



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

**FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**

**EVALUACIÓN PRELIMINAR DE RECURSOS
HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS DE LA LOCALIDAD
DE QUINTAY, CASABLANCA, REGIÓN DE
VALPARAÍSO.**

Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de
Geólogo.

Profesor Guía: Dr. Jaime Araya Vargas

Juan Ignacio Reyes Serrano

Copiapó, Chile 2024

RESUMEN

La crisis hídrica en Chile derivada principalmente del cambio climático, plantea la necesidad de realizar una gestión más sostenible del agua. Esto se enfoca en resolver la gestión y gobernanza del agua, aumento de actividades productivas y el otorgamiento de derechos de agua.

El presente trabajo tiene como objetivo principal evaluar la disponibilidad de recursos hídricos subterráneos en la localidad de Quintay, mediante la compilación de información de pozos, estudios geológicos y geofísicos, caracterización de unidades hidrogeológicas, estimación del balance hídrico y construcción de un modelo hidrogeológico conceptual.

Se determinaron tres unidades hidrogeológicas, según su capacidad de almacenamiento y transmisión de agua subterránea. La estimación del balance hídrico muestra que las tasas de descarga superan a las de recarga durante la mayor parte del año, producido principalmente por la disminución de las precipitaciones en Chile Central. Se estimó que el volumen de agua almacenado es de aproximadamente $4.725.000 \text{ m}^3$, los cuales tendrían una duración de 10 años, teniendo en cuenta las tasas de extracciones actuales y que las tasas de descargas superan a las de recargas.

La evaluación realizada sugiere abordar la sobreexplotación y el desequilibrio que existe en el balance hídrico en Quintay. La escasa disponibilidad de agua afecta la calidad de vida de los habitantes, especialmente en el acceso al agua potable. Se requiere una gestión a largo plazo que considere tanto los cambios climáticos como las demandas de agua que se requieran. Se propone la ampliación de recopilación de datos, la expansión del área de estudio y la planificación de ensayos de bombeo para una gestión efectiva y sostenible de los recursos hídricos subterráneos en Quintay.

Palabras claves: ESCASEZ HÍDRICA- RECURSOS HÍDRICOS- CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA- BALANCE HÍDRICO- MODELO HIDROGEOLÓGICO.

ABSTRACT

The water crisis in Chile, primarily stemming from climate change, underscores the need for more sustainable water management. This focuses on addressing water management and governance issues, increased productive activities, and water rights allocation.

The main objective of this study is to assess the availability of groundwater resources in the Quintay locality. This is achieved through the compilation of well data, geological and geophysical studies, characterization of hydrogeological units, estimation of the water balance, and the construction of a conceptual hydrogeological model.

Three hydrogeological units were identified based on their capacity for groundwater storage and transmission. The water balance estimation indicates that discharge rates exceed recharge rates for most of the year, primarily due to decreased precipitation in Central Chile. The estimated stored water volume is approximately 4.725.000 m³, with a duration of 10 years considering current extraction rates and the fact that discharge rates surpass recharge rates.

The assessment suggests addressing the overexploitation and imbalance in the water balance in Quintay. The limited water availability adversely affects the quality of life for residents, particularly in terms of access to potable water. A long-term management approach is required, taking into account both climate changes and water demand. Recommendations include expanding data collection, extending the study area, and planning pumping tests for effective and sustainable management of groundwater resources in Quintay.

Keywords: WATER SCARCITY - WATER RESOURCES - HYDROGEOLOGICAL CHARACTERIZATION - WATER BALANCE - HYDROGEOLOGICAL MODEL.

*Mami cony sé lo importante que era esto para ti,
espero te sientas orgullosa.
Siempre estás en mi corazón y te recuerdo a cada
momento, gracias por todo. Te lo dedica tu nieto.*

AGRADECIMIENTOS

Aprovecharé este espacio para expresar mis agradecimientos a todas las personas que contribuyeron a hacer esto posible, no solo por tradición, sino porque es importante dejar constancia de ello. Pido disculpas de antemano por lo reiterativo, pero se leerá bastantes veces la palabra gracias, sin lugar a dudas me gustaría tener espacio para escribirla más.

Agradezco al proyecto ANID N°FSEQ210038, por financiar esta tesis y al Departamento de Ingeniería Química y Ambiental de la Universidad Técnica Federico Santa María, sobre todo a la profesora Paula Guerra y el profesor Adrián Ortiz, por su constante apoyo y buena onda durante todo este tiempo.

Agradezco al profesor Jaime Araya, por aceptar ser mi profesor guía a pesar de no conocerme, por sus valiosas y minuciosas correcciones, así como sus enseñanzas, no solo en relación con el tema específico de esta tesis, sino también sobre la investigación, el pensamiento crítico y la resolución de problemas, su influencia positiva perdurará en mi vida. Agradecer a los miembros de la comisión profesora Nicoll Castillo y Wolfgang Griem, que cuando me enteré que eran de mi comisión fue una grata sorpresa, ya que, ambos han sido con los profesores que más tuve asignaturas durante la carrera, y me han aportado invaluable conocimientos durante mi formación. Muchas gracias al profesor Ayaz Alam, por confiar en mí para realizar este trabajo. Muchas gracias a los profesores Rubén Rojas y Luis Tapia del Departamento de Matemáticas, por su profesionalismo y buena onda. También, quiero agradecer a los profesores del preuniversitario, Walter Uribe y Francisco Puntarelli, los que me aportaron conocimiento que fue la base para afrontar muchos ramos en la universidad, que hasta el día de hoy me sirve.

Muchas gracias a todos los compañeros de universidad con quienes compartí innumerables veces, los cuales hicieron la vida universitaria mucho más agradable Loreto, Rocío, Pablo, Seba, Javi, Flo y José, su compañía ha sido invaluable. Agradecer a Don Carlos, por siempre tener una sonrisa y buenos deseos cada vez que lo encontraba en mi camino en bici hacia la universidad.

A toda la gente que conocí en Casablanca, Don René, Don Mauricio, Alexa y Francisco muchas gracias por el apoyo, espero que este trabajo contribuya a unque sea en un 1% para que en algún momento puedan solucionar su problema con el agua. A la gente de Subterránea, Fabián, Pablo y Carlos gracias por sus buenos deseos y buena onda cuando nos tocó hacer la campaña geofísica.

Infinitas gracias a Annia Arias, su apoyo, paciencia, cariño y comprensión han sido mis mayores fortalezas. Aprecio cada palabra de aliento, cada gesto de ánimo y cada abrazo durante este tiempo. Agradezco la dicha de tener su compañía en cada paso de este camino, este logro no es solo mío, sino nuestro. Muchas gracias a Mauricio Arias, por ser un pilar fundamental en nuestro camino, su constante respaldo y confianza en cada una de las decisiones tomadas ha marcado una diferencia significativa en todo este tiempo. Muchas gracias a Carmen Wolf, por su apoyo, confianza, hospitalidad y por hacer las mejores pizzas que he probado en mi vida.

Quiero dar las gracias de forma especial a mi querido Liceo Manuel Barros Borgoño (Universidad del Matadero) por haberme inculcado valores sólidos, proporcionado conocimientos fundamentales y regalado amistades que han perdurado a lo largo del tiempo. Desearía haber contado con la madurez suficiente para aprovechar de manera más plena y consciente las valiosas enseñanzas y oportunidades que esta etapa de mi vida me ofreció. Muchas gracias a mis amigos Pape, Italiano y Negro por su incondicional amistad durante todos estos años.

Finalmente, quiero darle las gracias de todo corazón a mi familia, papá, mamá y hermana por acompañarme y soportarme todos estos años. Papá, muchas gracias por el esfuerzo que haces por nosotros, espero algún día alcanzar, aunque sea una pequeña fracción de la bondad que irradias; te mereces lo mejor. Mamá, gracias infinitas por tu apoyo, amor y esfuerzo, a ti y el papá les debo todo lo que soy, sin ustedes jamás habría llegado a este punto, por lo que este logro es de ustedes también. Tata Pato Pato, muchas gracias por tus enseñanzas, cariño y enseñarme la importancia de la puntualidad, siempre estás en mis pensamientos. Mamá Ana, muchas gracias por el cariño y apoyo que siempre me das. Tata Guillermo, gracias por su apoyo y por siempre estar al lado de mamá Ana. Mami cony, gracias por tu cariño, enseñanzas y siempre incentivar la lectura y buena ortografía, siempre te recuerdo. Tata Jilberto, gracias por tu cariño, a pesar de que me pinchabas las pelotas de fútbol te quiero, espero que estés con la mami cony viéndonos y cuidándonos desde donde estén.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Hipótesis	2
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo general	3
1.3.2. Objetivos específicos	3
1.4. Metodología	4
1.5. Trabajos anteriores	5
1.6. Limitaciones	5
2. MARCO TEÓRICO	7
2.1. Recursos hídricos	7
2.1.1. Agua superficial	7
2.1.2. Agua subterránea	8
2.1.3. Disponibilidad de recursos hídricos	12
2.1.4. Agua potable rural (APR)	13
3. ANTECEDENTES DE LA ZONA DE ESTUDIO	14
3.1. Ubicación y Acceso	14
3.2. Geomorfología	15
3.3. Hidrografía	15
3.4. Clima	16
3.5. Precipitaciones	17
3.6. Extracción y consumo de recursos hídricos	19
3.7. Geología del área de Quintay	20
3.7.1. Rocas estratificadas	21
3.7.2. Depósitos no consolidados	21
3.7.3. Rocas intrusivas	22
3.7.4. Rocas metamórficas	23
3.7.5. Estructura	24

4. METODOLOGÍA	26
4.1. Caracterización hidrogeológica	26
4.2. Método Transiente Electromagnético	28
5. RESULTADOS	31
5.1. Hidrogeología	31
5.1.1. Unidades hidrogeológicas	31
5.1.2. Secciones estratigráficas	35
5.2. Distribución y volumen de recursos subterráneos	42
5.3. Balance hídrico	43
5.3.1. Entradas y salidas hídricas.....	43
5.3.2. Estimación del balance hídrico	45
5.3.3. Modelo hidrogeológico	47
6. DISCUSIÓN	48
7. CONCLUSIONES.....	52
REFERENCIAS	54
ANEXOS	59
Anexo 1 (A.1) Columnas estratigráficas	59
Anexo 2 (A.2) Perfiles geoelectricos y RMS	67
Anexo 3 (A.3) Factores de corrección para cálculos de la evapotranspiración	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Delimitación de las áreas que pertenecen al resort y club de golf Santa Augusta, curso del estero El Jote, pozos en Quintay y área de estudio.	6
Figura 2.1. Representación de una cuenca de drenaje	7
Figura 2.2. a) Agua rellenando los espacios entre los sedimentos. b) Agua entre las fracturas de las rocas. c) Agua disolviendo estructuras carbonatadas.....	9
Figura 2.3. Representación de la zona saturada, no saturada, franja capilar y nivel freático bajo la superficie	10
Figura 2.4. Índice regional de precipitaciones en la zona central de Chile en los últimos 100 años.....	12
Figura 2.5. Escasez de recursos hídricos y precipitaciones, y gastos en camiones aljibe en las regiones de la zona central de Chile	13
Figura 3.1. Ubicación y vías de acceso del área de estudio.....	14
Figura 3.2. Hidrología del área de Quintay.....	18
Figura 3.3. Representación gráfica de las precipitaciones medias anuales en la estación meteorológica Lago Peñuelas.....	19
Figura 3.4. Mapa de unidades geológicas en la localidad de Quintay	25
Figura 4.1. Distribución de los pozos presentes en Quintay, zonas de los sondeos TEM y unidad hidrogeológica predominante	27
Figura 4.2. Esquema indicando la distribución de corrientes eléctricas en el subsuelo durante el levantamiento TEM	28
Figura 4.3. Materiales utilizados para la realizar las mediciones geofísicas	30
Figura 5.1. Mapa con la ubicación de los pozos con estratigrafía, zonas de sondeos TEM y trazo de tres secciones	32
Figura 5.2. Clasificación de unidades hidrogeológicas.....	33
Figura 5.3. Sección estratigráfica A-D, con orientación N-S	36
Figura 5.4. Perfil geoeléctrico 1	36
Figura 5.5. Sección estratigráfica D-G, con orientación W-E	38
Figura 5.6. Sección estratigráfica C-TEM01, con orientación N-S.	40
Figura 5.7. Mapa con la distribución en superficie de las unidades hidrogeológicas interpretadas en Quintay.....	41
Figura 5.8. Mapa del espesor del acuífero correspondiente a la UHG-1.....	42
Figura 5.9. Modelo conceptual hidrogeológico	47

