 18..... 123

Figura 49. Corte de sondeos eléctricos verticales de Sev 27, Sev To 6, Sev 24, Sev 21 y Sev To 12..... 124

Figura 50. Localización de las tomografías de resistividades eléctricas en el área de estudio.. 125

Figura 51. Fotos de la salida de campo de la adquisición TRE del perfil 1..... 126

Figura 52. Pseudosección de la TRE del perfil 1 ..... 127

Figura 53. Fotos de la salida de campo de la adquisición TRE del perfil 2..... 128

Figura 54. Pseudosección de la TRE del perfil 2..... 129

Figura 55. Fotos de la salida de campo de la adquisición TRE del perfil 5..... 130

Figura 56. Pseudosección de la TRE del perfil 5..... 131

Figura 57. Fotos de la salida de campo de la adquisición TRE del perfil 3..... 132

Figura 58. Pseudosección de la TRE del perfil 3..... 133

Figura 59. Fotos de la salida de campo de la adquisición TRE del perfil 6..... 134

Figura 60. Pseudosección de la TRE del perfil 6..... 135

Figura 61. Modelo hidrogeológico conceptual ..... 138

**Lista de Apéndices**

	<b>pág.</b>
Apéndice A. Desarrollo del proceso del balance hídrico del área de estudio.....	155
Apéndice B. Modelos geoelectricos de los 25 perfiles de sondeos eléctricos verticales.....	161

## Glosario

**ACA “Agencia Catalana de Aguas”:** Empresa pública de la Generalidad de Cataluña que se encarga de la planificación y la gestión del ciclo del agua de acuerdo con los principios básicos de la Directiva marco del agua con el fin de garantizar el uso sostenible de los recursos hídricos en Cataluña.

**Acuífero costero:** Los acuíferos costeros son aquellos que pueden ser libres, confinados y semi-confinados, sin embargo, la característica que los distingue es la presencia de dos fluidos con densidades distintas: agua dulce con una concentración inferior y agua salada con una densidad superior.

**Balance hídrico:** En hidrología se basa en la aplicación del principio de conservación de masas de agua, analizando la entrada y salida de agua de un espacio territorial a lo largo del tiempo.

**Hidrogeología:** Estudia el almacenamiento y comportamiento de las aguas subterráneas en lo relacionado al origen, circulación, condicionamientos geológicos, interacción con los suelos, rocas y humedales; estado y propiedades (físicas, químicas, bacteriológicas y radiactivas).

**Hidrogeoquímica:** Estudio de los procesos de interacción agua-sólido y reacciones químicas que afectan la distribución y circulación de especies disueltas en aguas naturales, combinada con la geología y la biología.

**Hidrología:** es una rama de las geociencias que estudia el agua y su impacto en la superficie terrestre: distribución, circulación, propiedades físicas, químicas y mecánicas en los océanos, atmósfera y superficie terrestre.

**IDESCAT “Instituto de Estadística de Cataluña”:** Organismo oficial responsable de la recopilación y publicación de estadísticas en la comunidad autónoma de Cataluña , España .

**IGME “Instituto Geológico y Minero de España”:** Organismo Público de Investigación, con carácter de organismo autónomo, adscrito al Ministerio de Ciencia e Innovación.

**Intrusión marina:** Entrada de agua salada en una zona de un acuífero ocupada anteriormente por agua dulce.

**SEV “Sondeos Eléctricos Verticales”:** Consiste en determinar el parámetro de resistividad a profundidad, mediante la inyección de corriente eléctrica en el subsuelo y la medición del potencial resultante a través de un arreglo electródico tetraelectródico.

**Sobreexplotación acuífera:** Se produce cuando la extracción de agua del subsuelo se extrae a un ritmo superior al de la infiltración o recarga natural

**TRE “Tomografías de Resistividad Eléctrica”:** Consiste en la inyección de corriente en el subsuelo mediante un par de electrodos y la respuesta medida de la diferencia de potencial [voltaje] a través de otro par de electrodos llamados de potencial; la distribución del potencial eléctrico permite la reconstrucción de la resistividad eléctrica asociada a los diferentes materiales o litologías que conforman el subsuelo.

## Resumen

**Título:** Desarrollo del modelo hidrogeológico conceptual del acuífero costero del SE del Camp Tarragona (NE Península Ibérica), integrando información hidrogeológica, hidrológica y geofísica.\*

**Autor:** Ingrid Julietd Cubides Grimaldos\*\*

**Palabras Clave:** Acuífero costero, Geoeléctrica, Hidrogeología, Hidrogeoquímica, Hidrología.

### Descripción:

Los acuíferos costeros del litoral mediterráneo español están sometidos de forma generalizada a una intensa explotación para cubrir la creciente demanda hídrica para usos domésticos, turísticos, agrícolas e industriales. El resultado de la acelerada explotación de los acuíferos principalmente por las extracciones por bombeo ha generado la creciente salinización debido a la intrusión marina que se puede presentar en las aguas subterráneas alterando rápidamente el equilibrio natural entre aguas y originando un deterioro de la calidad del agua obtenida y a su vez limitando su utilización para determinados usos necesarios de la comunidad.

Por ello en España, crearon instituciones encargadas del monitoreo del recurso natural hídrico, sin embargo, para un análisis más detallado del área de interés ubicada en la región de Cataluña dentro de la comarca de Tarragonés, se realiza el siguiente informe de proyecto de grado en modalidad de trabajo de investigación con el propósito de proponer la caracterización hidrogeológica e hidrológica de los sistemas acuíferos más un análisis geofísico mediante campañas de campo de prospección geoeléctrica que permita corroborar la información, definiendo con mayor precisión un modelo hidrogeológico del área de estudio.

---

\* Trabajo de Grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Albert Casas Posantí. Geólogo. PhD. Codirector: Alexandre Sendrós Brea-Iglesias. Geólogo. PhD. Tutor: Ángel Fabián Salazar Álvarez. Geólogo.

**Abstract**

**Title:** Development of a conceptual hydrogeological model for the coastal aquifer in SE of Camp Tarragona (NE Iberian Peninsula), using hydrogeological, hydrological, and geophysical information.\*

**Author(s):** Ingrid Julietd Cubides Grimaldos \*\*<sup>1</sup>

**Key Words:** Coastal aquifer, geoelectrics, hydrogeology, hydrogeochemistry, hydrology.

**Description:**

With the purpose of fulfilling the increasing water demand (domestic, touristic, agricultural and industrial uses), coastal aquifers along the Spanish Mediterranean coast have been subjected to intense exploitation. The overexploitation of these aquifers, which is mainly done through pumping, have led to a rapid alteration of the natural balance between fresh and marine waters and have produced their salinization from a marine intrusion, limiting its possible uses in the community.

Because of this, Spain created organizations in charge of monitoring water. However, to have a more detailed of the area of interest, located in Catalonia within the Tarragona region, the following undergraduate project report is carried out in a research work modality with the purpose of proposing the hydrogeological and hydrological characterization of this aquifer system is proposed, through a geophysical analysis completed in the field using geoelectrics. This approach will allow to define more precisely a hydrogeological model of the area.

---

\* Bachelor Thesis

\*\*Physicochemical Engineering Faculty. Geology School. Director: Albert Casas Posantí. Geologist. PhD. Co-director: Alexandre Sendrós Brea-Iglesias. Geologist. PhD. Tutor: Ángel Fabián Salazar Álvarez. Geologist.

## Introducción

Los acuíferos son un conjunto de rocas o sedimentos de formaciones subterráneas que están saturadas y suficientemente permeables para transmitir cantidades económicas de agua a pozos y manantiales generando a todo ser vivo una mayor posibilidad de acceso a un recurso hídrico potable (Fetter, 2000). España es un país que se encuentra mayormente rodeado de costas continentales e insulares y es allí donde se localiza la mayor parte de su población, así como una serie de acuíferos de vital interés debido al volumen y carácter estratégico de los recursos hídricos que almacenan. Los acuíferos, además poseen una relación primordial con los humedales y ecosistemas presentes a su alrededor, influyendo de gran manera en la génesis y preservación de dichas aguas, es por ello por lo que presentan una significativa utilidad para la supervivencia especialmente del ser humano (López-Geta, 1995).

Sin embargo, el acelerado aumento del desarrollo económico y demográfico que han sufrido las zonas costeras españolas han generado un desequilibrio natural producido por la salinización resultado de mezcla de agua dulce y salada generando una intrusión marina. La intrusión marina es un proceso dinámico en donde el agua salada proveniente del mar avanza tierra adentro en los períodos de menos recarga del acuífero y retrocede hacia el mismo cuando aumenta la recarga de agua dulce proveniente del continente dando como consecuencia la mezcla de estas aguas y asimismo la contaminación de los acuíferos que suplen la necesidad del recurso hídrico (Losada *et al.*, 2014).

Por lo tanto, el siguiente proyecto de grado en modalidad de trabajo de investigación realizado bajo la supervisión y apoyo de la Universitat de Barcelona mediante el Grupo de investigación Geología Económica, Ambiental e Hidrogeológica, tiene el propósito de

desarrollar un modelo hidrogeológico conceptual del acuífero costero existente en el SE del Camp Tarragona (NE Península Ibérica), mediante la integración de información hidrogeológica, hidrológica y geofísica y de esta manera lograr contribuir a la mejor caracterización de las formaciones acuíferas e intrusión marina presente, mediante la determinación de posibles zonas afectadas por la salinización por medio de prospecciones hidrogeológicas, hidrológicas y geofísicas específicamente usando métodos eléctricos.

Para el caso de la hidrogeología e hidrología se trabaja mediante la recopilación de información disponible de todos los datos piezométricos y de calidad de agua subterránea del sistema acuífero costero existente tanto en los registros bibliográficos como en las bases de datos disponibles en la Agencia Catalana del Agua (ACA), Servicio Meteorológico de Cataluña (Meteocat-Ruralcat), Instituto de Estadística de Cataluña (Idescat), Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y demás entidades municipales y empresas suministradoras del recurso hídrico, con el fin de realizar mapas piezométricos, delimitar conos de bombeo, determinar la dirección del flujo preferente de las aguas subterráneas, trazar mapas de concentración de los indicadores físico-químicos de las aguas subterráneas (conductividad eléctrica, concentración en ion cloruro, etc.) y analizar las facies geoquímicas a partir de los diagramas clásicos de Piper, Schoeller, Stiff y el diagrama de salinización para clasificar aguas de riego.

Para la prospección geofísica se trabaja con los métodos geoeléctricos tanto de sondeos eléctricos verticales (SEV), los cuales fueron adquiridos en el año 1985 por el IGME y se encuentran disponibles actualmente como datos crudos en el SIGEOF, 2021, para su posterior procesamiento e interpretación con el fin de conocer la distribución general y a su vez el comportamiento de la resistividades presentes en el suelo del área de estudio, como también de datos tomados recientemente en campo de tomografía de resistividad eléctrica (TRE), la cual es

una excelente técnica para corroborar e identificar posibles zonas afectadas por la salinización y caracterizar las formaciones acuíferas dado el contraste de resistividades eléctricas entre ambos medios y su alta resolución.

## 1. Planteamiento del Problema

Los acuíferos costeros del litoral mediterráneo español están sometidos de forma generalizada a una intensa explotación para cubrir la creciente demanda hídrica para usos domésticos, turísticos, agrícolas e industriales. El resultado de la acelerada explotación de los acuíferos principalmente por las extracciones por bombeo ha generado la creciente salinización debido a la intrusión marina que se puede presentar en las aguas subterráneas alterando rápidamente el equilibrio natural entre aguas y originando un deterioro de la calidad del agua obtenida y a su vez limitando su utilización para determinados usos necesarios de la comunidad.

Es por ello por lo que, en España, para prevenir el deterioro de la calidad de los recursos hídricos subterráneos la Agencia Catalana del Agua (ACA) ha desarrollado una red para el monitoreo de la salinidad y de los descensos piezométricos. Esta red, permite tener un conocimiento más al detalle de las zonas posiblemente afectadas tanto por intrusiones marinas como por agentes antropogénicos. Sin embargo, para complementar la información de dichas áreas, se propone además de un análisis tanto hidrogeológico orientado a la piezometría y distribución hidrogeoquímica del área de interés como hidrológico basado en el balance hídrico de los sistemas acuíferos, un análisis geofísico mediante campañas de campo de prospección geoeléctrica que permita corroborar la información litológica y estratigráfica y definir con mayor precisión un modelo hidrogeológico en el área de estudio. Por lo tanto, se plantea la recopilación de datos brutos de campañas de prospección geofísica de SEV disponibles en la página SIGEOF, 2021, de acuerdo con ello, la realización de campañas de prospección geofísica específicamente del método TRE, para incrementar la resolución de las áreas de mayor interés desde el punto de vista hidrogeológico e hidrológico.

## 2. Objetivos

### 2.1 Objetivo General

Elaborar un modelo hidrogeológico conceptual del acuífero costero del SE del Camp de Tarragona a partir de datos hidrogeológicos, hidrológicos y geofísicos.

### 2.2 Objetivos Específicos

Definir las direcciones de flujo del agua subterránea a partir de la elaboración del mapa piezométrico.

Caracterizar la hidrogeoquímica de las aguas subterráneas.

Identificar las posibles zonas afectadas por la intrusión marina.

Realizar balance hídrico del área de estudio, identificando posibles zonas de recarga, descarga e interacciones acuíferas.

Determinar la geometría de las formaciones acuíferas presentes al SE de la Camp de Tarragona mediante métodos geofísicos como sondeos eléctricos verticales (SEV) y tomografías de resistividad eléctrica (TRE).

Comprobar las conexiones acuíferas

Desarrollar un modelo hidrogeológico conceptual del área de estudio

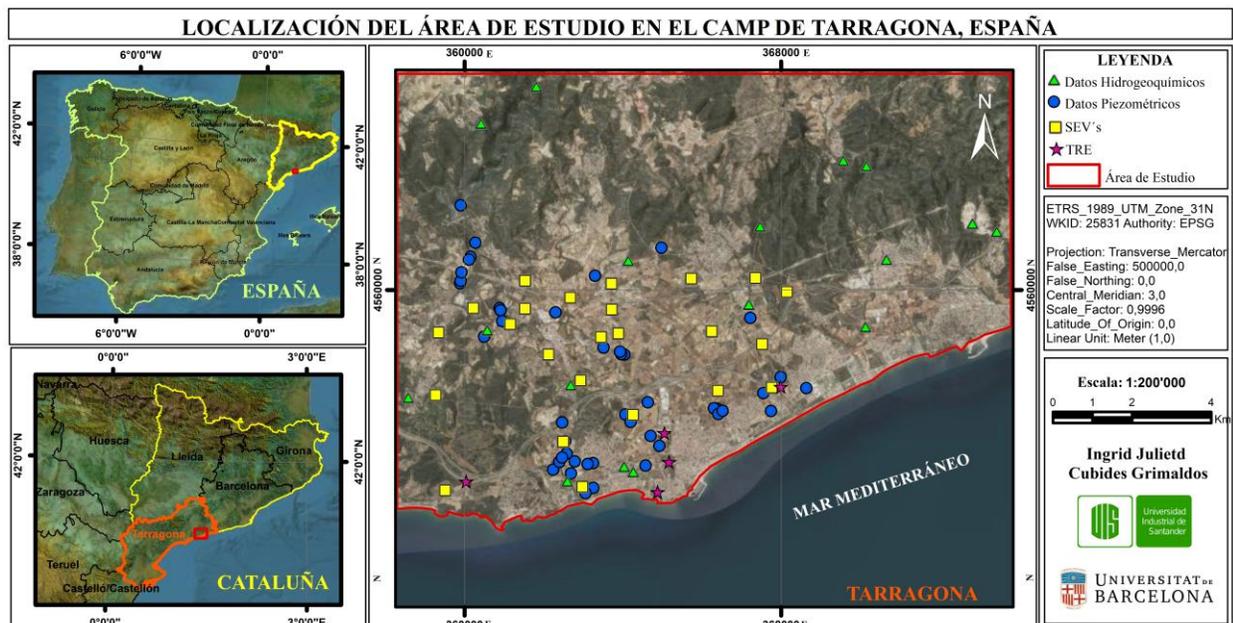
### 3. Localización

El área de estudio se ubica al NE de España en la región de Cataluña dentro de la comarca de Tarragonés, situado entre la latitud 41° 17' 75" N y la longitud 1° 48' 29" E, limitado al W por el municipio el Catllar, al N por los municipios de Salomó y Bonastre, al E por Roda de Berà, al S por Torredembarra y en la zona central por la Pobla de Montornès.

Presenta un área de 147 km<sup>2</sup>, siendo la zona de mayor interés la localizada desde el embalse de Catllar a la desembocadura de la Riera de Gaià, que comprende alrededor de 58.4 km<sup>2</sup> (Figura 1).

**Figura 1.**

*Localización del área de estudio en la comarca de Tarragonés*



*Nota.* El mapa representa la localización del área de estudio donde se identifican los pozos utilizados para la caracterización hidrogeoquímica (triángulos verdes), la distribución de los puntos de agua para el análisis piezométrico (círculos azules), la localización de los Sondeos Eléctricos Verticales – SEV (cuadros amarillos) y de las Tomografías de Resistividad Eléctrica – TRE (estrellas fucsias). Tomado y modificado de Esri, 2021.

## 4. Marco Teórico

### 4.1 Marco Geológico

El área de estudio regionalmente se encuentra en el sistema orográfico de los Catalánides de edad orogénica Herciniana - Alpina, conformada por una serie de alineaciones montañosas en dirección NE—SW desde la cuenca Empordà hasta el delta del Ebro, originando barreras altamente topográficas paralelas a la costa, las cuales separa la depresión del Ebro del Mar Mediterráneo (Llopis, 1943).

El sistema orográfico de los catalánides se encuentra principalmente formada por dos cordilleras (Litoral - Prelitoral) compuestas por fracturas transversales, longitudinales y situadas paralelamente a la costa (Llopis, 1943). La Cordillera litoral es aquella que encuentra más próxima al mar, posee una altitud modesta de máximo 600 m, con longitud aproximada de 150 Km y además desaparece a la altura del pueblo de El Vendrell (a escasos km al E de la cuenca del río Gaià) adentrándose en el mar. La cordillera prelitoral es la alineación del sistema orogénico más importante con una longitud aproximada de 250 Km (**Figura 2**) (Vera, 2004).

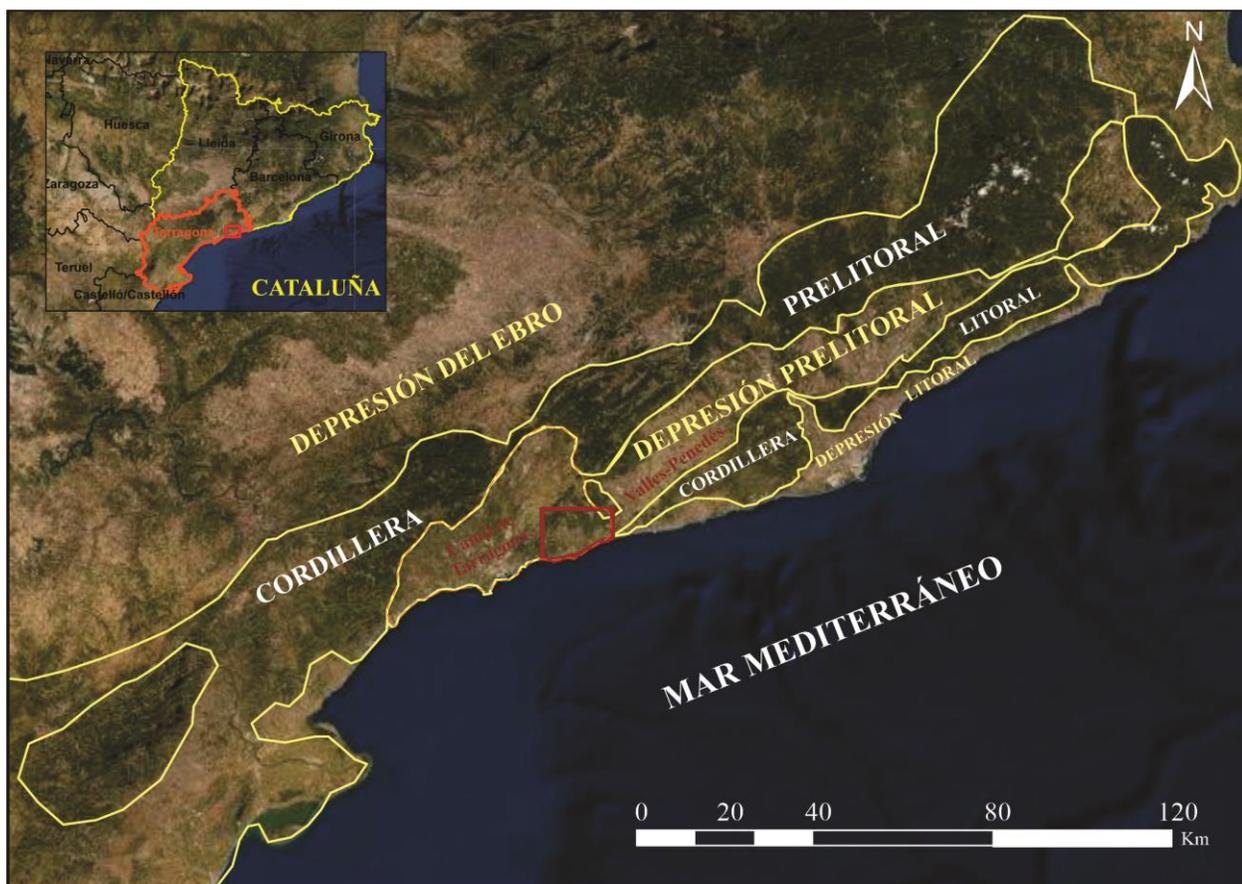
Dichas cordilleras se encuentran conformadas por un complejo sistema de horst y graben compuestos por bloques orientados ENE-WSW a NE—SW, los cuales reflejan la superposición de estructuras generadas por proceso compresivos paleógenas y extensivas neógenas. En la zona central la estructura paleógena posee un sistema de cabalgamientos corticales sobre la cuenca del Ebro afectado por fallas normales generadas durante la apertura extensiva de la Cuenca Catalana Balear en el Oligoceno Superior – Mioceno Inferior. Estas fallas normales principalmente buzanan hacia el SE, correspondiendo a su vez a la inversión tectónica de cabalgamiento previos, en donde el movimiento de estas es responsable de la topografía y del origen de los bloques

basculados hacia el NW presentes actualmente, con zonas elevadas en bloques inferiores y zonas deprimidas en la parte adyacente de los bloques superiores (Vera, 2004).

En las zonas deprimidas ("grabens") enmarcadas por ambas cordilleras o cuencas exhumadas denominada depresión prelitoral, se sitúan las comarcas naturales, Vallés-Penedés-Campo de Tarragona compuestas por sucesiones oligocenas superiores a cuaternarias (Cabrera & Calvet, 1996) y es allí donde se sitúa el área de estudio.

**Figura 2.**

*Geología Regional del sistema orográfico de catalánides*



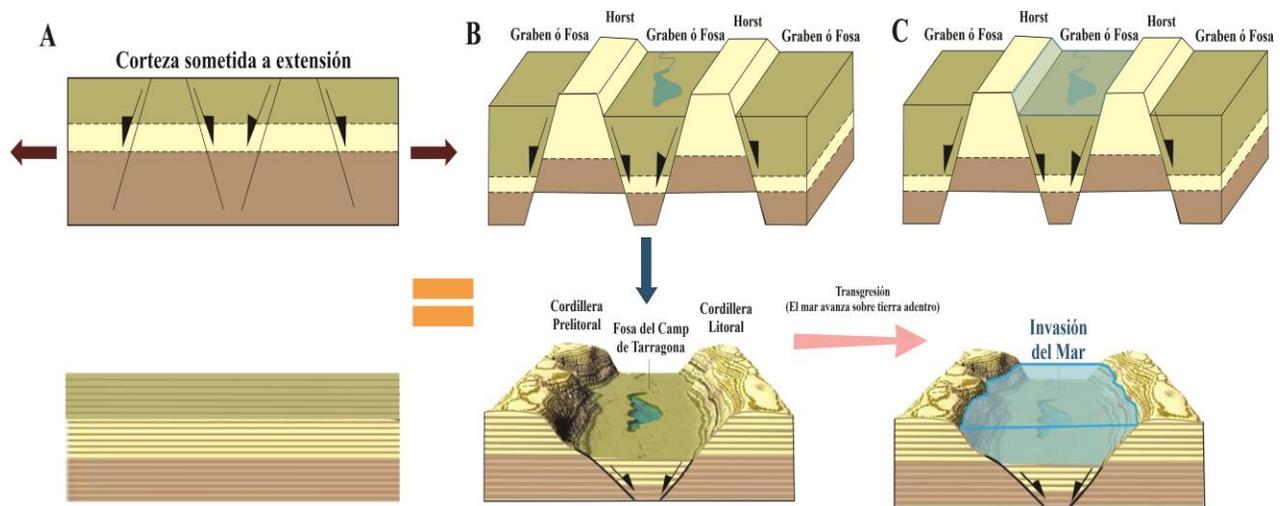
*Nota.* Sistema orográfico de catalánides, Polígono Rojo – Área de estudio. Modificado de Llopis, 1943.

**4.1.1 Tectónica local**

Localmente se sitúa en la estructura geológica denominada depresión prelitoral en donde se encuentra la cuenca neógena exhumada del Campo de Tarragona. La cuenca se generó durante un periodo extensivo de la corteza como una fosa tectónica de edad oligocena en la época del mioceno (aproximadamente 20 Ma). En la fosa se depositaron rellenos de tipo sedimentario tanto marinos (Mioceno) como continentales (Cuaternarios) por denudación del borde meridional de la Cordillera Prelitoral comprendida entre las cordilleras prelitoral y litoral (**Figura 3**), con orientación NE-SW, limitada al NE con los relieves mesozoicos del Macizo de Bonastre y del Bloc del Gaià y al NW con los relieves paleozoicos y mesozoicos de la sierra de Miramar y del Bloc de Prades (IGME, 1986).

**Figura 3.**

*Proceso tectónico que originó la cuenca del Camp de Tarragona*



*Nota.* (A) En el Mioceno la corteza es sometida a procesos de extensión (B) Las deformaciones generan estructuras de Horts y grabens (Fosa Camp de Tarragona) (C) Debido a transgresiones marinas la fosa Camp de Tarragona es invadida tierra a dentro por el mar generando la depositación de rocas tipo sedimentario marino. Modificada de Rius, 2021.

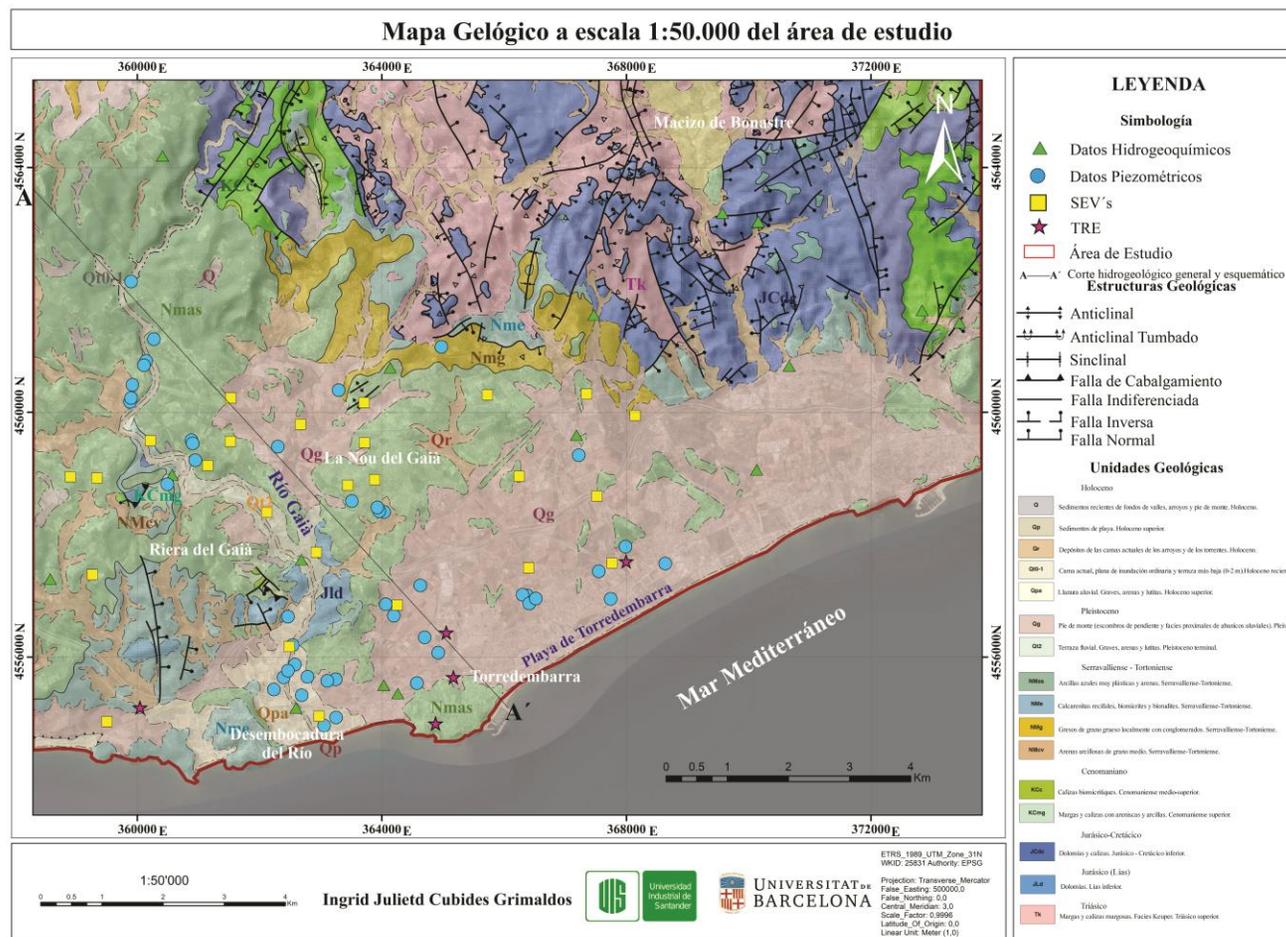
#### ***4.1.2 Litología local***

Dicha cuenca se forma, tanto sobre, como por, materiales mesozoicos, compuestos generalmente por un conjunto de sedimentos detríticos, posteriormente culmina con la depositación de materiales cuaternarios como resultado de la denudación de los materiales de los relieves circundantes y la formación de las terrazas fluviales de la riera de Gaia generando piedemontes y abanicos aluviales y al E de la cuenca Camp De Tarragona (IGME, 1986) donde se localiza el área de estudio. Hacia el NE del área de estudio se sitúa el macizo de Bonastre, el cual se encuentra altamente fracturado por los procesos extensivos. Compuesto litológicamente tanto por margocalizas del Triásico superior, características de ambientes sedimentarios lacustres salobres, como por tres niveles de dolomías y calizas del Jurásico de la siguiente manera: En la base por dolomías oscuras y fétidas, suprayacidas por una serie de calcarías blanca y hacia el límite/borde por niveles margosos de poca potencia (IGME, 1986).

El resto del área de estudio se encuentra en el valle aluvial de la Riera del Gaià específicamente al pie del Macizo de Bonastre. El valle está compuesto por sedimentos que corresponden al cauce del río actual, donde predominan las gravas del Pleistoceno originadas por los fenómenos erosivos del Cuaternario. Esta unidad agrupa grandes zonas compuestas por sedimentos cuaternarios provenientes del pie de monte del Macizo de Bonastre, apoyados en los relieves principales y formando a su vez importantes acumulaciones pleistocénicas (Qg), como se logra observar en gran parte del SE del área de estudio. En las zonas de gran erosión (**Figura 4**) que afectan a los sedimentos cuaternarios, afloran unidades de arcillas y arenas del Mioceno, mayormente del Mioceno medio-superior (Nmas), las cuales son arcillas azules muy plásticas con intercalaciones de arenas de ambiente sedimentario marino de mar cerrado (IGME, 1986).

Figura 4.

Mapa geológico de la comarca de Cataluña a escala 1:50.000, Tarragonés 26



Nota. Última actualización del mapa geológico del área de estudio a escala 1:50.000, con los respectivos puntos de muestreo hidrogeoquímicos, piezométricos y

líneas

geofísicas

levantadas.

Modificado

de

ICGC,

2017b.

### ***4.1.3 Estratigrafía local***

El área de estudio está compuesta principalmente por sedimentos Jurásico - Cretácico, Miocenos y Cuaternarios (**Figura 5**). Según FCIHS, 2012, la estratigrafía se encuentra descrita de la siguiente manera:

**4.1.3.1 Jurásico – Cretácico.** Se describen a continuación las formaciones geológicas que la conforman.

Dolomías - Lías inferior (Jld): Corresponde a una dolomía microcristalina violácea, sumamente tectonizada, que se corresponde a la serie de unos 50-100m constituido por dolomías granudas de color oscuro, bien estratificadas.

Dolomías y Calizas. Jurásico-Cretácico inferior (JCdc): De potencia máxima de 150 m. Es un paquete dolomítico de color negro, llamado formación “Peñas negras”. Corresponde a una serie compresiva depositada sobre una plataforma estable, equivalente lateral de las facies pelágicas de la Cuenca del Ebro. Y calizas microcristalinas a biomicriticas de 30 m de potencia.

Margas y calizas con areniscas y arcillas – Cenomaniano superior (KCmg): En la base hay afloramientos de marga con intercalaciones de caliza micrítica que contienen ostrácodos y miliólidos. La serie continúa progresivamente con areniscas rojas y arcillas, con intercalaciones de niveles de yeso y microconglomerados, en los que los guijarros son de carbonatos del Cretácico. El potencial es mayor de 30-40 metros. Área sedimentaria lacustre.

Calizas biomicriticas del Cenomaniano medio, superior (Kcc): Episodio carbonatado con potencia próxima a los 45 m, los primeros 25 m netamente marinos, y los siguientes corresponden a un medio abrigado y poco profundo, pero con influencias marina. Litológicamente, lo constituye un conjunto muy estratificado en la base y muy tableado, esquistoso y ondulado en el techo, de calizas blancas bien compactas. Son biomicritas y

bioesparitas con escasos niveles finamente calcareníticos, una dolomitización secundaria afecta indistintamente a la serie.

**4.1.3.2 Mioceno – Plioceno.** Se describen a continuación las formaciones geológicas que la conforman.

Conglomerados con matriz arcillosa, Aquitaniano-Burdigaliano (NMcv): Potencia muy variable, de carácter de formación de relleno; alcanza al menos 30 m, en las gargantas del Gaia. Sobre una brecha calcárea o paleosuelo, inmediatamente encima de los paleorrelieves mesozoicos, se desarrollan facies conglomeráticas gruesas, poco seleccionadas y rodadas. Ocasionalmente existe una cementación secundaria de los tramos iniciales, pero lo característico es la existencia de una matriz margo-detritica queda al conjunto una coloración rojiza. En un 90% la naturaleza de los cantos es cretácica.

Arenisca de grano grueso localmente con conglomerados, Serravaliano-Tortoniano (Nmg): De potencia muy variable, constituida por areniscas que en algunos puntos pueden incluir conglomerados, principalmente en la base. Generalmente las areniscas son lumaquéllicas, biomicritas o biorruditas, de ambiente sedimentario marino-aluvial.

Calcarenitas arrecifales, biomicriticas y biorruditas. Serravaliano (Nme): El espesor visible es de unos 180 m, son facies arrecifales y costera. De carácter detritico, sus litologías son arenas, areniscas con cemento carbonatado y calcirruditas arenosas. Facies muy someras, sucediéndose alternativamente sedimentos de playa, estuario y aguas salobres.

Arcillas azules muy plásticas y arenas, Serravaliense-Tortoniano (Nmas): Arcillas azules con intercalaciones de arenas que contienen ostrácodos, pertenece a un ambiente sedimentario marino de mar cerrado.

**4.1.3.3 Cuaternario.** Se describen a continuación las formaciones geológicas que la conforman.

Terraza fluvial. Gravas, arenas y lutitas. Pleistoceno terminal-Holoceno basal (Qt2): Son gravas bien rodadas, con tamaños máximos de clasto de 40 cm, y englobados en una matriz areno-arcillosa, ocasionalmente puede apreciarse una incipiente cementación, cubren una gran extensión superficial intensamente cultivada. Estos depósitos situados a alturas variables sobre el cauce, 6 a 10m, representan niveles de terraza.

Pie de monte (Qg): Derrivos de pendiente y facies proximales de abanico aluvial, Plistoceno Relacionado con la distancia a los relieves adyacentes, su espesor varía entre 2 y 80 m. Son conglomerados heterométricos muy angulosos, dimensiones más frecuentes entre 10 y 20 mm, llegándose a tamaños de hasta un metro. Los cantos son en un 75% de materiales paleozoicos, el resto corresponde a elementos de procedencia mesozoica y cenozoica, predominando estos últimos y muy especialmente calizas de Alveolinas. El conjunto está prácticamente exento de cementación, con matriz limo-arcillosa gris a roja. Recubren cantos y lentejones de arenas de granulometría media a gruesa, costras calcáreas.

Llano aluvial. Gravas, arenas y lutitas. Holoceno superior (Qpa): Los depósitos de Qt<sub>0-1</sub> pasan lateralmente a limos y arcillas de color rojizo que forman la llanura de inundación. Y a gravas, arenas y arcillas en su tramo final.

Lecho actual, llanura de inundación ordinaria y terraza más baja ((0-2 m) Holoceno reciente (Qt<sub>0-1</sub>): El cauce actual está constituido por gravas con cantos algo rodados, heterométricos y en ocasiones de gran tamaño. La litología predominante es de procedencia paleozoica, siguiendo en importancia los materiales triásicos.

Depósitos de los lechos actuales de las rieras y de los torrentes. Holoceno (Qr): Limos y suelos, depositados preferentemente en los barrancos de escasa pendiente, se corresponden a zonas deprimidas que soportan un intenso cultivo y que tapan considerablemente los afloramientos de materiales cenozoicos.

Sedimentos de playa. Holoceno Superior (Qp) y Sedimentos recientes de fondos de valles, arroyos y pie de monte. Holoceno (Q).

**Figura 5.**

*Columna estratigráfica base del área de estudio*

Eón	Era	Periodo	Época	LITOLOGÍA				Descripción Litológica	
				Me	Wc	Pc	Gr		
				ARENITA					
				A	G				
FANEROZOICO	CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	Q				Sedimentos recientes de fondos de valles, arroyos y pie de monte. Holoceno.	
				Qp				Sedimentos de playa. Holoceno superior.	
				Qr				Depósitos de lechos actuales de los arroyos y de los torrentes. Holoceno.	
				Qt0-1				Lecho actual, plana de inundación ordinaria y terraza más baja (0-2 m). Holoceno reciente.	
			PLEISTOCENO	Qpa				Llanura aluvial. Gravas, arenas y lutitas. Holoceno superior.	
		Qg					Pie de monte (escombros de pendiente y facies proximales de abanicos aluviales). Pleistoceno.		
		Qt2					Terraza fluvial. Gravas, arenas y lutitas. Pleistoceno terminal.		
		NMas					Arcillas azules muy plásticas y arenas. Serravaliense-Tortonense.		
		NEÓGENO	MIOCENO	NMe				Calcarenitas arrecifales, biomicroritas y bioruditas. Serravaliense-Tortonense.	
	NMg						Gravas de grano grueso localmente con conglomerados. Serravaliense-Tortonense.		
	NMcV						Arenas arcillosas de grano medio. Serravaliense-Tortonense.		
	KCc						Calizas biomicríticas. Cenomaniense medio-superior.		
		CRETÁCICO	SUPERIOR	KCmg				Margas y calizas con areniscas y arcillas. Cenomaniense superior.	
	JCdc						Dolomías y calizas. Jurásico - Cretácico inferior.		
			JURÁSICO	SUPERIOR	JLd				Dolomías. Lias inferior.
					INFERIOR	Tk			
		TRIÁSICO	SUPERIOR						

*Nota.* Modelo base de la columna estratigráfica, realizada de acuerdo con la información encontrada de ICGC, 2016 & IGME, 1986.

## 4.2 Marco Hidrogeológico

Se localiza hidrográficamente en las Cuencas Internas de Catalunya e hidrogeológicamente en la Cuenca Camp de Tarragona que a su vez pertenece al sistema de red hidrográfica de Cataluña No. 74. El sistema posee características geológicas e hídricas que no permiten un tratamiento unitario por lo que se ha hecho necesaria la delimitación en 5 subsistemas (74/1,74/2,74/3,74/4 y 74/5) (**Figura 6**), cuyo funcionamiento se ilustra por medio de recargas y descargas de agua (IGME, 1986).

El área de estudio se ubica en el subsistema 74/1 denominado Bloque del Gaià. Dicho subsistema posee una extensión total de 646 Km<sup>2</sup> y un conjunto de fallas y pliegues, los cuales siguen generalmente una alineación en dirección NE-SW, sin embargo, en algunas zonas existen pliegues con una dirección N-S, como resultado del efecto de rotación que les impone principalmente la falla de desgarre de La Riba-Altafulla, cuya componente final es dextrógira, provocando una compartimentación de los materiales permeables que implica con ello la formación de varias unidades morfoestructurales (IGME, 1986).

El bloque del Gaià se divide a su vez en 8 unidades hidrogeológicas (Ver Figura), las cuales se recargan mediante la infiltración de la lluvia y se descargan gracias al drenaje que tiene lugar a través del flujo del río Gaià hacia el Baix Penedés, la cuenca del río Anoia y al acuífero profundo del Camp de Tarragona (IGME, 1986).