Figura 6.1. Déficit o superávit pluviométrico de la Región de Valparaíso entre los periodos 1966-1969 y 2010-2014.	49
Figura 6.2. Ajuste de la inversión (izq) y modelos de capas y suavizado (der) para TEM-01 (RMS=3.75%)	50
Figura 6.3. Ajuste de la inversión (izq) y modelos de capas y suavizado (der) para TEM-02 (RMS=12.36%)	51
Figura A.1.1. Representación estratigráfica del pozo “A”	59
Figura A.1.2. Representación estratigráfica del pozo “B”	60
Figura A.1.3. Representación estratigráfica del pozo “C”	61
Figura A.1.4 . Representación estratigráfica del pozo “D”	62
Figura A.1.5. Representación estratigráfica del pozo “E”	63
Figura A.1.6. Representación estratigráfica del pozo “F”	64
Figura A.1.7. Representación estratigráfica del pozo “G”	65
Figura A.1.8. Representación estratigráfica de la ladera del estero El Jote.	66
Figura A.2.1. Perfil geoelectrico 2	67
Figura A.2.2. Perfil geoelectrico 3	67
Figura A.2.3. Perfil geoelectrico 4	68
Figura A.2.4. Perfil geoelectrico 5	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Distribución de agua dulce presente en la hidrósfera.....	8
Tabla 3.1. Área y precipitaciones de Quintay y Estero Casablanca.....	16
Tabla 4.1. Información de los pozos presentes en el área de estudio para realizar la caracterización hidrogeológica.....	26
Tabla 4.2. Resistividad de aguas, sedimentos y rocas.....	29
Tabla 5.1. Clasificación de unidades hidrogeológicas	35
Tabla 5.2. Temperaturas medias y precipitaciones estación meteorológica Lago Peñuelas correspondiente al año 2018	43
Tabla 5.3. Datos de evapotranspiración	45
Tabla 5.4. Valores de estimación del balance hídrico	46
Tabla A.2.1. Valor RMS de cada sondeo TEM.....	68
Tabla A.3.1. Factores de corrección según latitud del área de estudio	69

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

Las precipitaciones en Chile durante el año 2021 alcanzaron un déficit de 43% en promedio, incluso el período entre los años 2012-2021 es el más seco desde 1961 con un promedio de 23% de déficit a nivel nacional (DGAC, 2022). Los principales factores que explicarían este déficit son el aumento de emisiones de gases de efecto invernadero, que genera un alza en las temperaturas del planeta, y las condiciones de circulación atmosférica y oceánicas que provoca que las altas presiones del Océano Pacífico impidan que los sistemas frontales avancen hacia el continente (de la Vega, 2021). Durante el año 2011, la Región de Valparaíso presentó una disminución pluviométrica de aproximadamente 60% y del agua en embalses en un 56%, la cual es utilizada como agua potable, riego y energía, en donde el agotamiento de esta reserva representa un grave problema para la comunidad (BCN, 2012). La Región de Valparaíso concentra la mayor parte de eventos climáticos extremos como lo son sequías, temporales y heladas, lo que provoca que esta región sea de las más vulnerables a los cambios climáticos (Henríquez et al., 2016). La economía de esta región se sustenta en su producción agrícola, en donde en las últimas décadas ha aumentado la demanda de agua superando a la oferta de este recurso (Budds, 2012). Se declaró zona de catástrofe a 38 comunas continentales, por lo que el agotamiento de agua ha provocado que parte de la población no tenga acceso a agua potable y se ha tenido que implementar el reparto de agua potable a través de camiones aljibe (Intendencia de Valparaíso, 2019). En la región las aguas corresponden a superficiales o subterráneas, las cuales deben tener un derecho de agua para extraerlas, en donde en los últimos años ha existido una repartición desmedida de permisos de agua sin tener en consideración los efectos que provocan las extracciones ilegales de agua y los constantes periodos de sequía que afectan la región. El agotamiento de aguas superficiales ha provocado una disminución de aguas subterráneas, por lo que si no existen recursos para realizar pozos lo suficientemente profundos (mínimo de 100 metros), es inviable acceder al agua (Budds, 2009; 2012; 2018).

La comuna de Casablanca presenta una fuerte actividad agrícola, lo que requiere de grandes cantidades de agua, en donde junto con la expansión de la población en la comuna, cada vez aumenta la demanda del agua en la zona (I. Municipalidad de Casablanca, 2019). La Empresa Sanitaria de Valparaíso, Aconcagua y Litoral (ESVAL) proporciona agua a las localidades con contrato, sin embargo, existen localidades donde no existen o son deficientes las instalaciones sanitarias, lo que restringe el acceso al agua potable (Lara, 2020). En la localidad Quintay (Figura 1.1), existe un déficit en la disponibilidad del recurso hídrico debido principalmente a la apropiación de derechos de agua, lo que dificulta la vida diaria de sus habitantes y el acceso para efectuar eventuales estudios (Cossio, 2021). Por lo tanto, es crucial encontrar nuevas fuentes de recursos hídricos en Quintay para abordar esta problemática.

1.2. Hipótesis

Se plantea que en Quintay es probable la existencia de recursos hídricos subterráneos tanto en la cuenca fluvial del Estero El Jote como en el sector del pueblo de Quintay. Esta hipótesis se basa en la presencia de 23 pozos catastrados en la localidad (Figura 1.1). Además, estudios geológicos de riesgos (MINVU, 2017) y expedientes realizados durante la construcción de obras de captación de aguas de la Dirección General de Aguas (DGA), indican la presencia de acuíferos en el área de estudio.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la disponibilidad de recursos hídricos subterráneos en la localidad de Quintay, Casablanca, Región de Valparaíso.

1.3.2. Objetivos específicos (OE.)

1. Caracterizar las unidades hidrogeológicas del área de estudio.
2. Estimar la distribución y volumen de recursos hídricos subterráneos presentes en la localidad de Quintay.
3. Estimar la recarga de recursos hídricos subterráneos.
4. Estimar escenarios de disponibilidad en el tiempo de los recursos hídricos estimados.

1.4. Metodología

Para lograr los objetivos expuestos, se realizó lo siguiente:

- Se compiló y analizó las publicaciones científicas y expedientes de derechos de agua de la DGA, acerca de los pozos existentes en el área de estudio (Para cumplir con OE. 1 y 4).
- Se obtuvo un catastro de pozos de agua subterránea presentes en la localidad de Quintay. Existe un total de 23 pozos, con la siguiente información: código expediente, nombre solicitante, caudal anual promedio, volumen, coordenadas, entre otros. Posteriormente, se recuperaron los expedientes de 12 pozos desde la DGA, para obtener estratigrafía, nivel estático y pruebas de bombeo (Para cumplir con OE. 1 y 2).
- Reconocimiento geológico del área de estudio y confección de 8 columnas estratigráficas, las cuales fueron utilizadas para definir y caracterizar las unidades hidrogeológicas correspondientes (Para cumplir con OE. 1).
- Se realizaron 3 campañas de terrenos con dos finalidades. La primera, fue realizar un mapeo geológico e identificar sitios que cumplieran las condiciones para realizar un estudio geofísico mediante Transiente Electromagnético (TEM). La segunda, fue la participación en el estudio geofísico mencionado anteriormente (Para cumplir con OE. 2).
- Se estimaron los volúmenes de recarga mediante el análisis de las precipitaciones (Para cumplir con OE.3).
- Se realizó un balance hídrico simplificado (Para cumplir con OE. 4).

1.5. Trabajos anteriores

La información geológica e hidrogeológica del área de estudio es mínima, y está limitada a estudios de escala regional como el Mapa Geológico del Área de Valparaíso-Curacaví de escala 1:100.000 (Gana et al., 1996), el Mapa Hidrogeológico de Chile de escala 1:2.500.000 (DGA, 1986) y la Evaluación de los recursos subterráneos de las cuencas costeras de la V Región (DGA, 2005). Existen estudios de actualización de la modelación hidrogeológica e integrada de los acuíferos de la Cuenca del Estero de Casablanca (DGA, 2015), sin embargo, estos no cubren el área de estudio. Se encontraron tesis de pregrado sobre el área de estudio, pero abordan el estudio petrológico puntual de unidades metamórficas (Celis, 2018), e intrusivas (Ramírez, 2010), o la propuesta de una desalinizadora en el sector de Quintay (Guajardo, 2023), y la implementación de una planta desalinizadora de agua en el sector de Lago Peñuelas (Gaete, 2021). Cabe destacar, que en los catálogos del Servicio Nacional de Geología y Minería (SNGM) y de la DGA no se encontraron informes que abarquen las áreas de estudio con mayor detalle a los trabajos regionales anteriormente mencionados.

1.6. Limitaciones

El desarrollo de esta tesis enfrentó dos limitantes principales. La primera limitante fue la escasa información tanto geológica como hidrogeológica de la zona de estudio (ver sección 1.5). Aparte de los escasos estudios previos, se encontraron un total de 23 pozos en los archivos de la DGA, de los cuales solo 7 presentan información completa, es decir, código de expediente, nombre solicitante, caudal anual promedio, coordenadas UTM, estratigrafía, pruebas de bombeo y nivel estático, 5 presentan la misma información mencionada anteriormente excepto estratigrafía, 7 presentan código de expediente, nombre solicitante, caudal anual promedio y coordenadas UTM, y 4 solo presentan código de expediente, nombre solicitante y caudal anual promedio.

Otra limitante relevante fue el acceso a sitios de interés para realizar un estudio geofísico. Gran parte de la localidad de Quintay está administrada por el resort y club de golf Santa Augusta (Figura 1.1). A pesar de intentar tomar contacto con la administración, que incluyen correos con copia a la municipalidad, llamadas telefónicas y una visita presencial, no se logró establecer contacto, en donde el objetivo era explicar en detalle de que consta el proyecto de investigación y la relevancia de estudio geofísico posterior.

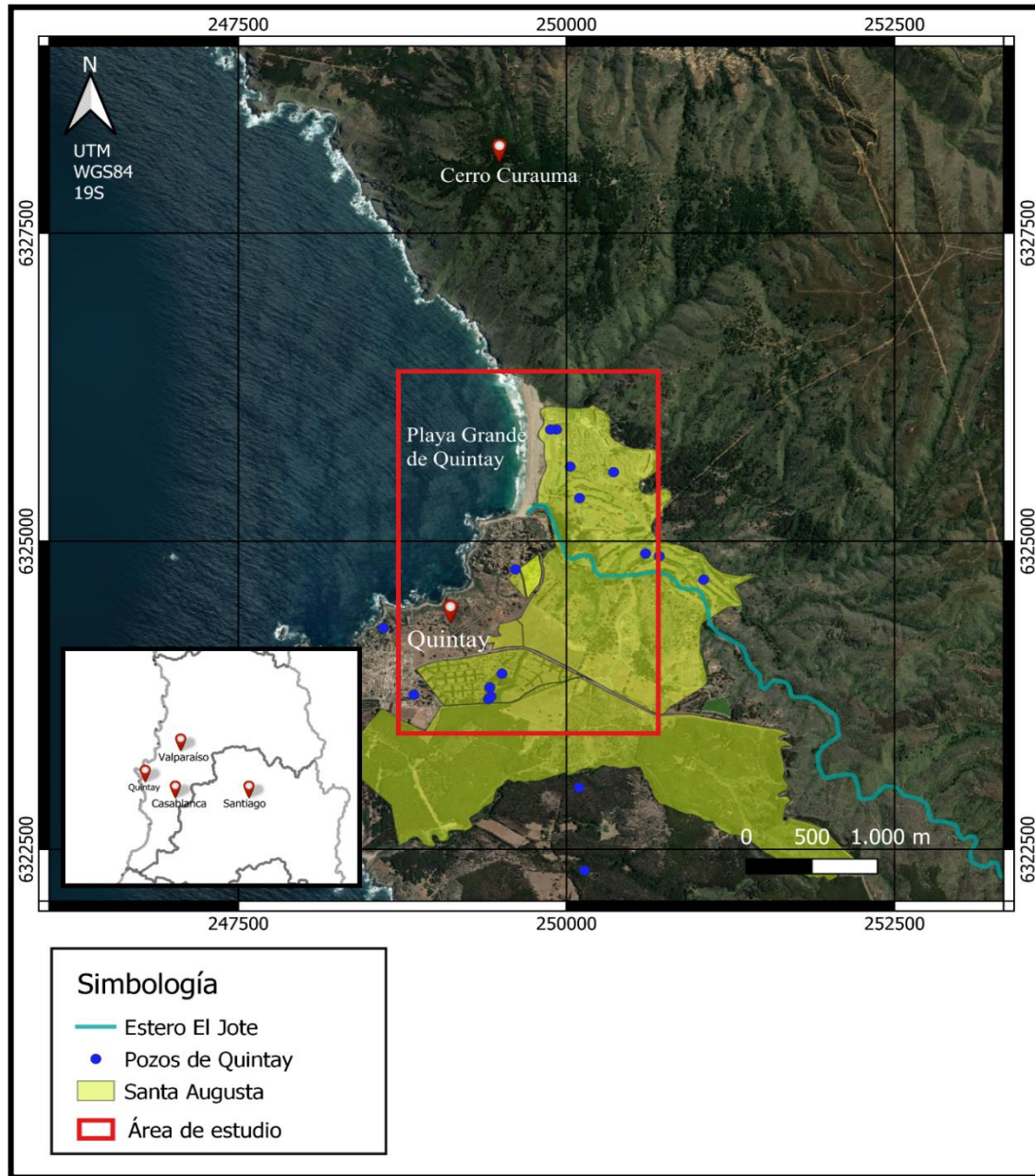


Figura 1.1. Delimitación de las áreas que pertenecen al resort y club de golf Santa Augusta, curso del estero El Jote, pozos en Quintay y área de estudio.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Recursos hídricos

2.1.1. Agua superficial

Se denomina agua superficial aquella agua que se encuentra sobre la superficie del planeta, en donde la mayor parte de las precipitaciones se infiltra en el terreno o bien permanece en la superficie, la cual se desplaza como agua de escorrentía. El hecho de que el agua escurra sobre la superficie en vez de infiltrarse depende de factores como: intensidad y duración de las precipitaciones, estado de humedad de la superficie, textura del suelo, pendiente del terreno y la cantidad de cubierta vegetal. Cuando la textura de la superficie es impermeable, o cuando ésta se satura, predomina la escorrentía superficial. El agua superficial fluye por las pendientes en forma de láminas mediante un flujo laminar, el cual se desplaza siguiendo trayectorias rectas y paralelas al cauce. Generalmente, las corrientes de aguas se mueven de manera confusa, errática y turbulenta, los que se denomina flujo turbulento, incluso cuando las corrientes tienen un comportamiento tranquilo en la superficie, en el fondo existen corrientes turbulentas. Las corrientes de agua drenan por una cuenca de drenaje (Figura 2.1), la cual está separada una de otra por una línea imaginaria denominada divisoria de aguas (Tarbuck y Lutgens, 2013).

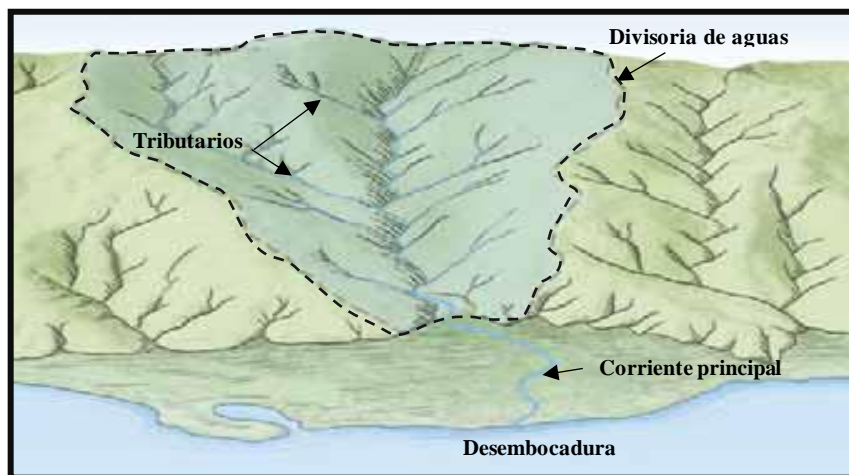


Figura 2.1. Representación de una cuenca de drenaje. Modificado de Tarbuck y Lutgens (2013).

2.1.2. Agua subterránea

El agua subterránea es aquella que se almacena en la porosidad presente en el suelo, así como también en diaclasas y fracturas presentes en el basamento rocoso. Entre estos espacios es donde se reúne y mueve el agua subterránea. El agua subterránea representa una pequeña parte si se considera la hidrósfera total (Tabla 1.1), sin embargo, este pequeño porcentaje que se almacena en el subsuelo representa una gran cantidad del recurso hídrico (Tarbuck y Lutgens, 2013). Sin considerar los casquetes polares y glaciares, el agua subterránea representa el mayor depósito de agua dulce, que eventualmente es asequible para los seres humanos.

Tabla 2.1. Distribución de agua dulce presente en la hidrósfera (Tarbuck y Lutgens, 2013).

Partes de la hidrosfera	Volumen de agua dulce (m)	Porcentaje del volumen total de agua dulce (%)	Porcentaje del volumen total de agua dulce líquida (%)
Casquetes polares y glaciares	24.000.000	84,945	0
Aguas subterráneas	4.000.000	14,158	94,05
Lagos y embalses	155.000	0,549	3,64
Humedad del suelo	83.000	0,294	1,95
Vapor de agua en la atmósfera	14.000	0,049	0,33
Agua de los ríos	1.200	0,004	0,03
Total	28.253.200	100,00	100

El agua subterránea, en la mayoría de los casos, es originada por las precipitaciones que se infiltran en la superficie terrestre, la cual llega hasta el nivel freático, que corresponde a una superficie conceptual que se encuentra a cierta profundidad que varía de un lugar a otro, y corresponde a la parte superior de la zona en donde los poros, espacios intersticiales, fracturas y canales se encuentran saturados en agua (Figura 2.2). Esta profundidad, se puede medir mediante la perforación de un pozo, que va desde la superficie terrestre hasta el nivel freático. Por encima del nivel freático, se encuentra la zona no saturada, en donde algunos espacios se encuentran llenos de aire y otros llenos de agua.

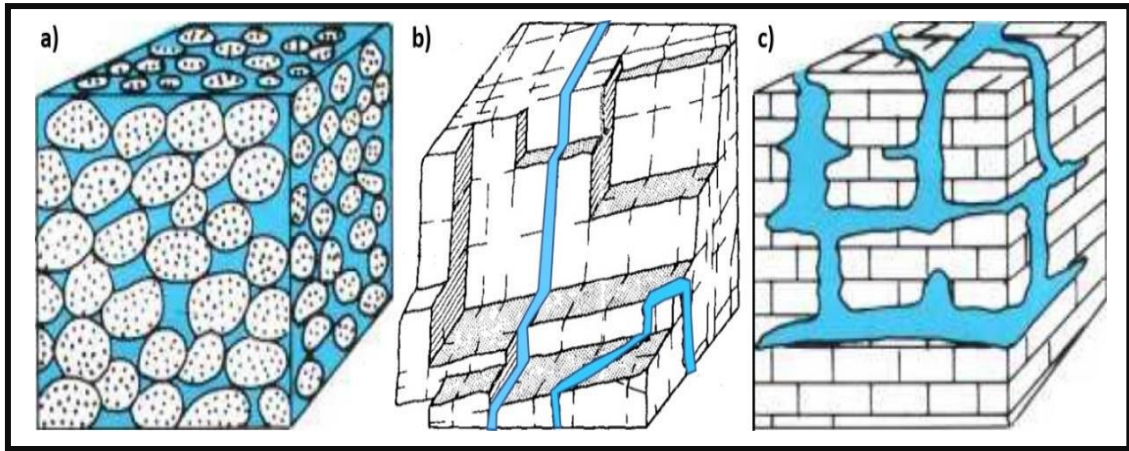


Figura 2.2. a) Agua relleno los espacios entre los sedimentos. b) Agua entre las fracturas de las rocas. c) Agua disolviendo estructuras carbonatadas (Poeter et al., 2020).

Entre la zona saturada y no saturada, se encuentra una zona que se denomina franja capilar, en donde el agua subterránea se mantiene adherida por tensión superficial en pequeños conductos entre los granos del suelo o sedimentos (Figura 2.3). Los principales factores que afectan el almacenamiento y circulación de aguas subterráneas son principalmente: la porosidad y permeabilidad. La porosidad corresponde al porcentaje de volumen total de roca o sedimento ocupado por poros, estos espacios se alojan generalmente entre sedimentos, pero también son comunes en fracturas y diaclasas. Una roca o sedimento puede poseer una alta porosidad, pero no permitir el flujo del agua a través de ellos, los poros tienen que estar conectados entre sí para que fluya el agua y deben ser lo suficientemente grandes. Por lo tanto, a la capacidad de transmitir un fluido en un material se conoce como permeabilidad (Poeter et al., 2020).

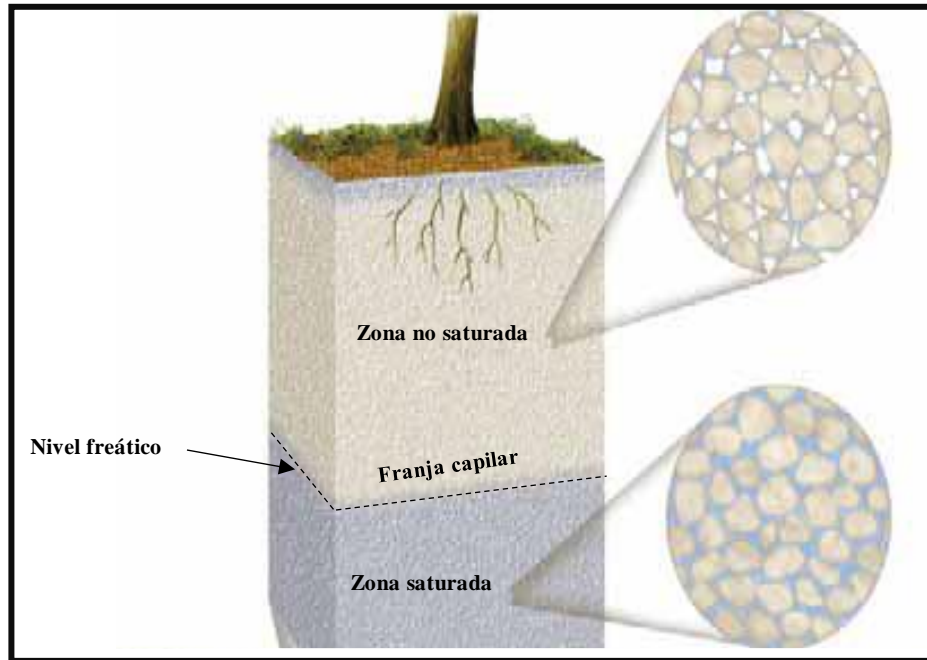


Figura 2.3. Representación de la zona saturada, no saturada, franja capilar y nivel freático bajo la superficie. Modificado de Tarbuck y Lutgens (2013).

El agua subterránea se mueve a través de espacios interconectados, en donde a menor sean los espacios más lento será el movimiento del agua. Esta agua, se puede dividir en dos categorías: la primera corresponde a la porción que drenará bajo la influencia de la gravedad (porosidad eficaz), y la segunda corresponde a la parte retenida sobre las superficies de las partículas y rocas y en pequeñas aperturas (retención específica). La porosidad específica indica cuanta agua es asequible para su uso, mientras que la retención específica indica el agua que queda unida al material (Tarbuck y Lutgens, 2013). Cuando una formación geológica situada en la zona saturada es capaz de almacenar y transmitir agua libremente en cantidades considerables, se la denomina acuífero (Hispagua, 2020).

Existen una gran variedad de tipos de acuíferos los cuales puedes ser clasificados según diferentes criterios:

1. Según sus características litológicas o tipo de poros (Hispagua, 2020):

- Acuíferos porosos o detríticos: corresponden a rocas o sedimentos con una permeabilidad variable que depende de la porosidad intergranular del material y de la interconexión entre los poros.
- Acuíferos fisurados y/o kársticos: rocas carbonatadas u otro tipo de rocas que presenten fracturación.
- Acuíferos mixtos: su porosidad se debe a todas las causas anteriormente definidas.

2. Según la presión hidrostática (Sánchez, 2014):

- Acuíferos no confinados: se caracterizan por ser superficiales y no tener una capa confinante de baja permeabilidad. Su límite superior está a presión atmosférica.
- Acuíferos confinados: limitados en su parte superior, por una capa de permeabilidad muy baja, en donde el flujo del agua es prácticamente nulo. El material del acuífero está completamente saturado y su límite superior presenta una mayor presión que la atmosférica.
- Acuíferos semiconfinados: corresponden a acuíferos a presión, pero en algunas de sus capas confinantes son semipermeables.

2.1.3. Disponibilidad de recursos hídricos

Desde el año 2010, la zona central de Chile experimenta una megasequía, en donde existe un déficit de precipitaciones cercano al 30% (CR2, 2015). La Figura 2.4, muestra las precipitaciones medidas a partir del índice regional de precipitaciones (RPI), donde los puntos rojos corresponden a años de sequía con RPI menor a 80%. La megasequía de la zona central (segmento amarillo en Figura 2.4) corresponde a un intervalo anómalo donde se acumulan varios años con RPI <80%.