**Figura 6.**

*Subsistemas y unidades hidrogeológicas del sistema No 74*



*Nota.* Gráfico representativo del sistema No.74 (Camp de Tarragona) con sus respectivos subsistemas 74/1 - Bloque del Gaià (Subsistema de Interés), 74/2 - Baix camp – Alt Cam, 74/3 – Conca de Barbera, 74/4 – Mesa de Prades y 74/5 – Llaberia – Pratsdip, cada una con sus unidades hidrogeológicas correspondientes. Área de estudio (Cuadro Rojo). Modificado de IGME, 1986.

#### **4.2.1 Unidades Hidrogeológicas**

En la presente investigación, 4 de las unidades hidrogeológicas presentes en el Bloque Gaià se encuentran dentro del área de estudio (**Figura 6**), localizadas aproximadamente en dirección NS de la siguiente manera:

Unidad hidrogeológica del cretácico del Gaià

Unidad hidrogeológica del Prelitoral Sector Sur

Unidad hidrogeológica del Baix Gaià

Unidad hidrogeológica de la Depresión Costera de Torredembarra

Dichas unidades hidrogeológicas se clasifican según la estratigrafía de acuerdo con la capacidad de experimentar recarga, almacenar y transmitir agua según las características físicas como porosidad, grado de compactación, cementación, presencia de fino y la morfología de clastos que lo conforman, estas unidades conforman un sistema de multicapa compuesto por dos acuíferos hidrogeológicos (Acuífero Inferior – Acuífero Superior) con niveles freáticos y piezometría distintas que producen una divisoria de aguas cuando afloran los niveles triásicos impermeables del Buntsandstein ó del Muschelkalk medio que actúa como barrera impermeable , afectando al acuífero inferior pero no al superior, esto debido a las conexiones hidráulicas en los niveles profundos calcáreos, originadas por las fracturas y pliegues y a su vez poseen potenciales distintos (**Figura 7**), (IGME, 1986)

Dichas unidades hidrogeológicas se describen a continuación:

**4.2.1.1 Acuífero Inferior.** Se encuentra compuesto por un solo acuífero denominado Jurásico – Cretácico.

*4.2.1.1.1 Acuífero Jurásico-Cretácico.* Compuesto por materiales sedimentarios tipo calizas de edad Jurásico- Cretácico, los cuales su potencia estimada es de 250 m a 400 m de espesor. Los

materiales se encuentran fuertemente fracturados y con algún grado de carstificación, lo que le confiere al acuífero una elevada permeabilidad secundaria en los sectores más fracturados y a su vez con transmisividades altas de hasta 4500 m<sup>2</sup>/día, con flujo subterráneo perpendicular al Mar Mediterráneo, excepto en la zona de recarga donde existe una pequeña divergencia que reparte el flujo hacia el SW y hacia el Vendrell (SE) (IGME, 1986).

4.2.1.2 Acuífero Superior. Se encuentra compuesto por dos acuíferos, los cuales, a su vez, forman una sola unidad acuífera debido a que posiblemente se encuentran conectados hidráulicamente entre sí, siendo esta la más importante en cuestión de explotación y extensión aflorante en el área de estudio.

4.2.1.2.1 *Acuífero Mioceno*. Acuífero multicapa compuestos principalmente por arenas, limos y arcillas que varían en su porcentaje de abundancia de origen calizo. La potencia estimada para esta unidad varía entre 50 m llegando a un máximo de 300 m. Debido a sus características geológicas se considera como un acuífero libre con permeabilidad variable entre media a alta y transmisividad media – alta entre 42 - 900 m<sup>2</sup>/día, de tipo intergranular y con flujo subterráneo perpendicular al Mar Mediterráneo (IGME, 1986).

4.2.1.2.2 *Acuífero Cuaternario*. Compuesto por materiales aluviales, coluviales y fluvio-aluviales depositados en el antiguo cauce del río Gaià. Corresponde a un acuífero libre de potencias estimadas entre 10 y 15 m, con permeabilidades elevadas de tipo intergranular dada por los materiales elásticos que la componen y con transmisividades variable entre 50 - 3000 m<sup>2</sup>/día donde dominan las gravas que favorecen su intensa explotación. El acuífero es explotado por una serie de pozos poco profundos y de gran diámetro (IGME, 1986).



**Tabla 1.**

*Resumen general hidrogeológico del área de interés*

Und Hidrogeológica	Acuífero Hidrogeológico	Acuífero	Fm Geológica	Descripción	Área Hidrogeológica	Fm Hidrogeológica	Tipología del Acuífero
Cretácico del Gaià Preitoral Sector Sur Baix Gaià Depresión Costera de Torredembarra	Acuífero Inferior	Acuífero Cuaternario	Q	Compuesto por sedimentos clásticos fluvio-aluviales y aluviales, principalmente arcillas y limos con niveles de gravas y arenas.	309 Área de la depresión del Camp de Tarragona	I20: Depósitos detríticos cuaternarios	A2: Acuíferos predominantemente porosos en medio detríticos granulares
			Qp				
			Qr				
			Qt0-1				
			Qpa				
	Acuífero Superior	Acuífero Mioceno	Qg	Compuesto por intercalaciones arcillo-margosas alternados niveles detríticos principalmente calcarenitas	308 Área mesozoica y terciaria de Garraf - Bonastre	D20: Depósitos detríticos y calcáreos del Mioceno marino	B2: Acuíferos predominantemente consolidados carbonatados con porosidad por fisuración y/o carstificación
			Qt2				
			Nmas				
			NMe				
			NMg				
Acuífero Jurásico-Cretácico		NMcV	Compuesto por calizas y en menor proporción dolomitas hacia la base de la formación.		C30 : Rocas calcáreas jurásico y cretácico	B2: Acuíferos predominantemente consolidados carbonatados con porosidad por fisuración y/o carstificación	
		KCc					
		KCmg					
		JCdc					
		JLd					
		Tk			F40 : Margas y calizas triásicos	C1: Zonas poco permeables con acuíferos locales con predominio de depósitos detríticos y margocalcarias.	

*Nota.* Resumen hidrogeológico del área de estudio (ICGC, 2017<sup>a</sup>)

#### 4.2.2 Contexto hidrogeoquímico

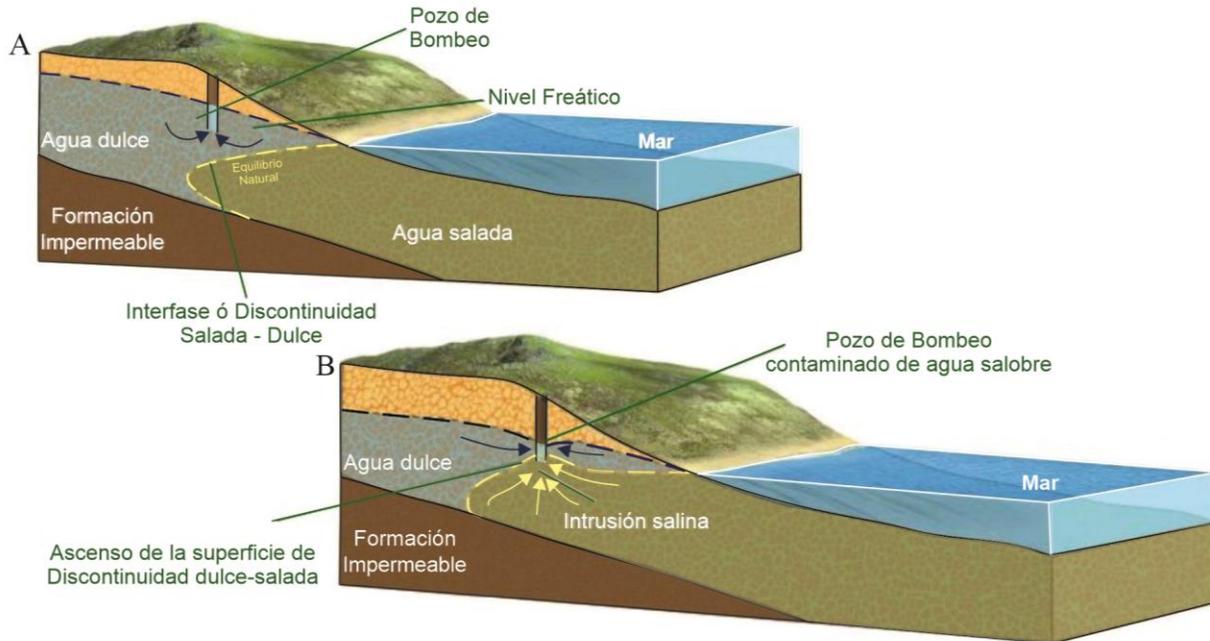
El agua potable es un recurso hídrico importante para la sobrevivencia de cualquier ser vivo, especialmente en España en donde aproximadamente el 80% del agua proviene de las aguas subterráneas, las cuales, según la normatividad de la calidad de agua de consumo humano de ese país (MSPSI, 2020) (**Tabla 6**), el agua potable debe presentar concentraciones máximas de cloruro de 250 mg/L o valores de conductividad eléctrica inferiores a 1500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , los cuales se presentan por causas naturales, sin embargo, las altas concentraciones de cloruro son causados por efluentes industriales, mezcla de aguas producto de intrusiones marinas entre otras generando contaminación y mala calidad del agua.

Según Barea *et al.*, 2005, en el área de estudio las mayores demandas del recurso hídrico son primordialmente para el abastecimiento urbano, no solamente para los habitantes del sector sino para el turismo, el cual ha presentado a través de los años un incremento significativo por ser zona costera, además de tener en cuenta el alto consumo causado por las actividades agrícolas y ganaderas. De ahí la importancia del suministro y la vigilancia de su calidad.

La presión por cubrir la mayor demanda posible de agua potable, ha generado el desequilibrio natural alterado por la acción humana al modificar la descarga de agua dulce al mar, causada por la sobreexplotación de las Unidades Hidrogeológicas (UH) mediante la extracción excesiva de los pozos de bombeo, provocando un descenso de la superficie piezométrica y en consecuencia la salinización de aguas subterráneas mediante la penetración de la cuña de agua marina tierra adentro, siendo mayormente conocida como intrusión marina (**Figura 8**) (Custodio & Llamas, 1983).

**Figura 8.**

*Gráfico básico de intrusión marina*



*Nota.* Salinización de un acuífero costero. (A) Situación Inicial, estado de equilibrio de agua dulce-salada en zonas costeras. (B) Situación de salinización, sobreexplotación de pozos de bombeo, donde el nivel freático baja haciendo que se filtre el agua salada y se mezcle con el agua dulce. Modificado de Estelles, 2012.

Esta intrusión provoca el aumento de la salinidad del acuífero costero, la cual puede ir acompañada de la disolución de sales y lixiviado de minerales, evaporación, mezcla con otras aguas salinizadas procedentes de pasados procesos de intrusión o presencia de aguas congénitas asociadas a los sedimentos de origen marino, vertidos industriales y demás y así mismo, la limitación del aprovechamiento hídrico para determinados usos.

Debido a la alta sobreexplotación de agua subterránea que se presentó en el sector en las décadas de los años 70 y 80 (IGME, 1986), se funda en 1981 el Mini-trasvase del Ebro en el Camp de Tarragona con el objetivo de resolver la problemática de sobreexplotación de los acuíferos para disminuir la contaminación de las aguas pero así mismo también lograr solventar

los problemas derivados de la escasez de agua en los diversos sectores económicos, para la gestión del trasvase se constituye en 1985 el Consorcio de Aguas de Tarragona (CAT) con el fin de crear nuevas alternativas y requerimientos que permitan el aprovechamiento adecuado del recurso subsanando la demanda respectiva.

Posterior a ello, la CAT procede a construir un embalse ó presa en el área de estudio ubicado en el municipio de Catllar sobre el Río Gaià, el cual discurre desde la construcción hasta el mar aproximadamente 9 Km de continente, sin embargo, debido al embalse el río va prácticamente seco la mayor parte del año. Esto se realizó con el fin de crear reservas hídricas para las épocas de mayor demanda y disminuir la sobreexplotación de acuíferos, sin embargo, entre 1989 y 2008 debido al exhaustivo almacenamiento causa filtraciones del recurso y pérdidas de agua por evaporización, por esta razón, en el año 2012 se decide dejar la presa permanentemente con las compuertas abiertas.

#### ***4.2.3 Evolución histórica de la intrusión marina***

El conjunto acuífero existente en el área de estudio, estuvo intensamente explotado en las décadas de 1970 y 1980 con una notable salinización de los pozos al Norte de Tarragona (Calafell-Torredembarra-Tarragona) (IGME, 1986), luego, en la década de los años 90 el IGME realizó una serie de estudios donde detecta una intensa intrusión marina en el sector, específicamente entre los años 1994 y 1999 fue la época, en donde ocurrieron episodios esporádicos de fuertes ascenso de la interfaz salina provocados por la intensiva explotación de los pozos de bombeos y por los vertidos altamente salinos de la industria petroquímica.

En el acuífero inferior, la intrusión marina es general en el área de estudio, pues es un proceso natural que se da por el contacto directo de sus formaciones geológicas con el mar, generando una afectación menor al del acuífero superior. En 1994 se detecta un avance de la

intrusión en las áreas costeras de mayor bombeo como en el municipio de Torredembarra, en donde se identifican incrementos máximos de hasta 150 mg/L adicionales de Cl. Años después se observa un efecto de dilución en la cuenca del río Gaià, por las filtraciones del Embalse de Gaià y de la recarga indirecta en este cauce, que contienen en parte el avance de la cuña salina hacia el interior, posterior a ello, en 1998 se comprueba la disminución del avance salino, ya que solo se detecta un ligero avance de dicha intrusión con valores máximos de hasta 125 mg/L de Cl. (Garrido, 2003).

En cuanto al acuífero superior, en la década de los años 90 al NW en el área de estudio en el municipio de Catllar presenta valores de conductividad eléctrica entre 400 y 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , en el sector entre el río Gaià y Roda de Barà, registró valores de hasta 7.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y en los sectores de la Riera del Gaià y Altafulla estos valores oscilan entre 9.000 y 10.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  producto de los conos de bombeo generados por la intensa explotación de los acuíferos, en cuanto a las concentraciones de cloruros a finales de 1994 en las zonas de extracción de las depresiones como la de Torredembarra presenta concentraciones de hasta 600 mg/L y en municipios como Altafulla presenta aumentos de aproximadamente de 100 mg/L, luego a finales de 1998 especialmente en la zona costera como Tamarit presenta un ascenso de 250 a 3000 mg/L y en 1999 dichas zonas presentan un descenso entre 100 a 500 mg/L de Cl, sin embargo, a pesar de que estas concentraciones aún siguen siendo elevadas, logran demostrar según Garrido (2003), que la intrusión marina ha retrocedido como resultado del ministrasvase del Ebro decretado en 1989, el cual actualmente se mantiene vigente.

En el 2003 de forma general continua el proceso de retroceso de la intrusión marina indicando en los puntos de mayor importancia de extracción ubicados en las zonas costeras como el sector de Altafulla, valores de conductividades de 2.000 hasta 4000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y como en el sector

de Tamarit valores máximos 2.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en donde además los valores de cloruros han disminuido considerablemente (Puigserver *et al.*, 2006)

En el año 2012 se identifica en todos los sectores una disminución tanto en la conductividad eléctrica como en la concentración del ión cloruro en comparación al año 2003. Las relaciones iones principales indican un componente mayormente continental y el análisis de mezcla demuestra porcentajes mínimos de agua dulce con agua de mar. Con ello, indica que el efecto de la intrusión marina ha seguido atenuándose a través de los años, correspondiendo mejor a un lavado de los materiales por efecto de las variaciones de nivel piezométrico, esto relacionado también al aumento del caudal de salida hacia el mar por la disminución de las extracciones gracias al minitrasvase aunque sin haber logrados los objetivos de calidad propuestos por el ACA (ACA, 2019).

### **4.3 Marco Hidrológico**

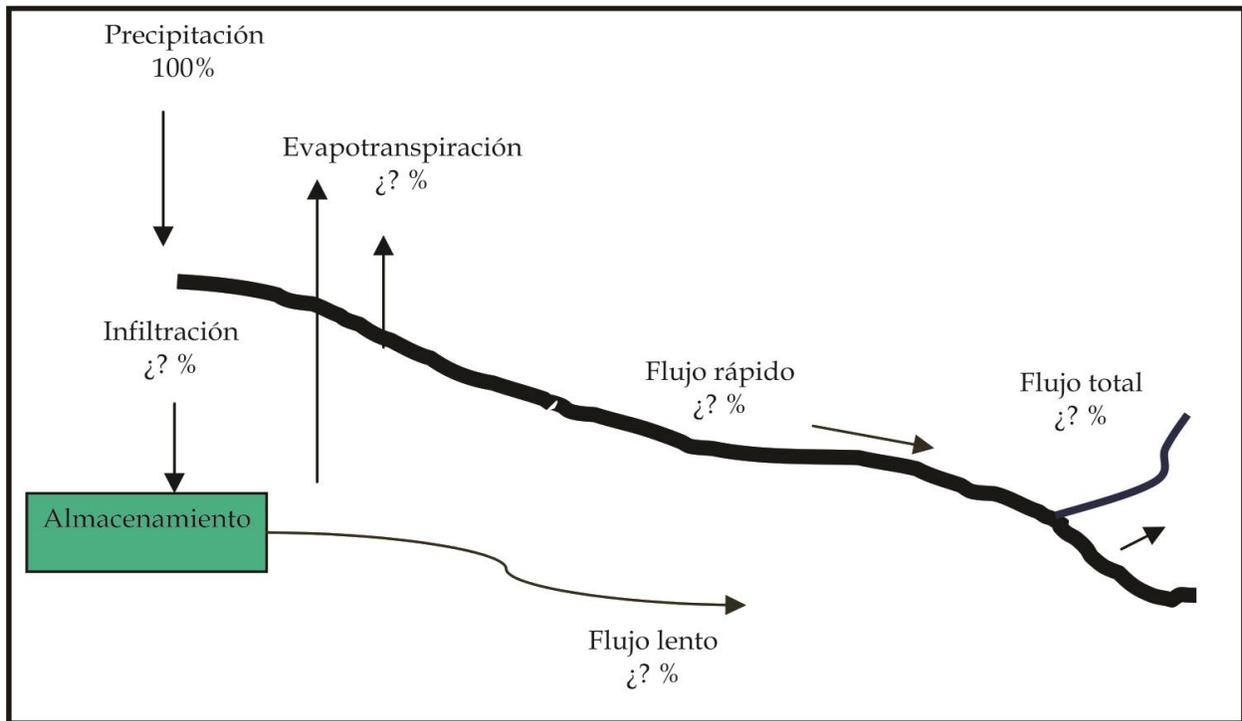
Para la hidrología solo se tendrá en cuenta el balance hídrico, el cual se deriva del concepto de balance en contabilidad, es decir, de un equilibrio entre todos los recursos hídricos que entran y salen del sistema, estimando así la cantidad de agua que puede presentar un área de interés en un intervalo de tiempo determinado (León, 2005).

De este modo, el agua que cae en un determinado sitio se le denomina precipitación = PP (Entrada al sistema), el agua que vuelve a la atmosfera como evapotranspiración directa o como por transpiración de la vegetación = evapotranspiración ET (Salida del sistema), y el agua que escurre por la superficie de la cuenca se le conoce como escorrentía superficial= Esc, este escurrimiento, fluye a través de la red de drenaje hasta alcanzar los cauces principales y finalmente el mar, y el resto se infiltra en el terreno y se incorpora al sistema de aguas

subterráneas o acuífero el cual se identifica como infiltración = I (Entrada al sistema) (Ordoñez, 2011) (**Figura 9**).

**Figura 9.**

*Representación gráfica del balance hídrico*



*Nota.* Esquema general del concepto básico del balance hídrico. Tomado de Enríquez, 2008.

Por lo tanto, la evaluación de los recursos hídricos de un sistema requiere de una estimación correcta del balance hidrológico, en donde se logra comprender tanto el ciclo en sus diferentes fases como la forma en que el agua que se recibe por precipitación y se reparte entre el proceso de evapotranspiración, escorrentía e infiltración según Pladeyra, 2003.

Por consiguiente, para la evaluación de los recursos hídricos se debe desarrollar el cálculo del balance hidrológico mediante una ecuación de expresión muy simple, sin embargo, la cuantificación de sus términos es normalmente complicada por la falta de medidas directas y por

la variación espacial de la evapotranspiración, de las pérdidas profundas (en acuíferos) y de las variaciones del agua almacenada en la cuenca (Llorens, 2003).

De esta forma la ecuación básica del balance hídrico es igual a:

$$P = ETR + ES + I$$

En donde:

P: Balance hídrico

ETP: Evapotranspiración potencial definida como la cantidad de agua que perderá una superficie completamente cubierta de vegetación si en todo momento hay en el suelo agua suficiente para el crecimiento activo de las plantas.

ES: Escorrentía superficial

I: Infiltración

Para el cálculo de un balance hídrico más detallado se requieren más parámetros específicos, sin embargo, en muchas ocasiones por falta de información existente se utilizan estos parámetros básicos los cuales en varias ocasiones son estimados empíricamente a partir de los datos base de precipitación y flujos con el propósito de simular la dirección de los posibles flujos (Enríquez, 2008)

Adicionalmente del Balance Hidrológico, podemos conocer el estado de humedad de la cuenca, la cual está asociado al aporte de precipitación recibida y a las pérdidas generadas, por ello, es importante clasificar el tipo de año (húmedo, normal o seco) ya que permitirá planificar el recurso hídrico, en base a las demandas (Ordoñez, 2011).

#### **4.4 Marco Geofísico**

La geofísica principalmente aplicada, es aquella que realiza e interpreta mediciones de propiedades físicas de la tierra para determinar condiciones del subsuelo para caracterizar

cualquier recurso natural, generalmente con un fin de interés económico o ambiental (Sheriff, 2002).

Así mismo, la geofísica aplicada presenta diversos métodos, los cuales se basan en las propiedades físicas de los materiales que conforman el planeta tierra principalmente en la corteza terrestre como la densidad, la conductividad eléctrica, la velocidad de transmisión de ondas elásticas, el campo magnético y demás, permitiendo generar y diseñar modelos que presenten características y distribuciones espaciales del subsuelo a través del contraste, correlación e interpretación matemática y geológica de las propiedades físicas y anomalías observadas en el área de interés.

Uno de los métodos principales y mayormente empleados en la rama de la hidrogeología para la exploración de aguas subterráneas son las prospecciones eléctricas, gracias a que todo comenzó con un experimento empírico donde se reveló por primera vez que una formación geológica que se encuentre 100% saturada puede relacionar el valor de resistividad eléctrica  $\rho_0$  [ $\Omega \cdot m$ ] con los valores de resistividad eléctrica  $\rho_w$  [ $\Omega \cdot m$ ] del fluido saturante, por medio de un factor resistivo el cual depende de la formación  $F_i$  [-], es decir,  $\rho_0 = F_i \rho_w$  (Archie, 1942).

#### **4.4.1 Prospección Eléctrica**

Los principios básicos de la prospección eléctrica se desarrollaron a inicios de la década de 1900, pero fue en la década de 1970 en donde se volvió mayormente útil debido a la proliferación de herramientas aptas para procesar, analizar e interpretar dichos datos (Reynolds, 2011). A partir de allí, el propósito principal es conocer e identificar las dimensiones, propiedades físicas, geológicas y profundidad de las estructuras o cuerpos que se encuentren en el terreno como también lograr cartografiar horizontes del suelo, perfiles profundos, localización de niveles freáticos y del basamento rocoso, en donde, es importante tener en cuenta que la roca

se encuentra constituida por un almacén, una matriz y un cemento, los cuales dejan un espacio poroso en su estructura permitiendo el paso de fluidos y de esta manera lograr identificar posibles existencias de recursos naturales como acuíferos, hidrocarburos y mucho más. Principalmente en este caso de estudio, estas técnicas se utilizarán ampliamente tanto en la búsqueda de acuíferos por medio de fuentes de agua subterránea adecuadas como en el monitoreo de los diversos tipos de contaminación subterránea, a partir de la determinación de la distribución de resistividad eléctrica obtenida en campo mediante la utilización de electrodos ubicados sobre la superficie que generan una diferencia de potencial permitiendo evaluar la resistividad media y cartografiar la resistividad real del subsuelo.

El procesamiento de la información de la prospección eléctrica capturada en campo posee un factor de incertidumbre el cual puede disminuir considerablemente incluyendo variables observadas en campo como la litología, estratigrafía, sedimentología, geomorfología, la geología estructural, entre otras ya que, el valor de resistividad de las rocas va depender de diversos factores como la composición, porosidad conectada, tipo de fluido que rellenan los poros, fisuración, procesos que ocurren entre el contacto de fluido-roca, grado de humedad, componente minerales y demás, logrando de esta manera atribuir el valor adecuado y correspondiente a cada tipo de roca, mediante la realización de un modelamiento verídico y detallado del subsuelo del área de interés (Lakubovskii & Liajov, 1980).

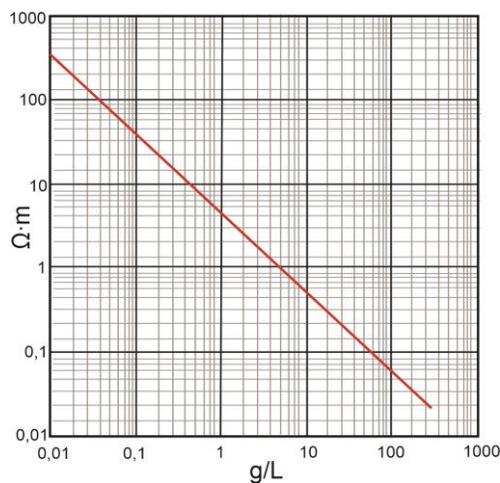
De acuerdo con el tipo de roca, composición y demás, la corriente eléctrica se puede propagar en el subsuelo de tres formas distintas en relación con la conducción presente: electrolítica (asociada al movimiento lento de iones que se encuentran en un fluido intersticial del terreno), electrónica u óhmica (asociada a materiales con electrones libres como los metales) y dieléctrica (asociada a materiales aislantes) (Reynolds, 2011).

Sin embargo, la principal conducción en el subsuelo es la electrolítica debido a que la litosfera se compone mayoritariamente de rocas con minerales dieléctricos y a su vez con porosidad parcialmente ocupada por fluidos (Orellana, 1982).

En los acuíferos dichos fluidos son composicionalmente H<sub>2</sub>O, los cuales, rellenan los poros en la roca caracterizándose no solo por tener un grado de humedad siendo este directamente proporcional a la conductividad y así mismo indirectamente proporcional a la resistividad eléctrica, si no también, por tener composiciones minerales diferentes, causadas principalmente por su contenido de sales disueltas asociadas a la naturaleza de las rocas con las que las aguas hayan entrado en contacto durante su recorrido teniendo en cuenta varios factores en dicho proceso como el tiempo de permanencia del agua subterránea en el medio poroso, la química de la roca encajante en el paso del flujo, las zonas de recarga - descarga, e hidrología. A su vez la concentración de estas sales disueltas (NaCl) en el agua, afecta de manera inversa el valor de resistividad eléctrica ( $\Omega\text{m}$ ) (**Figura 10**) Lakubovskii & Liajov, 1980).

**Figura 10.**

*Relación entre la resistividad ( $\Omega\text{m}$ ) y la concentración (g/L) de NaCl en el agua (salinidad)*



*Nota.* Indica la variación en la resistividad eléctrica ( $\Omega\text{m}$ ) de una solución en función de su concentración de NaCl, las cuales son inversamente proporcionales entre sí. Tomada de Lakubovskii & Liajov, 1980).

De esta manera, genera que los fluidos en este caso, cada tipo de agua, presente un rango específico de resistividad eléctrica ( $\Omega\text{m}$ ) (**Tabla 2**).

**Tabla 2.**

*Resistividades propias del agua en función al origen y composición de cada una*

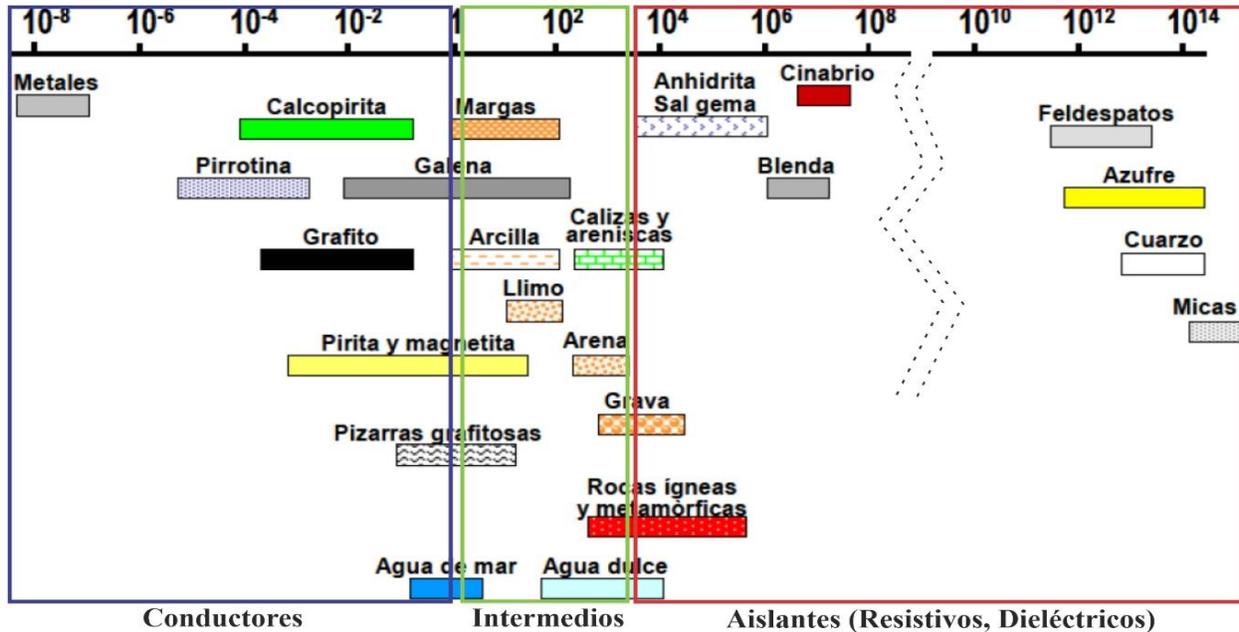
<b>Tipo de agua</b>	<b>Resistividad (<math>\Omega\text{m}</math>)</b>
Agua de lagos y arroyos de alta montaña	$10^3 - 3 * 10^3$
Aguas dulces superficiales	$10 - 10^3$
Aguas salobres superficiales	2 - 10
Aguas subterráneas	1 - 20
Aguas de lagos salados	0,1 - 1
Aguas marinas	$\sim 0,2$
Aguas de impregnación	0,03 - 10

*Nota.* Rango específico de resistividad eléctrica ( $\Omega\text{m}$ ) acorde a cada tipo de agua, refiriéndose a los márgenes de variación usuales en cada uno de los casos. Tomada de Orellana, 1982.

Por lo tanto, cabe recordar que cada tipo de roca va a presentar un valor de resistividad eléctrica específico (**Figura 11**), dependiendo no solo del tipo de fluido que posea sino también de su composición, porosidad, minerales que contenga y demás aspectos que influyan en la variación, por ello, es importante realizar previamente una revisión bibliográfica del área de interés todos los aspectos que puedan influir en el resultado de la interpretación de los datos.

**Figura 11.**

*Rangos generales de la variación de la resistividad eléctrica ( $\Omega m$ ) de las rocas y minerales más comunes presentes en el planeta tierra*



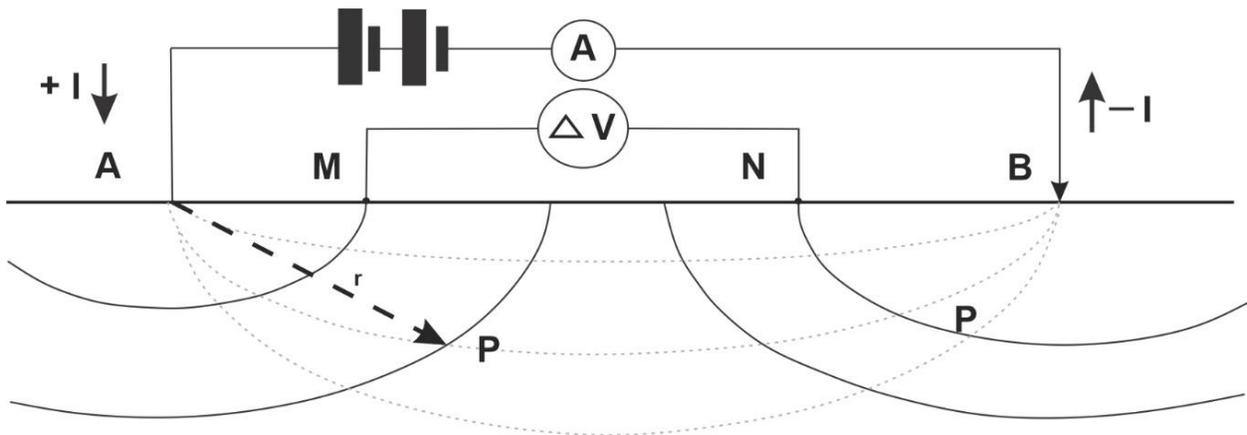
*Nota.* El gráfico presenta los rangos de variación de la resistividad eléctrica ( $\Omega m$ ) para las litologías más usuales, en donde sus límites se extienden en casos donde exista fisuración, impregnación de agua salada, entre otras. Además, se encuentran localizados de acuerdo con el tipo de material, en el margen izquierdo se sitúan los materiales más conductores y menos resistivos (metales) que se encuentran en la naturaleza (Cuadro azul), hacia el centro se los materiales intermedios, los cuales son mayormente implicadas en los estudios hidrogeológicos (Cuadro verde) y al margen derecho los materiales aislantes y más resistivos (agregados cristalinos) (Cuadro rojo). Modificada de Palacky, 1988.

**4.4.1.1 Principio teórico y físico.** La prospección eléctrica consiste en inducir al terreno, una corriente eléctrica continua de intensidad ( $I$ ), mediante 2 electrodos emisores A y B formando un campo eléctrico cuyas señales son recepcionadas y medidas por 2 electrodos receptores M y N que miden la diferencia de potencial ( $\Delta U$ ) inducida que se ha generado y la resistividad de las formaciones atravesadas, los cuales se encuentran localizados en medio de los puntos A y B (**Figura 12**), de acuerdo a la distribución, configuración y arreglo geométrico

particular utilizado para la toma de datos en superficie, acorde al tipo de problema geológico de interés (Orellana, 1982), generando así mismo, un factor geométrico específico denominado coeficiente del dispositivo (K) limitando la profundidad y resolución de los datos obtenidos (Lakubovskii & Liajov, 1980).

**Figura 12.**

*Distribución y funcionamiento básico y general de la prospección eléctrica*



*Nota:* Gráfico de la distribución general de los electrodos y funcionamiento base para la medida de la resistividad eléctrica del terreno, donde se observa la curva tetraelectródico que genera en el subsuelo. Tomada de Orellana, 1982.

K se representa a partir del arreglo geométrico utilizado en cada caso de estudio, en donde los 4 electrodos distan entre ellos una distancia  $r_{AM}$ ,  $r_{BM}$ ,  $r_{AN}$  y  $r_{BN}$  y un campo eléctrico con potencial  $U_{MA}$ ,  $U_{MB}$ ,  $U_{NA}$  y  $U_{NB}$  (Lakubovskii & Liajov, 1980).

De este modo, el potencial se expresa de la siguiente forma:

$$U_{AB} = \frac{\rho I}{2\pi} * \frac{1}{r_{AB}}$$

$$U_{MA} = \frac{\rho I}{2\pi} * \frac{1}{r_{AM}}$$

$$U_{MB} = \frac{\rho I}{2\pi} * \frac{1}{r_{BM}}$$

El potencial total en el punto M es:

$$U_M = U_{MA} + U_{MB} = \frac{\rho I}{2\pi} * \frac{1}{r_{AM}} - \frac{\rho I}{2\pi} * \frac{1}{r_{BM}} = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} \right)$$

Análogamente, el potencial para el punto N será:

$$U_N = U_{NA} + U_{NB} = \frac{\rho I}{2\pi} * \frac{1}{r_{AN}} - \frac{\rho I}{2\pi} * \frac{1}{r_{BN}} = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r_{BN}} \right)$$

Por lo tanto, la diferencia de potencial entre los puntos M y N es:

$$\begin{aligned} \Delta U = U_M - U_N &= \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} \right) - \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r_{BN}} \right) \\ &= \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}} \right) \end{aligned}$$

A partir de la ecuación anterior se obtiene la expresión para la resistividad  $\rho$  en un medio homogéneo cuando en la superficie se encuentra ubicado un dispositivo tetra puntual.

$$\rho = \frac{\Delta U}{I} * \frac{2\pi}{\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}}} \text{ es igual a } \rho = K \frac{\Delta U}{I}$$

En donde K va a ser igual a:

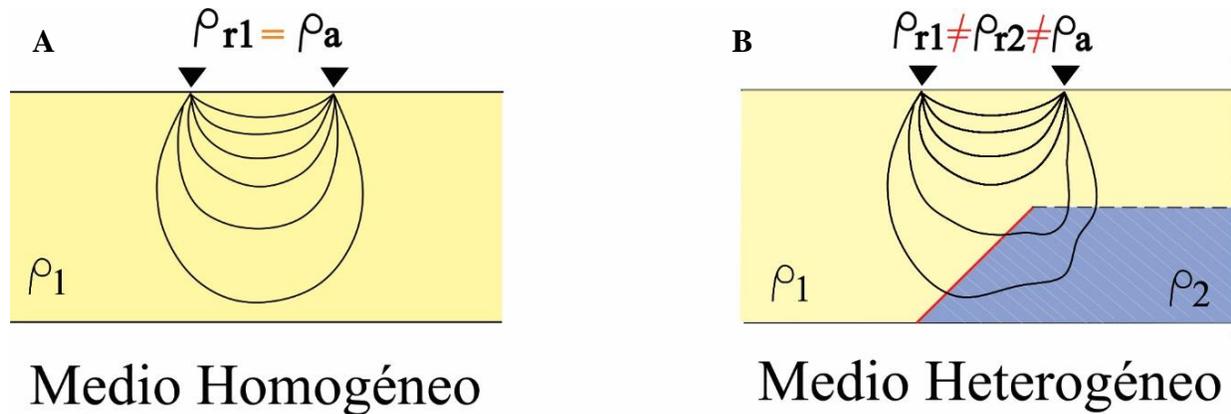
$$k = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}}}$$

Dado que las distancias cumplen  $AM=BM$ ,  $AN=BN$ , etc., se obtiene que  $K1 = K2$  cuando el medio es homogéneo, en donde para una misma corriente de inyección las diferencias de potencial leídas  $\Delta V1$  y  $\Delta V2$  serán iguales. De esta manera la resistividad medida  $\rho$  en un medio homogéneo, será independiente de la posición de los electrodos de inyección y detección cuando estos se intercambian causando el principio de reciprocidad, el cual también se cumple para medios heterogéneos (Orellana, 1982).

Por lo tanto, existe en la naturaleza tantos medios homogéneos como heterogéneos (**Figura 13**), en donde la resistividad varía dependiendo el medio en el que se encuentre.

**Figura 13.**

*Resistividad real y aparente de acuerdo con el medio natural en el que se encuentre*

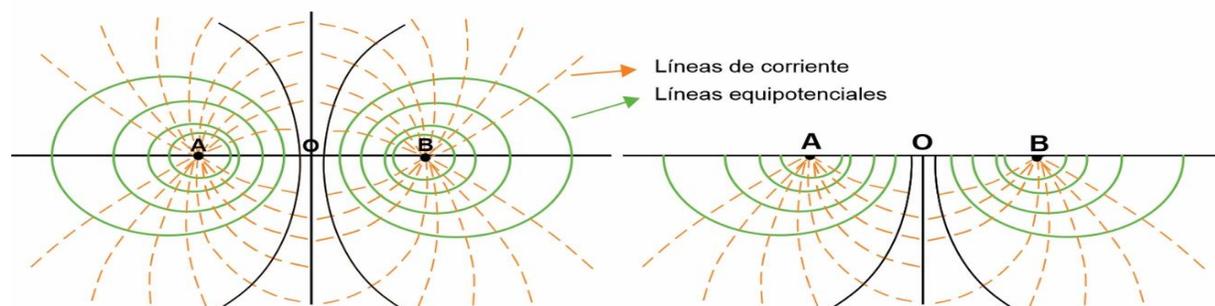


*Nota:* Medio homogéneo en el cual la resistividad real de la capa es igual a la resistividad aparente (Margen izquierdo) y Medio heterogéneo en el cual la resistividad real de las capas es diferente a la resistividad aparente (Margen derecho). Modificada de Burger, 1992

En un medio homogéneo, la resistividad eléctrica real ( $\rho$ ) coincide con la resistividad eléctrica aparente ( $\rho_a$ ), es decir,  $\rho = \rho_a$  (**Figura 13-A**), en donde las trayectorias del flujo de corriente en el terreno siguen el mismo trazado (**Figura 14**) (Dobrin & Savit, 1988)..

**Figura 14.**

*Líneas equipotenciales (Verdes) y líneas de corriente o de flujo (Naranja) en un medio homogéneo*



*Nota:* Plano vertical de los electrodos (Margen izquierdo), plano horizontal de la superficie del terreno (Margen derecho). A y B indican la posición de los electrodos y O el punto de atribución de la medida. Modificada de Dobrin & Savit, 1988.

Sin embargo, en medios heterogéneos solo se obtienen datos de resistividad aparente ( $\rho_a$ ) como representación de cierta magnitud arbitraria que tiene las dimensiones de una resistividad eléctrica (**Figura 13-B**), cuyo valor depende de K y de las resistividades que posea los diferentes materiales. Es decir,

Donde:

$$\rho_a = \frac{\Delta U k}{I}$$

K: Coeficiente del dispositivo y se determina por la distancia entre los electrodos del dispositivo, posee dimensiones de longitud.