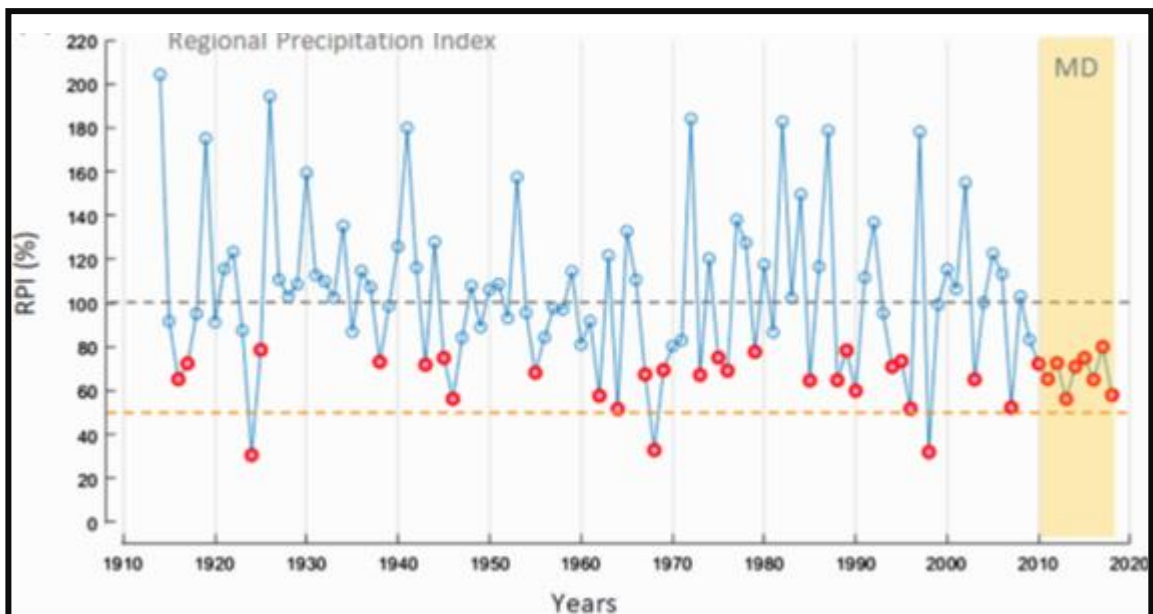


Figura 2.4. Índice regional de precipitaciones en la zona central de Chile en los últimos 100 años. (Garreaud y Boisier, 2019).

La disminución de las precipitaciones puede causar disminución en los volúmenes de embalses, aguas subterráneas y caudales de ríos (Garreaud y Boisier, 2019). Esto causa un importante efecto en la oferta y demanda de agua potable, por lo que generalmente se implementa una repartición de agua potable mediante camiones aljibes en las zonas afectadas. En la región de Valparaíso, existe una gran cantidad de comunas que se han declarado en emergencia agrícola por déficit hídrico, por lo que se ha debido invertir una considerable cantidad de dinero en camiones de agua (Figura 2.5).

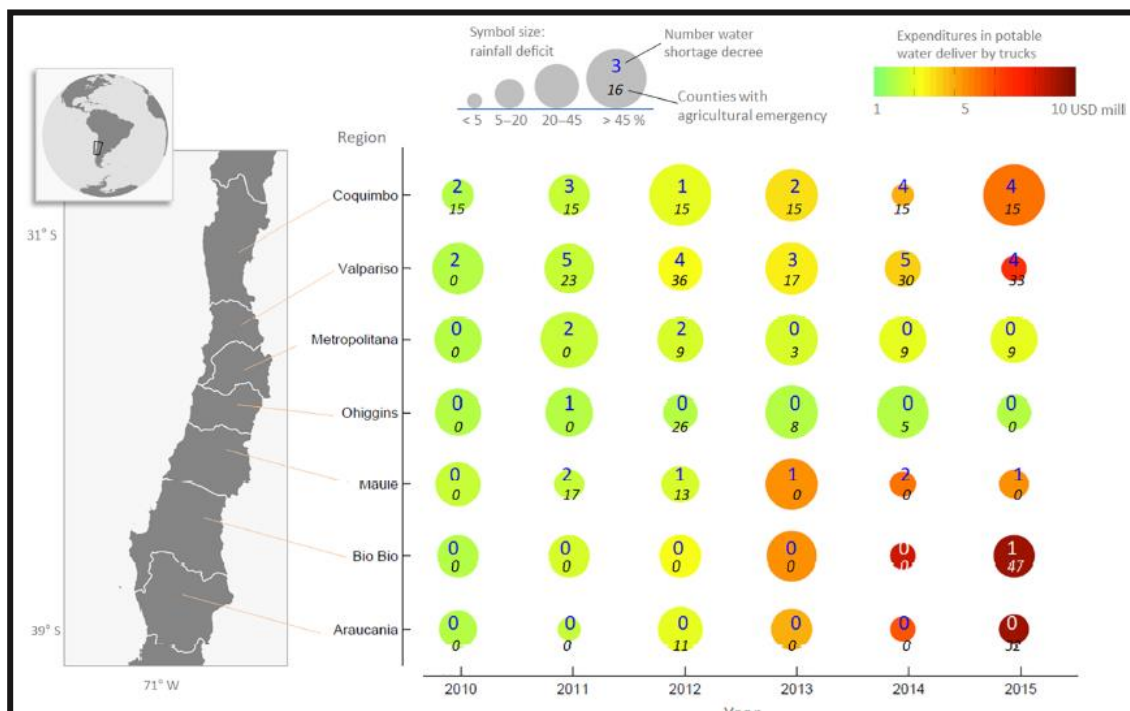


Figura 2.5. Escasez de recursos hídricos y precipitaciones, y gastos en camiones aljibe en las regiones de la zona central de Chile. (Garreaud y Boisier, 2017). Los números en los símbolos indican la magnitud de la escasez y la cantidad de comunas declaradas con emergencia agrícola. Los colores indican el gasto en camiones aljibes.

2.1.4. Agua potable rural (APR)

Este sistema inicialmente se desarrolló a través del Plan Básico de Saneamiento Rural por el Ministerio de Salud, el cual pretende mejorar las condiciones de salud y saneamiento de las poblaciones rurales del país. Posteriormente se desarrolló por el Ministerio de Obras Públicas, y considera a más de 1800 sistemas APR a lo largo del país, lo que alcanza aproximadamente a 1.700.000 habitantes (DOH, 2019).

Los APR son administrados, mantenidos y operados por una comunidad correspondiente, de los cuales los costos asociados son realizados por los vecinos que conforman la comunidad. La infraestructura de los APR, constan de obras de captación, conducción, tratamiento, almacenamiento y distribución de los recursos hídricos para la comunidad beneficiada. (DOH, 2007). Sin embargo, existen numerosos APR que no logran abastecer a toda la comunidad, producto de la disminución de caudales y defectos en la infraestructura, en donde actualmente existen viviendas sin acceso a agua potable.

3. ANTECEDENTES DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1. Ubicación y Acceso

El área de estudio abarca la localidad de Quintay y un radio aproximado de 2 km a su alrededor (Figura 1.1), área que pertenece administrativamente a la comuna de Casablanca, Región de Valparaíso. Quintay ($33^{\circ}11'S$, $71^{\circ}41' O$) se localiza aproximadamente 18 km al sur de la ciudad de Valparaíso (Figura 1.1). El acceso a la zona de estudio, desde la ciudad de Santiago, se realiza a través de la ruta CH-68 para llegar al peaje lateral Quintay y Tinquén, una vez ahí se debe continuar por la ruta F-800, la cual conduce directamente a la localidad de Quintay (Figura 3.1).

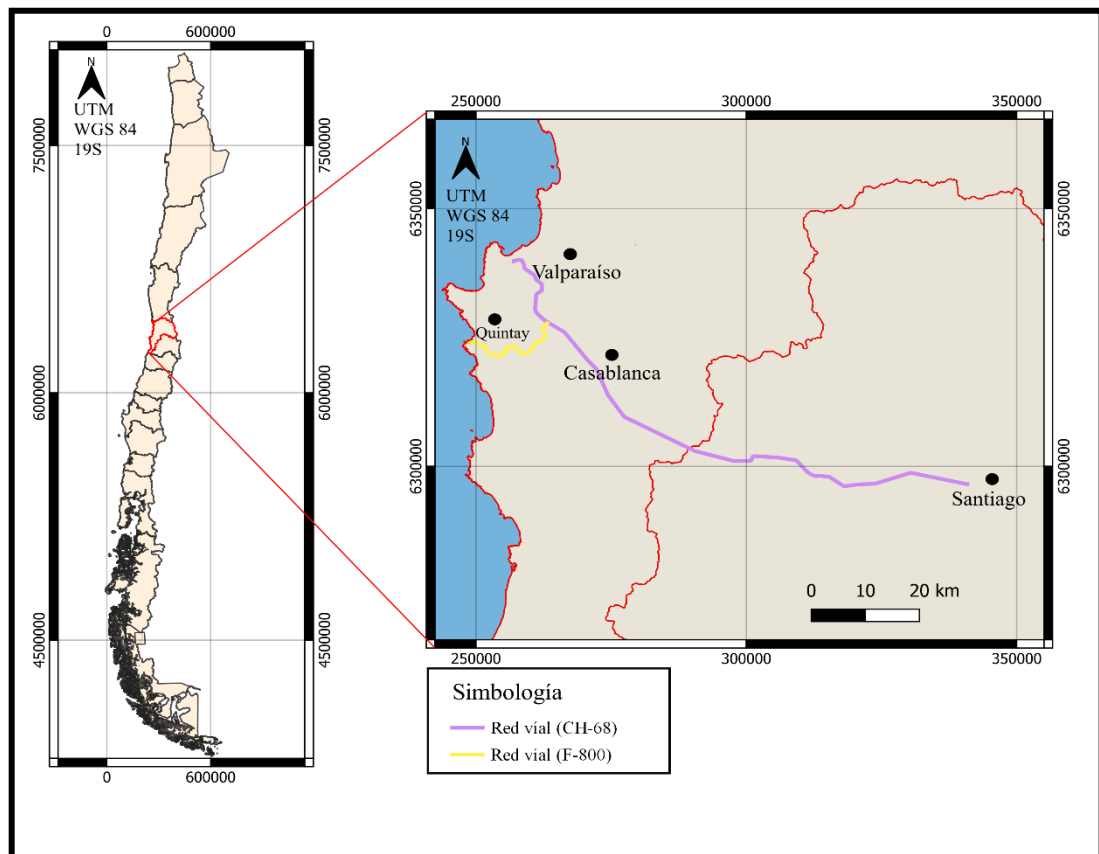


Figura 3.1. Ubicación y vías de acceso del área de estudio.

3.2. Geomorfología

La comuna de Casablanca comprende sectores tanto de la Cordillera de la Costa como de las planicies litorales, en donde se encuentra Quintay (Riffo y Castro, 2010). Quintay presenta cordones montañosos de orientación N-SE, con altura máxima de 455 msnm que corresponde al cerro Curauma (Figura 1.1) (Claramut y Naranjo, 2018). Hacia el sur existen unidades de planicies litorales y playas arenosas, las cuales aumentan de altura y pendiente hacia el norte en donde se emplaza el acantilado costero rocoso con pendientes abruptas. Esta zona costera posee superficies abrasivo-acumulativas, las cuales están dispuestas sobre rocas metamórficas de la Formación Quintay y graníticas del batolito costero (MINVU, 2017).

En la Playa Grande se observa una unidad dunaria (Figura 1,1), la cual es un obstáculo para la salida al mar del estero El Jote. En este sector se desarrolla un humedal con alto valor ecosistémico, y corresponde a la zona de transición de dos ecosistemas diferentes en donde se encuentran las aguas continentales y las del océano (MINVU, 2017).

3.3. Hidrografía

La comuna de Casablanca posee una superficie total de 953 km², en donde se encuentra el 42,9% del total de humedales de la Provincia de Valparaíso, cuenta con una superficie de 1.8 hectáreas en ríos principales y de 8.06 hectáreas en ríos secundarios. El estero El Jote está ubicado en la subcuenca de Curauma, formado por las unidades geográficas del Cerro Curauma y el Valle de Casablanca (I. Municipalidad de Casablanca, 2022). El estero El Jote es el principal curso de agua de Quintay, el cual es un cuerpo de agua que incluye un humedal o estuario que desemboca en el océano Pacífico. La tabla 3.1 indica los valores del área aportante de la cuenca y el relleno del acuífero de la comuna.

Tabla 3.1. Área y precipitaciones de Quintay y Estero Casablanca. Modificado de DGA (2005).

Sector Hidrogeológico	Área aportante de la cuenca (km²)	Área relleno acuífero (km²)	Precipitación media anual (mm)	Recarga media anual ($\frac{l}{s}$)
Quintay	47,7	15.9	440	33

El acuífero subterráneo de la localidad de Quintay está condicionado por las precipitaciones, los esteros, los embalses y las infiltraciones del sistema de riego y quebradas laterales (I. Municipalidad de Casablanca, 2022). Las extracciones de agua son de carácter subterráneo y superficial. Generalmente, las cuencas de la comuna siguen líneas rectas o se encuentran limitadas por escarpes, por lo que están determinadas por un control estructural asociado a fallas o lineamientos, como lo es el estero El Jote (I. Municipalidad de Casablanca, 2022).

3.4. Clima

La Región de Valparaíso posee un clima templado mediterráneo (Figura 3.2), con algunas variaciones como lo es la semiaridez al norte del río Aconcagua, húmedo en la costa y frío en las partes altas de la Cordillera (DGA, 2015).

La localidad de Quintay presenta un clima templado mediterráneo, la cual es afectada por la influencia marítima, que presenta una marcada estacionalidad con otoños e inviernos fríos y lluviosos, y veranos secos y cálidos. Las temperaturas registran máximos en la estación seca o de verano, resultando dos períodos bien definidos: uno con superávit hídrico entre mayo y septiembre, y otro con déficit hídrico, entre octubre y abril. Las planicies litorales están influenciadas por la acción del océano Pacífico, lo que produce una estabilidad en la humedad relativa y una menor amplitud térmica (I. Municipalidad de Casablanca, 2022).

3.5. Precipitaciones

La cuenca de Casablanca presenta un régimen pluviométrico de tipo mediterráneo, la que posee lluvias invernales que son de tipo ciclónico, afectadas por la influencia del relieve que exagera sus valores a medida que se introducen en los valles hacia el interior del país.

La Cordillera de la Costa actúa como una barrera que provoca que las precipitaciones ocurran en sus faldeos occidentales (DGA, 2015). La distribución de las precipitaciones está fuertemente marcada por las épocas del año, ya que el 80% de estas ocurren desde mayo a agosto, y el 20% restante se distribuye en ocho meses (DGA, 2014b). Las precipitaciones medias anuales en la estación más cercana al área de estudio (Lago Peñuelas), ubicada aproximadamente a 10 km (Figura 3.2), muestran episodios extremadamente húmedos como lo fue en 1997, el cual coincide con un intenso fenómeno de El Niño (Figura 3.3) (DGA, 2015).

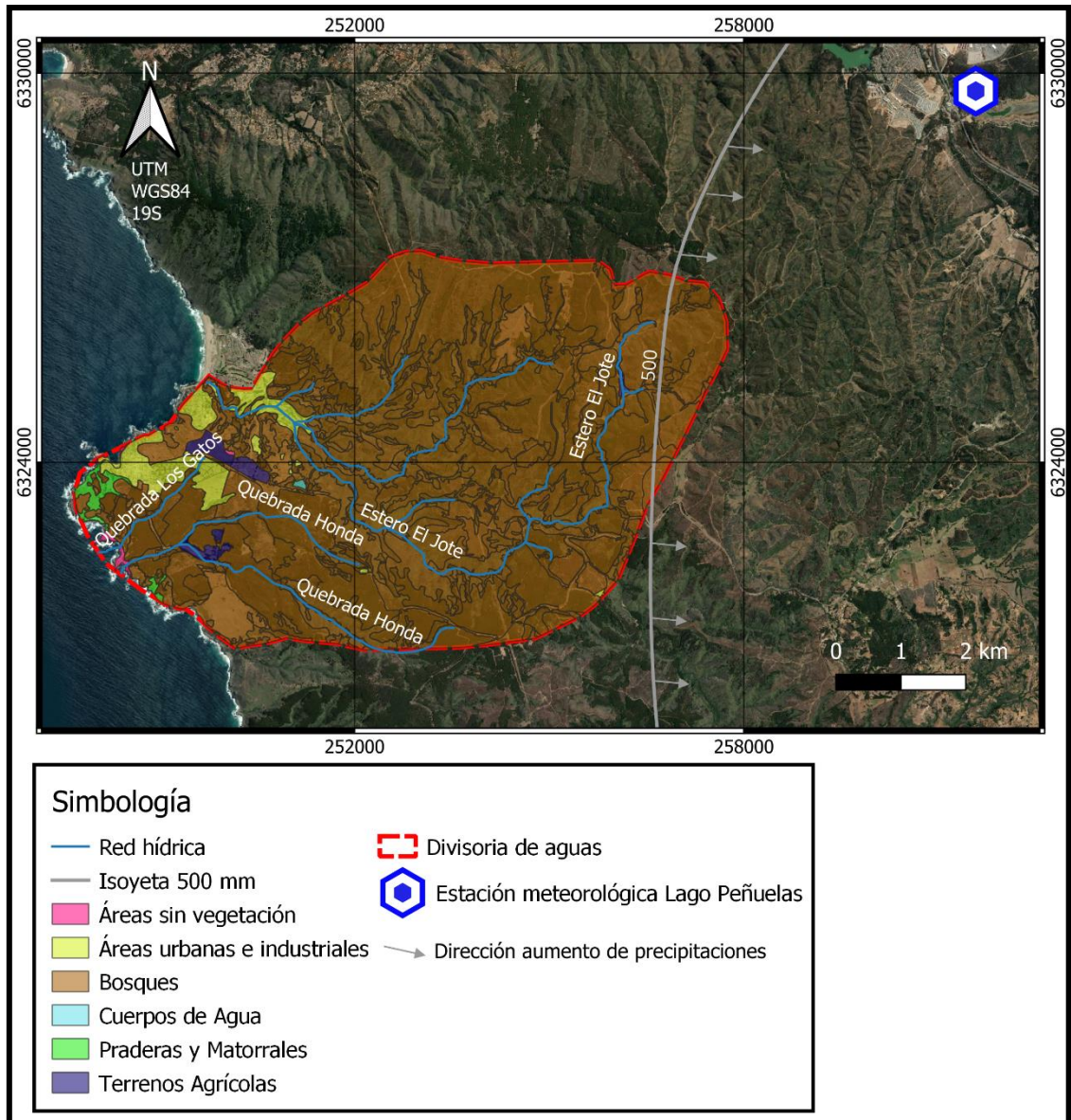


Figura 3.2. Hidrología del área de Quintay. Red hídrica tomada de (Ministerio de Bienes Nacionales, 2023). Isoyeta tomada de (MOP, 2019). Se incluye el uso de suelo (Ministerio de Agricultura, 2019).

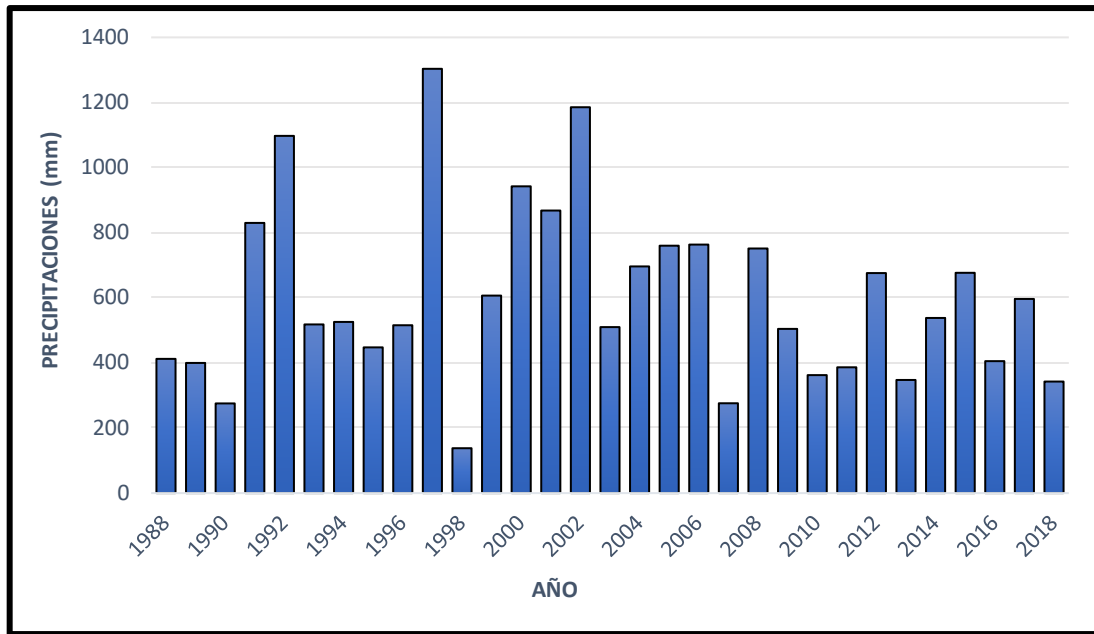


Figura 3.3. Representación gráfica de las precipitaciones medias anuales en la estación meteorológica Lago Peñuelas.

3.6. Extracción y consumo de recursos hídricos

En la localidad de Quintay existe un sistema de APR el cual posee 272 arranques (tramo de la red pública de distribución, que va desde la tubería de distribución, hasta la llave de paso) que abastecen a una población de aproximadamente 1400 personas, la cual en época estival se cuadruplica. El APR obtiene agua por medio de punteras, que consisten en tuberías de diámetros entre 30 y 50 mm. Estas punteras se conectan a un sistema de perforación en el cual se inyecta agua a alta presión. Esta agua es forzada hacia abajo por medio de la tubería y, posteriormente, retorna a la superficie a través de la parte exterior de la tubería y la pared del pozo. Actualmente, el servicio de APR no cubre el sector de Playa Grande, el cual cuenta con aproximadamente 90 lotes (porciones de terrenos en los cuales se puede edificar) en donde hay un 50% edificado, por lo que se debe considerar un actual déficit del servicio. La capacidad de producción de agua en Quintay corresponde a 6,7 l/s, en donde la demanda media máxima es de 7,5 l/s, esto se podría explicar por el aumento de la población de Quintay, que pasó de 286 arranques en el año 2010 a 377 en 2015 (MINVU, 2017). La capacidad de 6,7 l/s se ha visto afectada por la disminución en la producción de la napa alimentada por el estero El Jote, con un descenso de 7 m en el

nivel freático y requerimiento de operación de 24 horas/día para un caudal de aproximadamente 2 l/s desde las norias que operan con trasvasije y están conectadas en serie. Cabe mencionar que el agua extraída presenta alto contenido de hierro y turbiedad, la cual es tratada en la planta de filtro a presión, la cual exige un frecuente retro lavado, la consecuente pérdida de esa agua y el deterioro rápido de las bombas impulsoras. Se cuenta con dos estanques de almacenamiento de 50 y 100 m³, que abastecen a la extensa red de distribución de 17.050 m de trazado. Si se mantienen las tasas anuales de crecimiento de la población (10%) o de arranques (6%), se alcanzaría una población proyectada de 6031 habitantes en aproximadamente entre 13 a 22 años a partir del 2015, por lo que la demanda de agua llegaría a los 14 l/s (MINVU, 2017).

3.7. Geología del área de Quintay

La localidad de Quintay (33°11'S, 71°41' O), se encuentra dentro de la Cordillera de la Costa de la Región de Valparaíso, donde afloran rocas paleozoicas que están intruidas por complejos plutónicos del Carbonífero y Mesozoico (Deckart et al., 2014). En el sector costero de Quintay afloran gneisses de alto grado metamórfico del Paleozoico que muestran una compleja relación de contacto con granitoides del Paleozoico con abundantes enclaves máficos y migmatitas (Celis, 2018). Sobre las unidades anteriores se observan los depósitos marinos terciarios de la Formación Navidad, los cuales se extienden hacia el interior aproximadamente por 6 km (Gana et al., 1996). El Neógeno comprende terrazas de abrasión, y el Holoceno presenta depósitos eólicos y de playa y coluviales (Gana et al., 1996).

Las descripciones de las unidades geológicas fueron tomadas de Gana et al. (1996) y Gana y Tosdal (1996), las cuales se describen a continuación:

3.7.1. Rocas estratificadas

Formación Navidad (Mioceno- Plioceno, Tn en Figura 3.4) (Gana et al., 1996).

Secuencia sedimentaria marina fosilífera, medianamente consolidada, compuesta por limonitas, areniscas arcillosas, areniscas de grano muy fino a muy grueso, bancos de conglomerados, areniscas muy finas grises y bancos de coquinas y calizas. Posee un carácter litoral en la base, evidencia una tendencia transgresiva. Se dispone sobre granitoides paleozoicos y triásicos-jurásicos, Está cubierta por depósitos eólicos, aluviales y suelos cuaternarios. Presenta fuertes variaciones verticales y laterales de facies; disposición general subhorizontal y una potencia máxima de 500 m al sur del río Rapel.