$\Delta U$ : Diferencia de potencial

I: Corriente eléctrica inyectada

A partir allí, el procesamiento, modelado e interpretación de estos valores logran dar posibles conclusiones sobre la composición estructural del subsuelo.

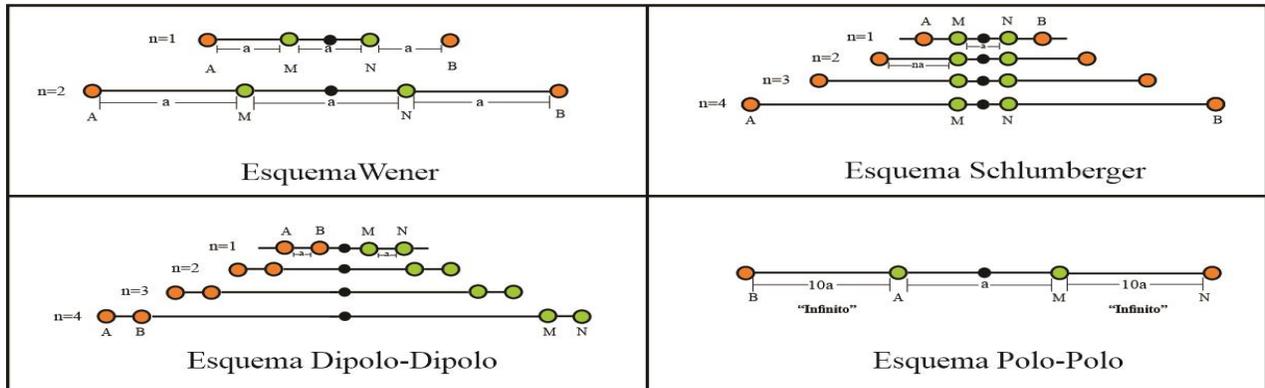
De acuerdo con lo anterior, existen varios tipos de configuraciones o arreglos cada uno con distribuciones geométricas acorde en cada caso de estudio, entre los cuales los más comunes se encuentran las configuraciones Wenner, Schlumberger, dipolo-dipolo y polo-polo.

El arreglo Wenner mantiene la misma distancia “a” entre los electrodos de corriente (AB) y de potencial (MN), el arreglo schlumberger mantiene la misma distancia “a” entre los electrodos de potencial (MN) pero aumenta de manera exponencial la distancia “na” entre los electrodos de corriente (AB), el arreglo dipolo-dipolo mantiene constante la distancia “a” entre los electrodos de corriente (AB) y potencial (MN), sin embargo la distancia entre los electrodos BM es variable (n) y el arreglo polo-polo solamente utiliza un electrodo de corriente (A) y un electrodo de potencial (M) a una distancia “a” entre ellos , los demás electrodos se encuentran

tan lejos, aproximadamente a una distancia  $n \cdot 10a$ , la cual solo se utilizan como referencia generando un efecto insignificante en las mediciones (**Figura 15**).

**Figura 15.**

*Diversas distribuciones de los electrodos sobre la superficie acorde a las principales configuraciones o arreglos geométricos en la toma de la resistividad eléctrica*



*Nota.* Distribución de los electrodos de corriente A y B (Círculos naranja) y de potencial M y N (Círculos verdes). Tomada de Cuesta, 2007.

Cada tipo de configuración presenta cierta disposición de los electrodos y así mismo cada uno de ellos tienen sus propias ventajas y desventajas, por ello, se debe escoger el arreglo más idóneo de acuerdo con el objetivo de cada estudio (**Tabla 3**)

**Tabla 3.**

*Idoneidad general de las principales configuraciones o arreglos geométricos*

Criterios	Wenner	Schlumberger	Dipolo-Dipolo	Polo-Polo
Resolución Vertical	✓✓✓	✓✓	✓	✓✓
Penetración en Profundidad	✓	✓✓	✓✓✓	✓✓
Idoneidad para SEV	✓✓	✓✓✓	✓	✗
Idoneidad para TSC	✓✓✓	✗	✓✓✓	✓✓✓
Sensibilidad a la Orientación	Sí	Sí	Moderado	No
Sensibilidad a las inhomogeneidades laterales	Alto	Moderado	Moderado	Bajo
Trabajo intensiva	Sí	Moderado	Moderado	Bajo
Disponibilidad de ayudas interpretativas	✓✓✓	✓✓✓	✓✓	✓

\*SEV: Sondeos Eléctricos verticales  
 \*TSC: Recorrido de separación constante  
 \*Cuando se utiliza un cable multifilar y una guía de electrodos automatizada

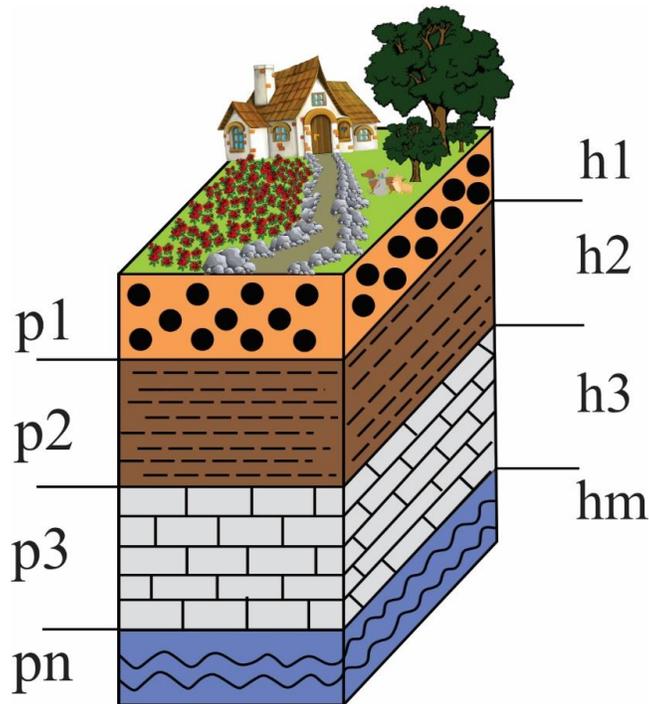
*Nota:* Tomada de Reynolds, 2011.

De acuerdo con lo anterior, la resistividad eléctrica de las rocas pueden ser medidas y calculadas según el tipo de configuración idóneo en cada caso de interés en su mayoría primordialmente por métodos tanto de sondeos eléctricos verticales SEV, los cuales indican el cambio de resistividad de forma vertical, es decir, en una sola dirección en el subsuelo indicando profundidad, como de tomografía de resistividad eléctrica (TRE), la cual genera perfiles horizontales a través de variaciones laterales y verticales en la resistividad, presentado como un método multielectrónico que muestra la resistividad en dos (2D) o tres dimensiones (3D) según sea la forma de adquisición en la superficie (Reynolds, 2011).

**4.4.1.2 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV).** Es el método más sencillo y económico del mercado el cual tiene origen en el año 1920 (Koefoed, 1979), es principalmente utilizado en áreas que presenten una estructura geológica básica formada por estratos horizontales con el fin de determinar las capas que componen el subsuelo de interés con la respectiva profundidad alcanzada mediante las diversas variaciones de resistividades, las cuales se miden solamente en una dirección (dimensión vertical) y a su vez se encuentran asociadas a la estratigrafía del terreno (**Figura 16**), en donde utilizan corriente continua producida por generadores artificiales.

**Figura 16.**

*Resistividad del subsuelo en área geológicamente formada por estratos horizontales*



*Nota.* Debido a que el área es geológicamente sencilla, presenta resistividades eléctricas acorde a sus espesores, en donde la interpretación de los datos es de menor dificultad. Modificada de (Lakubovskii & Liajov, 1980).

A pesar de que los SEV son comúnmente utilizados a causa de que es un método más económico y que adicionalmente en varias ocasiones no se cuenta con el equipo y herramientas suficientes para realizar la interpretación y modelación 2D y 3D, no son muy útiles en áreas que presenten una geología muy compleja (**Figura 16**) debido a que posee grandes limitaciones con respecto a los cambios laterales o en dirección horizontal (López-Hidalgo *et al.*, 2004).

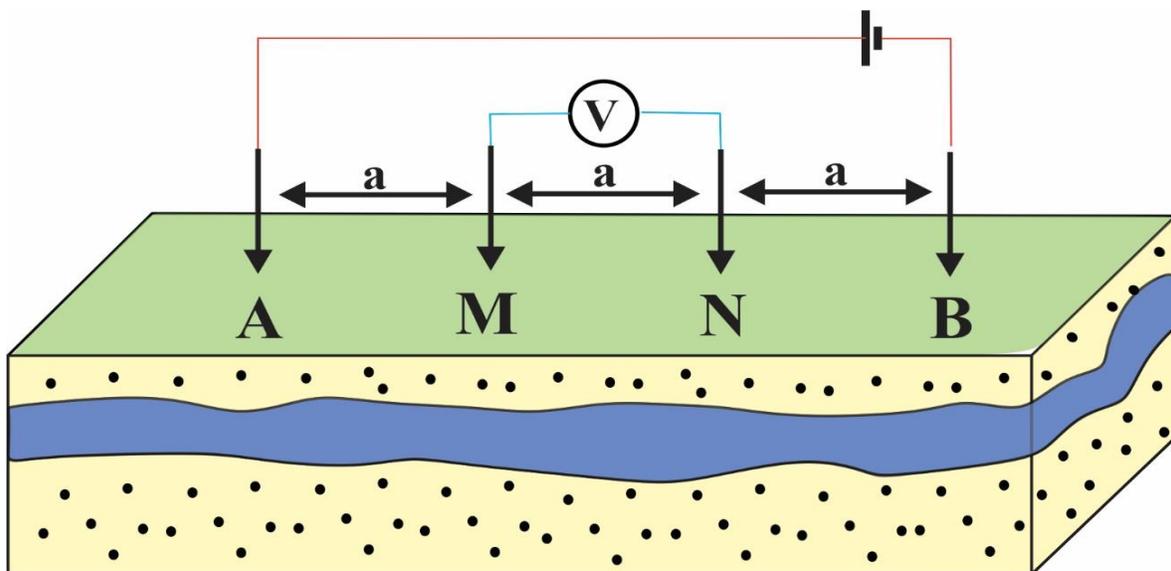
Sin embargo, se aplica de forma general para determinar la presencia de acuíferos con sus respectivas profundidades, niveles freáticos, zonas posiblemente contaminadas y perfiles estratigráficos a lo largo de una dirección específica.

**4.4.1.2.1 Procedimiento de Adquisición de SEV.** Los SEV generan perfiles geoeléctricos de modelo 1D, a través de un sistema tetra puntual de solo cuatro electrodos AMNB alineados y

distribuidos de acuerdo al tipo de arreglo geométrico escogido acorde al tipo de problema que se desee resolver, los cuales de forma in situ inyectan corriente eléctrica (I) de cualquier fuente DC (corriente continua), la cual es conocida en los electrodos exteriores (AB) y se mide la diferencia de potencial en los interiores (MN) (**Figura 17**). Posteriormente, se realiza el cálculo de la resistividad aparente en cada punto de medición. La variación de la resistividad se asocia con el cambio de material y por lo tanto, es posible conocer la profundidad de este cambio a través de la observación de la distancia entre los electrodos A y B, la cual depende del objetivo del estudio con respecto a la resolución y el alcance vertical que se desea alcanzar ya que, a menor distancia entre los electrodos, mayor es la resolución vertical, pero al mismo tiempo menor es la profundidad alcanzable y viceversa, por ello, depende primordialmente de la disposición relativa de los electrodos en superficie y de la penetración de corriente en el terreno (Auge, 2008).

**Figura 17.**

*Configuración básica sobre el terreno distribuida de forma treta puntual para la adquisición de sondeos eléctricos verticales*



*Nota:* Adquisición básica de sondeos eléctricos verticales (SEV'S) sobre el terreno de naturaleza homogénea, basado en 4 electrodos, 2 de corriente (AB) y 2 de potencial (MN). Modificada de Moller *et al.*, 1995.

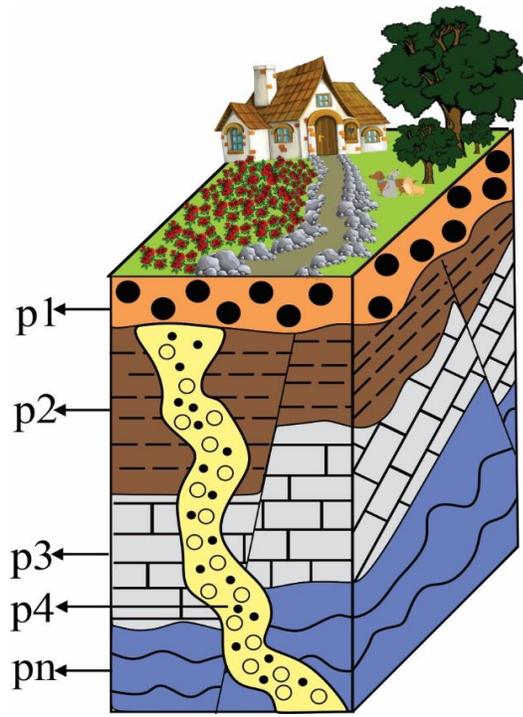
Finalmente, para mayor interpretación y comprensión de los datos obtenidos, se procede a realizar modelos 1D, los cuales relacionen las resistividades con los espesores de las capas generados por los cortes geoelectricos conformados por diferentes estratos de rocas o depósitos dispuestos en el subsuelo (Lakubovskii & Liajov, 1980).

**4.4.1.3 Tomografía de resistividad eléctrica (TRE).** El método TRE , es aquel que puede obtener mejores resultados en áreas con geología / anomalías moderadamente complejas (Griffiths & Barker, 1993), es por eso que se enfoca primordialmente en el estudio de la estructuras geológicas de alta complejidad del planeta tierra, a través de, la visualización de alguna propiedad eléctrica del subsuelo (resistividad o impedancia general), mediante secciones continuas en donde la resistividad cambia en las 2 direcciones tanto en la vertical como en la horizontal a lo largo de la línea del levantamiento (López-Hidalgo- *et al.*, 2004), generando perfiles continuos de resistividades del subsuelo que permite observar una imagen en dos dimensiones de resistencias aparentes que posterior a un procesamiento de datos (inversión de resistividades), permite la determinación más específica de la profundidad, espesor y presencia de agua subterráneas en las capas geológicas.

En la actualidad el método es intensivo, generando principalmente modelos 2D con un mejor resultado en áreas que presenten una geología compleja con estratos no horizontales ni homogénea y con anomalías moderadamente difíciles (**Figura 18**) (Griffiths & Barker, 1993), con mayor detalle y resolución, permitiendo no solamente la prospección de los acuíferos, sino también un alto control de contaminantes de forma más practica en relación con costos y resultados (López-Hidalgo *et al.*, 2004).

**Figura 18.**

*Resistividad del subsuelo en área con geología / anomalía medianamente compleja*



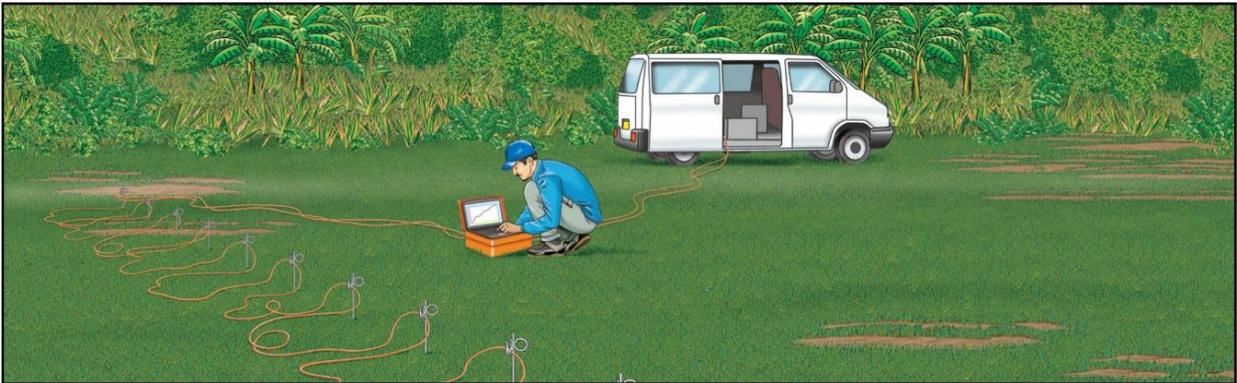
*Nota:* Debido a que el área es geológicamente compleja, presenta diversas resistividades eléctricas con distintos espesores cada una, en donde la interpretación de los datos es de mayor dificultad. Modificada de (Lakubovskii & Liajov, 1980).

**4.4.1.3.1 Procedimiento de Adquisición de TRE.** El método de tomografía de resistividad eléctrica posee prácticamente el mismo concepto de adquisición utilizado en los sondeos eléctricos verticales con la diferencia de que en la toma de datos de TRE se utiliza más de cuatro electrodos (**Figura 19**), generalmente en promedio de cincuenta electrodos repartidos en dos cadenas de veinticinco proporcionando que se puedan abordar diversos conjuntos sucesivos de cuatro electrodos, desplazándose cada vez por una separación de electrodos lateralmente, de esta forma, permite que el sistema tetra puntual se repita hasta que se haya escaneado el número apropiado de niveles. Todos los electrodos se encuentran conectados por un cable de múltiples núcleos a una caja de conmutación y medidor de resistencia ó simplemente un

cable conectando todos los electrodos, posterior a ello, todo el procedimiento de adquisición de datos se controla completamente mediante un software desde una computadora portátil, cuyos parámetros se seleccionan desde el principio, obteniendo datos de resistividades aparentes (Reynolds, 2011).

**Figura 19.**

*Adquisición de tomografías de resistividades eléctricas*

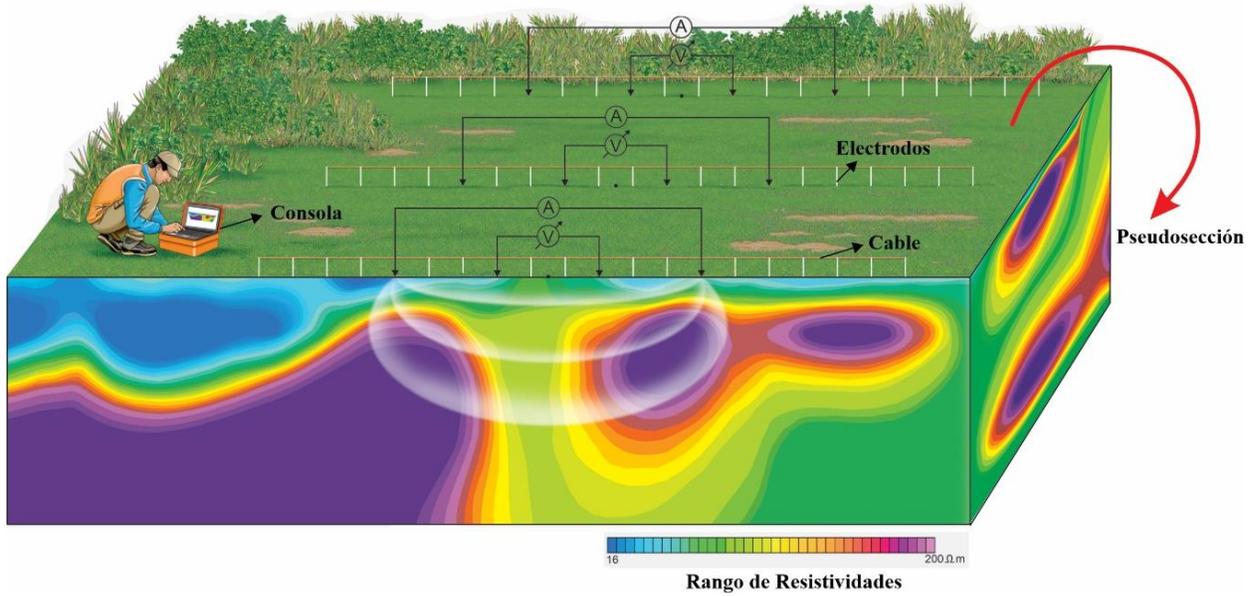


*Nota:* Operario realizando la adquisición de TRE sobre el terreno plano, a través de una consola computacional conectada a varios electrodos por medio de un cable. Tomada de ANH, 2019.

A partir de allí, con el software de procesamiento se generan pseudosecciones (**Figura 20**) proporcionando una idea cercana a la distribución de las resistividades aparentes que conforman el subsuelo y finalmente de acuerdo con los parámetros establecidos en cada caso de estudio se realiza la inversión de los datos para generar modelos 2D de la resistividad real y así definir geometría de cuerpos, litologías y demás (López-Hidalgo *et al.*, 2004).

**Figura 20.**

*Proceso de adquisición de tomografías de resistividad eléctrica en campo*



*Nota.* Diagrama esquemático del proceso correcto correspondiente a la toma de tomografías de resistividades eléctricas con la adecuada distribución y geometría de los electrodos y respectiva respuesta (Pseudosección) de dicho levantamiento geoelectrico. Las tonalidades frías (azules) corresponden a resistividades bajas y las tonalidades cálidas (Rojizas) corresponden a resistividades altas. Tomada de ANH, 2019.

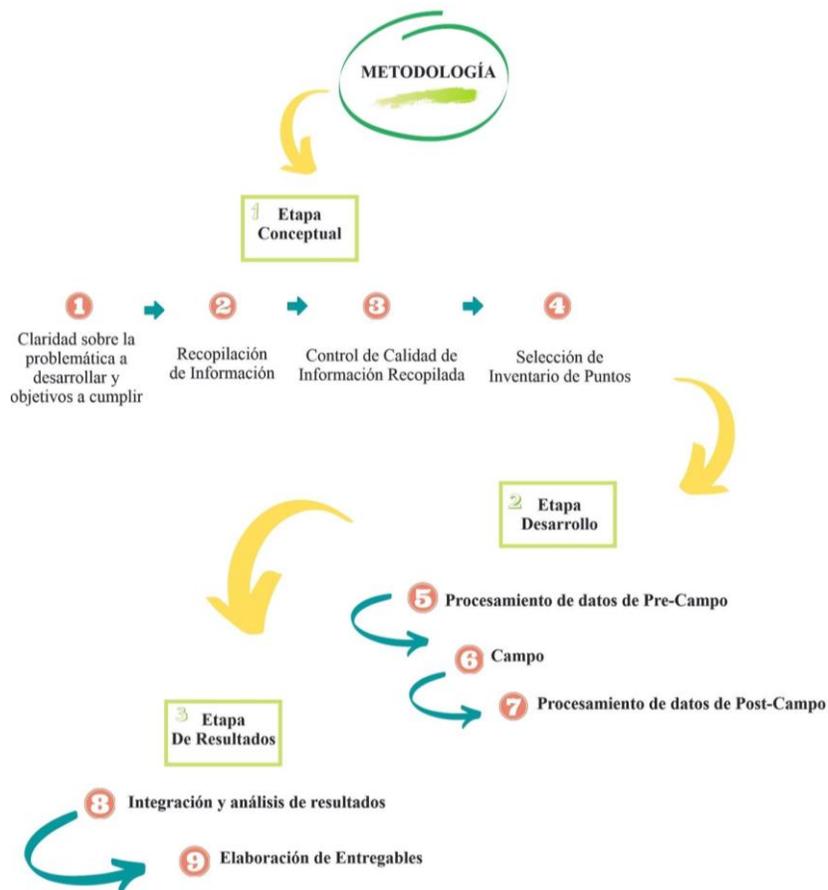
### 5. Metodología

La metodología seleccionada para cumplir los objetivos del presente estudio inicia desde la búsqueda, selección e integración de información tanto geológica, hidrogeológica, hidrogeoquímica como geofísica, hasta el análisis de resultados y entrega de documento final, logrando así, identificar de la mejor manera los procesos de intrusión marina en los acuíferos costeros existentes en el área de estudio.

De acuerdo con lo anterior, se plantea una metodología específica compuesta por 3 etapas principales y cada una de ellas con sus respectivas fases (**Figura 21**).

**Figura 21.**

*Esquema general de las etapas principales correspondientes a la metodología del proyecto*



## **5.1 Etapa conceptual**

Esta etapa inicia con la búsqueda, revisión, selección y organización detallada de toda la información recopilada sobre el tema y el área de interés.

De esta manera la etapa conceptual se divide en 5 fases principales.

### ***5.1.1 Fase 1: Claridad sobre la problemática a desarrollar y objetivos a cumplir***

La fase 1 quizá es la fase más importante del presente trabajo, ya que se debe tener identificada explícitamente la problemática que posee el área de estudio, la justificación del por qué se desea contribuir al problema existente y así mismo tener de forma clara y detallada los objetivos planteados, con el fin de lograr contribuir a resolver de alguna manera dicha problemática y de esta forma evitar desvíos y contradicciones de información encontrada y posteriormente desarrollada.

### ***5.1.2 Fase 2: Recopilación de información***

Teniendo claridad sobre lo anteriormente mencionado, se procede a realizar la búsqueda y recopilación de la mayor información disponible tanto bibliográfica como webgráfica, a través de artículos, libros, proyectos de investigación, mapas, modelos, gráficas y páginas online actualizadas, las cuales se encuentren relacionadas competentemente con el área de interés y la temática de investigación.

Para este proyecto de investigación, es importante recordar que para los componentes de geología, hidrogeología, hidrología, hidrogeoquímica, no se realizará ninguna toma o muestreo en campo o ningún análisis específico en laboratorio, debido a que solamente se trabajará con la información disponible existente en las bases de datos disponibles en la ACA, Meteocat-Ruralcat, Idescat, IGME, además de información disponible de empresas suministradoras y

entidades municipales, en donde se recopilará información exhaustiva de todos los datos piezométricos y de calidad del agua subterránea del sistema acuífero costero de interés.

Para el caso de la prospección geofísica se trabaja solo con métodos geoeléctricos, SEV, el cual se trabajará con información netamente bibliográfica extraída desde la base de datos del IGME, 1981 y para el TRE se realizará levantamiento directo en el área de interés específicamente a lo largo de la zona costera.

### ***5.1.3 Fase 3: Control de calidad de información recopilada***

De acuerdo con toda la literatura recopilada en la fase 2, se realiza un análisis exhaustivo y se procede a seleccionar aquella que posea alto grado de confianza, utilidad y sea mayormente significativa, logrando obtener información correcta, concreta y precisa para el desarrollo del proyecto. Posterior a ello, se reorganiza dicha información creando un marco teórico que permita abarcar la geología, la hidrogeología y la geofísica que se debe tener en cuenta para el desarrollo de la presente investigación, clasificando los conceptos y principios fundamentales para llevar a cabo la interpretación conjunta de todas las ramas aplicadas, con el propósito de obtener una correlación coherente y acorde con los objetivos propuestos, pues el 80% del proyecto se basa en esa recopilación de información y el 20% se puede identificar directamente en campo.

### ***5.1.4 Fase 4: Selección de inventario de puntos***

Posterior al control de calidad de la información de la fase 3, se procede a seleccionar y reorganizar la información realizando un inventario de datos y puntos hidrogeológicos, hidrológicos y geofísicos existentes en las bases de datos y que a su vez se encuentren localizados dentro del área de interés y sean de importancia para el desarrollo e interpretación del proyecto.

#### **5.1.4.1 Hidrogeología.**

**5.1.4.1.1 Piezometría.** Para la piezometría se selecciona los puntos que se encuentren registrados en la ACA y que a su vez se localizan en el interior del área de estudio, sin embargo, los datos más recientes registrados en el área de estudio constan de 4 puntos medidos de los cuales 1 posee información mensual durante el periodo 2015-2020 y los otros 3 puntos sin información registrada alguna, lo que conlleva a que dicha información se ha considerado insuficiente para elaborar una piezometría base. Por lo tanto, la piezometría se ha elaborado a partir de los datos más actualizados hasta el momento, obtenidos en la campaña de campo realizada entre los meses de abril y mayo del año 2012 por FCIHS, 2012 a partir del muestreo de los pozos de bombeo existentes, los cuales corresponden a norias antiguas cedidas a los propietarios sin información de fechas de construcción, habilitación ni de columnas estratigráficas que sean de utilidad para caracterizar al detalle dichas captaciones (**Tabla 4**). En esta campaña existen zonas donde no hay registro de muestreo de algunos puntos donde se encuentran pozos, por ello, se realizan de forma inferida siguiendo la tendencia original.

**Tabla 4.**

*Datos de muestreo más recientes de niveles piezométricos del 2012*

PUNTO	ESTE	NORTE	PROF - msnm	Z - msnm	DIAM - mm	PROF N - msnm	NP
NP1	363253	4555011	3.8	2	152.4	8.7	-6.7
NP2	362580	4555876	6	9	300	6	3
NP3	362234	4555468	20	4	200	17	-13
NP4	362466	4556659	20	12	152.4	7	5
NP5	364065	4556860	>100	40	250	40	0
NP6	364630	4557169		35		1	34
NP7	364197	4556675		29	300	28	1
NP8	364575	4555573	5	4	10000	1	3
NP9	364701	4556321	5	8	4000	8	0
NP10	364805	44558297		57	1000	2	55
NP11	364039	4558370		45	1000	2	43
NP12	363960	4558381		45	2000	2	43
NP13	363928	4558445		48	2000		48
NP14	363511	4558548		65	2000	5	60
NP15	362690	4555375		5	2000	12	-7
NP16	366380	4557006		14	10000	13	1
NP17	366303	4557017		15	2000	11	4
NP18	366412	4556874		10	7500	9	1
NP19	366520	4556954		8	10000	14	-6
NP20	367550	4557400	16	15	>2000	17	-2
NP21	367987	4557803	19.3	16	1600	18	-2
NP22	368118	45577799		16	2500		16
NP23	368637	4557527	2.5	2	7500		2
NP24	359883	4560169	10	55			55
NP25	359899	4560233	8.8	63		2	61
NP26	359921	4560447	3	70		3	67
NP27	360146	4560838	4	77	2000	37	40
NP28	360109	4560768	4	76	2000	42	34
NP29	360273	4561194	7.75	53	900	10	43
NP30	359900	4562136		95		6	89
NP31	360950	4559215	95	45	380	13	32
NP32	362300	4559438	92	58	1500	10	48
NP33	363247	4555635		12	320	18	-6
NP34	362784	4555677	9	7	5000	4	3
NP35	363110	4555611	15	13	2800	6	7
NP36	362542	4556194	12	9	5000	6	3
NP37	362773	4567794	100	23	400	60	-37
NP38	367744	4556949	5	3	250		3
NP39	362395	4555667	27.7	6	280	56	-50
NP40	362465	4555776	8.6	7	100	8	-1
NP41	360886	4559543	95	48			48
NP42	360907	4559491	9.85			6	-6
NP43	360492	4558823	101	60	300	20	40
NP44	363295	4560360	40	52			52
NP45	364975	4561068	43	122			122
NP46	363057	4554878		1			1
NP47	364923	4556071	7.5	4	1		4
NP48	367222	4559298	100	43	0.3		43

*Nota.* PROF-m: Profundidad en msnm, Z-m: Altura topográfica en msnm, DIAM-mm: Diámetro del pozo piezométrico en milímetros, PROF N-m: Profundidad del nivel piezométrico en msnm, NP: Nivel piezométrico.

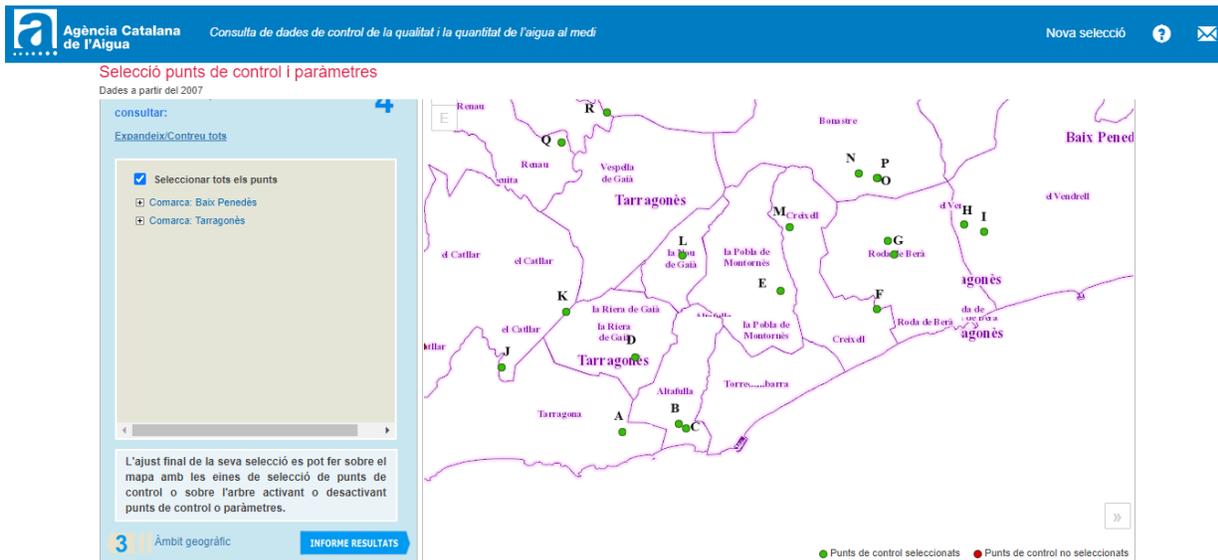
Datos tomados del FCIHS, 2012.

**5.1.4.1.2 Hidrogeoquímica.** Para la parte de hidrogeoquímica se seleccionan los puntos que se encuentren localizados dentro del área de estudio y registrados en la ACA (ACA, ).

En este caso, solo se encuentra información hidrogeoquímica actualizada de aguas subterráneas, en el que se seleccionan 18 puntos identificados desde la letra A hasta la R (**Figura 22**), posterior a ello, se descarga la información por temporadas, sin embargo la ACA solo posee información de las estaciones de verano y otoño, por lo que únicamente se puede tasar de forma anual principalmente las épocas secas entre los meses Junio - Agosto (Verano) en donde la demanda de agua es considerablemente alta debido al aumento causado por fines recreativos y turísticos y los meses de Septiembre – Noviembre (Otoño) donde ha disminuido dicha demanda y se preparan para el invierno. Tanto verano como otoño se evaluaron durante los últimos cinco años específicamente desde el 2015 hasta el 2020.

**Figura 22.**

*Localización de los puntos de muestreo hidrogeoquímicos seleccionados para el área de interés*



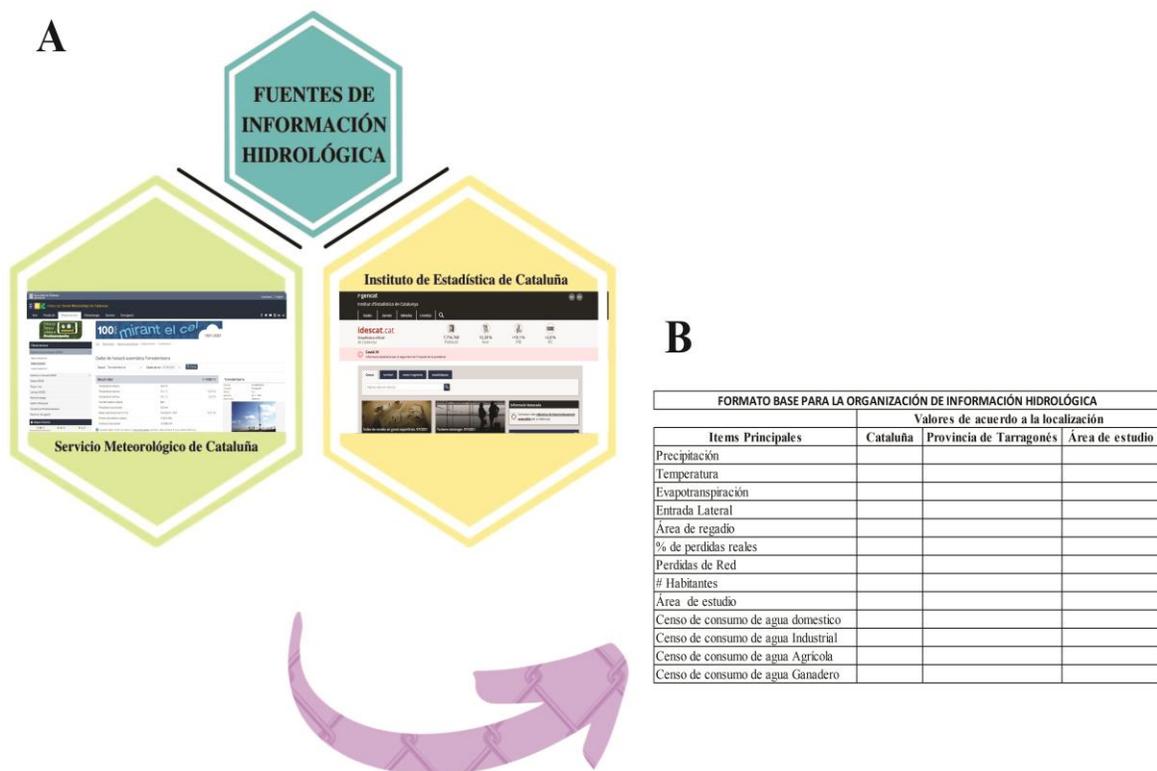
*Nota.* Puntos de muestreo hidrogeoquímicos (Puntos Verdes) de aguas subterráneas existentes actualmente en el registro de la Agencia Catalana de Aguas (ACA). Tomados de ACA, 2021.



estación meteorológica de Torredembarra como del Instituto de Estadística de Cataluña y posterior a ello, se crean formatos base de Excel para organizar la información de manera clara y sencilla de buscar cuando se requiera (**Figura 24**).

**Figura 24.**

*Selección de la información a partir de las bases de datos digitales existentes y formato de organización de dicha información*



*Nota.* A. Fuentes de información digital hidrológico (Izquierda) B. Formato base para organización de información (Derecha).

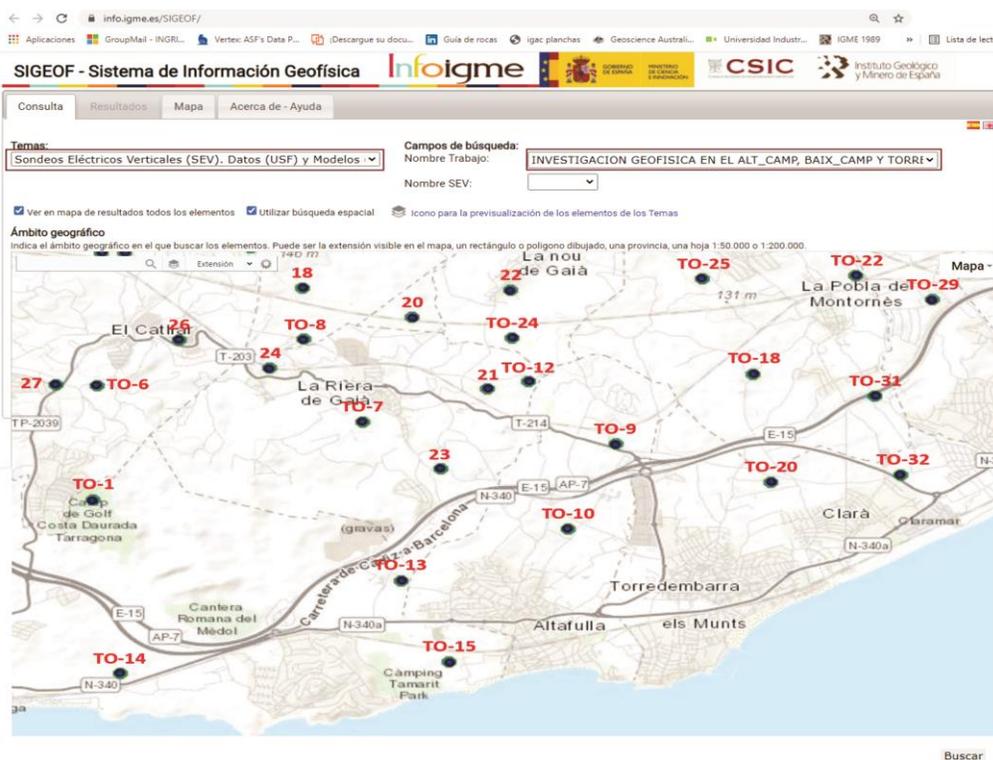
**5.1.4.3 Geofísica.**

Para geofísica se eligieron 25 puntos de información pertenecientes a los perfiles de sondeos eléctricos verticales. Fueron seleccionados aquellos que se encontraban en el interior del área de estudio y que corresponden a una campaña realizada en el año de 1985 en donde la zona presentaba condiciones ambientales y urbanizables menos intervenidas por el hombre a las

existentes actualmente, pertenecientes a dicha época a terrenos más rurales libres de construcciones, logrando realizar extensiones de cable de aproximadamente 800 a 1000 m sobre la superficie del terreno, obteniendo así un mayor alcance en la vertical para la toma de datos SEV. Posterior a ello, se descargan desde la página de Sistema de información geofísica (SIGEOF, 2021) (**Figura 25**), y a partir de allí, se obtienen los archivos digitales y luego se organizan para proceder a su posterior procesamiento.

**Figura 25.**

*Localización de los puntos de líneas SEV seleccionados para el área de interés*



*Nota.* Base de datos de puntos de levantamiento de sondeos eléctricos verticales (Puntos azules) existentes actualmente en el Sistema de Información Geofísica (SIGEOF, 2021). Los datos extraídos fueron adquiridos en el año 1985 siendo esta la actualización más reciente y ambiciosa existente en el área de estudio. Tomados de SIGEOF, 2021.