3.7.2. Depósitos no consolidados

Terrazas de abrasión. (Plioceno (?)- Pleistoceno, QTt en Figura 3.4) (Gana et al., 1996).

Unidades morfológicas de origen marino, labradas sobre intrusivos paleozoicos y triásico-jurásicos, y unidades sedimentarias y volcánicas terciarias, preservadas en la zona costera, a cotas variables entre los 60 y 290 m.s.n.m. Se incluyen terrazas de abrasión sin cubierta sedimentaria, terrazas con una cubierta de arenas cuarzosas, posiblemente marinas, arenas negras con acumulaciones de minerales pesados, de origen litoral y terrazas con cubierta aluvial.

Depósitos coluviales. (Holoceno, Qc en Figura 3.4) (Gana et al., 1996).

Sedimentos no consolidados, ubicados en las cabeceras de las quebradas; se componen principalmente de depósitos gravitacionales correspondientes a flujos en masa, matriz-soportados, de muy mala selección, que incluyen desde bloques hasta arcillas, interdigitados con lentes de arenas y gravas producto de pequeños cursos de agua, permanentes o esporádicos.

Depósitos litorales y eólicos actuales. (Holoceno, Qe en Figura 3.4) (Gana et al., 1996).

Sedimentos no consolidados de playa, compuestos de arenas y gravas de clastos bien redondeados, con estratificación plana horizontal predominante y estratificaciones cruzadas de bajo ángulo; incluye láminas arenosas conformadas por concentración de minerales pesados; a: dunas activas compuestas por arenas amarillas de buena selección con estratificación cruzada y ondulitas superficiales. Existen morfologías de dunas transversales que indican dirección del viento predominante en sentido N-NE.

3.7.3. Rocas intrusivas

Unidad Mirasol. (Carbonífero Superior, pzmg en Figura 3.4) (Gana y Tosdal, 1996).

Rocas de grano grueso a medio, color gris medio verdoso, con inclusiones dioríticas a diorítica cuarcíferas, paralelas a la foliación magmática de la roca albergante. Textura alotriomórfica granular con variedades gnéicas y porfídicas; contienen feldespatos y piroxenos reemplazados por anfíbol y biotita. Poseen foliación magmática afectada por foliación tectónica no homogénea. Los monzogranitos, ocasionalmente, poseen mica blanca primaria y megacristales de microclina; los sienogranitos y granitos de microclina son rocas de color rosado y se asocian a pegmatitas de microclina-cuarzo-epidota-biotita. Forman un plutón compuesto, de 36 km de elongación noroeste y contienen enclaves de ortogneises (Quintay, Caleta Las Cruces).

Unidad Laguna Verde. (Jurásico Superior, Jlv en Figura 3.4) (Gana y Tosdal, 1996).

Rocas de color gris oscuro a medio, grano medio a fino, con foliación magmática y en parte dinámica (gnéica y milonítica). Texturas desde granoblástica a inequigranular seriada, formada principalmente por hornblenda y plagioclasa. Los gabros y dioritas se caracterizan por la presencia de clinopiroxeno con coronas de biotita. Estas rocas constituyen plutones compuestos, de tamaño inferior a 16 km de largo. Intruyen ortogneises y granitoides paleozoicos, originando zonas bandeadas y de enclaves máficos (Quintay).

Unidad Sauce. (Jurásico Medio, Js en Figura 3.4) (Gana y Tosdal, 1996).

Compuesto principalmente por dioritas cuarcíferas de piroxeno-hornblenda-biotita, con tonalitas de hornblenda-biotita y gabros subordinados, que en algunos afloramientos presentan bandas alternadas de 1-3 m de espesor. Rocas de color gris oscuro a medio, grano medio a fino, texturas inequigranulares seriada a intergranular, en parte foliada, de origen magmático y tectónico. Muestran plagioclasas zonadas tipo andesita-labradorita con bordes mirmequíticos y anfíbol en cristales subparalelos. Los gabros contienen núcleos de olivino rodeados por ortopiroxeno y clinopiroxeno, a su vez con coronas de anfíbol y biotita.

Unidad Peñuelas. (Jurásico Medio, Jp en Figura 3.4) (Gana y Tosdal, 1996).

Tonalitas de hornblenda-biotita y monzodiorias cuarcíferas, dioritas, gabros, granitos y granodioritas de hornblenda-biotita. Corresponden a rocas de color gris, grano muy variable (grosso a fino), que contienen abundantemente inclusiones básicas alargadas (1-10%) subparalelas, de 0,1-1 m de longitud. Se presenta gran variedad textural, localmente gnéssica. Contiene 60-65% de SiO₂; son rocas calcoalcalina, metaluminosas a moderadamente peraluminosas.

3.7.4. Rocas metamórficas

Complejo Metamórfico Valparaíso. (Paleozoico Superior, Pzmv en Figura 3.4) (Gana et al., 1996).

Rocas metamórficas foliadas, de protolito principalmente plutónico y sedimentario en menor proporción. Afloran como enclaves de longitud inferior a 2 km dentro de los complejos intrusivos de la zona costera intruidas por granitoides paleozoicos, con los que presenta en parte contacto gradual (Quintay), y gabros jurásicos al este de Valparaíso, incluye ortogneises graníticos y tonalíticos de biotitas y migmatitas, ocasionalmente porfiroblastos de microclina y granate; hornblenda, actinolita, augita y mica blanca;

intercalaciones de esquistos anfibólicos, cloríticos y sericíticos. Foliación principal noroeste-oeste con manteos hacia el sur.

3.7.5. Estructura

El marco geológico regional está dominado por fallas con rumbo NW, que limitan bloques que presentan movimientos de rumbo, rotación y alzamiento, y por fallas conjugadas de orientación NE (Ramirez, 2010), las cuales se encuentran fuera del área de estudio. Estos sistemas de fallas se activaron en el post-Plioceno con movimientos normales (Gana et al., 1996). Existen terrazas de abrasión bien marcadas, cuya altura varía entre los 100 y 500 m.s.n.m. que está controlada por el desplazamiento vertical en las fallas NW (Gana et al., 1996). En el área de estudio existe la presencia de dos fallas con orientación NW-SE, y la presencia de un escarpe indicando un área deprimida (Figura 3.4).

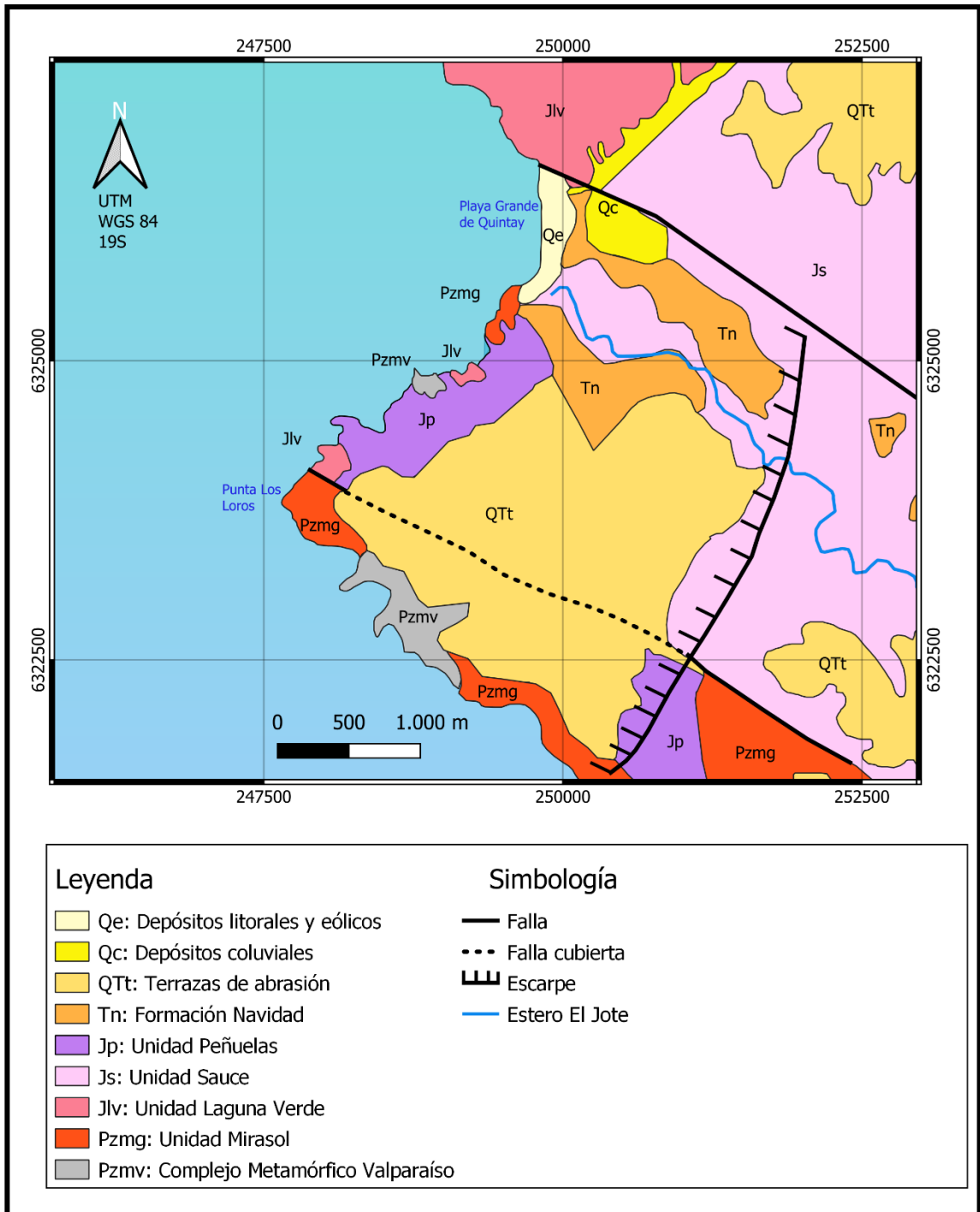


Figura 3.4. Mapa de unidades geológicas en la localidad de Quintay. Modificado de Gana et al., (1996), Gana y Tosdal, (1996), Ramírez, (2010) y Celis, (2018).

4. METODOLOGÍA

4.1. Caracterización hidrogeológica

La información que se utilizó para definir y caracterizar las unidades hidrogeológicas fueron los expedientes que la DGA obtuvo durante la construcción de obras de captación de aguas en las solicitudes de derechos facilitados por la DGA, Mapa Hidrogeológico de Chile (DGA, 1986) y el Informe de cuencas costeras de la Región de Valparaíso (DGA, 2005). Además, se consiguió realizar una columna estratigráfica en un sector del estero El Jote. Se lograron encontrar expedientes de 7 pozos (Tabla 4.1) con los que se obtuvo el nivel estático, pruebas de bombeo, caudal, profundidad de los pozos y estratigrafía.

Tabla 4.1. Información de los pozos presentes en el área de estudio para realizar la caracterización hidrogeológica.

N° Expediente	Pozo	Nombre Solicitante	Caudal anual promedio	Nivel estático (m)	Profundidad (m)		Coordenadas	
					Columna Estratigráfica	Pozo	Norte (m)	Este (m)
ND-0505-2634	A	ADMINISTRADORA SANTA AUGUSTA S.A.	1,8 (lt/s)	4,15	48	19	6325906	249925
ND-0505-2634	B	ADMINISTRADORA SANTA AUGUSTA S.A.	1,8 (lt/s)	2,28	17	17	6325609	249879
ND-0505-4758	C	CLODOMIRO VICENTE CAVIEDES MEDINA	22 (lt/min)	25	24	39	6324771	249612
ND-0505-3548	D	COMITE DE AGUA POTABLE RURAL DE QUINTAY	6 (lt/s)	2,62	9,5	11,5	6325350	250100
ND-0505-2635	E	INMOB. CLUB DE GOLF QUINTAY S.A.	1,8 (lt/s)	2,79	15	16	6324900	250603
ND-0505-2635	F	INMOB. CLUB DE GOLF QUINTAY S.A.	2,2 (lt/s)	2,68	17	18	6324878	250708
ND-0505-2635	G	INMOB. CLUB DE GOLF QUINTAY S.A.	2,5 (lt/s)	2,79	34	30	6324688	251046

Al obtener la información disponible de la zona, se procedió a digitalizar la información estratigráfica disponible con el propósito realizar una reconstrucción de la geología de subsuperficie a partir del catastro de pozos construidos en Quintay. Se realizaron 8 perfiles estratigráficos a partir de la información recopilada, utilizando el software SedLog 3.1,

los cuales fueron utilizados para definir y caracterizar las unidades hidrogeológicas correspondientes según su caracterización textural.