## 5.2 Etapa Desarrollo

La siguiente etapa consiste en el procesamiento tanto de la información recopilada como de los datos brutos tanto los que fueron extraídos en las diferentes plataformas digitales como de los que se tomaron directamente en campo, para proceder a realizar los mapas, diagramas, tablas, secciones y cálculos necesarios para el desarrollo del proyecto, para ello, se compone de las siguientes fases.

### 5.2.1 Fase 5: Procedimiento de datos Pre-Campo

En la fase 5 abarca el 80% de la información fundamental para el presente caso de estudio, es esta donde cubre el procesamiento digital y desarrollo de la información bibliográfica y webgráfica de hidrogeología, hidrogeoquímica, hidrología y geofísica en el método geoelectrico de sondeos eléctricos verticales (SEV).

Posteriormente, se ejecutan mapas de piezometría, hidrogeoquímica, los diagramas, gráficos, tablas, secciones de SEV y todo lo necesario con la información recopilada y seleccionada anteriormente.

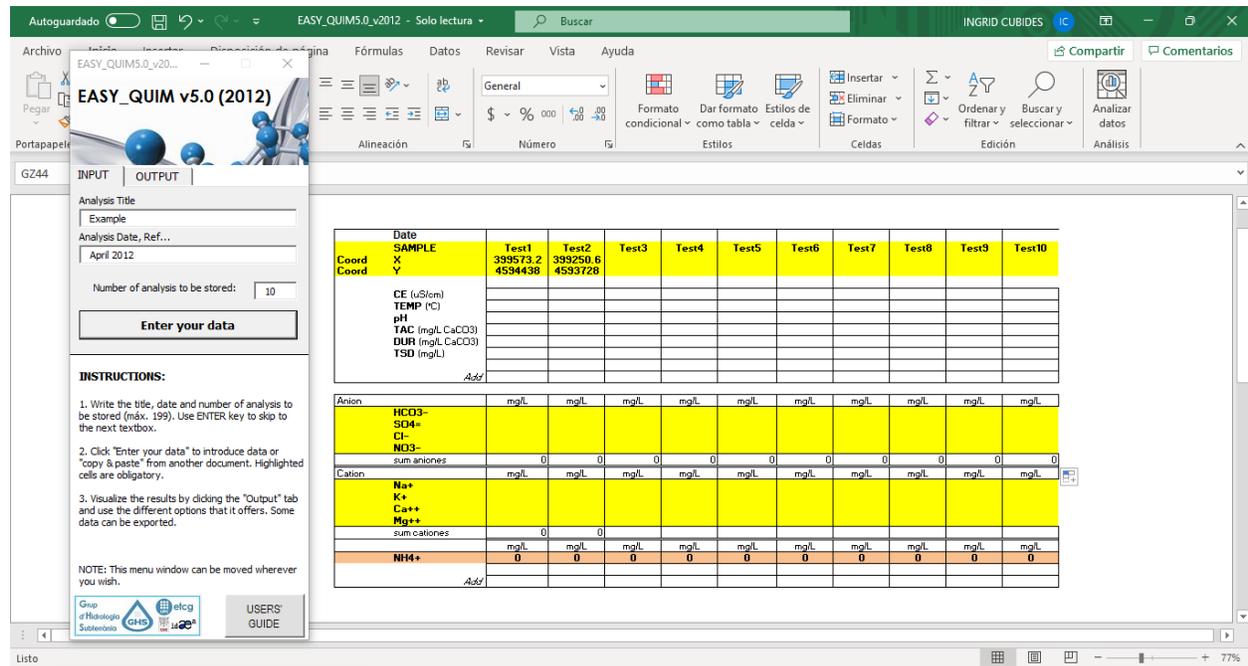
#### 5.2.1.1 Hidrogeología.

**5.2.1.1.1 Piezometría.** El objetivo principal de la construcción del mapa piezométrico es definir principalmente la tendencia de direcciones de flujo de aguas subterránea, identificar áreas de conos de bombeo, áreas de recarga y descarga de agua.

**5.2.1.1.2 Hidrogeoquímica.** De acuerdo con los formatos realizados en la fase 4 para la organización de información, se procede a ejecutar el procesamiento de datos hidrogeoquímico mediante el software de libre acceso EASY\_QUIM v 5.0 creado por Vásquez, 2012<sup>a</sup> (**Figura 26**), en el cual se registran los datos de los valores de las concentraciones químicas de cada punto de muestreo seleccionados en la fase 4 de la etapa 1.

**Figura 26.**

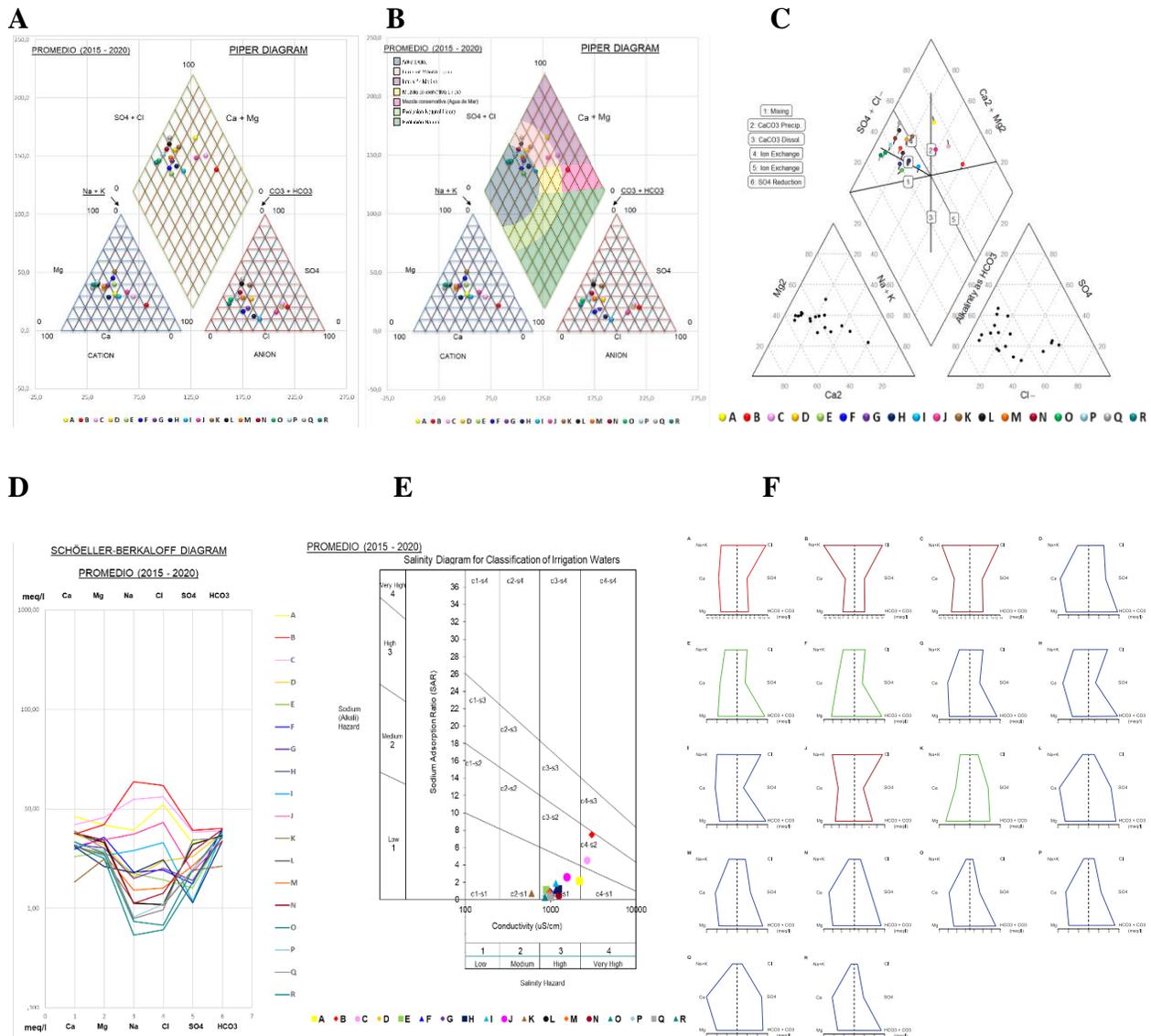
*Plataforma del programa de Easy\_Quim v 5.0*



Subsiguientemente, el programa EASY\_QUIM v 5.0 genera los diagramas químicos principales de Piper, Shöeller, salinidad para clasificación de aguas de riego, stiff en donde plotea cada uno de los puntos de muestreo seleccionados. A partir del diagrama de piper se modifica creando dos de gráficos adicionales, uno de acuerdo con la modificación de Kelly, 2005 (**Figura 27-B**) y el segundo de acuerdo con el programa de libre acceso de GQAnalyzer creado por García-cabrejo *et al.*, 2020 (**Figura 27-C**) y en cuanto a los diagramas de stiff se modifican de acuerdo al programa de libre acceso HatariChem v2 creado por Gidahatari, s.f (**Figura 27-D**). De acuerdo con lo anterior se obtiene los gráficos finales para su posterior análisis.

Figura 27.

Diagramas químicos principales para aguas subterráneas

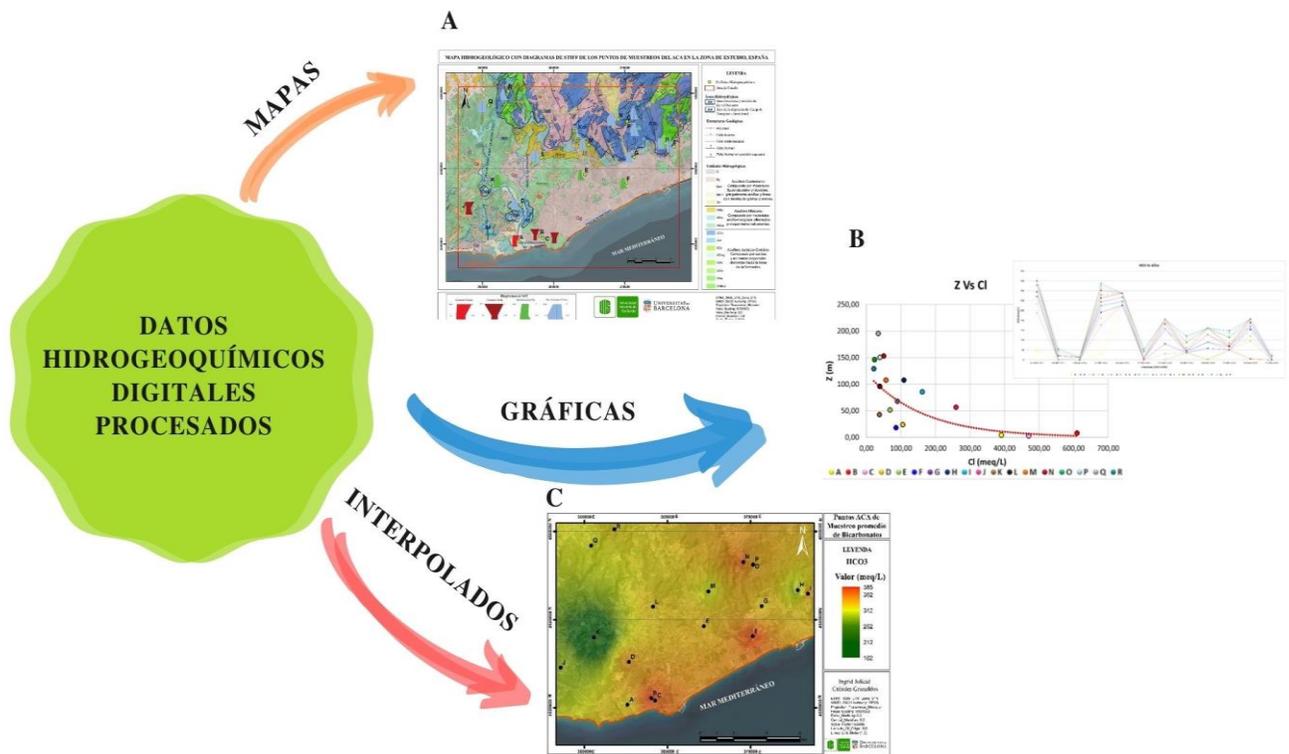


Nota. Diagramas químicos principales para aguas subterráneas. Diagrama de Piper (A), Diagrama de piper modificado según Kelly, 2005, Diagrama de Piper modificado según García-cabrejo *et al.*, 2020 (C), Diagrama de Shöeller (D), Diagrama de salinidad para clasificación de aguas de riego (E), Diagramas de Stiff, (F). Procesados en el easy quim creado por vasquez, 2012.

Finalmente, se realizan mapas de interpolación de las concentraciones de los iones mayoritarios y gráficas de Cl contra el HCO<sub>3</sub> y CE, cota topográfica y distancia línea de costa (Figura 28) todo ello, con el fin de lograr un correcto análisis de la situación del área de interés.

**Figura 28.**

*Datos hidrogeoquímicos digitales procesados*

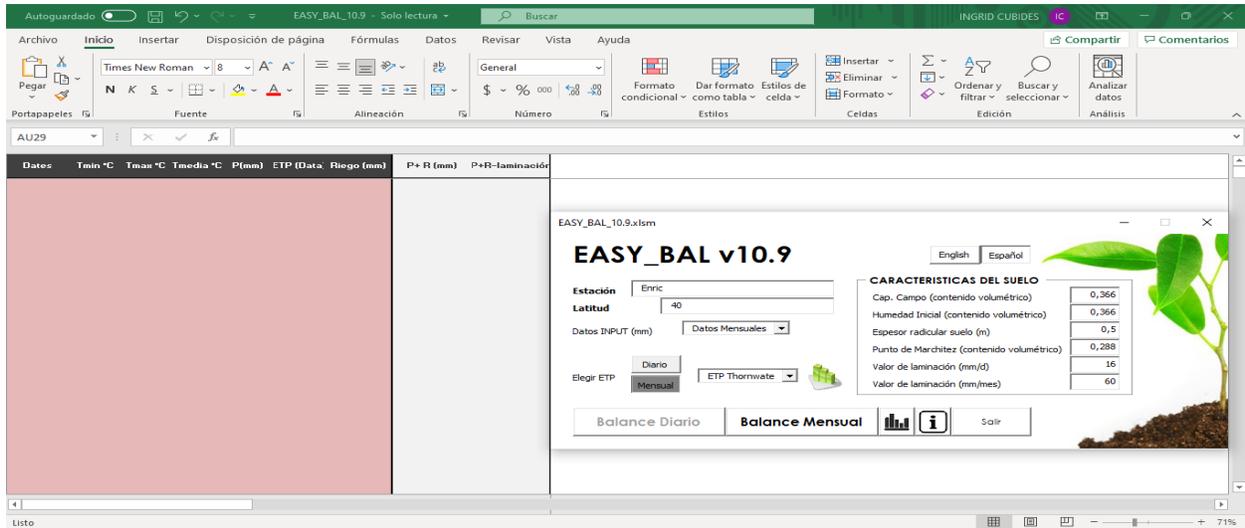


*Nota.* Resultados digitales de los datos hidrogeoquímicos seleccionados. Mapas (A), Gráficas (B), Mapas de interpolaciones de concentraciones químicas (C)

**5.2.1.2 Hidrología.** De acuerdo con los formatos realizados en la fase 4 para la organización de información, se procede a ejecutar el procesamiento de datos hidrológicos para lograr obtener el balance hídrico del área de estudio. Para el cálculo de la evapotranspiración potencial ETP se calcula el balance hidrometereológico mediante el software de libre acceso EASY\_BAL v 10.9 creado por Vázquez, 2012b. (Figura 29-B) utilizando el método de Thornwate.

**Figura 29.**

*Plataforma del programa de Easy\_Bal*



Para el cálculo de los demás ítems necesarios para obtener el balance hídrico se especifican en la **Tabla 5** con sus respectivas ecuaciones utilizadas y el desarrollo de cada ecuación se encuentra en detalle en el **Apéndice A**.

**Tabla 5.**

*Items necesarios para el balance hídrico con sus respectivas ecuaciones para el caso de estudio*

Balance Hídrico		
Tipo	Item	Ecuación
Entradas	Recarga por Infiltración	RF=Recarga (Calculada en el Easy Bal) * Área de Estudio
	Entrada Lateral	Bibliográfico
	Retorno de Riego	QRR=[( Ha regadío (Comarca de Tarragonés) * 33.33%)*Dotación de riego m3 /Ha/año]*25%
	Perdida de Red-Distribución	PRD=[((Habitantes (Comarca de Tarragonés) * 33.33%)*(L/hab/día)) * % de pérdidas reales / volumen de agua suministrada]
	Perdida de Red-Alcantarillado	PRA=[(Perdidas de red promedio en hm3/año + ((%Uso de suelo urbano*Área de estudio) * Precipitación anual promedio)) Recarga de acuífero%]
Salidas	Descarga Und Tarragona	Bibliográfico
	Descarga hacia el mar:	Bibliográfico
	Urbano	U= Consumo de agua doméstico * % de extracción del acuífero
	Industrial	I= Consumo de agua industrial* % de extracción del acuífero
	Agrícola	Q= [(Ha de regadío * 33,33%) * Dotación de riego m3 /Ha/año]
	Ganadero	G=[( Consumo de agua ganadera * 33.33%)* % perteneciente al área de estudio

*Nota.* Tabla de las respectivas ecuaciones para realizar el balance hídrico para el área de estudio. Tomada de la metodología usada en FCIHS, 2012.

### 5.2.1.3 Geofísica

Para el procesamiento precampo geofísico, solo contamos con el registro de 25 datos de SEV, los cuales son los más recientes encontrados, seleccionados y extraídos son del año de 1985 de la página SIGEOF, 2021, sin embargo, cabe resaltar que para el presente proyecto de investigación es importante tener la posibilidad de poder comparar los datos sev de dicha época con los resultados de los datos TRE que se lograran adquirir en el campo a desarrollar en el presente trabajo y de esta forma lograr transformarlos bajo los mismos formatos SIG actualmente existentes y de ese modo darle valor significativo y novedoso a cada uno de ellos.

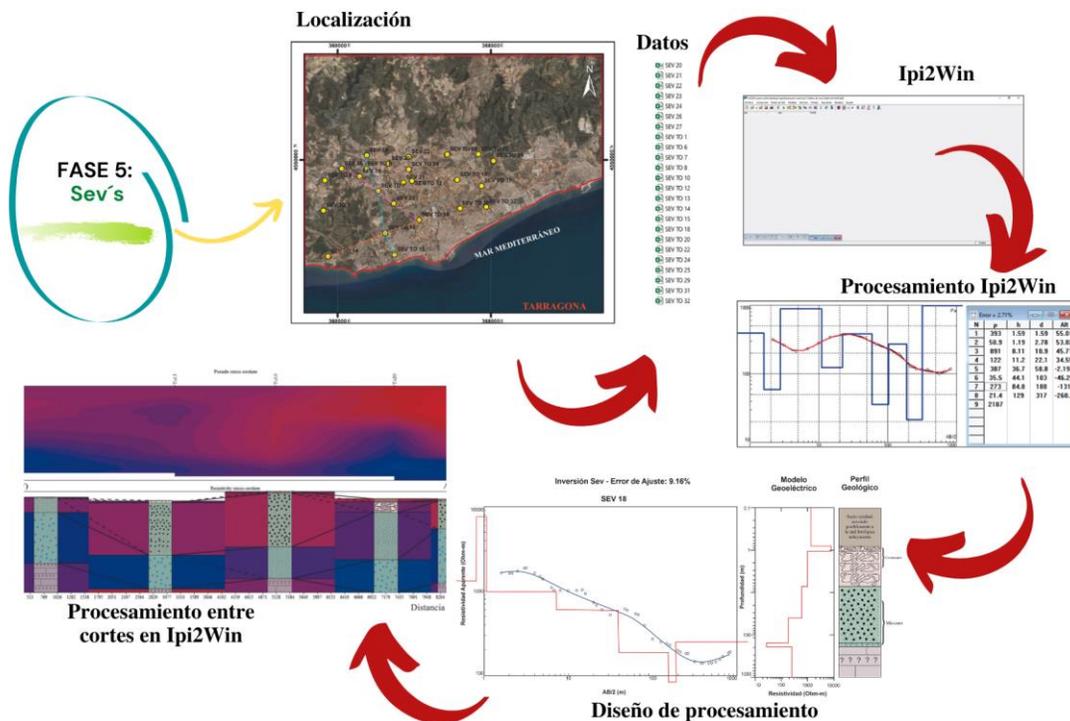
Para procesar los datos sev se utiliza el programa del Ipi2win creado en la Universidad de Moscú por Alexei *et al*,2000. El software está diseñado para la interpretación automática o semi-automática de datos de sondeo eléctrico vertical obtenidos (Bobachev *et al.*, 2000), en este caso mediante la configuración que ya viene predeterminada los datos, (Schlumberger). Adicionalmente este programa es distribuido por Geoscan – M Ltda., Moscú, Rusia de acceso libre mediante licencia limitada.

Adicional a los perfiles de inversión obtenidos del ipi2win de cada punto seleccionado, se realizan cortes estratégicos interpolando varios puntos a la vez, para lograr una posterior interpretación de la geología del subsuelo y así relacionarla con las formaciones hidrogeológicas, a partir de los datos de la prospección geoelectrica del 1985.

Posteriormente, con el procesamiento obtenido se realiza una planeación congruente de las zonas de mayor importancia en donde sea significativo ejecutar la toma de datos directos en campo para la adquisición de líneas de tomografía de resistividad eléctrica (**Figura 30**).

**Figura 30.**

*Diagrama ilustrativo de proceso para el procesamiento de datos sev.*



*Nota.* Imagen ilustrativa del procesamiento de datos sev's de 1985 seleccionados en el área de interés.

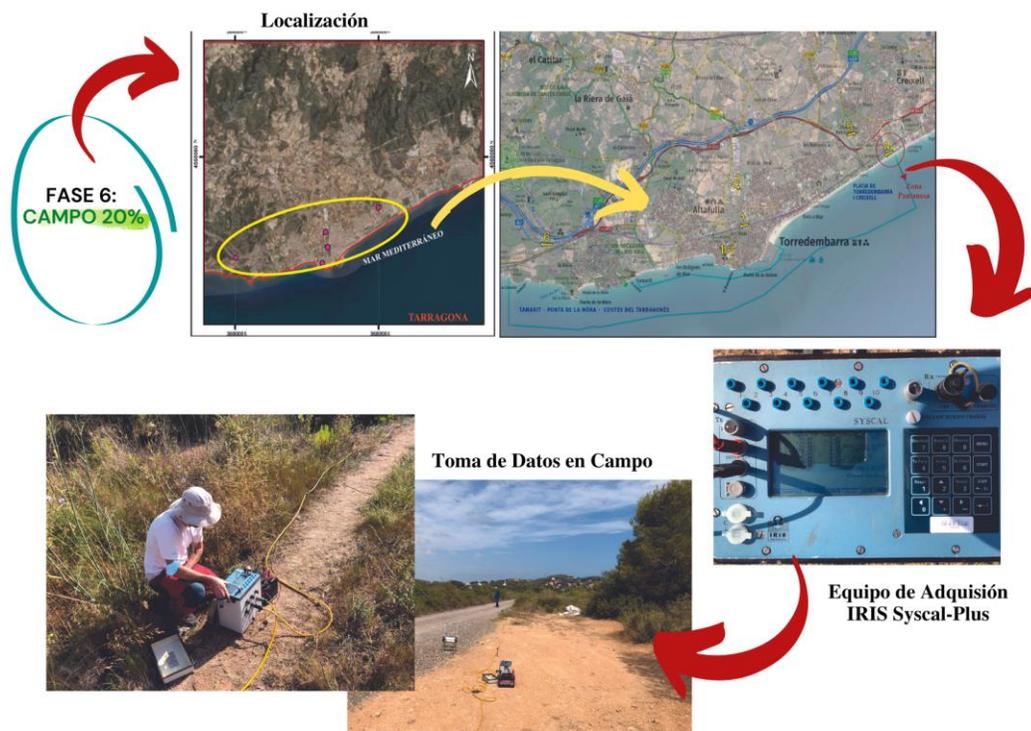
### 5.2.2 Fase 6: Campo

Esta fase se encuentra principalmente enfocada en el 20 % del proyecto de investigación, la cual fue planeada, organizada y seleccionada las áreas de interés para la toma de datos tomográficos de acuerdo con los resultados procesados de las fases anteriores pertenecientes al 80% del proyecto de investigación. Este 20%, se enfoca en la rama de la geofísica, específicamente en el método geoelectrico de TRE, en el cual se dispuso de 2 días del mes de julio del año 2021 para la actividad de campo, la cual fue realizada por 2 personas quienes fueron el Co-director del presente proyecto de estudio el Dr Alexandre Sendrós Brea-Iglesias y el encargado del equipo geofísico de la Universitat de Barcelona.

El trabajo en campo se realizó a lo largo de la zona costera del área de estudio, en donde se tenía planeado realizar 6 perfiles ó líneas de adquisición, de las cuales solo se lograron 5, debido a que, una de ellas (Perfil 4) se encontraba en una zona inundada a escasos metros de la línea de costa donde los resultados de la adquisición no hubieran sido relevantes para discriminar la interfaz agua dulce-salina. Dichos datos fueron adquiridos por medio de un resistivímetro IRIS Syscal-Plus de 48 canales con un intervalo de 5 metros entre los electrodos alcanzando líneas sobre la horizontal, es decir, sobre la superficie del terreno de hasta 235 metros, utilizando la configuración electrónica Dipolo-Dipolo (**Figura 31**).

**Figura 31.**

*Diagrama ilustrativo de proceso para la adquisición en campo de datos TRE*



*Nota.* Imagen ilustrativa del proceso de adquisición en campo de los datos de tomografía de resistividad eléctrica (TRE) en el área de interés. Imágenes tomadas y suministradas por el Codirector del proyecto Dr. Alexandre Sendrós.

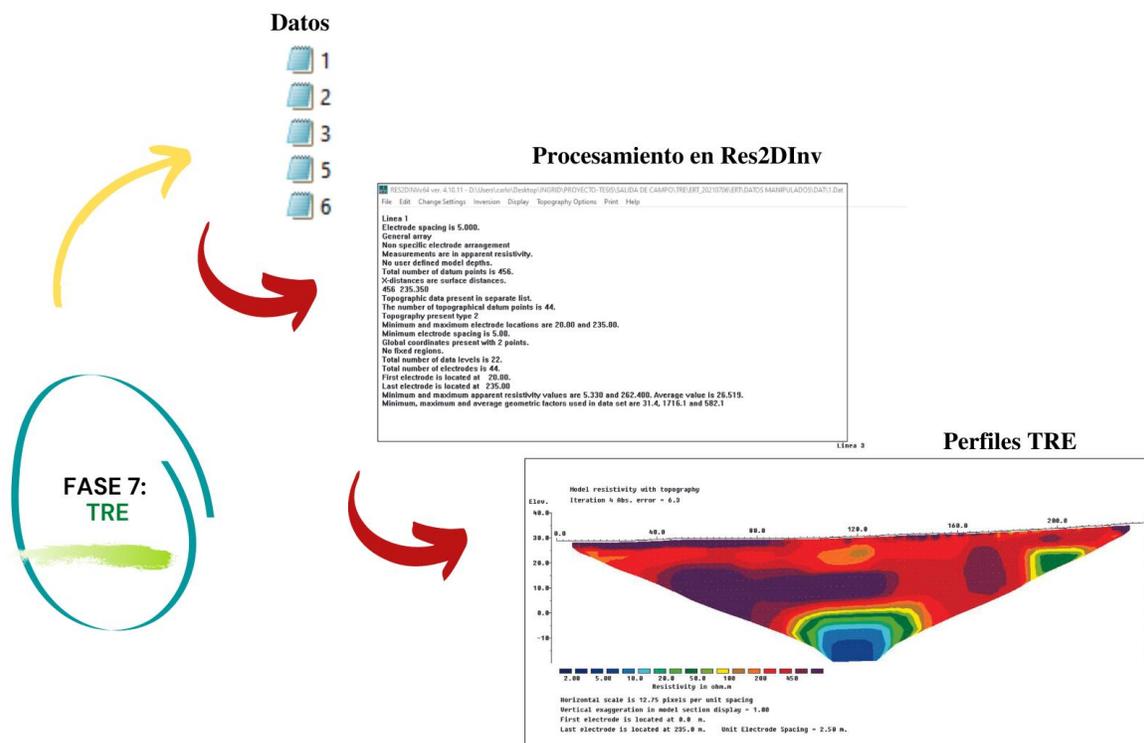
5.2.3 Fase 7: *Procesamiento de datos Post-Campo*

La última fase de la etapa 2 consistió en el procesamiento de los datos TRE que fueron adquiridos directamente en campo mediante 5 perfiles, posteriormente se realizó el respectivo procesamiento a través del Software Res2Dinv x 64 ver 4.10.11 (Abril de 2021) y creado por Loke, 2010 y limitado a 4 iteraciones máximas por cada perfil análisis y finalmente culmina con imágenes para interpretación TRE.

Con dicho procesamiento de datos se logra elaborar secciones, gráficos, mapas y demás que fueran necesarios para las siguientes fases de la etapa 3 donde se realiza la interpretación final de todos los datos obtenidos durante todas las etapas.

**Figura 32.**

*Diagrama ilustrativo de proceso para el procesamiento de los datos obtenidos mediante los perfiles TRE*



### **5.3 Etapa de resultados**

En la etapa de resultados se realiza la correlación de todas las ramas aplicadas con la respectiva interpretación, asociación y procesamiento de la información recopilada y organizada de las etapas anteriores, cumpliendo con los objetivos propuestos y posteriormente registrando todo el proceso en este documento final.

#### **5.3.1 Fase 8: Integración y análisis de resultados**

Esta fase se compone del análisis de resultados, discusión y posibles recomendaciones. Es aquí donde se reúne toda la literatura recopilada, se procesa y se genera una hipótesis coherente de acuerdo con todos los resultados obtenidos. En este proyecto, la información a integrar se compone de mapas geológicos, hidrogeológicos, piezométricos, hidrogeoquímicos, gráficas, tablas, diagramas de análisis químicos (Piper, stiff, Shöeller y salinidad para clasificación de aguas de riego), perfiles SEV y secciones TRE, los cuales fueron recopilados y procesados en las fases anteriores.

Con la información base de los mapas geológicos e hidrogeológicos permiten dar una noción preliminar del área de interés, con el desarrollo del mapa piezométrico se logra identificar direcciones de flujo subterránea, zonas de recarga y descarga, con los mapas hidrogeoquímicos, gráficas, tablas, diagramas de análisis químicos (Piper, stiff, Shöeller y salinidad para clasificación de aguas de riego) se definen las áreas tanto afectadas por la contaminación de agua salobre como mayormente vulnerable por dicha causa y con los perfiles Sev's y secciones TRE permiten delimitar la geometría del contacto entre el agua dulce y salada y la extensión de la zona de mezcla.

De modo general, con la realización y desarrollo de cada uno de los elementos anteriormente nombrados, los objetivos del presente proyecto de investigación poco a poco se

van llevando a cabo y las hipótesis van logrando alguna credibilidad y otra incredibilidad de forma gradual, lo que conlleva a que algunas de estas se descartaran y otras fueran tomando mayor importancia en el trabajo.

### ***5.3.2 Fase 9: Elaboración de entregables.***

Esta es la fase final, en la cual se compila toda la literatura , información, procesamiento de datos en los respectivos softwares utilizados y análisis de resultados, con el propósito de elaborar el presente documento como entregable un informe de proyecto de grado en la modalidad de trabajo de investigación para la Universidad Industrial de Santander (UIS) y consecutivamente a ello, se procede a redactar y organizar un artículo para su posterior publicación, presentando los conceptos básicos, metodología, resultados, discusión y conclusiones generados a lo largo de este trabajo que permitieron su desarrollo.

## 6. Análisis e interpretación de resultados

### 6.1 Caracterización hidrogeológica

#### 6.1.1 Análisis e interpretación piezométrica

La información de la campaña de campo realizada por FCIHS, 2012, es de gran utilidad para la elaboración del mapa piezométrico digital (**Figura 33**), sin embargo, esta información sigue siendo escasa para la realización de una piezometría detallada, logrando definir solamente la tendencia general piezométrica.

Cabe resaltar que de acuerdo con la campaña realizada por FCIHS, 2012, los niveles piezométricos fueron adquiridos en la zona topográficamente baja del área de estudio donde aflora principalmente sedimentos de tipo limo, arcilla, arena y grava correspondientes al acuífero Superior (Acuífero Mioceno y Cuaternario), por lo cual se puede deducir que no se alcanza a obtener información piezométrica del acuífero Inferior (Acuífero Jurásico - Cretácico). Adicionalmente, gran cantidad de pozos se encontraron secos, los cuales sirvieron para definir que el nivel piezométrico se encuentra por debajo de la cota de profundidad de cada uno de los puntos de agua analizados (FCIHS, 2012).

El mapa piezométrico logra dar una perspectiva piezométrica general del área de estudio principalmente subparalela a la línea de costa acompañada de algunas inflexiones generadas por un mayor flujo subterráneo proveniente de la parte norte, así mismo, se logra identificar que la dirección primordial de flujo tanto subterránea como superficial es principalmente perpendicular a dicha línea de costa procedente de las partes topográficamente altas en donde se encuentra las zonas de recarga, la cual descarga mayoritariamente en el mar. Sin embargo, también se

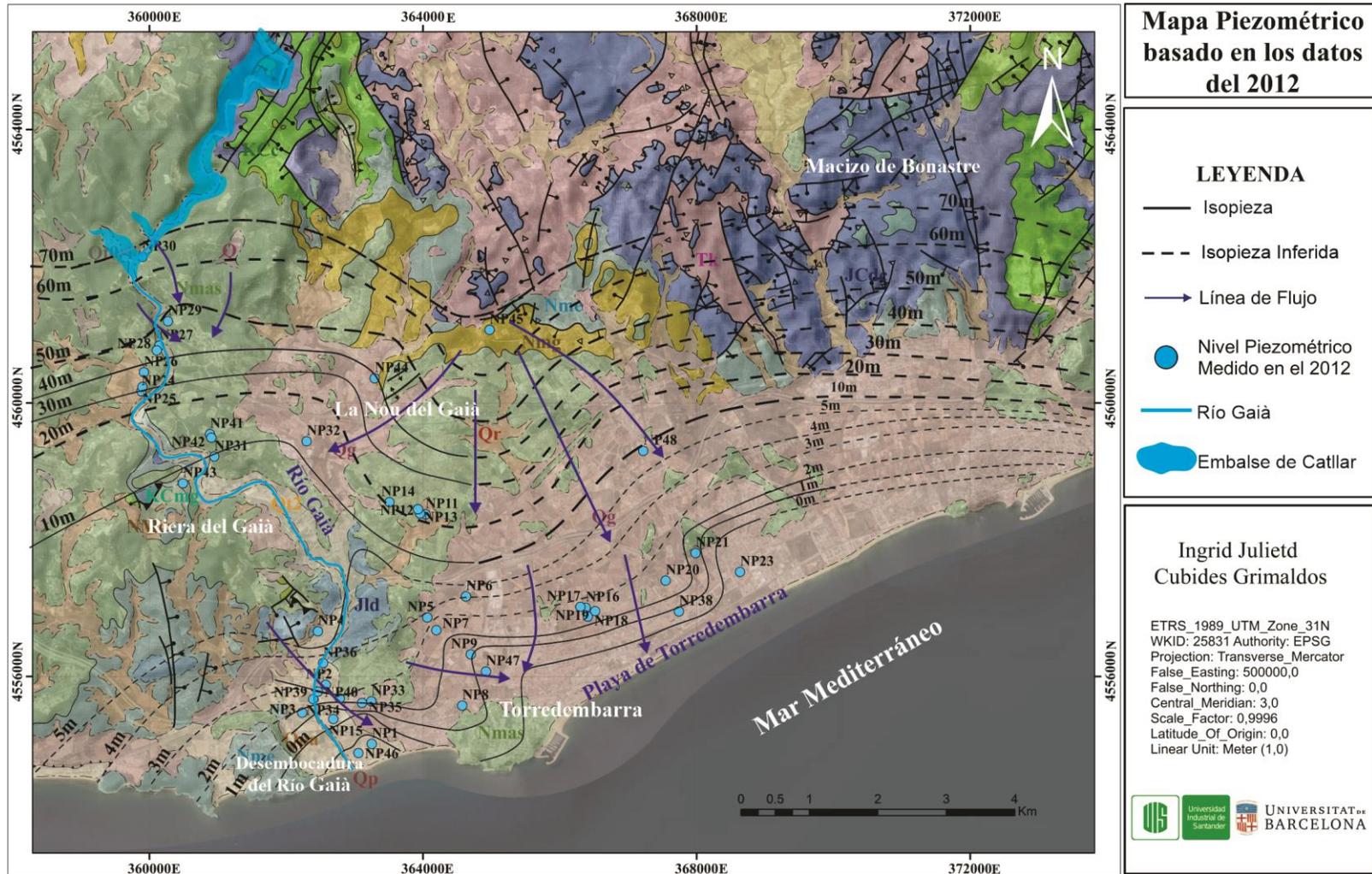
observan pequeñas zonas como en el municipio La Nou del Gaià donde presentan una tendencia de descarga orientada hacia el SW del área de estudio.

En el área de estudio, la dirección de flujo del agua superficial se logra visualizar fácilmente, debido a que este se ve reflejado directamente mediante el transcurso natural del río Gaià. El río Gaià se ha mantenido sin escurrimiento superficial importante como resultado de la construcción del embalse indicando mediante los niveles resultantes una desconexión del río con el acuífero superior en la mayor parte de su recorrido natural. No obstante, merece la pena destacar que en el mapa piezométrico se identifica en un sector de la Riera del Gaià un pequeño tramo en donde el río se comporta como ganador pese a dicha situación como resultado del agua originada por el riego de cultivo presentes en las zonas altas del sector. Así mismo, en la desembocadura también se observa el mismo aporte del acuífero hacía el río, quizá por la misma situación de los retornos por riego, permitiendo el renacimiento del río en la desembocadura.

Adicional a lo anteriormente mencionado, en la zona alta de la desembocadura del río Gaià, existen tanto áreas de cultivo como urbanizaciones generando zonas de baja recarga y relativa intensidad de explotación de agua subterránea y a su vez un cono de depresión (**Figura 33**).

Figura 33.

Mapa piezométrico



Nota. El mapa piezométrico es elaborado de acuerdo con los datos extraídos de FCIHS, 2012.

### ***6.1.2 Análisis e interpretación hidrogeoquímica***

De acuerdo con los resultados obtenidos de los puntos hidrogeoquímicos seleccionados, se observa que durante 2015 y 2020 las estaciones de verano y otoño no presenta ningún cambio significativo entre ellas, por lo contrario, poseen una tendencia regular en el resultado de las concentraciones químicas en cada punto, es por ello por lo que se decide calcular la media de cada concentración de ion mayoritario por cada punto hidrogeoquímico y de esta manera ejecutar un análisis hidrogeoquímico general.

Además, es importante mencionar que debido a la escasez de información estratigráfica de los pozos donde el ACA realizó los muestreos y a falta de una campaña de campo específicamente para obtener un muestreo hidrogeoquímico y una estratigrafía más al detalle, no se alcanza a separar e interpretar de manera exacta y concreta los datos de acuerdo con los dos acuíferos existentes en el área. Sin embargo, se logra obtener una identificación hidrogeoquímica base referente a los dos acuíferos, debido a que la profundidad máxima alcanzable de los pozos pertenece solamente a las unidades litológicas aflorantes según la estimación del espesor de cada una de ellas.

**6.1.2.1 Análisis estadístico descriptivo.** El resumen estadístico de la composición química de las muestras del agua subterránea de cada punto hidrogeoquímico seleccionado en el área de estudio se presenta en la **Tabla 6**. Para evaluar la calidad de los resultados analíticos es importante resaltar que todos los puntos hidrogeoquímicos desde la A hasta la R se evaluaron mediante el cálculo de error de balance iónico porcentual. El valor de error obtenido se sitúa entre 0.75% y 3.87% con una media del 2.3%, el cual se encuentra dentro del valor admitido y acorde a las condiciones geológicas y ambientales presentes en el área de estudio.

Estos puntos hidrogeoquímicos estuvieron en un rango de pH de 6.69 – 8.26 con una media de 7.49 y una desviación estándar de 0.33. Estos resultados indican que el agua subterránea en ciertas zonas es ligeramente alcalina principalmente indicios de agua de mar. La temperatura (T) presentó valores desde 13.7°C a 23.5 °C con una media de 19.49 °C y una desviación estándar de 2.45 y los valores de conductividad eléctrica (CE) oscilaron de 599 µS/cm a 3043.5 µS/cm con una media de 1297.75 µS/cm y una desviación estándar de 658.3. El orden de abundancia de los cationes mayores fue  $Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+} > K^+$  y la de los aniones mayores fue  $HCO_3^- > Cl^- > SO_4^{2-} > NO_3^-$ . Los valores máximos y mínimos de los cationes y aniones permiten mostrar la heterogeneidad espacial del medio acuífero debido al cambio dinámico entre los diferentes procesos hidrogeoquímicos presentes en el área de estudio.

**Tabla 6.**

*Parámetros estadísticos descriptivos de las características fisicoquímicas del agua subterránea del área de estudio durante la temporada secas de verano y otoño de 2015-2020*

Parámetro	Unidad	Núm. de muestras	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar	Sesgo	Pámetros individualizados
PH		18	6.69	8.26	7.49	0.33	-0.01	6.5–8.5
T	°C	18	13.70	23.50	19.49	2.45	-0.72	
CE	uS/cm	18	599.00	3043.50	1297.75	658.30	1.77	2500
Ca <sup>2+</sup>	mg/L	18	36.67	168.00	97.26	28.96	0.50	
Na <sup>+</sup>	mg/L	18	12.33	431.00	83.49	109.26	2.46	200
Mg <sup>2+</sup>	mg/L	18	31.75	99.00	54.31	18.05	1.27	
K <sup>+</sup>	mg/L	18	1.00	10.00	4.06	2.56	1.05	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	18	162.00	385.75	326.60	50.35	-0.03	
Cl <sup>-</sup>	mg/L	18	21.62	610.05	147.49	172.13	1.77	250
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/L	18	54.50	292.50	145.38	74.00	0.74	250
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	18	4.90	170.80	36.54	40.46	2.50	50

*Nota.* La columna de parámetros individualizados contiene los valores máximos de las concentraciones químicas aceptables para el agua subterránea como recurso hídrico según la normatividad de la calidad de agua de consumo humano de España para 2020. Tomado de MSPSI,2020.

**6.1.2.2 Tipos de agua.** En general, con los diagramas de *Schoeller-Berkaloff* y *Stiff* se clasificaron cuatro tipos de agua existentes en el área de estudio. Adicionalmente con el diagrama de *Piper* (*Kelly, 2005*) se determinaron el tipo de zonificación de cada punto hidrogeoquímico (A-R) y finalmente con el diagrama de *Piper* modificado por *García-Cabrejo et al., 2020* y creado especialmente para casos de mezclas de agua dulce-salada o de intrusiones marinas, se identificó los posibles procesos químicos del agua (**Figura 35-Tabla 7**).

El primer tipo de agua corresponde mayoritariamente a clorurada-cálcica (Ca-Cl) con el 5.55% del total de los 18 puntos hidrogeoquímicos, correspondiente al punto A, siendo de las posiciones más cercanas hacia el SW a la línea de costa con 0,6 km, presentando una zonificación según *Kelly, 2005*, de tipo de intrusión marina generando indicios de mezcla de aguas continentales y oceanicas.

Sin embargo, el punto hidrogeoquímico A, es la única posición en la cual se ve un cambio radical significativo en el año 2020, en donde las concentraciones químicas presentan un gran aumento del 57.8% en el ión mayoritario del  $\text{HCO}_3^-$  y una disminución altamente marcada de los iones mayoritarios  $\text{Cl}^-$  (89.33%),  $\text{NO}_3^-$  (94.39%),  $\text{Mg}^{2+}$  (44%),  $\text{Na}^+$  (82.82%) y de la CE (50.47%), en comparación con los años 2015 hasta el 2019. Es por ello, que es de gran importancia realizar en este caso los respectivos diagramas para todas las concentraciones químicas obtenidas durante todos los años para el punto A, con el fin de lograr identificar el comportamiento de los iones.

De esta forma el punto A, para el año 2020 presenta un tipo de agua bicarbonatada cálcica (Ca- $\text{HCO}_3$ ) con zonificación de agua dulce, en donde se clasifica como aguas utilizables para el riego con precauciones (Alta Salinidad - Baja en Sodio), mientras que para los años 2015 hasta el 2019, posee un tipo de agua clorurada cálcica (Ca-Cl) con zonificación de intrusión

marina y clasificación de aguas no aptas para el riego (Muy Alta Salinidad - Mediana a alta en Sodio) (**Figura 34**).

Para ambos tipos de agua encontrados en el punto A, solo un tipo de agua presentó una tendencia a los seis posibles procesos sugeridos por García-cabrejo *et al.*, 2020. Para los datos de los años 2015 al 2019 clasificados como aguas cloruradas cálcicas además de lograr confirmar la variación de las altas concentraciones de cloruros con tendencia al incremento del calcio se identifica un proceso químico de intercambio iónico resultado del reemplazamiento de los cationes de sodio que se encuentran en las arcillas con los cationes en solución que posee el agua de mar cuando entran en contacto agua-roca (**Figura 34-B** – Círculo rojo) y para el año 2020 aunque no se identifique ninguna tendencia de los procesos químicos sugeridos del diagrama se confirma el incremento de la concentraciones de los bicarbonatos con tendencia al descenso de la concentración del cloruro siempre y cuando se siga dando las mismas condiciones (**Figura 34-B** - Círculo azul).

La diferencia de los valores de las concentraciones de los iones mayoritarios obtenidos en el punto hidrogeoquímico A en el año 2020, se debe fundamentalmente a la baja demanda turística, industrial, agrícola y ganadera, generada durante las restricciones por la pandemia Covid-19, demostrando que si existen indicios nuevamente de contaminación por intrusión marina resultado de la sobreexplotación de acuíferos a pesar de la construcción del embalse de Catllar ejecutada como solución en la década de los años 90.



Los tres tipos de agua presentados a continuación, no tuvieron ningún cambio significativo siendo constantes entre sí durante 2015 -2020 (**Figura 35**).

El segundo tipo de agua es de tipo clorurada-sódica (Na-Cl) con el 16.67% del total, correspondiendo a los puntos B, C y J. Los puntos B y C se encuentran cercanos a la costa con aproximadamente 0,8 Km y J más alejada hacia el SW aproximadamente a 2,75 km de la zona costera. Los tres puntos presentan zonificaciones distintas, B es de tipo mezcla conservativa (Agua de mar), C de tipo intrusión marina y J de tipo intrusión marina ligera. Así mismo, B y C presenta clasificación de aguas no aptas para el riego (Muy Alta Salinidad - Mediana a alta en Sodio), sin embargo, J posee aún una clasificación de aguas utilizables para el riego con precauciones (Alta Salinidad - Baja en Sodio).

El tercer tipo de agua es bicarbonatada magnesio ( $Mg-HCO_3$ ) con el 16.67% del total, correspondiendo a los puntos E, F y K, de los cuales E y F se encuentran aproximadamente hacia el SE entre 3 a 1 Km cercano a la zona costera y K más alejada hacia el SW aproximadamente a 4,8 Km, presentando una zonificación para los puntos E y F de tipo de agua dulce con clasificación de aguas utilizables para el riego con precauciones (Alta Salinidad - Baja en Sodio) y para K de tipo intrusión marina ligera, sin embargo con una clasificación de aguas de buena calidad para el riego (Mediana Salinidad - Baja en Sodio).

Para el cuarto y último tipo de agua es de tipo bicarbonatada cálcica ( $Ca-HCO_3$ ) con la mayoría de los puntos seleccionados obteniendo un 61,11% del total de puntos hidrogeoquímicos pertenecientes a D, G, H, I, L, M, N, O, P, Q y R. La mayoría de estas posiciones (G, H, I, M, N, O, P y R) se encuentran en la parte mayormente topográficamente del área de estudio iniciando desde el NW hacia el NE, presentando una zonificación de tipo agua dulce, no obstante, es importante mencionar que los puntos I, N y R tuvieron ligeros cambios de zonificación entre las

temporadas estacionales pasando entre sí de agua dulce a mezcla conservativa (agua de mar) para I y de agua dulce a intrusiones marinas ligeras y viceversa para N y R. Los demás (D, L y Q) cuyas posiciones se ubican en la parte baja topográficamente desde el SW hacia el NW del área de estudio presentan una zonificación distinta a los anteriores pues es de tipo intrusión marina ligera. Todos con clasificación de aguas utilizables para el riego con precauciones (Alta Salinidad - Baja en Sodio).

Para los tres tipos de agua anteriormente mencionados, se presentaron tres tendencias a los seis posibles procesos sugeridos por García-Cabrejo *et al.*, 2020 (**Figura 35-C**). Para los puntos B (Clorurada Sódica) y E (Bicarbonatada Cálcica) se identifica un proceso químico con tendencia a *mixing* resultado de mezcla de agua dulce con agua salada de mar, en el punto B este ya se encuentra afectado mientras en el punto E posee tendencia a ser afectado por este proceso. Para el punto C (Clorurada Sódica) se identifica un proceso químico con tendencia a intercambio iónico generado en este caso debido al reemplazamiento de los cationes de sodio que se encuentran en las arcillas con los cationes en solución que posee el agua de mar cuando entran en contacto agua-roca. En los puntos J (Clorurada Sódica) y D (Bicarbonatada Cálcica) se identifica un proceso químico con tendencia de disolución de carbonato calcio el cual es interpretado de origen continental proveniente de aguas superficiales como las aguas lluvias. El agua allí posee un pH el cual infiltra el subsuelo y así mismo el acuífero superior hasta llegar al acuífero inferior en donde logra facilitar la disolución de los carbonatos presentes. De esta manera se puede inferir que en esos puntos además puede existir una conexión de ambos acuíferos quizá gracias a posibles fallas locales existentes en esas áreas específicas. Para los demás puntos, aunque no identificaron ninguna tendencia a los procesos químicos sugeridos del diagrama se confirma el

incremento de las concentraciones de los bicarbonatos con menor proporción en las concentraciones de cloruros (**Figura 35-C**).

**Tabla 7.**

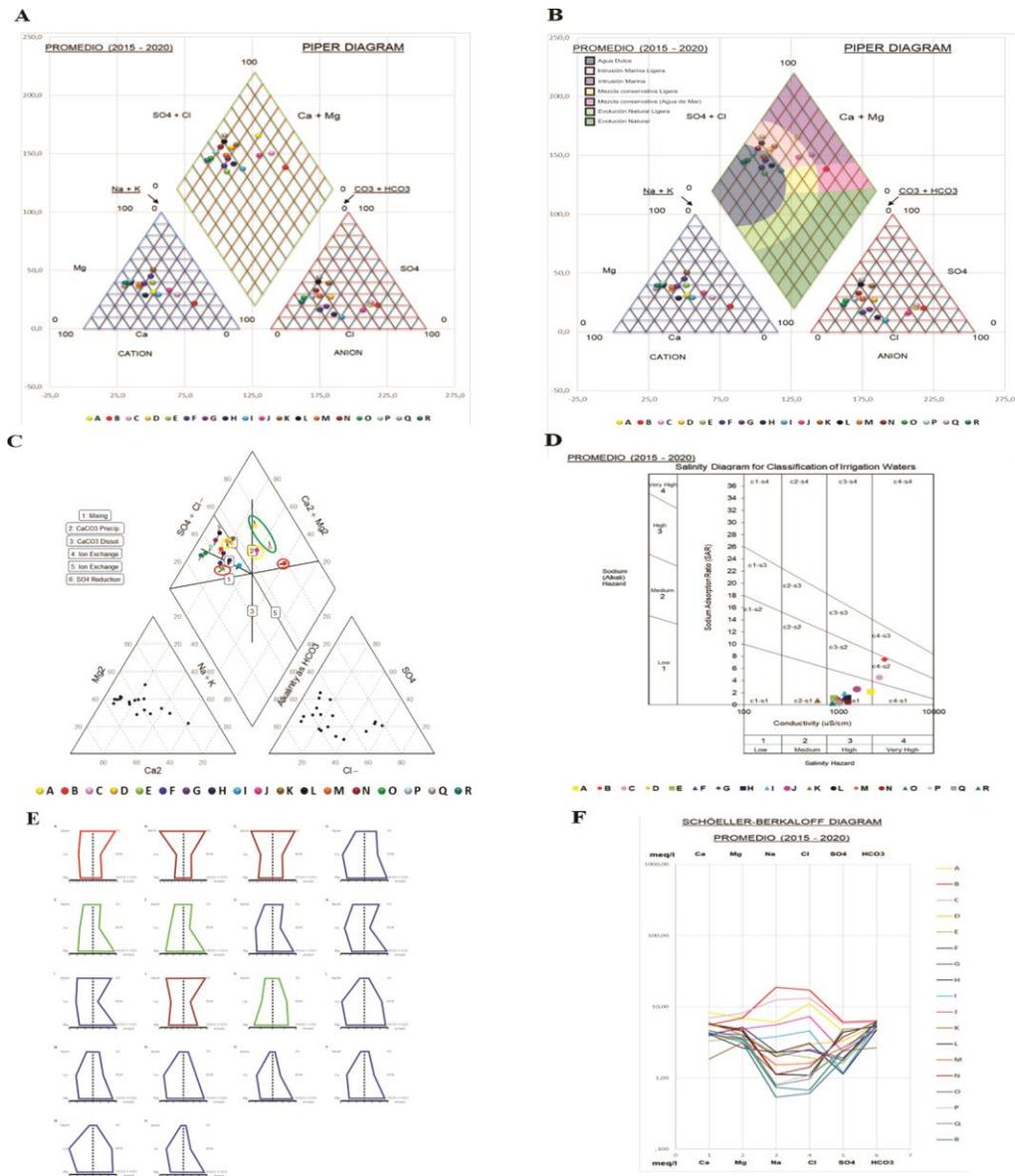
*Resumen hidrogeoquímico de todos los puntos desde la A hasta la R localizados en el área de estudio*

Punto	Coordenadas		Tipo de agua	Zonificación (Kelly, 2005)	Grado de salinización para clasificación de agua de irrigación	Proceso (García-cabrejo <i>et al</i> , 2020)
	Este	Norte				
A (2015-2019)	362596	4555171	Clorurada cálcica	Intrusión Marina	Aguas no aptas para el riego (Muy Alta Salinidad - Mediana en Sodio)	Intercambio Iónico
A (2020)	362596	4555171	Bicarbonatada cálcica	Agua Dulce	Aguas utilizables para el riego con precauciones (Alta Salinidad - Baja en Sodio)	Ninguno
B	364032	4555541	Clorurada Sódica	Mezcla (Agua de Mar)	Aguas no aptas para el riego (Muy Alta Salinidad - Mediana a alta en Sodio)	Mixing
C	364261	4555407	Clorurada Sódica	Intrusión Marina	Aguas no aptas para el riego (Muy Alta Salinidad - Mediana en Sodio)	Intercambio Iónico
D	362681	4557595	Bicarbonatada cálcica	Intrusión Marina Ligera	Aguas utilizables para el riego con precauciones (Alta Salinidad - Baja en Sodio)	Disolución del HCO <sub>3</sub>
E	367184	4559628	Bicarbonatada magnesica	Agua Dulce	Aguas utilizables para el riego con precauciones (Alta Salinidad - Baja en Sodio)	Mixing
F	370131	4559063	Bicarbonatada magnesica	Agua Dulce	Aguas utilizables para el riego con precauciones (Alta Salinidad - Baja en Sodio)	Ninguno
G	370662	4560760	Bicarbonatada cálcica	Agua Dulce	Aguas utilizables para el riego con precauciones (Alta Salinidad - Baja en Sodio)	Ninguno
H	372836	4561668	Bicarbonatada cálcica	Agua Dulce	Aguas utilizables para el riego con precauciones (Alta Salinidad - Baja en Sodio)	Ninguno
I	373449	4561466	Bicarbonatada cálcica	Agua Dulce	Aguas utilizables para el riego con precauciones (Alta Salinidad - Baja en Sodio)	Ninguno
J	358576	4557279	Clorurada Sódica	Intrusión Marina Ligera	Aguas utilizables para el riego con precauciones (Alta Salinidad - Baja en Sodio)	Disolución del HCO <sub>3</sub>
K	360570	4558982	Bicarbonatada magnesica	Intrusión Marina Ligera	Aguas de buena calidad para el riego (Mediana Salinidad - Baja en Sodio)	Ninguno
L	364136	4560731	Bicarbonatada cálcica	Intrusión Marina Ligera	Aguas utilizables para el riego con precauciones (Alta Salinidad - Baja en Sodio)	Ninguno
M	367466	4561595	Bicarbonatada cálcica	Agua Dulce	Aguas utilizables para el riego con precauciones (Alta Salinidad - Baja en Sodio)	Ninguno
N	369571	4563257	Bicarbonatada cálcica	Agua Dulce	Aguas utilizables para el riego con precauciones (Alta Salinidad - Baja en Sodio)	Ninguno
O	370147	4563104	Bicarbonatada cálcica	Agua Dulce	Aguas utilizables para el riego con precauciones (Alta Salinidad - Baja en Sodio)	Ninguno
P	370156	4563119	Bicarbonatada cálcica	Agua Dulce	Aguas utilizables para el riego con precauciones (Alta Salinidad - Baja en Sodio)	Ninguno
Q	360413	4564191	Bicarbonatada cálcica	Intrusión Marina Ligera	Aguas utilizables para el riego con precauciones (Alta Salinidad - Baja en Sodio)	Ninguno
R	361811	4565121	Bicarbonatada cálcica	Agua Dulce	Aguas utilizables para el riego con precauciones (Alta Salinidad - Baja en Sodio)	Ninguno

*Nota.* Tabla resumen de los 18 puntos hidrogeoquímicos extraídos de las estaciones de la Agencia Nacional de Cataluña (ACA) localizados en el interior del área de estudio.

**Figura 35.**

*Diagramas hidrogeoquímicos de las concentraciones constantes durante 2015-2020 de todos los puntos extraído del ACA*



*Nota.* Diagrama de piper sencillo (A), Diagrama de piper zonificado según Kelly, 2005 (B), Diagrama de piper modificado según García-Cabrejo *et al.*, 2020 (C), Diagrama de salinidad para clasificación de aguas de irrigación (D), Diagramas de Stiff (E) y Diagrama de Shöeller-Berkaloff (F). Procesados en el easy quim creado por vasquez, 2012.

**6.1.2.3 Análisis de la distribución espacial hidrogeoquímica de las aguas subterráneas.** Las aguas se distribuyen espacial y a su vez químicamente a medida que el agua fluye a través de la roca, ya que va adquiriendo distintas composiciones generadas por los minerales presentes en el terreno y a las reacciones que se producen (IGME, 1985). La hidrólisis y el intercambio catiónico juegan un papel importante en la formación de la composición de las aguas, que cambian de un tipo hidroquímico a otro. De igual forma el agua evoluciona en cuanto al contenido de aniones; a medida que un agua avanza, en su recorrido por un medio, en donde adquiere la composición de la matriz geológica con la cual está en contacto, aunque también se ve “afectada” por las reacciones que se llevan a cabo y así van adquiriendo diferente composición iónica, hasta su evolución final como aguas de descarga. Para este caso, las aguas principalmente se distribuyen espacial y químicamente en dirección NE-SW del área de estudio.

En la parte NE se encuentra la zona topográficamente más alta del área; representativa del Macizo de Bonastre en donde se encuentra aflorando las unidades litológicas pertenecientes al acuífero inferior compuesto en su mayoría por dolomías y calizas fracturadas. Es allí en el que se concentra el agua tipo bicarbonatada cálcica la cual se considera como agua de recarga y libre de alguna contaminación. No obstante, hay ciertas zonas específicas en donde se ubica I, N y R que a pesar de presentar un tipo de agua constante durante 2015-2020, poseen ligeramente cambios de zonificación, indicando estos sectores como focos principales para el alcance máximo espacial que puede llegar a tener la contaminación logrando una solución preventiva.

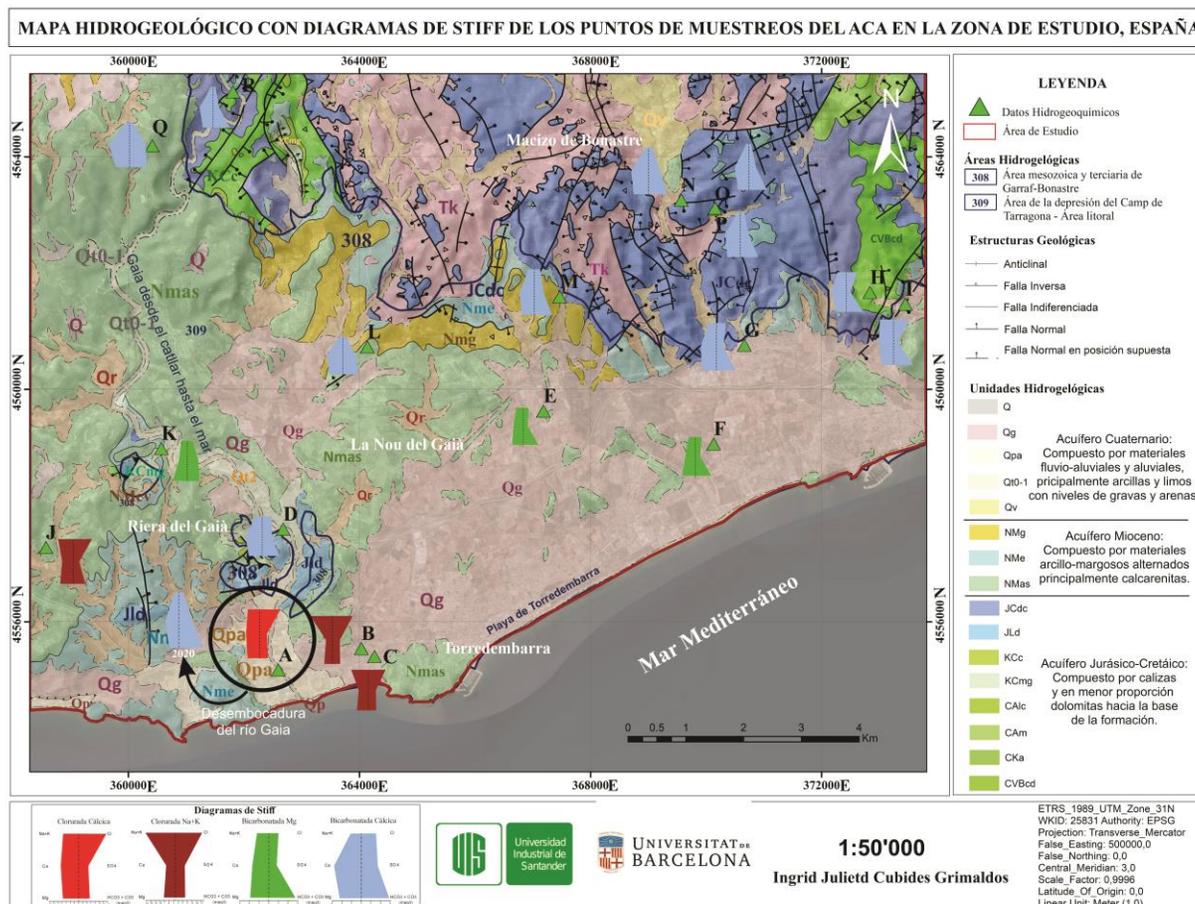
Hacia el SW se encuentra la zona topográficamente más baja del área, donde se encuentra aflorando las unidades litológicas pertenecientes al Acuífero Superior (Acuífero Mioceno-Cuaternario) compuesto por rocas sedimentarias desde limos hasta gravas con sedimentos de origen aluvial, fluvial y de playa.

En esta misma área, las zonas bajas cercanas o localizadas hacia el NW del borde de los niveles altamente topográficos como L y Q siguen presentando la misma tendencia de tipo de agua bicarbonatada cálcica, pero con zonificación distinta. Este hecho se interpreta como fenómenos de intrusiones marinas ligeras resultado de pequeñas mezclas de agua dulce-salada, generando pequeños indicios de posibles riesgos de extensión de la intrusión marina hacia esos sectores.

Continua topográficamente descendiendo con agua tipo bicarbonatada magnésica, predominando el Magnesio debido al cambio litológico y zonificado constantemente como agua dulce indicando libre de contaminación. Hacia el sector de la Riera del Gaià a pesar de ser constantemente agua de tipo bicarbonatadas presenta zonificaciones en sentido aguas abajo de intrusión marina ligera para K y de intrusión marina para D, interpretándose como una entrada de agua de mar a continente donde dicha contaminación se extiende en dirección SN, contraria al sentido del flujo de agua. Finalmente, hacia el sector costero se presenta el área más afectada y vulnerable pues ya se encuentra aguas cloruradas, específicamente hacia el municipio de Altafulla agua tipo clorurada cálcica (A) y hacia el municipio de Torredembarra aguas de tipo clorurada sódica (B y C), en donde hay mezcla de agua salada-dulce debido a la alta contaminación de intrusión marina presente resultado la sobreexplotación de los pozos de bombeos y a la cercanía de la línea de costa en donde hay que tener un mayor cuidado (**Figura 36**).

**Figura 36.**

*Mapa hidrogeológico con los diagramas de stiff correspondientes a cada uno de los puntos hidrogeológicos seleccionados del ACA*



*Nota.* Mapa hidrogeológico de los diagramas de Stiff representativos de cada punto de acuerdo con las concentraciones químicas constantes durante 2015-2020.

El círculo negro representa el cambio de tipo de agua que presentó el punto hidrogeológico A durante los años 2015-2019 al año 2020

**6.1.2.4 Análisis de los iones mayoritarios (CE, Cl, SO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub> y Na) según la normativa de la calidad del agua del consumo humano en España, 2020.** Se realiza un análisis de los parámetros químicos que caracterizan las aguas subterráneas teniendo en cuenta tanto la distribución espacial como la concentración relativa de los iones mayoritarios de acuerdo con la normatividad de la calidad de agua de consumo humano de España, 2020 (VG, 2018).

**(Tabla 6).**

En el presente caso de estudio, la conductividad eléctrica (CE) y los iones mayoritarios de cloruro (Cl), nitratos (NO<sub>3</sub>) y sodio (Na) presentan un comportamiento similar en cuanto a la cota topográfica (Z-msnm) como en la distancia hacia el mar (D-Km), en donde muestra un aumento general de dichos parámetros químicos a medida que disminuye la cota topográfica y así mismo a medida que disminuye la distancia del punto hidrogeoquímico hacia la línea de costa.

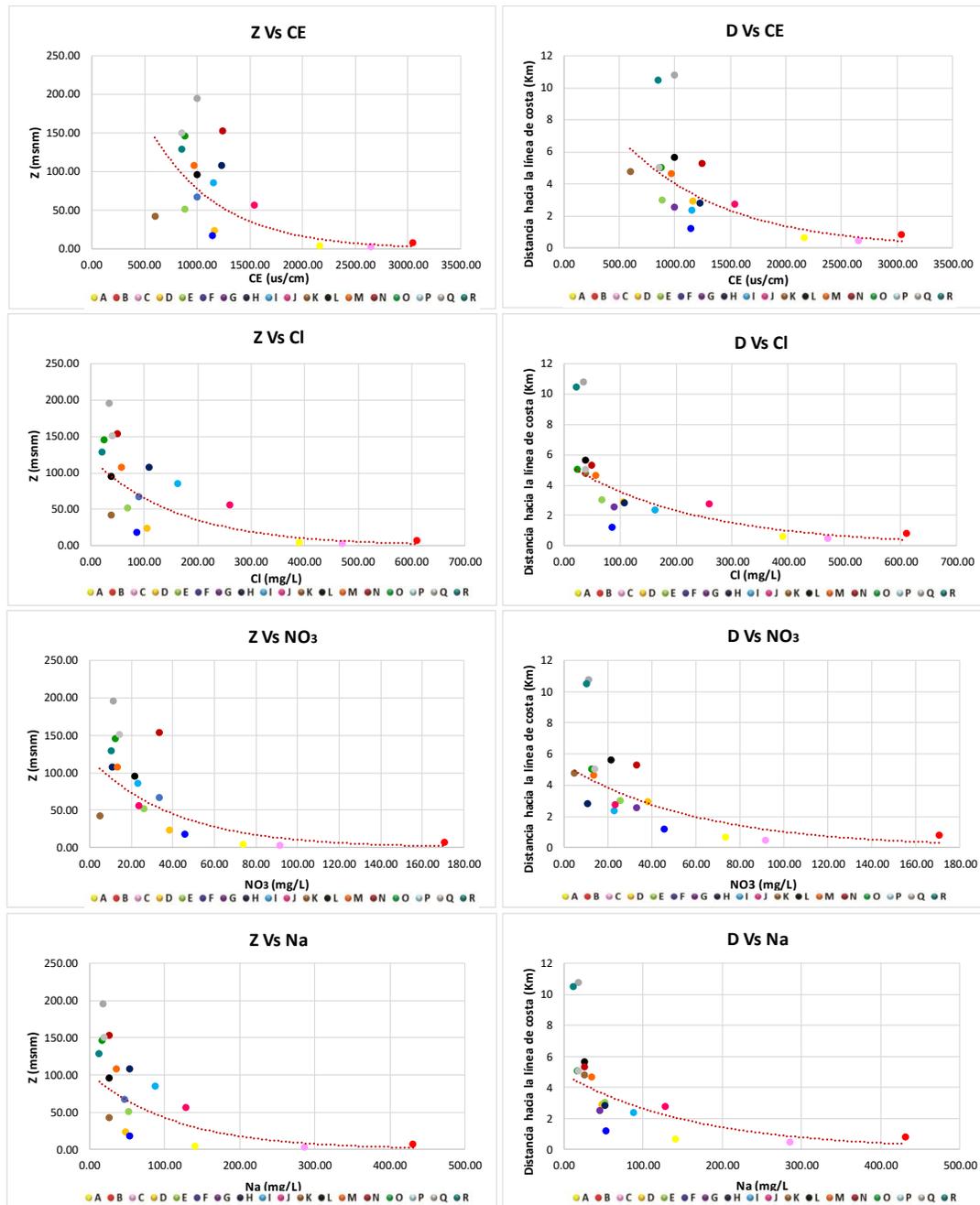
De acuerdo con lo anterior, se identifica hacia el NE en los sectores topográficamente altos y más alejados de la línea de costa, valores bajos de CE (Entre 500 uS/cm hasta 1500 uS/cm), Cl (<250 mg/L), NO<sub>3</sub> (<50 mg/L) y Na (<200 mg/L) los cuales se encuentran aún dentro de los rangos exigidos por la normativa (MSPSI,2020) interpretándose como áreas libres de contaminación generando un recurso hídrico apto para el consumo humano y hacia el SW en los sectores más planos y próximos a la línea de costa especialmente en los municipios de Altafulla y Torredembarra presenta valores altos de (> 1500 uS/cm), Cl (>250 mg/L), NO<sub>3</sub> (>50 mg/L) y Na (>200 mg/L) a excepción del punto A), los cuales se encuentran por fuera de los rangos exigidos por la normativa y al mismo tiempo identificándose como focos importantes de posibles zonas afectadas por la salinización generando aguas no aptas para el consumo humano (**Figura 37**).

Sin embargo, hacia el NE del sector costero se encuentran también áreas topográficamente bajas pero próximas a la zona costera, en donde se observa concentraciones bajas de CE, Cl, NO<sub>3</sub> y Na y dentro de la normatividad clasificada como apta para el consumo humano según estos parámetros, pero a su vez posibles áreas futuras de salinización debido a las condiciones de localización (mayor cercanía a la línea de costa = mayor demanda turística = mayor demanda del recurso hídrico) en las que se encuentra.

De acuerdo con el anterior análisis, se logra inferir que existe un posible origen relacionado al comportamiento exponencial que presenta estos iones mayoritarios y es fundamentalmente de tipo marino, ya que aumenta cada una de sus concentraciones entre más cercanos se localicen al sector costero y que adicionalmente se encuentren urbanizables en donde requiera una mayor demanda del recurso hídrico, generando posibles mezclas de agua dulce-salada.

Figura 37.

Gráficas estadísticas de los iones mayoritarios principales vs la altura y distancia hacia el mar



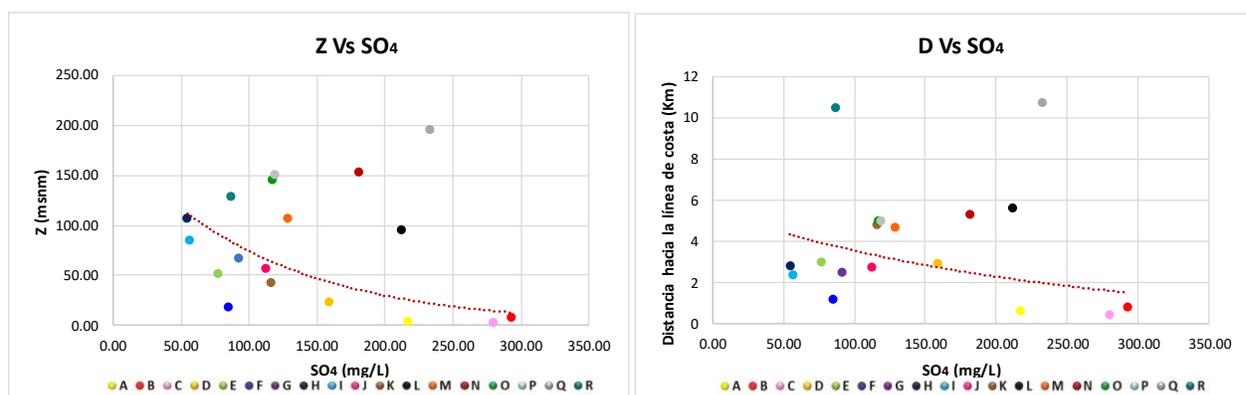
Nota. Gráficas de conductividad eléctrica, cloruros, nitratos y sodio contra la altura o elevación topográfica Z (Lado izquierdo) Gráficas de conductividad eléctrica, cloruros, nitratos y sodio contra la distancia hacia el mar D (Lado derecho).

En cuanto al comportamiento del ion mayoritario del SO<sub>4</sub>, se observa concentraciones medianamente altas entre 100 mg/L hasta 200 mg/L pero dentro de los rangos exigidos por la normativa del recurso hídrico adecuado. Los puntos Q, R, J, K y D se encuentran sobre el río Gaià y N hacia NE sobre el Macizo de Bonastre y concentraciones altas superiores a 200 mg/L sobrepasando los límites de la normativa, de las cuales L y P se encuentran sobre el Macizo de Bonastre y A, B y C al SW del área de estudio, específicamente en los municipios de Altafulla y Torredembarra (**Figura 38**).

De acuerdo con la distribución espacial del SO<sub>4</sub> se logra inferir que existe más de un origen relacionado a este ion mayoritario, en donde las concentraciones presentes tanto del Macizo de Bonastre como del Río del Gaià proviene de las zonas altas donde se encuentran las áreas de recarga y a su vez de agentes antropogénicos como el exceso de fertilizantes utilizables en los cultivos que se encuentran alrededor de dichas zonas y que las concentraciones presentes en los municipios de Altafulla y Torredembarra provienen del aporte marino.

**Figura 38.**

*Gráficas estadísticas del sulfato vs la altura y distancia hacia el mar*



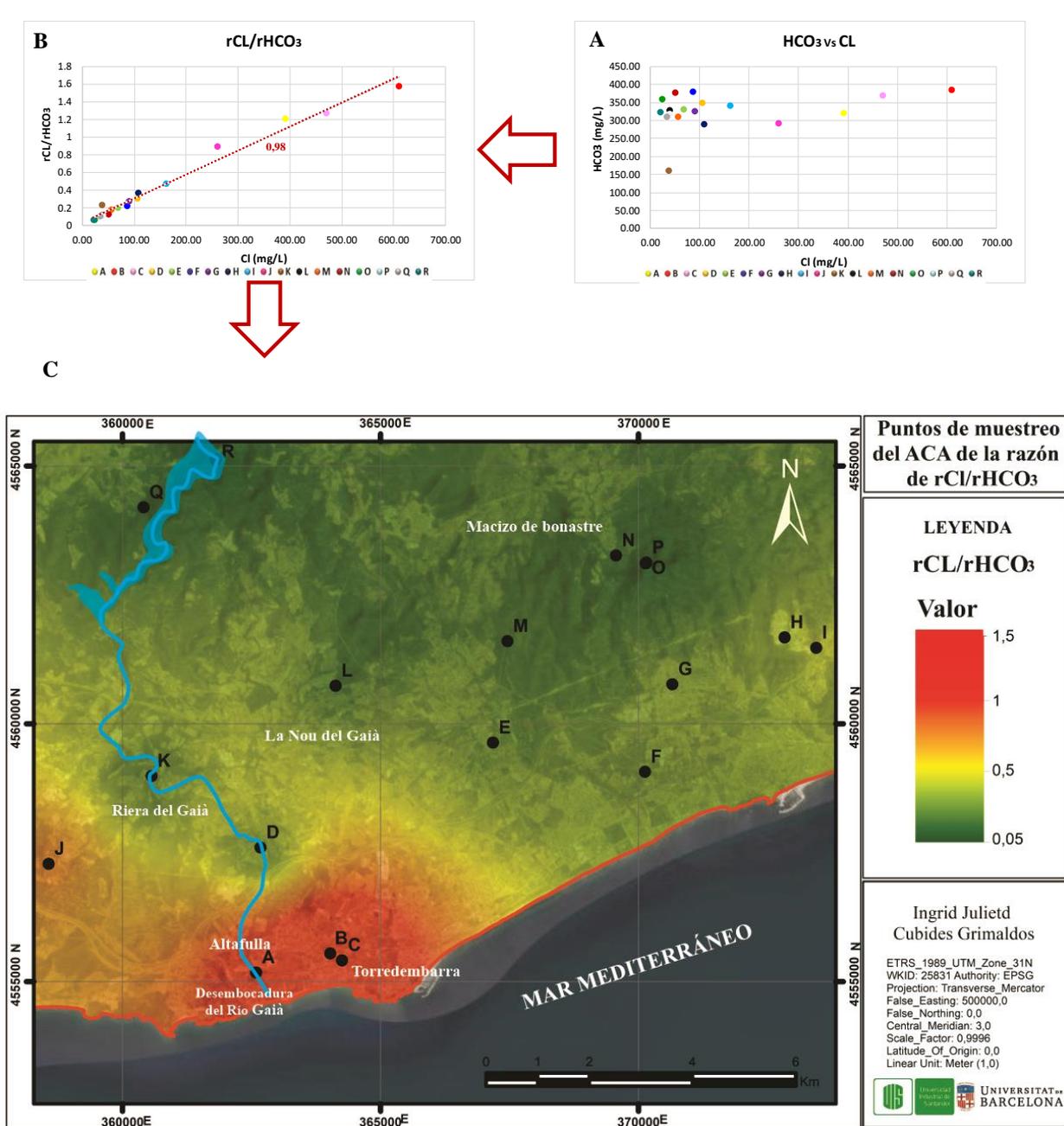
*Nota.* Gráficas de los sulfatos contra la altura o elevación topográfica Z (Lado izquierdo) Gráficas de los sulfatos contra la distancia hacia el mar D (Lado derecho).

**6.1.2.5 Análisis de las primordiales relaciones iónicas.** Para el análisis de mezcla de agua dulce – salada, se han realizado una serie de gráficas y mapas de las relaciones iónicas principales con la finalidad de evidenciar la presencia de posibles mezclas y a su vez de posibles contaminaciones y así ayudar a aportar a la caracterización de intrusiones marinas.

**6.1.2.5.1 Relación  $rCl/rHCO_3$ .** La relación de cloruros y bicarbonatos presenta una tendencia lineal con un coeficiente de correlación de 0,98, esta relación  $Cl/HCO_3$  asciende a medida que aumenta el Cl (**Figura 39-A**), ya que los puntos hidrogeoquímicos que se encuentran en las zonas topográficamente altas y más alejadas de los sectores costeros presentan concentraciones de cloruro bajas (<250 mg/L) y altas concentraciones de bicarbonatos (>250 mg/L) identificándose como aguas continentales, dicha relación asciende a medida que se acerca a los sectores costeros donde a pesar de tener altas concentraciones de bicarbonatos también se presentan valores altos de cloruros (>250 mg/L) (**Figura 39-B**) identificando de esta manera posibles zonas afectadas por la mezcla de agua dulce-salada (**Figura 39-C**).

Figura 39.

Gráficas estadísticas y mapa de la relación  $rCl/rHCO_3$

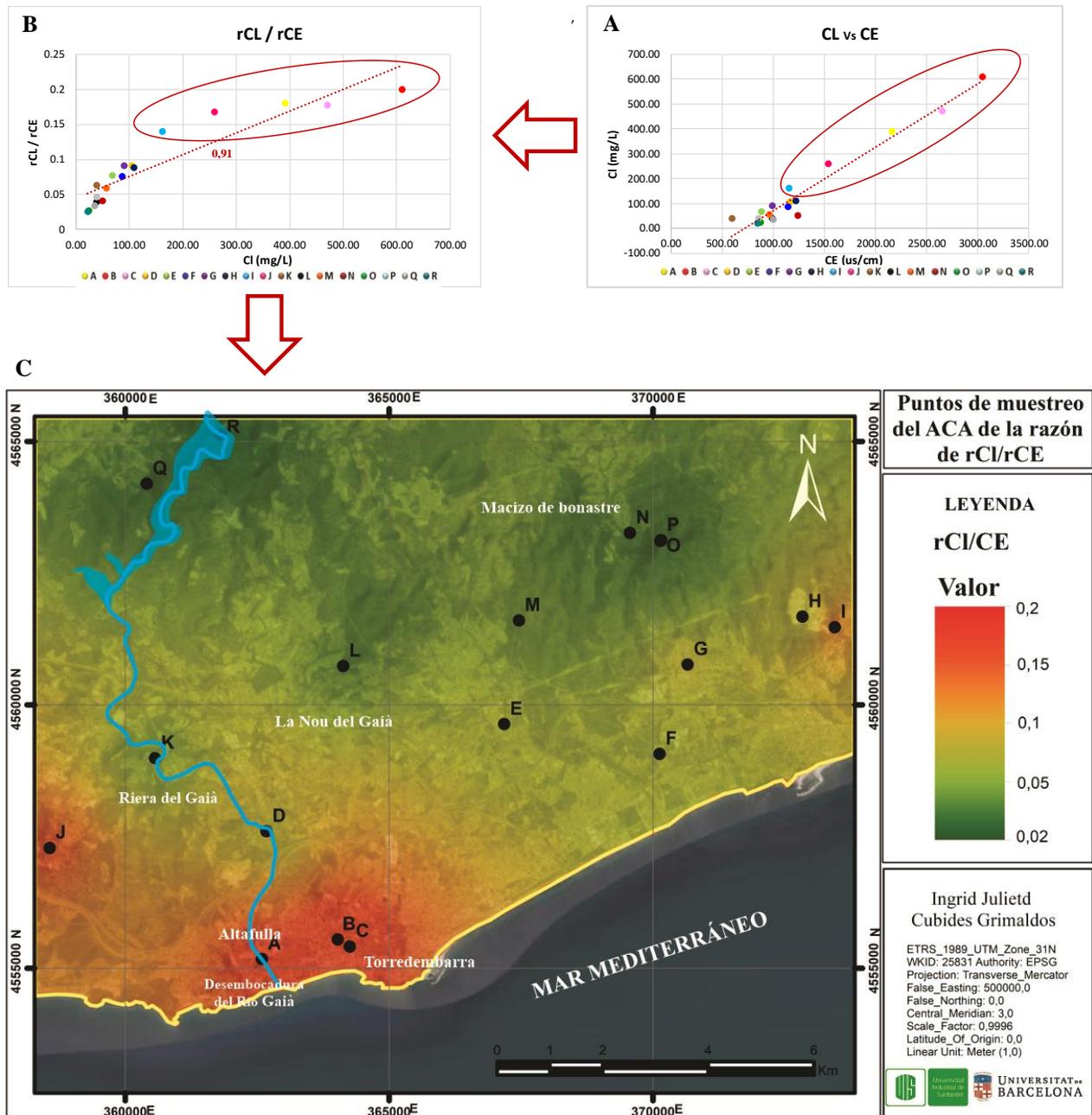


Nota. Gráfica estadística de las concentraciones de  $HCO_3$  vs  $Cl$  (A), gráfica estadística de la relación  $rCl/rHCO_3$  contra la concentración del  $Cl$  (B) y mapa del resultado de la relación  $rCl/rHCO_3$  (C). Realizado en Esri, 2021.