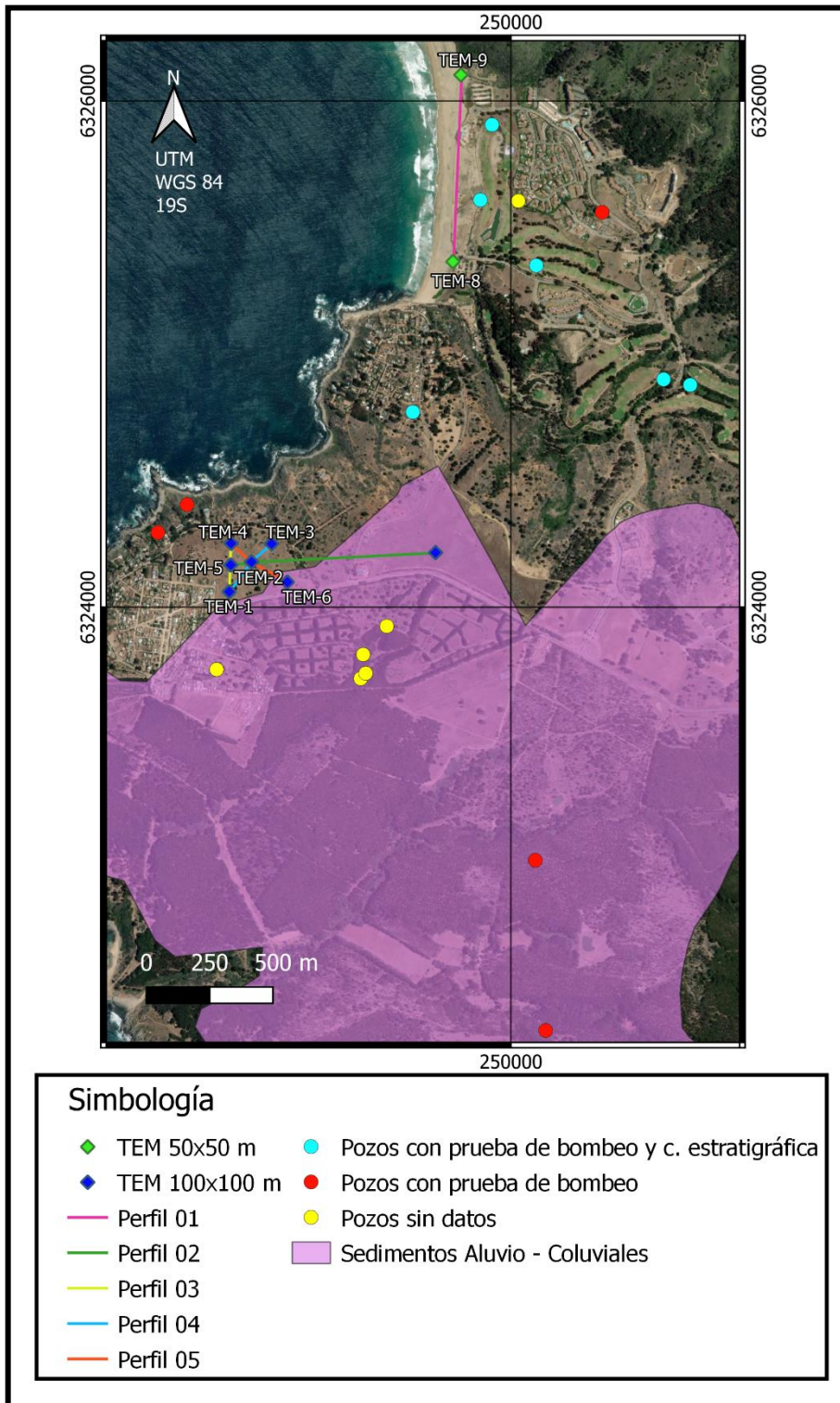


Figura 4.1. Distribución de los pozos presentes en Quintay, zonas de los sondeos TEM y unidad hidrogeológica predominante. (DGA, 1996; 2005).

4.2. Método Transiente Electromagnético

El método de Transiente Electromagnético (TEM) es un método geofísico que permite estimar la distribución de valores de resistividad eléctrica en el subsuelo, a partir de la medición del decaimiento con el tiempo de campos magnéticos inducidos. En el TEM se aplica una corriente eléctrica mediante una bobina transmisora, la que genera un campo electromagnético primario, que a su vez genera corrientes eléctricas en el subsuelo. Las corrientes eléctricas inducen un campo magnético secundario, el que es medido por la bobina receptora (Kirsch, 2006).

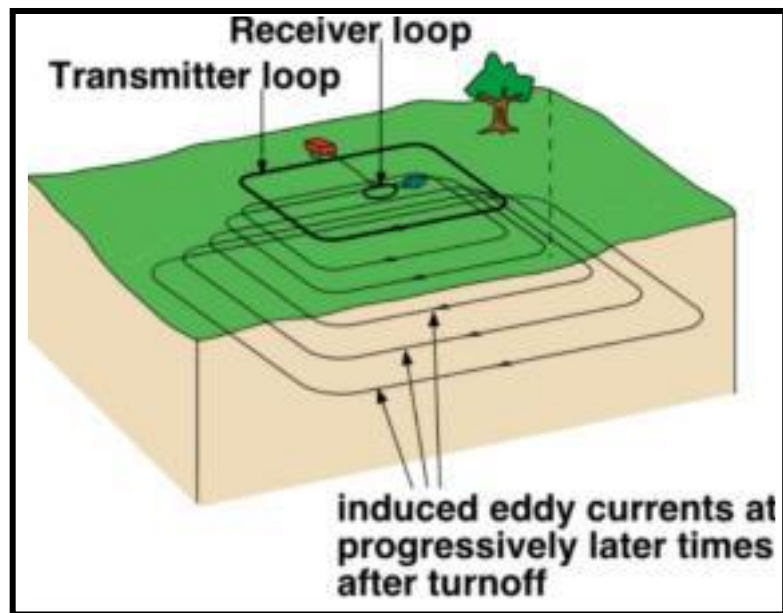


Figura 4.2. Esquema indicando la distribución de corrientes eléctricas en el subsuelo durante el levantamiento TEM (Subterránea, 2023).

El método TEM sirve para estimar la resistividad de un volumen de subsuelo que esta compuesto por rocas, fluidos, materia orgánica, etc. La resistividad del subsuelo, dependerá de los tipos de minerales y porosidad de los sedimentos que componen el subsuelo (Tabla 4.2), como también dependerá de la salinidad, cantidad y grado de interconexión de los fluidos intersticiales que presente.

Tabla 4.2. Resistividad de aguas, sedimentos y rocas. Modificado de ASTM D6431, (1999).

Material	Resistividad ($\Omega \cdot m$)
Rocas ígneas y metamórficas	
Granito	$5 \times 10^3 - 10^6$
Basalto	$10^3 - 10^6$
Esquistos	$20 - 2 \times 10^6$
Pizarra	$6 \times 10^3 - 4 \times 10^6$
Mármol	$10^2 - 2,5 \times 10^8$
Cuarcita	$10^2 - 2 \times 10^8$
Rocas sedimentarias	
Arenisca	$8-4 \times 10^3$
Limolita	$50-4 \times 10^2$
Suelos y aguas	
Arcilla	1-100
Aluvión	10-800
Agua fresca	10 - 100
Agua de mar	0,2

Las mediciones TEM en el área de estudio fueron ejecutadas por Subterránea Consultores a solicitud de Universidad Técnica Federico Santa María, durante los días 7 y 8 de junio del año 2023. Las mediciones se realizaron con un equipo TEM – FAST 48 HPC y loops de 100 y 200 m de largo (Figura 4.3). Los datos obtenidos fueron procesados y modelados utilizando inversión 1-D y el software TEM RESEARCHER. A partir de estos modelos se obtuvieron perfiles con la distribución espacial de la resistividad eléctrica del subsuelo.



Figura 4.3. Materiales utilizados para la realizar las mediciones geofísicas.

5. RESULTADOS

5.1. Hidrogeología

Los datos hidrogeológicos del área de estudio se obtuvieron a través de los expedientes que se realizaron durante la construcción de obras de captación de aguas en las solicitudes de derechos de la DGA, en donde se encontraron 7 expedientes con información para definir y caracterizar las unidades hidrogeológicas del área de Quintay. Además, de sondeos TEM y secciones estratigráficas (Figura 5.1).

5.1.1. Unidades hidrogeológicas

Las unidades hidrogeológicas se clasifican según la capacidad para almacenar y transmitir agua, en condiciones de saturación parcial o total y/o en condiciones no saturadas.

Mediante el análisis de los expedientes existentes, se confeccionaron 7 columnas estratigráficas las cuales presentan información de la descripción litológica y su espesor correspondiente (Anexo 1), para definir sus características texturales con el propósito de determinar las unidades hidrogeológicas, la cual entrega información sobre el comportamiento y potencial hidrogeológico.

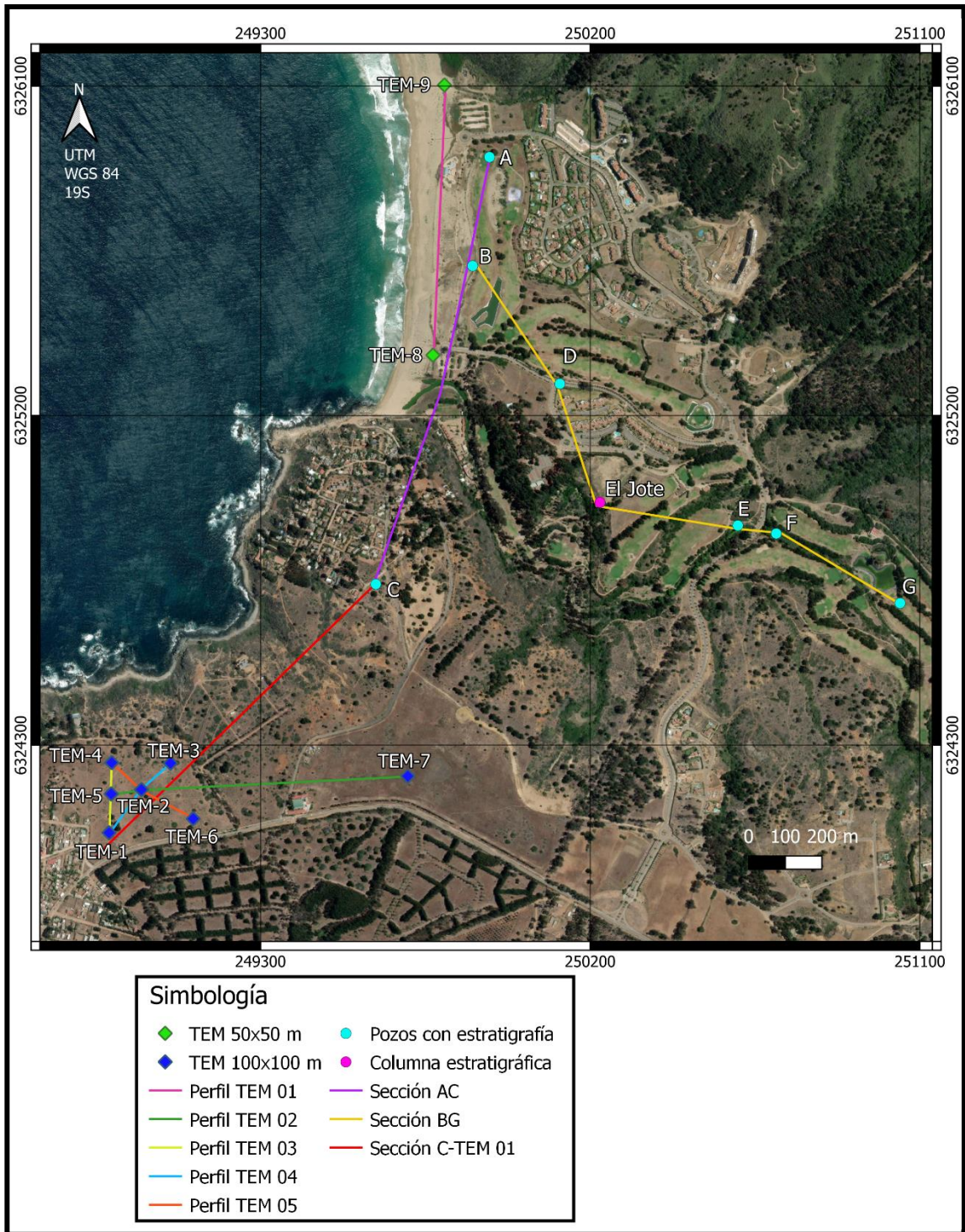


Figura 5.1. Mapa con la ubicación de los pozos con estratigrafía, zonas de sondeos TEM y trazo de tres secciones.