**6.1.2.5.2 Relación  $r_{Cl}/r_{CE}$ .** La relación de cloruros y conductividad eléctrica presenta una tendencia lineal con un coeficiente de correlación de 0,91, donde el aumento de la concentración de cloruros (Cl) está directamente relacionado con el aumento de la conductividad eléctrica (CE) (**Figura 40-A**). Así mismo, cabe resaltar que el ion mayoritario del cloruro es conservativo y que además en el área de estudio no hay ninguna unidad geológica que origine altas concentraciones (>250 mg/L) de dicho ion en las aguas (**Figura 40-B**), siendo este resultado de eventos de mezcla o de intrusión marina (**Figura 40-C**).

**Figura 40.**

*Gráficas estadísticas y mapa de la relación rCl/rCE*

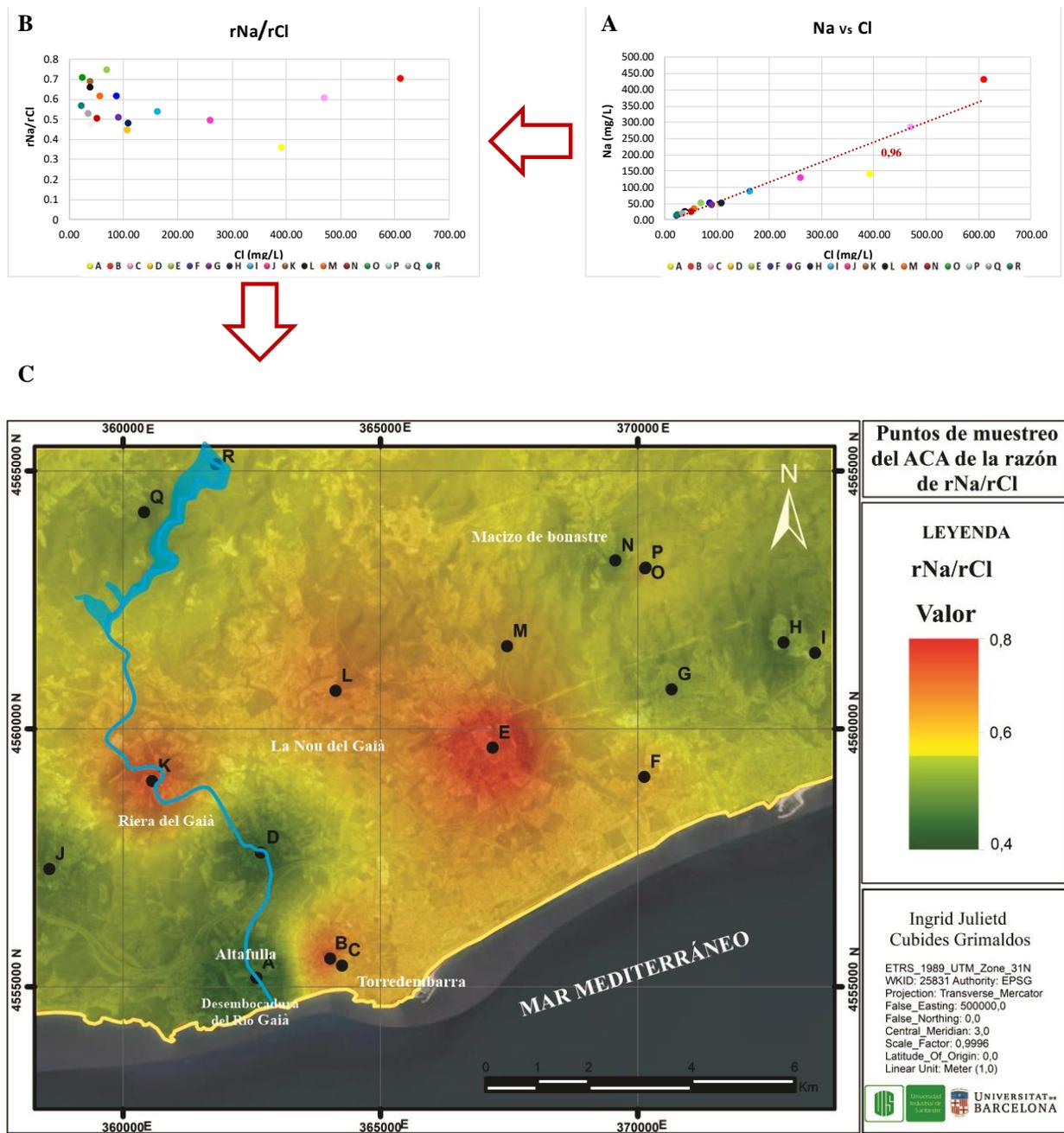


*Nota.* Gráfica estadística de las concentraciones de Cl vs CE (A), gráfica estadística de la relación rCl/rCE contra la concentración del Cl (B) y mapa del resultado de la relación rCl/rCE (C). Realizado en Esri, 2021.

**6.1.2.5.3 Relación  $rNa/rCl$ .** La relación de sodio y cloruros presenta una tendencia al incremento de los cloruros al acercarse al mar causados por eventos de posibles mezclas de agua dulce-salada (**Figura 41-A**), de esta forma, las aguas más continentales poseen bajas concentraciones (<100mg/L Na - <250mg/L Cl) con respecto a las aguas más costeras (>100mg/L Na - >250mg/L Cl) (**Figura 41-B**), mostrando una tendencia lineal con un factor de correlación entre los iones de 0,96 (**Figura 41-C**).

**Figura 41.**

*Gráficas estadísticas y mapa de la relación rCl/rCE*



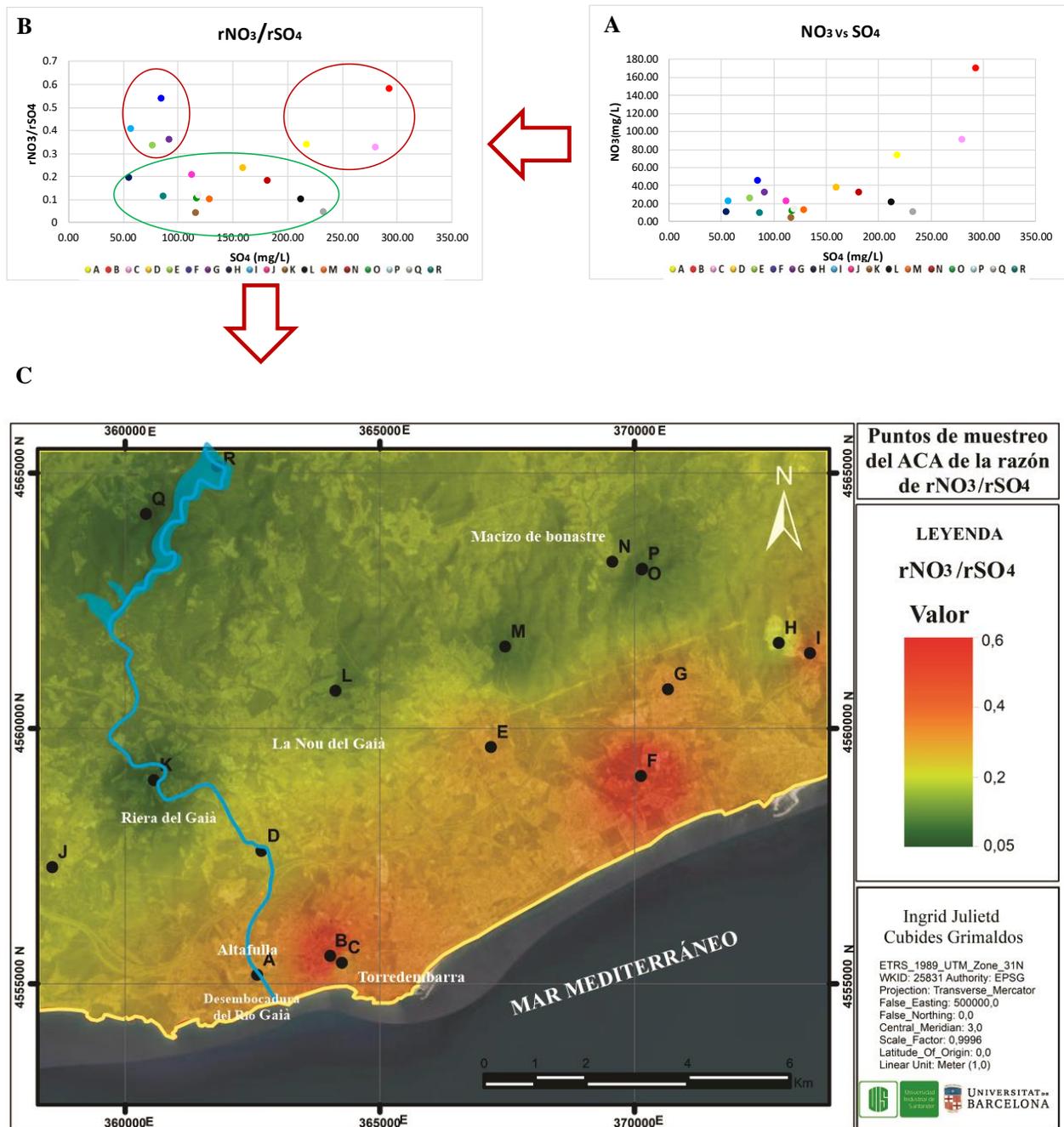
*Nota.* Gráfica estadística de las concentraciones de Na vs Cl (A), gráfica estadística de la relación rNa/rCl contra la concentración del Cl (B) y mapa del resultado de la relación rNa/rCl (C). Realizado en Esri, 2021.

**6.1.2.5.4 Relación  $rNO_3/rSO_4$ .** En la relación de nitratos y sulfatos se identifican tres comportamientos de izquierda a derecha (**Figura 42-A**), el primero cuando los sulfatos presentan una concentración en el rango de 50 mg/L a 100 mg/L, allí se observan algunos puntos con concentraciones medio altas de nitratos (>30 mg/L) (**Figura 42-B**), generando una relación alta con respecto al sulfato (**Figura 42-A**), el segundo comportamiento sigue aumentando los sulfatos pero los nitratos tienden a disminuir haciendo que la relación también disminuya (**Figura 42-A,B**), y en el tercer comportamiento se observa altas concentraciones tanto de nitratos como de sulfatos (**Figura 42-B**), generando nuevamente una creciente en la relación  $NO_3/SO_4$  (**Figura 42-A**).

Esto primordialmente se debe a que las concentraciones de sulfatos son variables espacialmente, pues en algunas partes situadas a lo lejos de las zonas costeras presentan altas concentraciones de sulfatos debido a factores antropogénicos como exceso de la aplicación de fertilizantes en los cultivos o por factores naturales provenientes de aguas arriba de las áreas de recarga y, por otro lado, también se observan concentraciones altas de sulfatos en los sectores costeros pero esta vez de origen marino (**Figura 42-C**).

**Figura 42.**

*Gráficas estadísticas y mapa de la relación rNO<sub>3</sub>/rSO<sub>4</sub>*

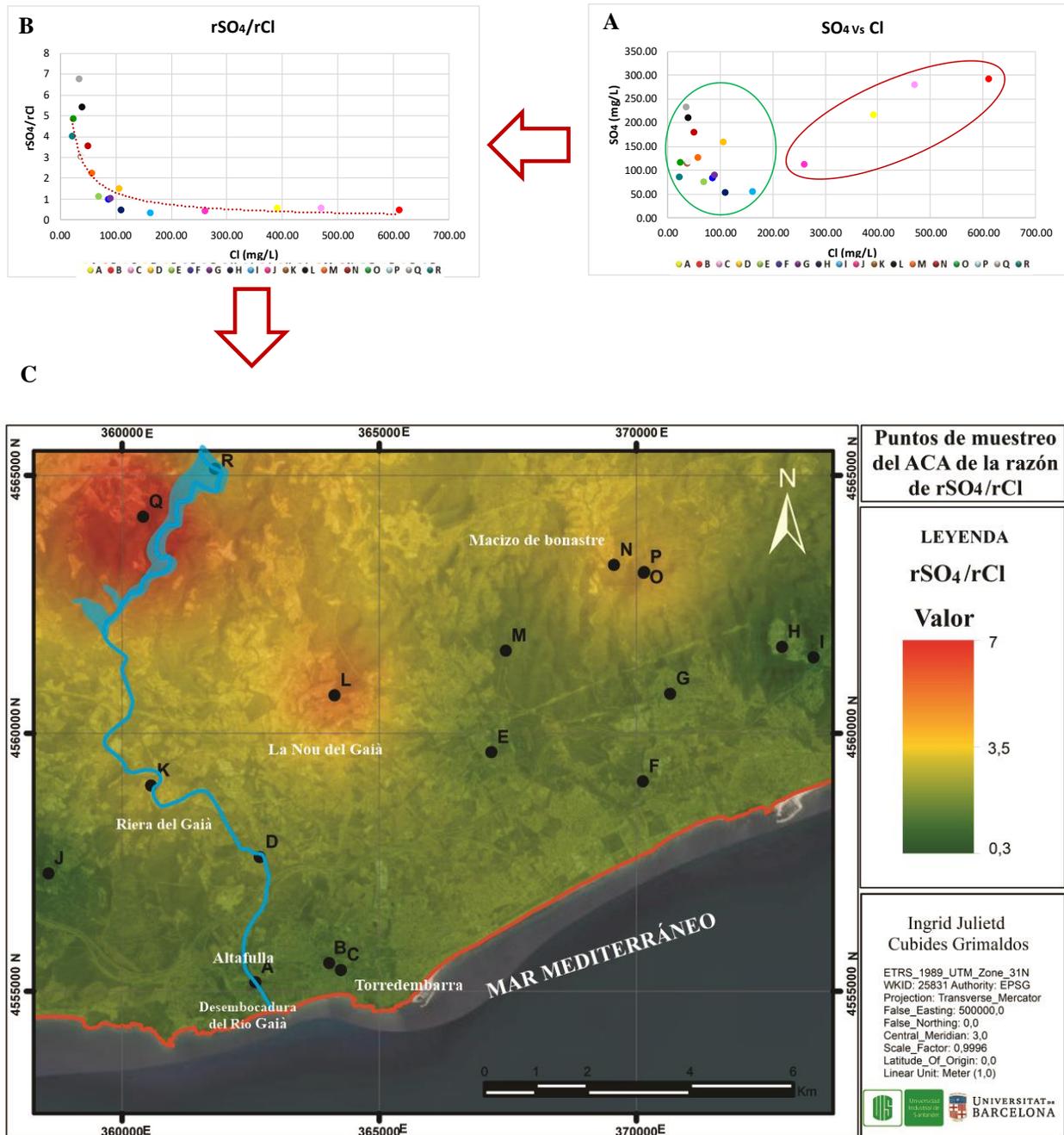


*Nota.* Gráfica estadística de las concentraciones de NO<sub>3</sub> vs SO<sub>4</sub> (A), gráfica estadística de la relación rNO<sub>3</sub>/rSO<sub>4</sub> contra la concentración del SO<sub>4</sub> (B) y mapa del resultado de la relación rNO<sub>3</sub>/rSO<sub>4</sub> (C). Realizado en Esri, 2021.

**6.1.2.5.5 Relación  $rSO_4/rCl$ .** La relación de sulfatos y cloruros disminuyen con tendencia logarítmica (**Figura 43-A**), en la primera zona (**Figura 43-B**) los cloros son bajos (<100mg/L) pero con concentraciones medianamente altas (100 mg/L a 200mg/L) de sulfatos provenientes de aguas arriba de las áreas de recarga y de agentes antropogénicos como la utilización de fertilizantes usados en los cultivos existentes en estas, es por ello que la relación  $SO_4/Cl$  (**Figura 43-A**) inicia con valores elevados y posteriormente empieza a disminuir debido a que aumenta la concentración de cloros y disminuye los sulfatos. Sin embargo, en la última parte a pesar de que presenta valores altos de sulfatos y de cloruro (**Figura 43-B**) ambos provenientes de origen marino por estar cercanos a los sectores costeros, posee una relación baja (**Figura 43-A**) debido a que la concentración del cloruro sigue siendo aun mayor que la de los sulfatos (**Figura 43-C**).

**Figura 43.**

*Gráficas estadísticas y mapa de la relación  $rSO_4/rCl$*



*Nota.* Gráfica estadística de las concentraciones de SO<sub>4</sub> vs Cl (A), gráfica estadística de la relación  $rSO_4/rCl$  (contra la concentración del SO<sub>4</sub>) (B) y mapa del resultado de la relación  $rSO_4/rCl$  (C). Realizado en Esri, 2021.

## 6.2 Caracterización hidrológica

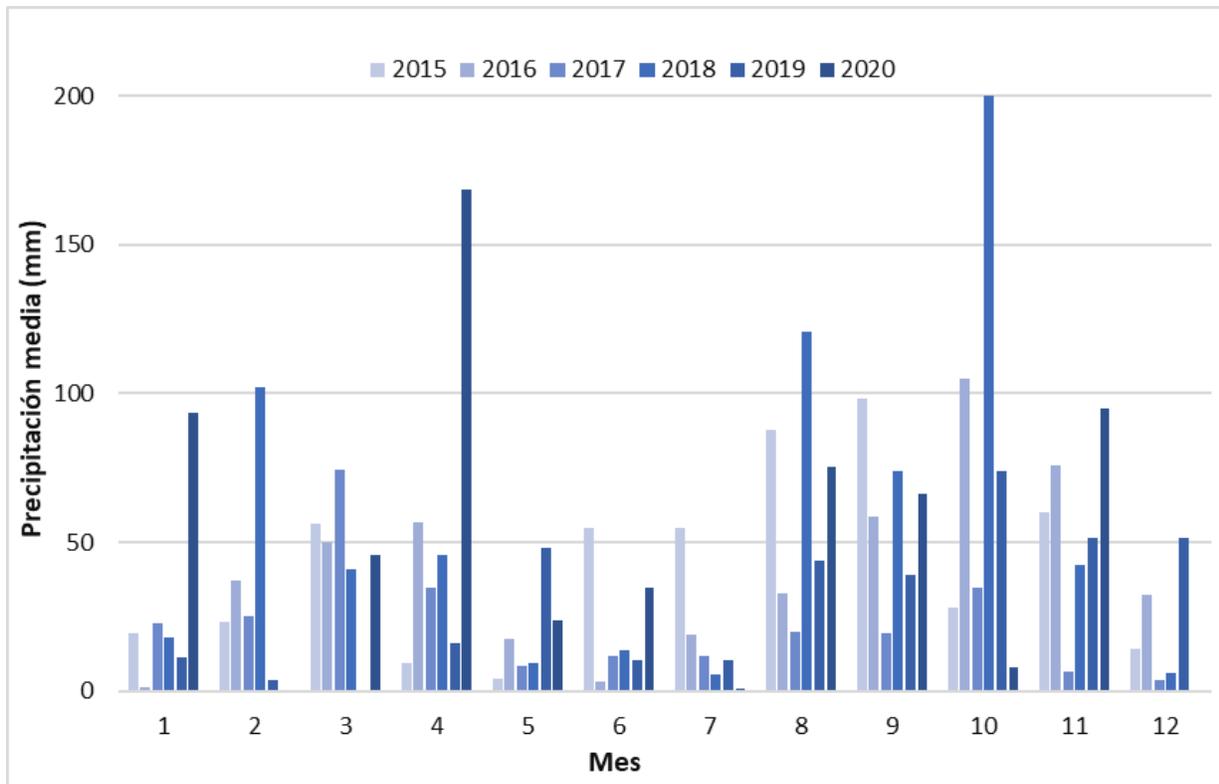
Para el análisis de resultados hidrológico, se realizó mediante los datos registrados en la red RuralCat, obtenidos en los años desde el 2015 hasta el 2020 por el servicio Meteorológico de Cataluña.

El área de estudio posee un clima mediterráneo con un régimen térmico cálido en verano y frío moderado en invierno. Las temperaturas medias mensuales se encuentra entre 8,4 °C en febrero hasta los 26,9 °C en julio en el periodo 2015-2020. Las aguas de lluvias se distribuyen de forma irregular a lo largo del año y principalmente concentradas en primavera, finales del verano y en el otoño. La precipitación mensual es moderada, con una media de 40,92 mm, sin embargo en los años 2018 (Octubre) y 2020 (Abril) presenta precipitaciones mayores a 150 mm. Los valores máximos de lluvia se registran en el periodo octubre (más de 160 mm de la media) y los valores mínimos en la temporada de verano correspondiente a la época mas seca del año, específicamente en el mes de julio (menos de 39.3 mm de la media), coincidiendo con los valores máximos de evapotranspiración de referencia (166.26 mm) (**Figura 44**).

Es importante mencionar que en las zonas de playa ubicadas en la parte costera del área de estudio, ha presentado un incremento en la demanda principalmente en la temporada de verano cuyos meses son mayoritariamente secos, en donde ha pasado de ser primordialmente una economía agrícola y pesquera a ser adominda por la urbanización causado por el crecimiento turístico, por ello, la demanda de agua potable y de efluentes de aguas residuales se han incrementado debido al alto consumo del recurso, el cual se utiliza principalmente para fines recreativos y turísticos.

**Figura 44.**

*Precipitaciones medias mensuales para el periodo 2015-2020*



*Nota.* Precipitaciones medias mensuales para el periodo 2015-2020. La temporada de verano corresponde a los meses secos del año y a la mayor demanda de agua causada principalmente por el incremento del turismo.

### 6.2.1 Balance hídrico

Para el cálculo del balance hídrico del presente caso de estudio se ha tenido en cuenta promedios de periodos o intervalos de tiempo diferentes para cada parámetro encontrados bibliográficamente o descargados directamente del Instituto de Estadística de Catauña (Idecast). Los datos para un año hidrológico concreto no se han podido obtener, debido a la información insuficiente en el área de estudio.

Los resultados obtenidos del total de entradas al sistema específicamente de infiltración por agua lluvia se encuentra fuera del rango de los datos bibliográficos (<10 Hm<sub>3</sub>/año), como consecuencia de la falta de información en los parámetros requeridos por el programa

EASY\_BAL, dejando así los preestablecidos por el mismo (**Apéndice A**), mientras que las salidas del sistema si se encuentran dentro de dicho rango.

Es por ello por lo que se ha considerado como resultado una variación de almacenamiento entre entradas y salidas igual a cero ya que no se puede definir con certeza si existe una ganancia o un déficit de agua, puesto que por falta tanto de información y/o datos recientes como de una salida de campo minuciosa ya que no se tienen mapas piezométricos actuales, en donde se podrían comparar los niveles actuales o de los últimos cinco años con niveles de años anteriores para obtener mayor certeza.

**Tabla 8.**

*Resultado de los cálculos del balance hídrico en el área de estudio*

<b>Balance hídrico del área de estudio</b>		
<b>Entradas</b>	<b>Valor</b>	<b>Año</b>
Infiltración por agua lluvia	<b>14,40 Hm<sup>3</sup>/año</b>	2015-2020
Entrada lateral	3,5 Hm <sup>3</sup> /año	2012
Retorno de riego	1,197 Hm <sup>3</sup> /año	2009
Perdidas de red - Distribución	0,74 Hm <sup>3</sup> /año	2018-2020
Perdidas de red - Alcantarrillado	0,59 Hm <sup>3</sup> /año	2020
<b>TOTAL</b>	<b>20,427 Hm<sup>3</sup>/año</b>	
<b>Salidas</b>	<b>Valor</b>	<b>Año</b>
Descarga Und Tarragona	2,6 Hm <sup>3</sup> /año	2012
Descarga Mar	2,4 Hm <sup>3</sup> /año	2012
<b>Extracciones</b>		
Urbano	1,4 Hm <sup>3</sup> /año	2020
Industrial	1,67 Hm <sup>3</sup> /año	2018
Agrícola	0,004 Hm <sup>3</sup> /año	2009
Ganadero	0,009 Hm <sup>3</sup> /año	2009
<b>TOTAL</b>	<b>8,083 Hm<sup>3</sup>/año</b>	

*Nota.* Entradas y salidas del sistema acuífero en un año hidrológico (promedio).

### 6.3 Caracterización geofísica

Para el análisis geoelectrico se correlaciona tantos los resultados obtenidos de los sondeos eléctricos verticales (SEV) como de las tomografías de resistividades eléctricas (TRE), asociando las resistividades comunes entre sí con la litología cartografiada por el Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña y a su vez relacionándolo con sus respectivas Formaciones hidrogeológicas (**Tabla 45**).

**Figura 45.**

*Información de las resistividades acorde a la litología existente en el área de estudio*

Formaciones geológicas	Nomenclatura	Nomenclatura modificada	Descripción	Resistividad	Achurado
Depositos de los lechos actuales de las rieras de los torrentes	Qr	Qr	Limos y suelos	~ 200	
Llano Aluvia	Qpa	Qpa-1	Arcillas rojas y limos	< 20	
		Qpa-2	Arenas gruesas intercaladas con arcillas	20-200	
		Qg-1	Gravas con presencia de arenas	< 100	
Pie de Monte	Qg	Qg-2	Gravas muy angulosos con matriz limo-arcillosa	100-1000	
		Qg-3	Gravas muy angulosos	> 1000	
		Qt2	Gravas con matriz limo-arcillosa	100-1000	
Terraza Fluvial	Nmas	Nmas-1	Arcillas azules (Agua Subterránea)	< 12	
		Nmas-2	Arcillas azules plásticas ó nivel piezométrico	12 - 59	
		Nmas-3	Arenas gruesas intercaladas con arcillas	60 - 1000	
		Nmas-4	Arenas muy gruesas	> 1000	
Calcarenitas arrecifales, biomicritas y bioruditas.	Nme	Nme-1	Calcarenitas posiblemente fractuadas o nivel	< 500	
		Nme-2	Calcarenitas	> 500	
Arena de grano grueso localmente con conglomerados	Nmg	Nmg-1	Arena de grano grueso posiblemente saturada	< 20	
		Nmg-2	Arena de grano grueso	20 - 1000	
		Nmg-3	Arena de grano grueso y conglomerado	> 1000	
Dolomías y calizas. Jurásico - Cretácico inferior.	JCdc	JCdc	Dolomías y calizas posiblemente tectonizadas	< 500	
Dolomías. Lias inferior	Jld	Jld-1	Dolomías posiblemente tectonizadas	< 500	
		Jld-2	Dolomías	> 500	

#### 6.3.1 Análisis e interpretación de sondeos eléctricos verticales (SEV)

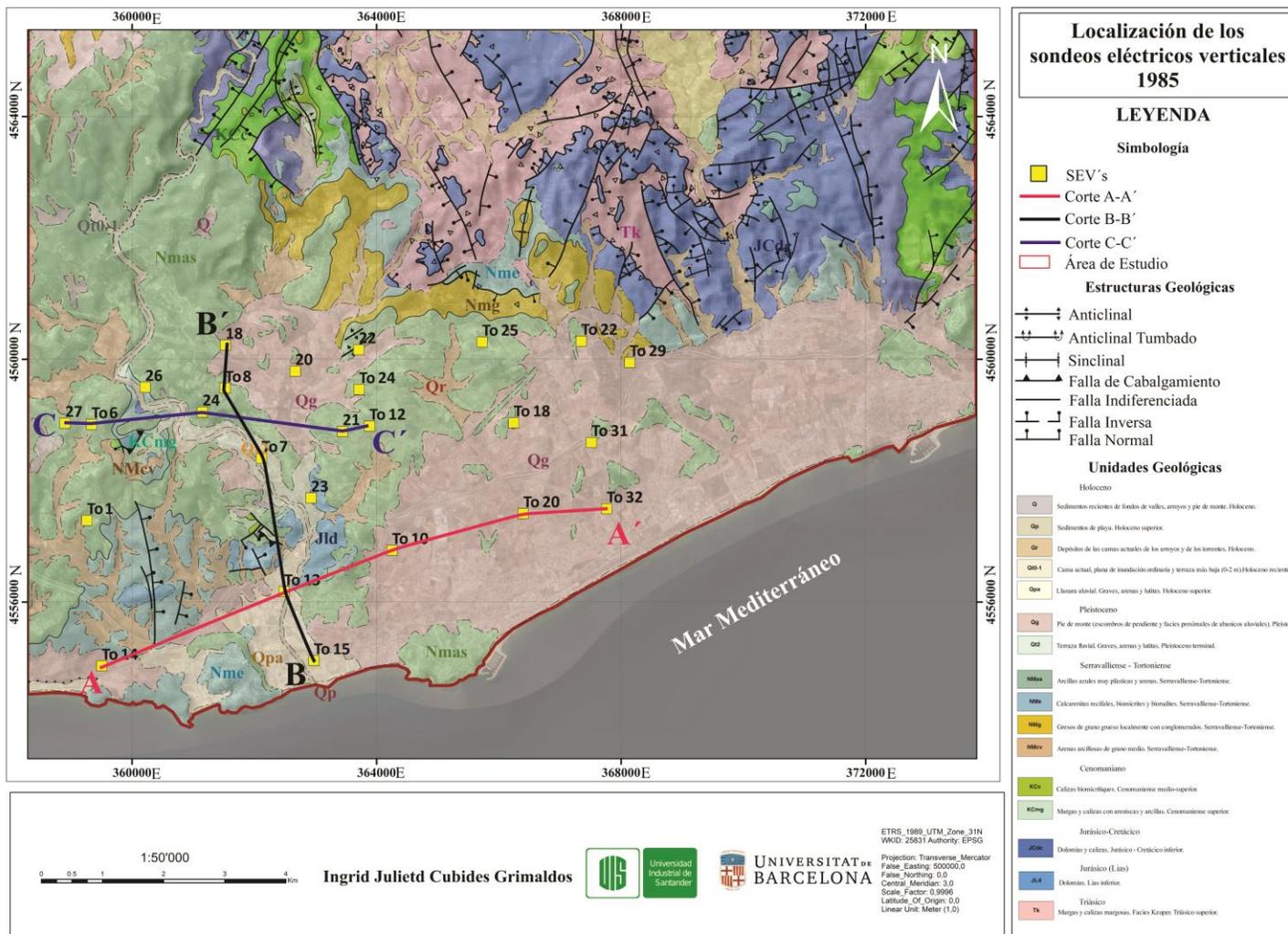
Los 25 SEV localizados dentro del área de estudio (**Figura 46**) fueron adquiridos en el año 1985 de acuerdo con la configuración electrodica Wenner- Schlumberger, el cual posee un gran poder resolutivo ante la presencia de cambios geológicos verticales (Martorana *et al.*, 2009), los cuales fueron sometidas a una inversión en IPI2WIN, permitiendo obtener la distribución geoelectrica real del subsuelo. Los sondeos eléctricos verticales al ser tratados permiten la

obtención de un modelo de resistividades, las cuales están en función de la profundidad permeada, además, dicho método permite visualizar la distribución de las capas geoelectricas, lo cual es ideal en el presente caso de estudio pues según la bibliografía geológica y cartográfica asumen un subsuelo homogéneo estratigráficamente horizontal.

Gracias a las condiciones topográficas y urbanizables del terreno presentes en el año 1985, los 25 perfiles SEV seleccionados lograron en esa época alcanzar sobre la superficie del terreno grandes extensiones en la horizontal (Entre 800 m a 1000 m) permitiendo así mismo poder llegar a mayores profundidades en la vertical (De 150 m a 200 m) (**Apéndice B**). La estimación de error del proceso de inversión es de entre el 2.14% y el 10.8% y a su vez un error cuadrático medio (RMS) de ajuste aproximado de 5.34 %, indicando una inversión ipi2win aceptable según Loke, 2010 (**Tabla 9**).

Figura 46.

Localización de los sondeos eléctricos verticales en el área de estudio



**Tabla 9.***Información de los perfiles SEV*

<b>Datos Básicos de los sondeos electricos verticales 1985</b>					
Id	Coodenadas		Altura	Longitud de	% Error
	Norte	Este	Z (msnm)	extensión (m)	
18	4560231	361528	86.82	825	9.16
20	4559803	362671	56.6	825	2.71
21	4558808	363445	74.04	825	10.5
22	4560157	363710	68.87	825	2.14
23	4557713	362930	22.23	825	6.5
24	4559131	361152	60.15	825	5.7
26	4559538	360215	64.36	681	7.22
27	4558946	358906	113	1000	4.33
To 1	4557345	359264	61.24	1000	6.78
To 6	4558924	359339	111.8	630	4.08
To 7	4558369	362119	24.44	1000	4.95
To 8	4559524	361524	73.29	1000	3.63
To 10	4556851	364254	28.79	800	3.8
To 12	4558899	363883	80.11	1000	3.26
To 13	4556170	362489	8.32	800	2.58
To 14	4554945	359505	16.75	630	4.77
To 15	4555032	362975	2.73	1000	4.52
To 18	4558953	366246	61.77	1000	6.67
To 20	4557456	366401	20.59	1000	3.81
To 22	4560298	367350	83.83	800	2.68
To 24	4559502	363715	71.11	1000	3.61
To 25	4560284	365727	110.61	1000	4.7
To 29	4559947	368144	69.118	1000	6.52
To 31	4558629	367518	42.42	1000	7.89
To 32	4557535	367765	14.06	1000	10.8

*Nota.* Descargados de IngoIGME, s.f

Los SEV en general llegaron a la profundidad promedio que deben alcanzar de acuerdo con la extensión horizontal en superficie de cada uno, corroborando la información de la cartografía general existente del área de estudio, sin embargo, los SEV 21 y 22 no alcanza la profundidad estimada de 160 metros, asociándose posiblemente a que se encuentra afectado estructuralmente por un pequeño horst (SEV 21) y por el mini anticlinal (SEV 22) debido a que presentan valores de resistividades similares a los demás SEV pero se encuentra a una distinta escala vertical (Z msnm) en donde se deduce un levantamiento estratigráfico (**Apéndice B**).

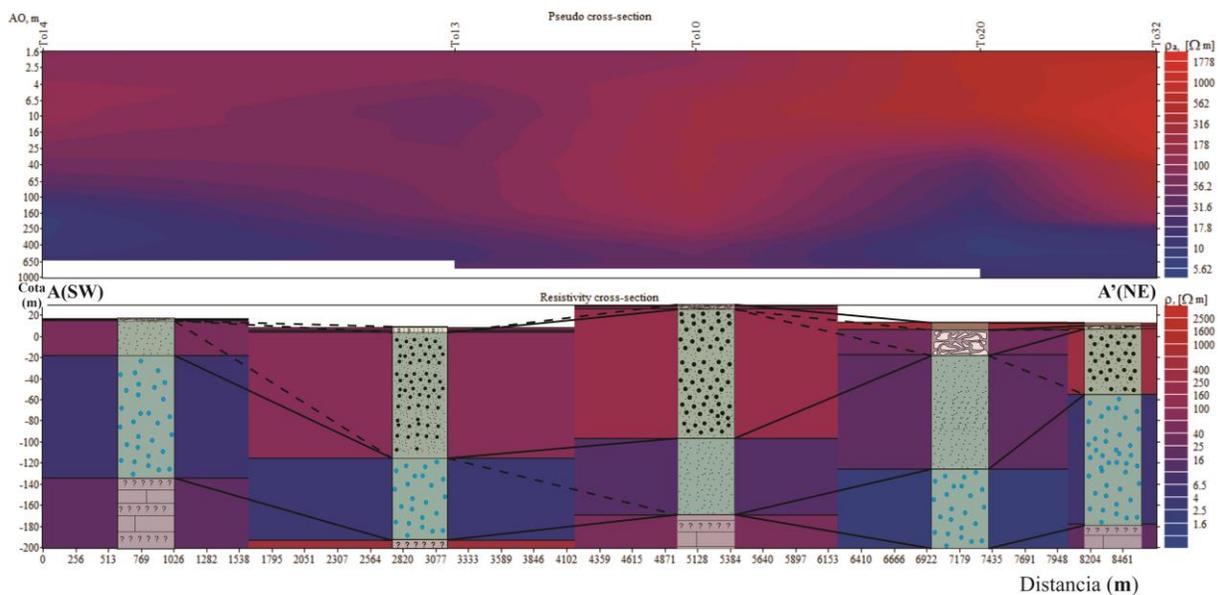
En los SEV To 12, To 13, To 14, To 15, To 20, To 25 y To 32, se identificó en cotas entre -100 msnm a -230 msnm, la existencia del acuífero superior (Mioceno-Cuaternario) específicamente en la Fm hidrogeológica D20, en donde se encuentra la unidad litológica Nmas (Arcillas azúles muy plásticas y arenas – Serravalliense - Tortoniense), específicamente en Nmas-1, la cual se encuentra compuesta por arcillas azúles con presencia de agua (**Apéndice B**).

**6.3.1.1 Corte A-A'.** Es el corte localizado más cerca y paralelo a la línea de costa el cual correlaciona los SEV To 14, To 13, To 10, To 20 y To 32, alcanzado una cota de hasta -200 msnm, presentando la correlación de unidades litológicas principalmente de Nmas. En el presente corte se identifica la existencia del acuífero superior localizado en cotas entre -20 msnm hasta -200 msnm compuesto por la unidad litológica Nmas-1 formado por la capa de arcillas azules con presencia de agua perteneciendo a su vez a la Fm hidrogeológica D20, la cual se acuña tanto en sentido SW-NE como en sentido NE-SW (**Figura 47**).

El error cuadrático medio (RMS) en este caso es de 5,152 %, el cual es bajo considerándose aceptable según Loke, 2010.

**Figura 47.**

*Corte de sondeos eléctricos verticales de Sev To 14, Sev To 13, Sev To 10, Sev To 20 y Sev To 32*



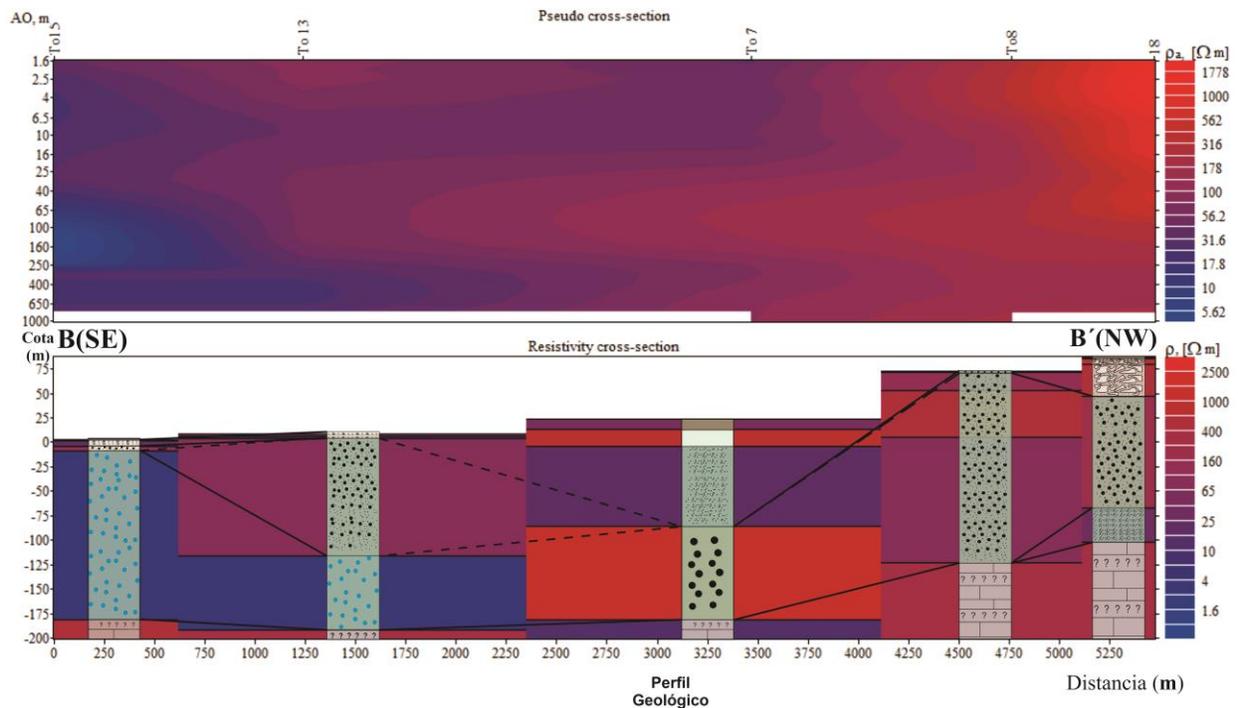
Nota. El achurado se encuentra en la Figura 45.

**6.3.1.2 Corte B-B’.** Es el corte localizado perpendicular a la línea de costa en sentido S-N correlacionando los SEV To 15, To 13, To 7, To 8 y To 18, alcanzado una cota máxima de -200 msnm, presentando la correlación de unidades litológicas principalmente de Nmas relacionada a la Fm hidrogeológica D20. En el presente corte los SEV más cercanos al sector costero (To 15, To 13) se identificó la existencia del acuífero superior localizado en cotas entre -22 y -192 metros por debajo del nivel del mar compuesto por la unidad litológica Nmas-1 formado por la capa de arcillas azules con presencia de agua, la cual se acuña mientras más se aleja a la línea de costa en sentido S-N, mientras los SEV más alejados a la línea de costa (To 7, To 8 y To 18), no se identifica la existencia del acuífero costero pero se identifica un levantamiento estratigráfico (**Figura 48**).

El error cuadrático medio (RMS) en este caso es de 4,968 %, se sitúa por debajo del 10% considerando como aceptable por Loke, 2010.

**Figura 48.**

*Corte de sondeos eléctricos verticales de Sev To 15, Sev To 13, Sev To 7, Sev To 8 y Sev 18*



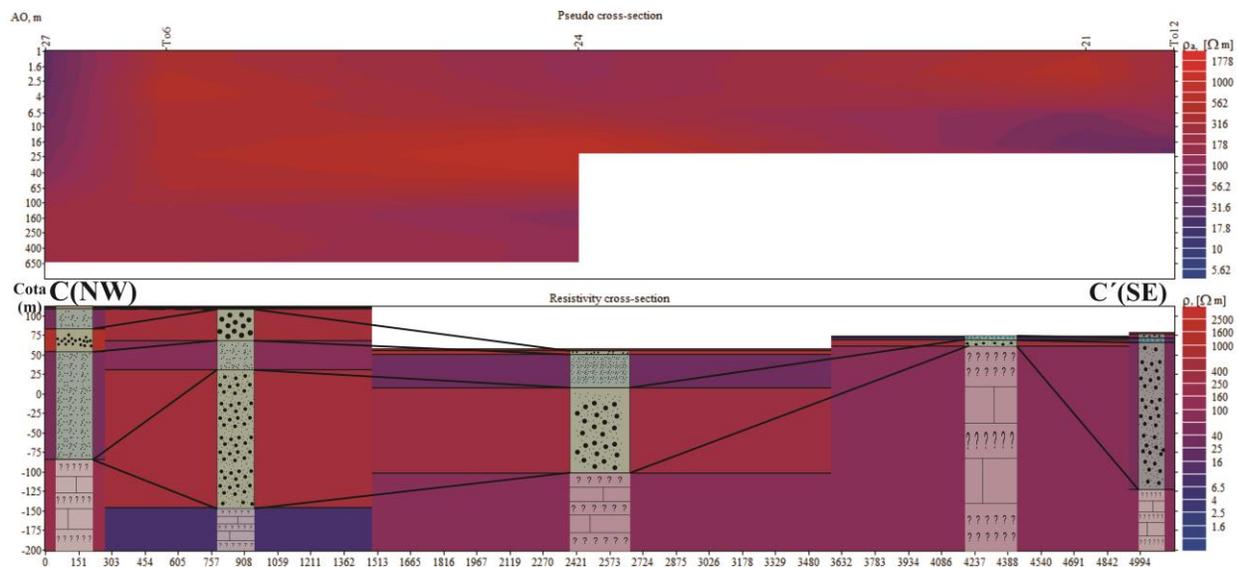
Nota. El achurado se encuentra en la Figura 45

**6.3.1.3 Corte C-C'.** Se encuentra localizado más lejos de la línea de costa en sentido NW-SE correlacionando los Sev 27, Sev To 6, Sev 24, Sev 21 y Sev To 12, alcanzado una cota de -150 msnm, presentando la correlación de unidades litológicas principalmente de Nmas relacionada a la Fm hidrogeológica D20. En el presente corte se observa claramente en el SEV 21, el levantamiento estratigráfico que presenta la unidad litológica Nmas, identificándose como un posible horst (**Figura 49**).

El error cuadrático medio (RMS) en este caso es de 5,574 %, el cual es bajo considerándose aceptable según Loke, 2010.

**Figura 49.**

*Corte de sondeos eléctricos verticales de Sev 27, Sev To 6, Sev 24, Sev 21 y Sev To 12*



Nota. El achurado se encuentra en la Figura 45

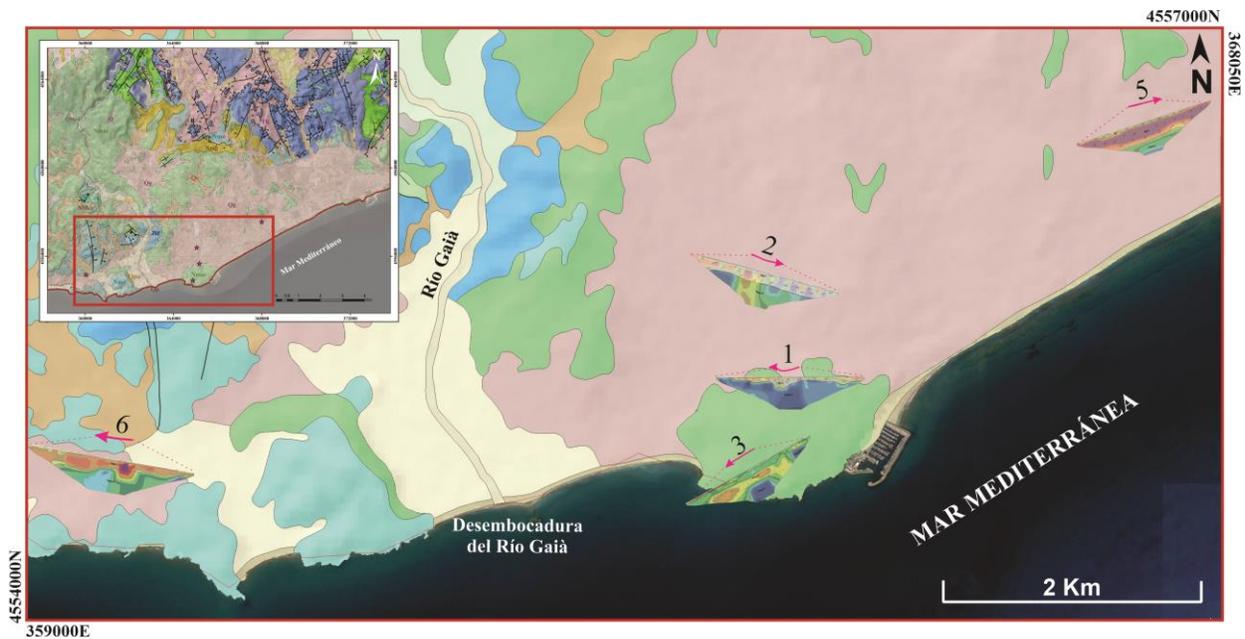
### 6.3.2 Análisis e interpretación de tomografías de resistividades eléctricas (TRE)

Para las tomografías de resistividades eléctricas se adquirieron 5 perfiles de acuerdo con la configuración electródica Dipolo-Dipolo (**Tabla 3**) localizados solamente en los sectores cercanos a la línea de costa (**Figura 50**) con una distancia horizontal sobre la superficie del terreno de 235 metros logrando alcanzar profundidades de hasta 55 metros. Estas TRE son invertidas mediante el programa RES2DINV e interpretadas de acuerdo con la litología del área de estudio cartografiadas en el mapa geológico de la comarca de Cataluña a escala 1:50000, plancha Tarragonés-36 (**Figura 4**), logrando así, encontrar la distribución real de la resistividad en el subsuelo, permitiendo corroborar el tipo de litología existente y posibles zonas de mezcla de agua dulce-salada.

Las TRE presentan una estimación de error entre 3,8% hasta el 26,4% con un error cuadrático medio (RMS) de ajuste aproximado de 12.92 %, el cual es aceptable debido a las condiciones de la superficie del terreno en que se adquiere cada perfil TRE (**Tabla 10**).

**Figura 50.**

*Localización de las tomografías de resistividades eléctricas en el área de estudio*



**Tabla 10.**

*Información de los perfiles TRE*

Perfiles de tomografías de resistividades electricas						
Id	Trayecto	Coodenadas		Altura Z (msnm)	Longitud de extensión (m)	% Error
		Norte	Este			
1	Inicio	365290,16	4555630,83	10,47	220	12,2
	Final	365088,53	4555638,32	10,51		
2	Inicio	364935,16	4556502,23	17,92	235	26,4
	Final	365158,20	4556427,76	15,00		
3	Inicio	364929,32	4555015,77	28,96	235	6,7
	Final	364723,37	4554893,58	36,21		
5	Inicio	367847,39	4557573,12	15,94	235	3,8
	Final	368073,48	4557626,02	18,70		
6	Inicio	360160,49	4555176,06	14,74	235	15,5
	Final	359919,61	4555208,19	22,80		

**6.3.2.1 Perfil 1, 2 y 5.** El perfil 1, 2 y 3 se encuentran localizados al SE del área de estudio, cercanos a la línea de costa con una topografía predominantemente plana y sobre la misma unidad litológica aflorante de pie de monte, Plistoceno (Qg) relacionada a la Fm hidrogeológica I20.

El perfil 1 se localiza en un área libre de obras de construcción, rodeado por una vegetación distribuida entre seca y verde, sobre un suelo árido, el cual es posteriormente hidratado con salmuera permitiendo una mejor conducción de la corriente (**Figura 51**).

### Figura 51.

*Fotos de la salida de campo de la adquisición TRE del perfil 1*



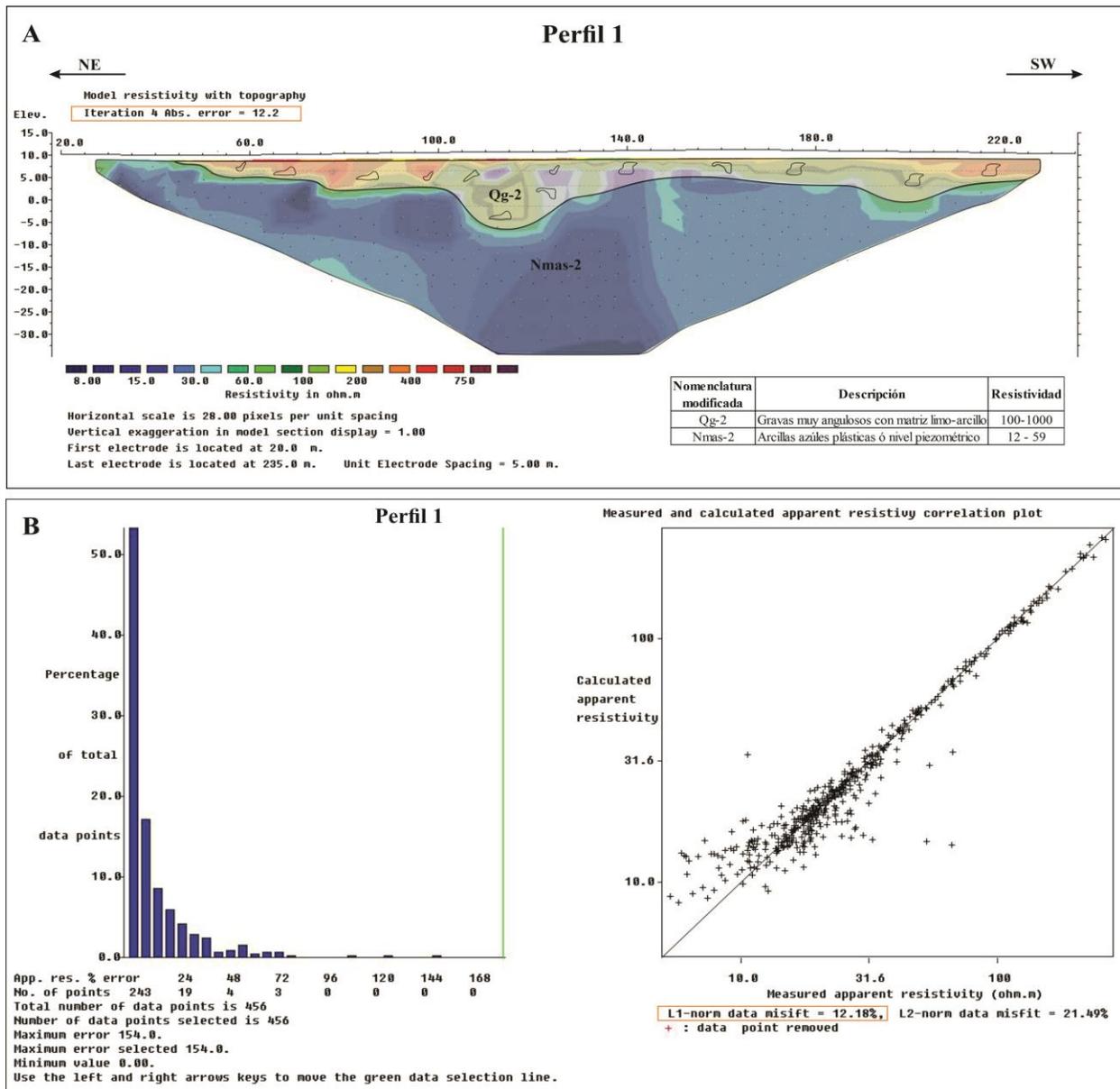
*Nota:* Imágenes tomadas y suministradas por el Codirector del proyecto Dr. Alexandre Sendrós.

La tomografía de resistividad eléctrica alcanza una profundidad máxima de -45 metros en donde se logra identificar 2 unidades litológicas Qg (Fm hidrogeológica I20) y Nmas (Fm hidrogeológica D20). De tope a base se encuentra en dirección NE-SW la unidad litológica Qg-2 compuesta de gravas muy angulosas con matriz limo-arcillosa con una potencia máxima de 15 metros, la cual es suprayacida por la unidad litológica Nmas-2 compuesta de arcillas azules plásticas o posiblemente el nivel piezométrico con una potencia de 30 metros (**Figura 52 A**).

El error cuadrático medio (RMS) en este caso es de 12,2 % (Figura 52 B), el cual se considera bajo según Loke, 2010, sin embargo, es resultado de condiciones aceptables de la superficie del terreno y a su vez a que se encuentra en un sector despejado y libre de obras de construcción.

**Figura 52.**

*Pseudosección de la TRE del perfil 1*

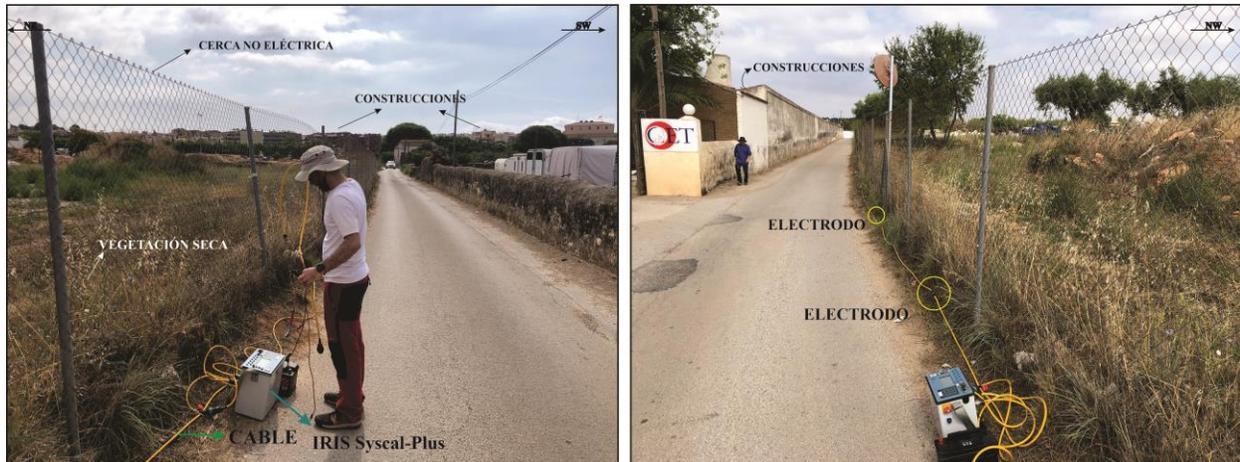


Nota. Pseudosección del perfil 1 (A), Comportamiento del % error de acuerdo con la norma L1 (B).

El perfil 2 se localiza en una vía pavimentada carreteable en donde el área se encuentra rodeada de obras de construcción, cercas no eléctricas y con vegetación mayoritariamente seca (Figura 53).

**Figura 53.**

*Fotos de la salida de campo de la adquisición TRE del perfil 2*



*Nota:* Imágenes tomadas y suministradas por el Codirector del proyecto Dr. Alexandre Sendrós.

La tomografía de resistividad eléctrica del perfil 2 alcanza una profundidad máxima de 55 metros en donde se logra identificar 2 unidades litológicas Qg (Fm hidrogeológica I20) y Nmas (Fm hidrogeológica D20). De tope a base se encuentra en dirección NW-SE la unidad litológica Qg-2 compuesta de gravas muy angulosas con matriz limo-arcillosa con una potencia máxima de 20 metros, la cual es infrayacida por la unidad litológica Nmas-2 compuestas de arcillas azules plásticas o posiblemente el nivel piezométrico con una potencia de 40 metros (Figura 54 A).

El error cuadrático medio (RMS) en este caso es de 26,4 % (Figura 54 B), el cual se considera medianamente alto según Loke, 2010, como resultado de los electrodos enterrados casi al borde de carretera en donde existe una posible presencia de una placa de concreta asociada a la



El perfil 5 se localiza en un área libre de obras de construcción, rodeado por una vegetación distribuida entre seca y verde, sobre un suelo árido, el cual es posteriormente hidratado con salmuera permitiendo una mejor conducción de la corriente (**Figura 55**).

**Figura 55.**

*Fotos de la salida de campo de la adquisición TRE del perfil 5*



*Nota:* Imágenes tomadas y suministradas por el Codirector del proyecto Dr. Alexandre Sendrós.

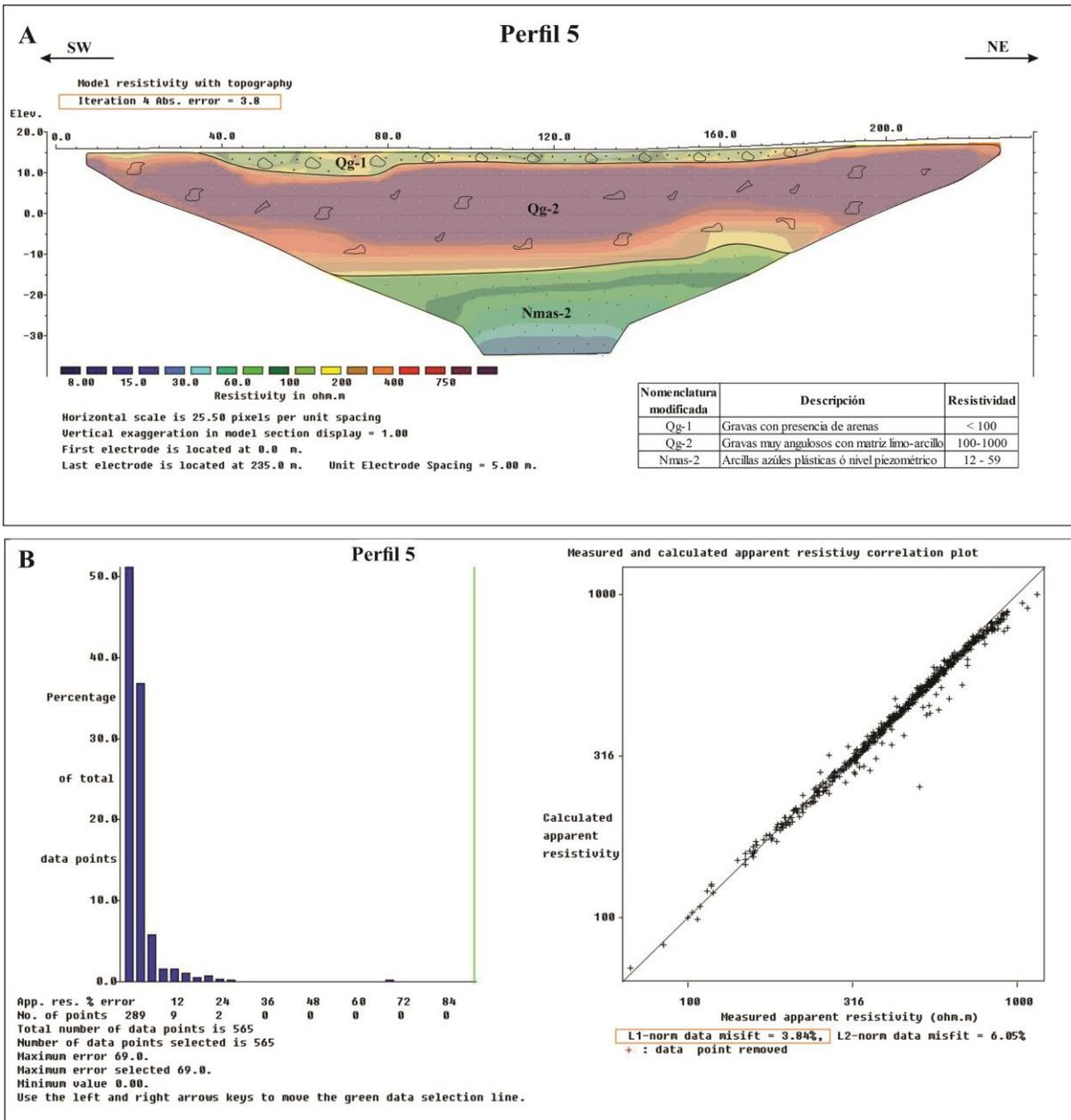
La tomografía de resistividad eléctrica del perfil 5 alcanza una profundidad máxima de - 55 metros en donde se logra identificar 2 unidades litológicas Qg (Fm hidrogeológica I20) y Nmas (Fm hidrogeológica D20). De tope a base se encuentra en dirección SW- NE la unidad litológica Qg compuesta de 2 capas, la capa suprayacente de Qg-1 compuesta por gravas con presencia de arenas con una potencia máxima de 5 a 10 metros, e infrayacente por Qg-2 compuesto por gravas muy angulosas con matriz limo-arcillosa con una potencia máxima de 30 a 35 metros, estas dos capas son infrayacidas a su vez por la unidad litológica Nmas, específicamente por la capa Nmas-2 compuesta por arcillas azules plásticas o posiblemente el nivel piezométrico con una potencia de 20 metros (**Figura 56 A**).

El error cuadrático medio (RMS) en este caso es de 3,8 % (**Figura 56 B**), el cual se considera bajo según Loke, 2010, sin embargo, es resultado de condiciones aceptables de la

superficie del terreno y a su vez a que se encuentra en un sector despejado y libre de obras de construcción.

**Figura 56.**

*Pseudosección de la TRE del perfil 5*

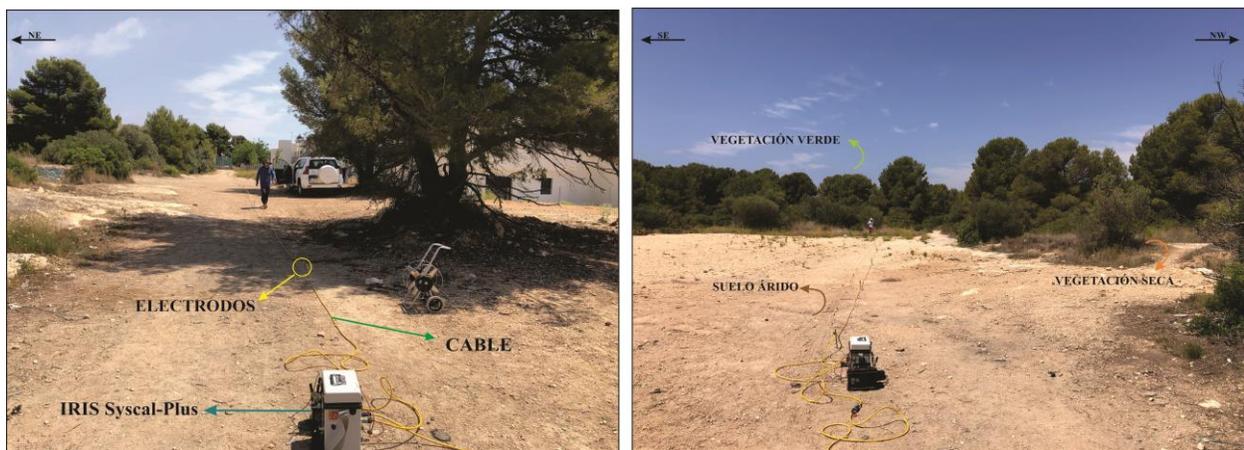


*Nota.* Pseudosección del perfil 5 (A), Comportamiento del % error de acuerdo con la norma L1 (B).

**6.3.2.2 Perfil 3.** El perfil 3 se encuentra localizado al S del área de estudio en el municipio de Torredembarra cercano a la línea de costa con una topografía predominantemente plana, libre de obras de construcción, rodeado por una vegetación distribuida entre seca y verde, sobre un suelo árido, el cual es posteriormente hidratado con salmuera permitiendo una mejor conducción de la corriente, este a su vez es ubicado geológicamente sobre la unidad litológica aflorante de arcilla azules muy plásticas y arena. Serravaliano-Tortoniano (Nmas) (**Figura 57**).

**Figura 57.**

*Fotos de la salida de campo de la adquisición TRE del perfil 3*



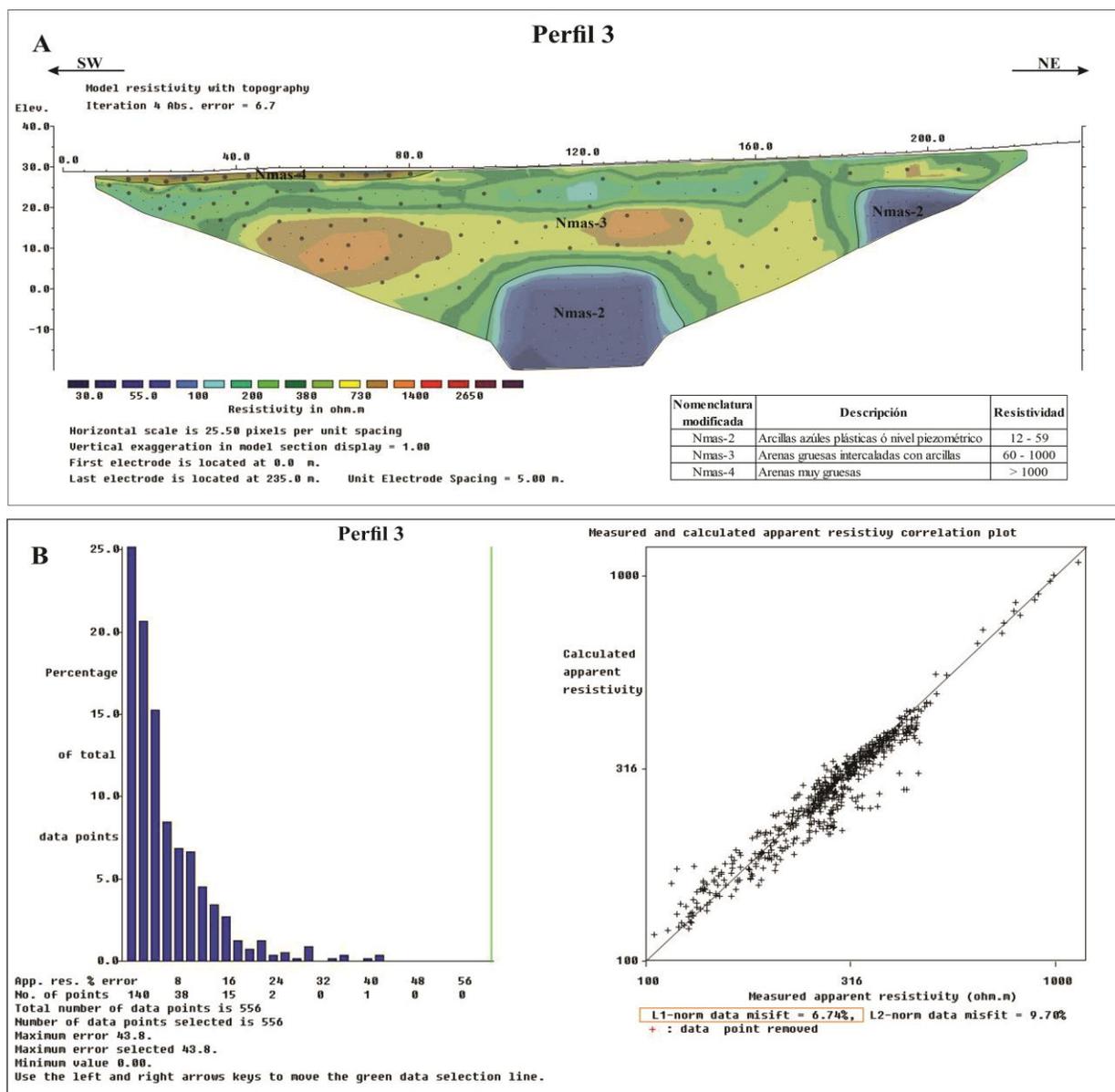
*Nota:* Imágenes tomadas y suministradas por el Codirector del proyecto Dr. Alexandre Sendrós.

La tomografía de resistividad eléctrica del perfil 3 alcanza una profundidad máxima de 50 metros en donde se logra identificar solamente a la unidad litológica Nmas (Fm hidrogeológica D20) compuesta en 3 capas, De tope a base se encuentra en dirección SW una capa compuesta por arenas muy gruesas (Nmas-4) con una potencia en la vertical estimada de 5 metros, esta es suprayacida en dirección SW-NE por una capa de arenas gruesas intercaladas con arcillas (Nmas-3) con potencia de 40 metros, en la cual se encuentra cuñas de arcillas azules plásticas o posiblemente el nivel piezométrico (Nmas-2) (**Figura 58 A**).

El error cuadrático medio (RMS) en este caso es de 6,7 % (**Figura 58 B**), el cual se considera bajo según Loke, 2010, sin embargo, es resultado de condiciones aceptables de la superficie del terreno y a su vez a que se encuentra en un sector despejado y libre de obras de construcción.

**Figura 58.**

*Pseudosección de la TRE del perfil 3*

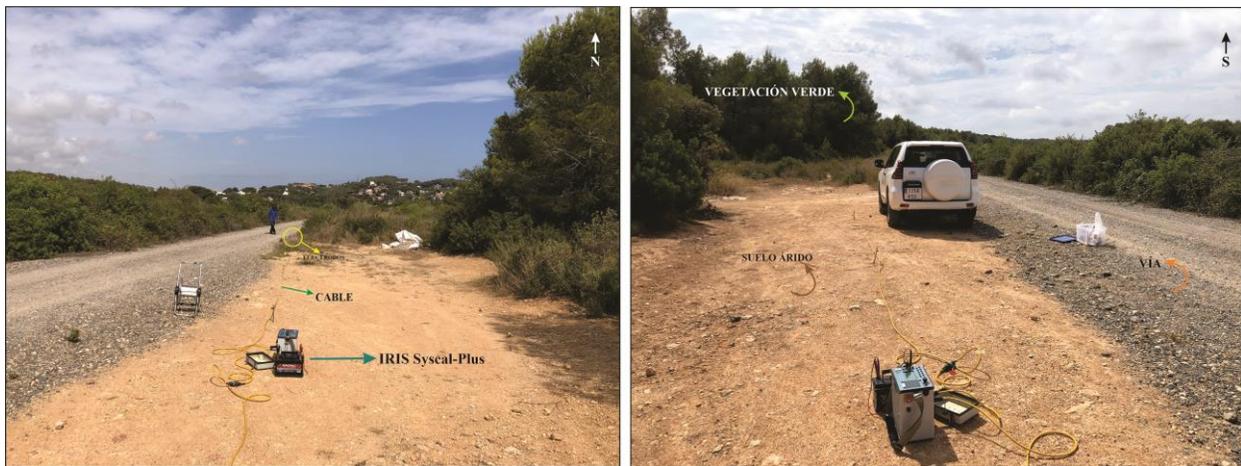


*Nota.* Pseudosección del perfil 3 (A), Comportamiento del % error de acuerdo con la norma L1 (B).

**6.3.2.3 Perfil 6.** El perfil 6 se encuentra localizado al SW del área de estudio cerca del municipio de Alftafulla cercano al sector costero con una leve inclinación topográfica hacia el NW, sobre las unidades litológicas aflorantes al SE los depósitos de los lechos actuales de las rieras y de los torrentes, Holoceno (Qr) y al NW calcarenitas arrecifles, biomicriticas y bioruditas, Serravaliano (Nme) (**Figura 59**)

**Figura 59.**

*Fotos de la salida de campo de la adquisición TRE del perfil 6*



*Nota:* Imágenes tomadas y suministradas por el Codirector del proyecto Dr. Alexandre Sendrós.

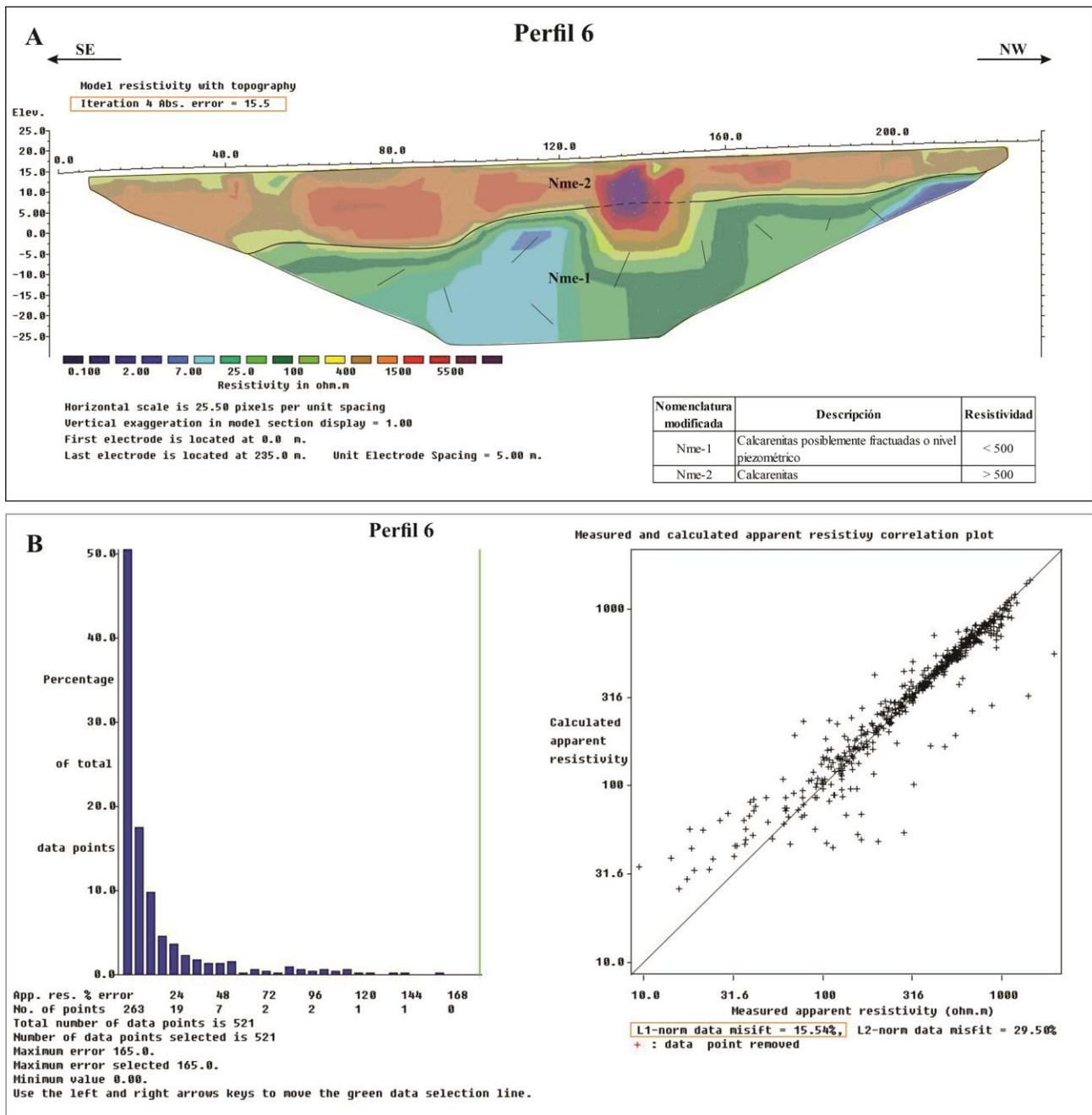
La tomografía de resistividad eléctrica del perfil 6 alcanza una profundidad máxima de - 40 metros en donde se logra identificar 1 unidad litológica Nme (Fm hidrogeológica D20) compuesta de dos capas Nme-1 y Nme-2. De tope a base se encuentra en dirección SE-NW la capa Nme-2 compuesta de calcarenitas con una potencia máxima de 20 metros, la cual es infrayacida por la unidad litológica Nme-1 compuestas de calcarenitas posiblemente fracturadas o a lo mejor el nivel piezométrico con una potencia de 20 metros (**Figura 60A**).

El error cuadrático medio (RMS) en este caso es de 15,5 % (**Figura 60 B**), el cual se considera medianamente alto según Loke, 2010, como resultado de los electrodos hacia el NW enterrados casi al borde de carretera en donde existe una posible presencia de material de relleno

altamente compactado asociada a la construcción de la vía alterando así las resistividades procesadas, sin embargo, en este caso, el error es aceptable por dichas condiciones.

**Figura 60.**

*Pseudosección de la TRE del perfil 6*



*Nota.* Pseudosección del perfil 6 (A), Comportamiento del % error de acuerdo con la norma L1 (B).

#### 6.4 Modelo hidrogeológico conceptual

De acuerdo con la información recopilada se muestra un modelo hidrogeológico conceptual (**Figura 61**) el cual representa el funcionamiento general de los sistemas acuíferos del área de estudio y su interacción con los componentes geológicos, hidrológicos e hidrogeológicos, es importante resaltar que este es un modelo dinámico el cual puede modificarse a la luz de estudios. En términos generales, sintetiza las condiciones básicas del estado y dinámica de las aguas subterráneas presentes en el subsuelo y sus relaciones con los cuerpos de agua superficial y aportes atmosféricos (IDEAM, 2014).

El modelo hidrogeológico conceptual presentado se conforma de dos áreas hidrogeológicas las cuales a su vez se dividen en 4 formaciones hidrogeológicas presentando características y distribuciones que concuerdan con las unidades geológicas, y es allí en donde se encuentran los dos acuíferos (**Tabla 1**), los cuales se corroboraron litológicamente hasta una cota de -200 msnm mediante la geofísica.

Este modelo posee una dirección de flujo N-S proveniente del área hidrogeológica 308 “Área mesozoica y terciaria del Garraf-Bonastre” siendo esta la parte alta en donde se localiza el Macizo de Bonastre el cual se divide en las unidades hidrogeológicas del Cretácico del Gaià y el Prelitoral Sur y las dos formaciones hidrogeológicas (C30 – F40) pertenecientes al Acuífero Inferior (Jurásico-Cretácico). Las formaciones presentan altas concentraciones (>250 mg/L) de SO<sub>4</sub> producto del uso de fertilizantes y del área de recarga y altas concentraciones de HCO<sub>3</sub>. Allí, ocurre principalmente los procesos de recarga por medio de lluvias (P) presentando una precipitación anual de 491 mm distribuida de forma irregular a lo largo del año y una evapotranspiración (EVR) de referencia anual de 1060 mm.

La unidad Cretácico del Gaià alimenta a la unidad Baix del Gaià específicamente desde la parte alta que se encuentra aguas arriba del Embalse del Catllar y la unidad Prelitoral Sur alimenta a la unidad de la depresión costera de Torredembarra, las cuales pertenecen mayoritariamente al área hidrogeológica 309 “Área de la depresión del Camp de Tarragona” y es en esta área donde se encuentra el Acuífero Superior (Cuaternario-Mioceno) conformado por las dos formaciones hidrogeológicas (I20 – D20).

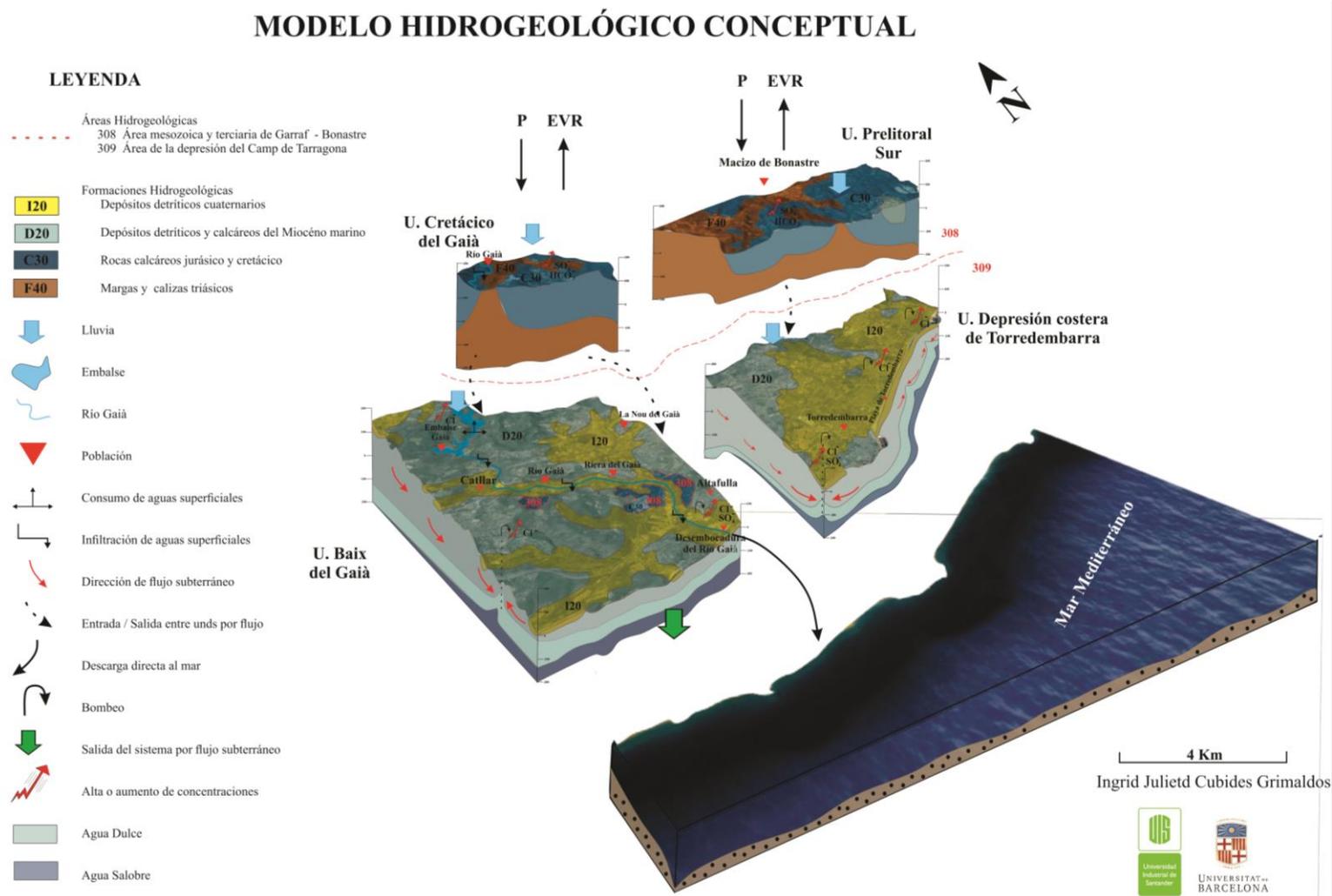
En la unidad Baix del Gaià se localiza el río Gaià perteneciente a aguas de tipo superficial infiltrándose hacia el Acuífero Superior con dirección de flujo subterráneo hacia el mar, sin embargo, el río vuelve a aflorar cerca de la línea de costa donde desemboca y descarga directamente en el mar mediterráneo.

En esta unidad se encuentran varias poblaciones donde extrae agua para consumo, riego o industria, sin embargo, es tan alta la demanda que produce sobreexplotación del Acuífero Superior ocasionando la mezcla de agua dulce-salada, generando tanto zonas contaminadas como zonas posiblemente afectadas por este fenómeno con altas concentraciones de cloruros y sulfatos.

La unidad de la depresión costera de Torredembarra posee una demanda principalmente turística, ya que es en esta donde se localiza la playa y es por ello por lo que en esta parte de la línea de costa presenta una alta sobreexplotación presentando tanto valores altos como tendencia al aumento de concentraciones de cloruros y sulfatos (>250 mg/L) de origen marino.

Figura 61.

Modelo hidrogeológico conceptual



## 7. Conclusiones

El sistema hídrico subterráneo del área de estudio se encuentra compuesto por dos acuíferos, los cuales se disponen de tope a base por el acuífero inferior (Jurásico-Cretácico) compuesto por dolomías y calizas y el acuífero superior (Mioceno-Cuaternario) compuesto por rocas clásticas de composición calcárea, sin embargo, el contacto entre ambos acuíferos no se logra determinar por la falta de información más detallada.

De acuerdo con la piezometría, el sentido principal de flujo es perpendicular a la línea de costa en dirección hacia el mar, sin embargo, en el municipio La Nou del Gaià, el flujo se encuentra en dirección SW hacia la Riera del Gaià descargando en el Río Gaià, en el cual también se observa un aporte de los flujos de agua proveniente de las áreas topográficamente altas resultado de los retornos de riego de cultivos.

En la zona alta de la desembocadura del Río Gaià, se encuentran áreas de cultivo y de urbanizaciones como resultado de zonas de relativa intensidad de explotación de agua subterránea generando un pequeño cono de depresión

La caracterización hidrogeoquímica base del área de estudio se logra evaluar en distintos puntos los cuales se encuentran localizados ya sea sobre el acuífero superior o sobre el acuífero inferior gracias a que las unidades litológicas de ambos acuíferos se encuentran aflorando, sin embargo, no se logra evaluar hidrogeoquímicamente en un mismo punto los dos acuíferos a la vez debido a la profundidad máxima registrada en la base de datos online.

Hidrogeoquímicamente el orden general de abundancia de los cationes mayores fue  $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$  y la de los aniones mayores fue  $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$ .

La caracterización hidrogeoquímica base del área de estudio es constante en las temporadas secas de verano y otoño durante 2015 a 2020 con excepción del punto hidrogeoquímico A, el cual varía en el año 2020. De esta forma, se determinaron 4 tipos de agua; bicarbonatada cálcica, bicarbonatada magnésica, clorurada sódica y clorurada cálcica, en ese mismo orden se distribuyen espacial y químicamente en dirección NE-SE, determinando que hacia el NE se encuentra las áreas topográficamente altas en donde aflora principalmente el acuífero inferior con aguas de tipo bicarbonatadas la cual se considera como agua de recarga y libre de alguna contaminación y hacia el SW se encuentra las áreas topográficamente bajas en donde aflora el acuífero superior con aguas de tipo primordialmente cloruradas a medida que se acerca a la línea de costa considerándose altas contaminaciones resultado la intrusión marina.

El punto hidrogeoquímico A, es la única posición en la cual se ve un cambio radical en el año 2020, cambiando de un agua tipo clorurada cálcica con zonificación de intrusión marina, no aptas para el riego y con concentraciones químicas fuera del rango recomendado a un agua bicarbonatada cálcica con zonificación de agua dulce y utilizable para el riego con precauciones y con concentraciones químicas dentro de los valores recomendados

La diferencia de los valores de las concentraciones de los iones mayoritarios obtenidos en el punto hidrogeoquímico A en el año 2020, se debe fundamentalmente a la baja demanda turística, industrial, agrícola y ganadera, generada por la pandemia Covid-19, demostrando que si existe indicios nuevamente de contaminación por intrusión marina resultado de la sobreexplotación de acuíferos a pesar de la construcción del embalse de Catllar ejecutada como solución en la década de los 90's.

Los puntos D, I, K, L, N, Q y R que, aunque permanezcan constantes durante 2015 a 2020 en el tipo de agua si presenta ligeros cambios de zonificación de aguas dulces a ligeramente

intrusiones marinas e intrusiones marinas, resultado de pequeñas mezclas de agua dulce-salada, generando indicios de posibles riesgos de extensión de intrusión marina hacia esos sectores generando una forma de U de zona de foco en dirección NW-SE.

Existen tres tendencias a los seis posibles procesos químicos. Para los puntos B y E un proceso químico con tendencia a *mixing* resultado de mezcla de agua dulce con agua salada de mar, para el punto A y C con tendencia a intercambio iónico generado al reemplazamiento de los cationes de sodio que se encuentran en las arcillas con los cationes en solución que posee el agua de mar cuando entran en contacto agua-roca, para los puntos J y D un proceso químico con tendencia de disolución de carbonato calcio el cual es interpretado de origen continental proveniente de aguas superficiales como las aguas lluvias en donde además puede existir una conexión de ambos acuíferos quizá gracias a posibles fallas locales existentes en esas áreas específicas y para los demás puntos aunque no identificaron ninguna tendencia a los procesos químicos sugeridos del diagrama se confirma que entre más alejado se encuentre al sector costero mayor es el incremento de la concentraciones de los bicarbonatos con menor proporción en las concentraciones de cloruros.

Los iones mayoritarios a excepción del  $\text{SO}_4$ , presentan un comportamiento similar relacionado tanto a la cota topográfica como en la distancia hacia el mar. en donde muestra un aumento general del rango exigido por la normativa de la calidad del agua del consumo humano de España, para estos parámetros químicos a medida que disminuye la cota topográfica y así mismo a medida que disminuye la distancia del punto hidrogeoquímico hacia la línea de costa y al mismo tiempo identificándose como focos importantes de posibles zonas afectadas por la salinización generando aguas no aptas para el consumo humano.

Existe un posible origen relacionado al comportamiento exponencial que presenta los iones mayoritarios y es fundamentalmente de tipo marino, ya que aumenta cada una de sus concentraciones entre más cercanos se localicen al sector costero y que adicionalmente se encuentren urbanizables en donde requiera una mayor demanda del recurso hídrico, generando posibles mezclas de agua dulce-salada.

El Ion mayoritario del  $\text{SO}_4$  no posee una relación directa con la altura o la distancia hacia el mar, siendo variable espacialmente en el área de estudio y con más de un posible origen.

Se encuentran ciertas concentraciones altas de sulfato superiores a los límites exigidos por la normatividad española, en zonas topográficamente altas ubicadas sobre el macizo de Bonastre debido a las áreas de recarga y agentes antropogénicos y en los municipios de Altafulla y Torredembarra proveniente de un origen marino.

Los pozos B y C ya se no pueden recuperar porque ya se encuentran altamente contaminados clasificados como aguas no aptas para el riego, mientras el punto J, a pesar de que se encuentra altamente contaminado posee una clasificación de aguas utilizables para el riego, pero con precauciones, por lo tanto, se puede recuperar con una mejor estrategia de extracción.

Hacia el sector costero se presenta el área más afectada y vulnerable pues ya se encuentra aguas cloruradas, específicamente hacia el municipio de Altafulla agua tipo clorurada cálcica y hacia el municipio de Torredembarra aguas de tipo clorurada sódica, en donde hay mezcla de agua salada-dulce debido a la alta contaminación de intrusión marina presente resultado la sobreexplotación de los pozos de bombeos y a la cercanía de la línea de costa en donde hay que tener un mayor cuidado.

El agua del área de estudio posee una, una conductividad eléctrica (CE) entre 599  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 3043.5  $\mu\text{S}/\text{cm}$  con una media de 1297.75  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y un pH de 6.69 – 8.26 con una media de 7,49

en las áreas cercana a línea de costa indicando una ligera alcalinidad como indicio de presencia de agua de mar.

El balance hídrico se encuentra dentro del rango reportado bibliográficamente a excepción del valor de entrada de infiltración por agua lluvia como resultado de la falta de información en los parámetros requeridos por el programa EASY\_BAL.

En el balance hídrico se considera una variación de almacenamiento igual a cero porque no se puede definir con certeza si existe una ganancia o un déficit de agua, consecuencia de la falta tanto de información y/o datos recientes como de una salida de campo minuciosa no se tienen mapas piezométricos actuales, en donde se podrían comparar los niveles actuales o de los últimos cinco años con niveles de años anteriores para obtener mayor certeza.

Los sondeos eléctricos verticales del año 1985 más cercanos a la línea de costa se determinó la existencia del acuífero superior (Mioceno-Cuaternario) en profundidades entre -100 msnm a -230 msnm con resistividades entre 2  $\Omega\text{m}$  a 10  $\Omega\text{m}$  identificándose litológicamente como arcillas azúles con presencia de agua relacionada a la formación hidrogeológica D20.

Las tomografías de resistividades eléctricas del año 2021 lograron identificar a profundidades más cercanas a la superficie del terreno aproximadas a 0 msnm, unidades litológicas que hacen parte del acuífero superior perteneciente a la formación hidrogeológica D20, en donde se identificaron resistividades entre 12  $\Omega\text{m}$  a 59  $\Omega\text{m}$ , las cuales no se asocian a presencia de agua sino a las arcillas azúles muy plásticas (Nmas) y resistividades  $<500 \Omega\text{m}$ , relacionadas a calcarenitas posiblemente fracturadas (Nme) y a su vez en ambas unidades litológicas acompañadas quizá por la presencia del nivel freático de dicho acuífero debido a la profundidad somera en la que se encuentran.

Debido a la poca información precisa y detallada obtenida de forma bibliográfica y a falta de una salida de campo minuciosa, no se logra realizar tanto una hidrogeología como una geofísica exacta principalmente para el acuífero inferior (Jurásico - Cretácico) y, por tanto, no se puede establecer con claridad las relaciones o conexiones acuíferas.

La geofísica ha permitido identificar las áreas donde no se recomienda realizar perforaciones para futuros estudios con el propósito de evitar el riesgo de poner en contacto masas de agua con calidades diferentes.

Se realizó un modelo hidrogeológico conceptual a partir de la información geológica, geofísica, hidrogeológica e hidrológica, donde se identificaron las direcciones de flujo subterráneo, áreas de recarga y descarga y áreas posiblemente afectadas por la mezcla de agua dulce-salada.

De acuerdo con el modelo hidrogeológico conceptual se evidencia nuevamente un progreso del efecto de la intrusión marina el cual se había detenido desde la década de los 90's por la construcción del Embalse de Catllar. Actualmente este efecto se extiende hacia el borde de la zona costera y hacia el sector de Catllar, ocasionando mezcla de agua dulce-salada evidenciadas por las alta concentraciones químicas del cloruro de origen marino, resultado de la sobreexplotación principalmente del acuífero superior.

## 8. Recomendaciones

Se recomienda una campaña cartográfica, perforación de núcleos, muestreo y ensayos de bombeos en áreas donde no exista riesgo de poner en contacto masas de agua con calidades diferentes con el propósito de corroborar al detalle la litología presente y así mismo correlacionar la estratigrafía de los pozos, obtener información más exacta a una mayor profundidad, conocer a fondo los parámetros hidráulicos y monitorear los niveles piezométricos para observar las futuras variaciones en el almacenamiento y de esta forma obtener un balance hídrico más adecuado del área de interés caracterizando óptimamente los 2 acuíferos existentes.

Debido a la distribución espacial tan variable y diversos orígenes que presenta los sulfatos se sugiere un estudio isotópico para determinar con exactitud sus orígenes y las diversas causas de la presencia de este ion mayoritario en el área de estudio.

Para completar la campaña de prospección geofísica, se propone una campaña gravimétrica para delimitar con precisión la profundidad de los 2 acuíferos, una campaña de sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (SEDT) para diferenciar entre depósitos frescos, salobres y salinos, monitorear los drenajes y recargas de los acuíferos, estimar y caracterizar con mayor detalle la extensión la cuña salina encontrando con mayor detalle la zona de interfase.

Se recomienda limitar la extracción o cambiar de ubicación de los pozos B, C y J debido a la contaminación marina que presenta y adicional mejorar las estrategias de explotación del pozo A para evitar la contaminación total de este, para ello se sugiere planificar una red de monitoreo exploratoria paralelas con la línea de costa tanto para temporadas húmedas como

secas, respetando las unidades hidrogeológicas, encontrando así, una mejor distribución y localización estratégica con el fin de investigar a fondo la cuña salina.

Se aconseja realizar un plan de gestión integral del recurso hídrico más local con el propósito de maximizar el bienestar social y económico de manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales a través de asegurar el cumplimiento de regulación en materia hídrica, para garantizar la disponibilidad del recurso hídrico en calidad y cantidad disminuyendo la sobreexplotación y mejorando a la vez las estrategias de extracción, formular y diseñar nuevas acciones orientadas al ahorro y uso eficiente del recurso hídrico y a la prevención de la contaminación de las fuentes de agua, la coordinación, promoción y orientación de las acciones de información e investigación relacionadas con el recurso hídrico, estableciendo para el efecto el Sistema de Información del Recurso Hídrico, programas de asistencia técnica dirigidos a las autoridades ambientales que permitan la transferencia eficaz de los protocolos, guías y herramientas que sean diseñados para la adecuada gestión del recurso hídrico, la identificación de posibles fuentes de financiamiento para el fortalecimiento de la gestión integral del recurso hídrico y la celebración de nuevos convenios a nivel nacional y con organismos de cooperación internacional relacionados con la materia.

**Referencias Bibliográficas**

- Agència Catalana de l'Aigua – ACA. (2021). *Consulta de dades de control de la qualitat i la quantitat de l'aigua al medi*.  
<http://aca-web.gencat.cat/sdim21/filtre.do>
- Agència Catalana de l'Aigua – ACA. (2019). *Memòria tècnica del Programa de Seguiment i Control (PSiC) del Districte de conca fluvial de Catalunya*. Període 2019-2024.  
[http://aca.gencat.cat/web/.content/30\\_Plans\\_i\\_programes/40\\_Programa\\_seguiment\\_i\\_control/3r\\_Programa\\_de\\_seguiment\\_i\\_control\\_2019-2024/Memoria\\_PSIC.pdf](http://aca.gencat.cat/web/.content/30_Plans_i_programes/40_Programa_seguiment_i_control/3r_Programa_de_seguiment_i_control_2019-2024/Memoria_PSIC.pdf)
- Agencia Nacional de Hidrocarburos – ANH. (2019). *Conceptos básicos de geología y geofísica, Cartilla informativa, Bogotá D.C, Colombia*.
- Alexei A. Bobachev., Igor. N. Modin., Vladimir A. Shevnin. (2000). *Ipi2win – Guía de usuario*, Universidad Estatal de Moscú.
- Alfonso, P.L. (2020). *Comunicación personal*.
- Archie, G. E. (1942). *The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics*. SPE Reprint series,55,9-16. <https://doi.org/10.2118/942054-g>
- Auge, M. (2008). *Métodos geoelectricos para la prospección de agua subterránea*. Universidad de Buenos aires.
- Barea, J, Estevan, A., García, D., González, M., Martínez, J., Prat, N., Herráez, I. & López-Semaniego, E. (2005). *Agua. La calidad de las aguas en España. Un estudio por cuencas*. Greenpeace España. 140 pp.  
<http://archivo-es.greenpeace.org/espana/Global/espana/report/other/agua-la-calidad-de-las-aguas.pdf>.

- Bobachev, A. A., Modin, I. N. & Shevnin V. A. (2000). IPI2Win Guía de Usuario. Universidad Estatal de Moscú. Facultad de Geología. Departamento de Geofísica. Geoscan - M Ltd.: Moscú, Rusia.
- Cabrera, L. & Calvet, F. (1996). Onshore Neogene record in NE Spain: Vallès-Penedès and El Camp grabens (NW Mediterranean). In Tertiary Basins of Spain (eds. P.F. Friend & C. Dabrio), pp. 97-105. Cambridge: Cambridge University Press.
- Cuesta, H. J. (2007). *Prospección geofísica en métodos potenciales: tomografía y sondeos eléctricos verticales para caracterización de suelo y aplicación en estudios hidrogeológicos*, Universidad Simón Bolívar – Sartenejas.
- Custodio E, Llamas M. R. (1983) Hidrología subterránea [Groundwater hydrology]. Editorial Omega, Barcelona, 2 vols, pp 1–2350.
- Dobrin, M. B., & Savit, C. H. (1988). *Introduction to geophysical prospecting*. 4th Edition. McGraw-Hill Book Company., New York.
- Enríquez, C. C. (2008). *Aplicación del proceso de descubrimiento de patrones geoespaciales al estudio sobre componente del balance hídrico*. Mexico, D. F.
- Esri (2021). *ArcMap v. 10.3. software SIG*. Licencia de estudiante cedida por ESRI a la Universidad de Barcelona.
- Estelles, V. A. (2012). *Tema 11, Contaminación de las aguas*. <https://es.slideshare.net/Bioestelles/tema-11- contaminacin-de-las-aguas>
- FCIHS (2012). *Estudio hidrogeológico del Bajo Gaià desde el Embalse del Catllar hasta el mar (Tarragonès, Tarragona)*, 46 Curso Internacional de Hidrología Subterránea. Barcelona. 54 pp.
- Fetter, C.W. (2000). *Applied Hydrogeology*, 4th edition. Harlow, Pearson Education Limited.

García-cabrejo, O., Ávila, J. P., Cárdenas, L. E., & Barrantes, L. A. (2020). *GQAnalyzer : An R Package for Geochemical Analysis of Geothermal Fluids and Gases*. 2015, 1–9.

Garrido, E. A. (2003). *Estado actual y evolución de la intrusión marina en los acuíferos costeros del litoral septentrional de Tarragona (España)*. Tecnología de la intrusión de agua de mar en acuíferos costeros: Países mediterráneos. ISBN. 87-7840-8, Madrid.  
[https://www.igme.es/actividadesIGME/lineas/HidroyCA/publica/libros2\\_TH/tiac-01/Area%20I-3.pdf](https://www.igme.es/actividadesIGME/lineas/HidroyCA/publica/libros2_TH/tiac-01/Area%20I-3.pdf)

Gitahatari, (s.f). *HatariChem v2, la herramienta online para realizar diagramas de Piper, Stiff y Schoeller*. Retrieved June 19, 2021.  
<https://gidahatari.com/ih-es/presentanto-hatarichem-la-herramienta-online-para-el-analisis-de-quimica-del-agua>.

Griffiths, D.H., & Barker, R.D. (1993). *Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology*. Journal of Applied Geophysics, 29, 211-226.  
[https://doi:10.1016/0926-9851\(93\)90005-j](https://doi:10.1016/0926-9851(93)90005-j)

IDEAM. (2014). Modelos Hidrogeológicos conceptuales.  
<http://www.ideam.gov.co/web/agua/modelacion-hidrogeologica>

Idescat. (2009a). Cens agrari. Distribució de la superfície agrícola utilitzada (SAU). Tarragonès.  
<https://www.idescat.cat/pub/?id=censag&n=5082&geo=com:36>

Idescat. (2009b). Anuari estadístic de Catalunya. Unitats ramaderes. Per espècies. Comarques i Aran, àmbits i províncies.  
<https://www.idescat.cat/pub/?id=aec&n=455>

Idescat. (2018a). Annual indicators. Drinking water supply.  
<https://www.idescat.cat/indicadors/?id=anuals&n=10540&Lang=en&tema=media>

Idescat. (2018b). Anuari estadístic de Catalunya. Principals resultats. Per agrupacions d'activitat.

<https://www.idescat.cat/pub/?id=aec&n=474>

Idescat. (2019). Anuari estadístic de Catalunya. Consum d'aigua. Facturació. Comarques i Aran, àmbits i províncies.

<https://www.idescat.cat/pub/?id=aec&n=231>

Idescat. (2020). Estimacions de població. Sexe. Tarragonès.

<https://www.idescat.cat/pub/?id=ep&n=9122&geo=com:36#Plegable=geo>

Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña – ICGC. (2016). Geoíndex – Visualizador de cartografía geológica: *Leyenda base geológica 1:50.000*, p. 4 – 22.

[https://app1.icgc.cat/bd/icgc\\_geoindex\\_v\\_cartogeol.pdf](https://app1.icgc.cat/bd/icgc_geoindex_v_cartogeol.pdf)

Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña – ICGC. (2017<sup>a</sup>). Geoíndex – Visualizador de cartografía geológica: *Mapa de Áreas hidrogeológicas de Cataluña a escala 1:250.000*

[Shapesfiles-Online]

<https://www.icgc.cat/es/Administracion-y-empresa/Descargas/Cartografia-geologica-y-geotematica/Cartografia-hidrogeologica/Mapa-de-Areas-hidrogeologicas-de-Cataluna-1-250.000-MAH250M-v1.0-2017>

Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña – ICGC. (2017b). Geoíndex – Visualizador de

cartografía geológica: *Mapa geológico comarcal 1:50.000* [Shapesfiles-Online]

<https://www.icgc.cat/Administracio-i-empresa/Descarregues/Cartografia-geologica-i-geotematica/Cartografia-geologica/Mapa-geologic-comarcal-1-50.000>

Instituto Geológico Minero de España - IGME. (1985). Calidad y contaminación de las aguas subterráneas en España: “*Composición química de las aguas subterráneas naturales*”

Madrid, España: Paraninfo. Vol. 1.

- Instituto Geológico Minero de España - IGME. (1986). Programa nacional de gestión y conservación de los acuíferos: “*Estudio de los recursos hídricos subterráneos del sistema hidrogeológico 74. Camp de Tarragona*” Madrid, España: Paraninfo. Vol. 1.
- Kelly, D. (2005). *Seawater intrusion topic paper (Final)*. Island Country/Wria 6 Watershed Planning Process.
- Koefoed, O. (1979). *Geosounding Principles, 1: Resistivity sounding measurements*. Elsevier Science Publishing Company, Amsterdam.
- Lakubovskii, I. V., & Liajov, L. (1980). *Exploración eléctrica (3°)*. España: Reverté, S.A. [https://books.google.com.co/books?id=EF3iQ4bpNH4C&printsec=frontcover&source=gs\\_bse\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.co/books?id=EF3iQ4bpNH4C&printsec=frontcover&source=gs_bse_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)
- León, G. S. (2005). *La cuenca del río Orinoco: visión hidrográfica y balance hídrico*. Revista Geográfica Venezolana, 75-108.
- Llopis, L. N. (1943). *Estudio tectomorfológico de la terminación meridional de la depresión prelitoral catalana*. Est. Geogr. vol. IV, p. 31- 111. Madrid.
- Llorens, C. A. 2003. *Servicios ambientales de las cuencas y producción de agua, conceptos, valoración, experiencias y sus posibilidades de aplicación en el Perú*. FAO Presentado en el Foro Regional sobre Sistemas de Pago por Servicios Ambientales (PSA), Arequipa, Perú, 9-12 junio 2003, durante el Tercer Congreso Latinoamericano de Manejo de Cuencas Hidrográficas.
- Loke, M. H. (2010). *Res2Dinv ver. 3.59 for Windows XP/Vista/7, 2010. Rapid 2-D Resistivity & IP Inversion Using the Least-Squares Method. Geoelectrical Imaging 2D & 3D Geotomo Software*.

- López-Geta, J.A. (1995). *La gestión de los acuíferos costeros como fuente de un recurso importante y estratégico; progreso y futuro*. En: Las aguas subterráneas en la Ley de aguas española: un decenio de experiencia. AIH. Madrid. 221-237.
- López- Hidalgo-, A. A., Loke, M. H., Oscar-Fanton, G., & Cara-Rubí, E. (2004). *Técnicas prácticas para investigación de resistividad en dos y tres dimensiones (Tomografía eléctrica 2D Y 3D)*. Vol. 600(5400), 1-36.
- Losada, I., Izaguirre, C. & Diaz, P. (2014). Cambio climático en la costa española. Oficina Española de Cambio Climático, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid, 133 pág.
- Martorana, R.; Fiandaca, G.; Casas Ponsati, A.; Cosentino, P.L. (2009). *Comparative tests on different multi-electrode arrays using models in near-surface geophysics*. J. Geophys. Eng. 2009, 6, 1–20.
- Moller, I., Christensen, N. B. & Jacobsen B. H. (1995): *Fast approximate 2 D interpretation of resistivity profile data, in proceedings of the 1<sup>st</sup> Meeting Environmental and Engineering Geophysicd*, Torino 468 – 471.
- MSPSI. (2020). *Calidad del agua de consumo en España. Informe técnico*. Información y Estadísticas Sanitarias 2020. Ministerio de Sanidad, Política Social e Igualdad. [https://www.msbs.gob.es/profesionales/saludPublica/docs/INFORME\\_AC\\_2020.pdf](https://www.msbs.gob.es/profesionales/saludPublica/docs/INFORME_AC_2020.pdf)
- SIGEOP. (2021). *Sistema de Información Geofísica – Geocientífica del IGME* <https://info.igme.es/SIGEOP/>
- Ordoñez, J. J. (2011). *Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral de Recurso Hídrico*. Cartilla técnica, Sociedad geográfica de lima, Perú.

- Orellana, E. (1982). *Prospección geoeléctrica en corriente continua. 2 ed.* Ediciones Paraninfo, Madrid, España.
- Palacky, G. J. (1988). *Resistivity Characteristics of Geologic Targets*. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Vol. (3), 52-129. <https://doi:10.1190/1.9781560802631.ch3>
- Pladeyra. (2003). *Paisajes hidrológicos y balance hídrico de la cuenca Lerma Chapala, México*.
- Puigserver D., Carulla N., Torres B., Iglesias M., Pérez A., Borràs X., Carulla N., Carmona JM<sup>a</sup> (2006). *Hydrogeological recovery of the overexploited Baix Francoli-Gaia block aquifer system (Spain)*, Número. 66, p. 66.
- Reynolds, J. M., (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics 2<sup>a</sup> ed.*, Chichester: Wiley.
- Rius, A. M. (2021). Geòleg, cartògrafi divulgador científic. <https://sites.google.com/view/albertmartinezrius/inicio>
- Sendrós, A. (2012). *Aplicación de parámetros geoeléctricos en el estudio de las aguas subterráneas (cuenca de Valls, Tarragona)*.
- Servicio Meteorológico de Cataluña – Meteocat-Ruralcat. (2019). *Dades agrometeorològiques. Generalitat de Catalunya Gencat.Cat.* [https://ruralcat.gencat.cat/web/guest/agrometeo.estacions?p\\_p\\_id%3D234&p\\_p\\_lifecycle%3D0&p\\_p\\_state%3Dnormal&p\\_p\\_mode%3Dview&p\\_p\\_col\\_id%3Dcolumn-3&p\\_p\\_col\\_count%3D1&\\_234\\_struts\\_action%3D/adadasistemas/agrometeo/estacio](https://ruralcat.gencat.cat/web/guest/agrometeo.estacions?p_p_id%3D234&p_p_lifecycle%3D0&p_p_state%3Dnormal&p_p_mode%3Dview&p_p_col_id%3Dcolumn-3&p_p_col_count%3D1&_234_struts_action%3D/adadasistemas/agrometeo/estacio)
- Sheriff, R. E. (2002). *Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics*, 4th edn, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, USA.
- Software Geotomo. (2013). *Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method—instructions manual*. Geotomo, Gelugor, p 173.

Vásquez, S.E. (2012a). *Easy\_Quim V 5.0*, Grupo de Hidrología Subterránea, [en línea], Inst.

Grupo de Hidrología Subterránea, UPC, España.

<https://h2ogeo.upc.edu/es/software-hidrologia-subterranea/11-software-hidrologia-subterranea/42-easy-quim>.

Vásquez, S.E. (2012b). *Easy\_BAL V 10.9*, Grupo de Hidrología Subterránea, [en línea], Inst.

Grupo de Hidrología Subterránea, UPC, España.

<https://h2ogeo.upc.edu/en/investigation-hydrogeology/software/147-easy-bal-en>

Vera, J. A. (editor) (2004). *Geología de España*. SGE-IGME, Madrid, 890 p.

Vicepresidenta del Gobierno. (2018). Real Decreto 902/2018, de 20 de julio, por el que se

modifican el Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. Vicepresidenta del

Gobierno y ministra de la Presidencia, Relaciones con las Cortes e Igualdad.

[https://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-2018-10940](https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2018-10940)

## Apéndices

### Apéndice A. *Desarrollo del proceso del balance hídrico del área de estudio*

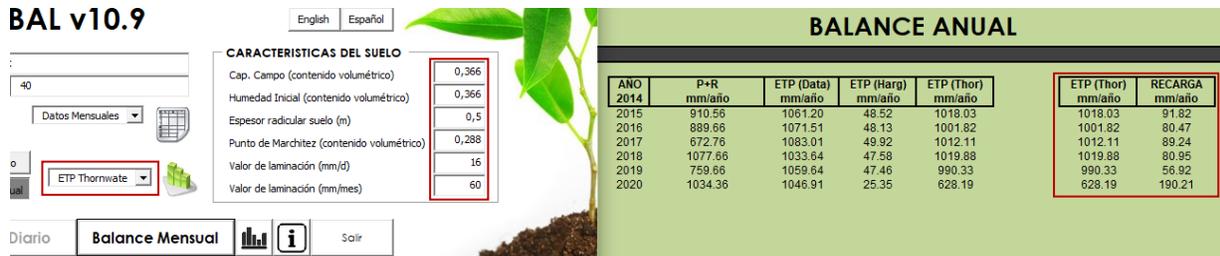
#### Procedimiento del cálculo del balance hídrico

##### Entradas

##### Infiltración por agua lluvia

La infiltración de agua fue obtenida a partir de los valores promedios anuales de precipitación de 491 mm/año, temperatura media de 17,16 °C y evapotranspiración de referencia de 1059,31, registrados en la base de datos meteorológica de (Servicio Meteorológico de Cataluña, 2019) desde el 1 de enero 2015 hasta el 31 de diciembre de 2020, adquiridos en la estación de Torredembarra, la cual es representativa debido a que se encuentra localizada dentro del área de estudio a 2 m de altitud, 41,1467° de latitud y de 1,41846° longitud. A partir de ello se realiza el cálculo del balance hidrometeorológico con el software EASY\_BAL, de acuerdo con los parámetros ya preestablecidos del programa y utilizando el método de Thornthwaite, con el propósito de hallar la evapotranspiración potencial ETP y así mismo la recarga por precipitación.

El método Thornthwaite consiste en introducir el término evapotranspiración potencial (ETP) para expresar "la cantidad de agua que perderá una superficie completamente cubierta de vegetación en crecimiento activo si en todo momento existe en el suelo humedad suficiente para su uso máximo por las plantas". Para el cálculo de la ETP de un mes determinado, se debe corregir la ETP mediante un coeficiente que tenga en cuenta el número de días del mes y horas de luz de cada día, en función de la latitud. Para lo cual se introduce el índice de iluminación mensual en unidades de 12 horas, que deberá multiplicar a la ETP para obtener la ETP según Thornthwaite (mm/mes) final.



ETP:  $945,06\text{mm/año} = 0,94506 \text{ m/año} * 146580467 \text{ m}^2 \text{ (Área de estudio)} = 138,52\text{Hm}^3/\text{año}$

Recarga por infiltración:  $98,26 \text{ mm/año} = 0,09826\text{m/año} * 146580467\text{m}^2 \text{ (Área de estudio)} = 14,40 \text{ Hm}^3/\text{año}$

**Entrada Lateral**

Debido a que el área de estudio presenta una piezometría muy compleja y a falta de información detallada, no se logra calcular exactamente el valor de las entradas laterales, por lo tanto, se tiene en cuenta el valor bibliográfico tomado de FCIHS (2012), el cual oscila entre 3 y 4 Hm<sup>3</sup>/año.

De esta manera, se plantea para el balance hídrico un valor de entrada lateral aproximado de 3,5 Hm<sup>3</sup>/año

**Retorno de Riego**

La comarca Tarragonés, posee aproximadamente 3594 ha de regadío (Idescat, 2009a) del cual se supone que 1/3, es decir, 33.33% pertenece al área de estudio. Para realizar el cálculo se tiene en cuenta el 25% de dotación de riego de 4000m<sup>3</sup>/Ha/Año (FCIHS, 2012), como valor destinado al riego.

$QRR = [(3.594 \text{ Ha} * 33.33\%) 4000\text{m}^3/\text{Ha}/\text{Año}] * 25\% = 1.197.880,2 \text{ m}^3/\text{Año} = 1,197 \text{ hm}^3/\text{año}$

**Perdidas de red – Distribución**

De acuerdo con la información suministrada (Idescat, 2018a), el % de pérdidas reales sobre el volumen de agua suministrado en Cataluña es de 13,7% sobre aproximadamente los 170 (L/hab/día) distribuidos aproximadamente en la Población de la Comarca Tarragonés (Idescat, 2020) de 262.488 habitantes, de la cual se supone que solo el 33,33% equivalente a 87.496 habitantes pertenece al área de estudio.

$$\text{PRD} = 87496 \text{ hab} * 170 \text{ (L/hab/día)} = 14874320 \text{ (L/día)} = 5,42 \text{ hm}^3/\text{año} * 13,7\% = 0,74 \text{ hm}^3/\text{año}$$

**Perdidas de red – Alcantarillado**

Según el valor obtenido en las pérdidas de red – distribución de 0,74 hm<sup>3</sup>/año, el valor promedio de la precipitación promedio anual de 491 mm/año y el área de la zona de aproximadamente 147 km<sup>2</sup> del cual se supone que un aproximadamente un 15 % es de uso de suelo urbano, a partir de allí, se obtiene el valor próximo de pérdidas por alcantarillado, considerando que el 5% se recarga al acuífero por dicho fenómeno

$$\text{PRA} = (0,74 \text{ hm}^3/\text{año} + ((15\% * 146580467 \text{ m}^2) * 0,491 \text{ m/año})) 5\% = 0,539 \text{ hm}^3/\text{año}$$

**Salidas**

Debido a que el área de estudio presenta una piezometría muy compleja y a falta de información detallada, no se logra calcular exactamente el valor de las salidas, por lo tanto, se tiene en cuenta el valor bibliográfico tomado de FCIHS (2012), el cual oscila entre 2 y 3 Hm<sup>3</sup>/año.

De esta manera, se plantea para el balance hídrico los siguientes valores:

Descarga Und Tarragona: 2,6 Hm<sup>3</sup>/año.

Descarga hacia el mar: 2,4 Hm<sup>3</sup>/año.

**Extracciones**

**Urbano**

A falta de información por municipio, se tiene en cuenta los datos del censo (Idescat,2020) y del consumo de agua para uso doméstico (Idescat, 2019) más recientes de la comarca de Tarragona, del cual se supone que 1/3, es decir, 33.33% se encuentra en el área de estudio, en donde se supone un aproximadamente solo un 25% de agua proveniente del río de la Gaià, debido a que este se encuentra interrumpido por el embalse del Catllar, de lo contrario podría ser un gran efluente ya que en esa zona aflora el acuífero calizo Jurásico-Cretácico.

Población: 262.488 habitantes / 3= 87.496.

Consumo de agua m<sup>3</sup>/año: 16.899 miles de metros cúbicos/año = 16.899.000(m<sup>3</sup>/año) /3 = 5.633.000 (m<sup>3</sup> /año).

Comarca	Población 2020	Consumo de agua doméstica 2019 (m <sup>3</sup> /año)	Población aprox en la zona de estudio(33.33%)	Consumo de agua doméstica (m <sup>3</sup> /año) 33.33%	% extracción acuífero	Volumen extraído acuífero (m <sup>3</sup> /año)
Tarragonés	262.488	16.899.000	87.496	5.633.000	25	1.408.250

U= Consumo de agua domestica \* % extracción acuífera= 5.633.000 (m<sup>3</sup>/año) \*25%= 1.408.250 (m<sup>3</sup>/año) = 1,4 Hm<sup>3</sup> /año.

**Industrial**

A falta de información por municipio, se tiene en cuenta los datos del número de establecimiento (Idescat, 2018b) y del consumo de agua para uso industrial y servicios (Idescat, 2019) más recientes de la comarca de Tarragona, del cual se supone que 1/3, es decir, 33.33% se encuentra en la zona de estudio, en donde se supone un aproximadamente solo un 15% de agua proveniente del río de la Gaia, debido a que este se encuentra interrumpido por el embalse del Catllar, de lo contrario podría ser un gran efluente ya que en esa zona aflora el acuífero calizo Jurásico-Cretácico.

Establecimientos (Número): 37921 establecimientos industriales en Cataluña, 7.584,2 establecimientos industriales en la Provincia Tarragonés y así mismo 2.528 establecimientos industriales en el área de estudio.

Consumo de agua m<sup>3</sup>/año: 33.543,3 miles de metros cúbicos/año = 33.543.300 (m<sup>3</sup> /año) /3 = 11.181.100 (m<sup>3</sup> /año)

Comarca	Establecimientos industriales 2018	Consumo de agua doméstica 2019 (m <sup>3</sup> /año)	Establecimientos Industriales aprox en la zona de estudio(33,33%)	Consumo de agua industrial (m <sup>3</sup> /año) 33,33%	% extracción acuífero	Volumen extraído acuífero (m <sup>3</sup> /año)
Tarragonés	7.584,2	33.543.300	2.528	11.181.100	15	1.677.165

I= Consumo de agua industrial \* % extracción acuífera= 11.181.100 (m<sup>3</sup>/año) \* 15%= 1.677.165 (m<sup>3</sup>/año) = 1,67 Hm<sup>3</sup> /año.

### Agrícola

La comarca Tarragonés, posee aproximadamente 3.594 ha de regadío (Idescat, 2009a), del cual se supone 1/3 es decir, 33,33% pertenece al área de estudio, por lo tanto, para realizar el cálculo se tiene en cuenta el valor representativo de 4000m<sup>3</sup>/Ha/Año, destinado al riego descrito en FCIHS,2012.

$$Q = [(3,594 \text{ Ha} * 33,33\%)4000\text{m}^3 /\text{Ha}/\text{año}] = 0,004 \text{ Hm}^3/\text{año}$$

### Ganadero

De acuerdo con la siguiente tabla en la cual se obtuvo la información más reciente (Idescat,2009b), se logra calcular el consumo total por tipo de animal existente en la comarca de Tarragonés, suponiendo un 33,33% perteneciente al área de estudio con un consumo estándar posible del 90% en el área de estudio.

<b>Comarca de Tarragonés</b>			
Tipo Especie	Número	Consumo agua (m <sup>3</sup> /año*cabeza)	Consumo agua total (m <sup>3</sup> /año)
Bovino	1047	14,61	15296
Ovino	276	0,73	201
Caprino	36	0,73	26,28
Porcino	1659	5,48	9091
Equino	118	18,27	2155
Conejos	35	0,55	19,25
Aves	8907	0,37	3295
Total	12078		30083
Total en el área de estudio	4026		10027

Consumo total \* 0.9= 10027 m<sup>3</sup>/año \* 0.9= 9024,3 m<sup>3</sup>/año = 0,009 hm<sup>3</sup>/año

### **Variaciones de almacenamiento**

A pesar de que se logra calcular los valores próximos al balance hídrico del área de estudio, no se puede obtener un valor de almacenamiento por lo cual se considera **0**, ya que no se puede comparar los niveles recientes hallados con niveles anteriores exactos, debido a la falta de información y de datos presentes en la zona.

Apéndice B. Modelos geoelectricos de los 25 perfiles de sondeos eléctricos verticales