En Quintay, se distinguen tres tipos de unidades hidrogeológicas: depósitos litorales y eólicos actuales, depósitos coluviales y aluviales y por último rocas metamórficas pertenecientes al Complejo Metamórfico Valparaíso, como también rocas intrusivas.

Para describir las unidades hidrogeológicas se utilizó la metodología de Struckmeier y Margat (1995), según su permeabilidad que puede ser granular, o fisurada (Figura 5.2), además, asigna una importancia hidrogeológica según su potencial para almacenar y transmitir agua.

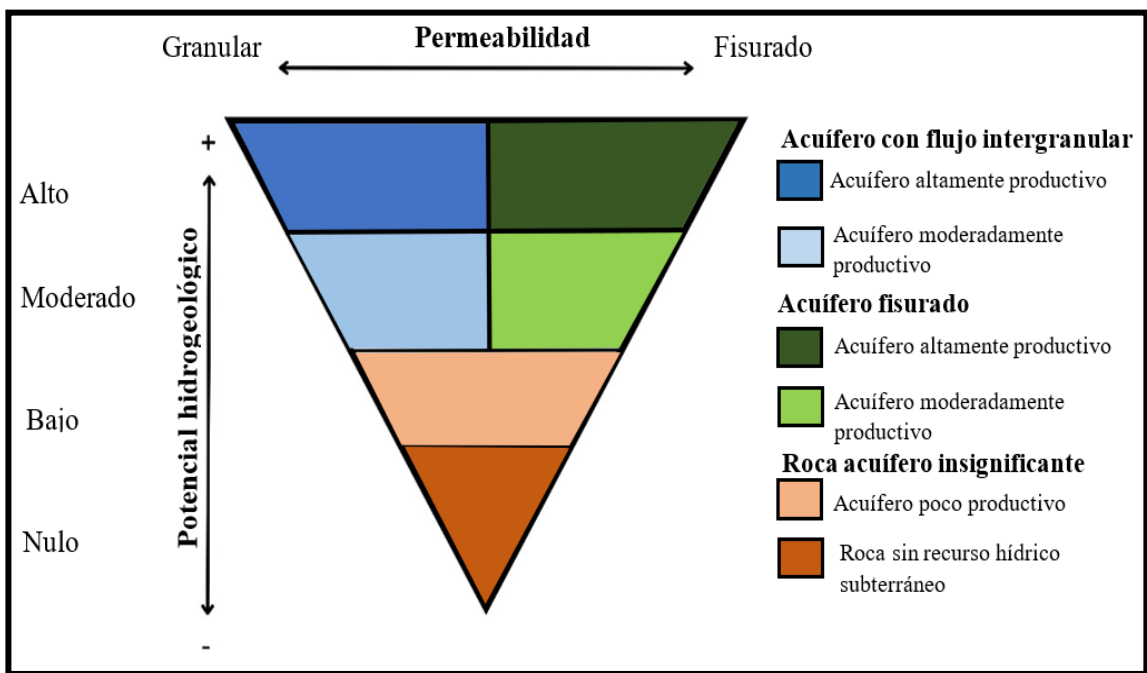


Figura 5.2. Clasificación de unidades hidrogeológicas. Modificado de Struckmeier y Margat (1995).

A continuación, se describen y definen cada una de estas unidades, de acuerdo a su importancia hidrogeológica:

1. Acuíferos de alta importancia hidrogeológica en depósitos no consolidados

Esta unidad hidrogeológica (UHG-1) está compuesta por depósitos litorales y eólicos actuales (Qe, Gana et al., 1996), los cuales están presentes principalmente en la zona norte de Quintay. Estos depósitos sedimentarios no consolidados corresponden a intercalaciones de capas de arenas gruesas a medias con capas de gravas y ripios. Esta unidad representa un alto potencial hidrogeológico debido a su alta porosidad y permeabilidad, permiten una buena recarga, transmisividad y almacenamiento de volúmenes significativos de agua subterránea.

2. Acuíferos de media a baja importancia hidrogeológica en depósitos no consolidados

Esta unidad hidrogeológica (UHG-2) está compuesta por depósitos coluviales y aluviales (Qa y Qc respectivamente, Gana et al., 1996), los cuales están presentes en gran parte de Quintay. Estos depósitos sedimentarios no consolidados corresponden a secuencias de mala selección que van desde bloques a arcillas intercalados con arenas y gravas. En esta unidad la permeabilidad y porosidad son medias a bajas, esta capa corresponde a la zona no saturada en donde el agua drena bajo el efecto de la gravedad, lo que limita la capacidad de recarga, almacenamiento y transmisión de agua subterránea.

3. Acuíferos de nula importancia hidrogeológica en rocas

Esta unidad hidrogeológica (UHG-3) está compuesta por rocas metamórficas: Complejo Metamórfico Valparaíso y Anfibolitas y ortoanfibolitas de Quintay, así como rocas intrusivas; Plutón Complejo de composición básica a intermedia (Js), tonalitas, granodioritas y monzogranitos de Isla Negra (Pzmg), los cuales están presentes en el basamento rocoso de Quintay. Estas secuencias rocosas son impermeables y poco porosas, por lo que poseen escasa a nula capacidad para almacenar y transmitir agua. Sin embargo, no hay que descartar la presencia de agua en zonas con alto grado de fracturamiento en las rocas mencionadas anteriormente.

La Tabla 5.1 muestra las unidades hidrogeológicas categorizadas según Struckmeier y Margat (1995).

Tabla 5.1. Clasificación de unidades hidrogeológicas. Modificado de Struckmeier y Margat, (1995).

Unidad hidrogeológica	Clasificación	Descripción	Potencial hidrogeológico
UHG-1	Color azul	Acuífero altamente productivo	Alto
UHG-2	Color celeste	Acuífero moderadamente productivo	Moderado
UHG-3	Color naranja	Roca sin recurso hídrico subterráneo	Nulo

5.1.2. Secciones estratigráficas

Se realizaron tres secciones estratigráficas longitudinales, con la información estratigráfica de 7 pozos, 1 columna estratigráfica y perfiles geoeléctricos para observar interpretar la distribución en profundidad y variaciones en el subsuelo de la cuenca.

La Figura 5.3 muestra la sección A-C construida con 3 columnas estratigráficas. Éstas se componen principalmente en su parte superior de un relleno sedimentario compuesto de bloques, arenas medias, limo y arcilla, estos estratos varían entre 10 a 40 metros de espesor, que poseen una porosidad y permeabilidad moderada y corresponde a la UHG-2. En su parte inferior, existe relleno sedimentario que se compone principalmente de arenas gruesas a medias, gravas y gravilla, estos estratos varían entre 5 a 10 metros de espesor, que poseen una porosidad y permeabilidad alta y corresponde a la UHG-1. La interpretación de las unidades hidrogeológicas, se sustenta además con el perfil geoeléctrico 1 (Figura 5.4), ya que la capa de baja resistividad ($< 10 \text{ Ohm} \cdot \text{m}$) interpretada en los sondeos TEM-8 y TEM-9 (UB, capa naranja en Figura 5.4) coinciden principalmente con niveles de gravas, arenas medias a finas, limos y arcillas descritos en los pozos “A” y “B”.

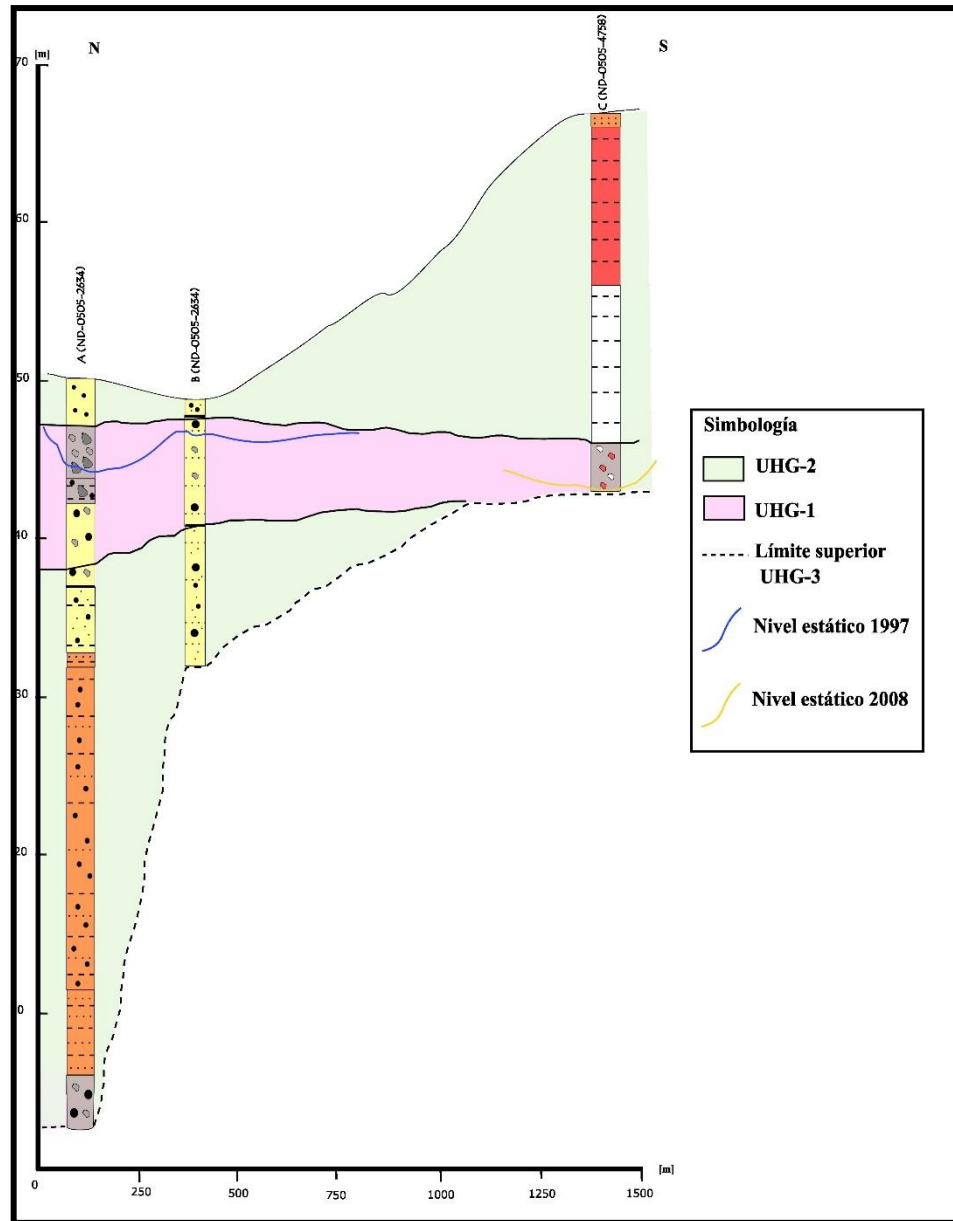


Figura 5.3. Sección estratigráfica A-D, con orientación N-S.

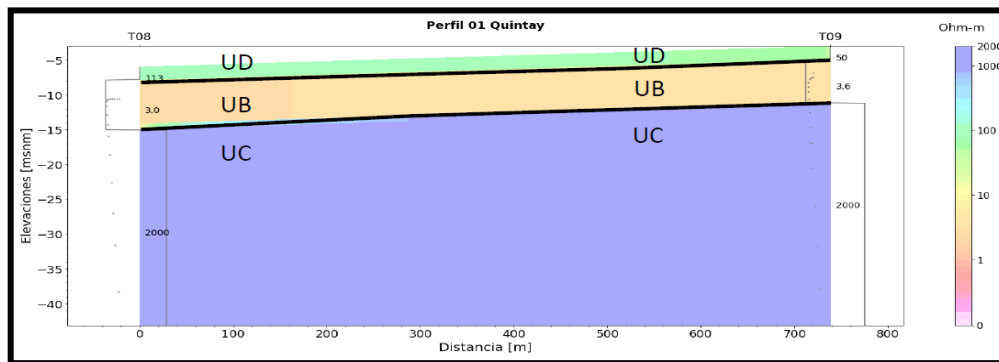


Figura 5.4. Perfil geoelectrico 1 (Subterránea, 2023).

La Figura 5.5 muestra la sección D-G construida con 4 columnas estratigráficas. Éstas se componen principalmente en su parte superior de un relleno sedimentario compuesto de bloques, gravas, arenas finas a medias, limo y arcilla. Estos estratos varían entre 5 a 20 metros de espesor, poseen una porosidad y permeabilidad moderada y corresponde a la UHG-2. En su parte inferior, existe relleno sedimentario que se compone principalmente de gravas, arenas finas, medias y gruesas. Estos estratos varían entre 5 a 15 metros de espesor, poseen una porosidad y permeabilidad alta y corresponde a la UHG-1.

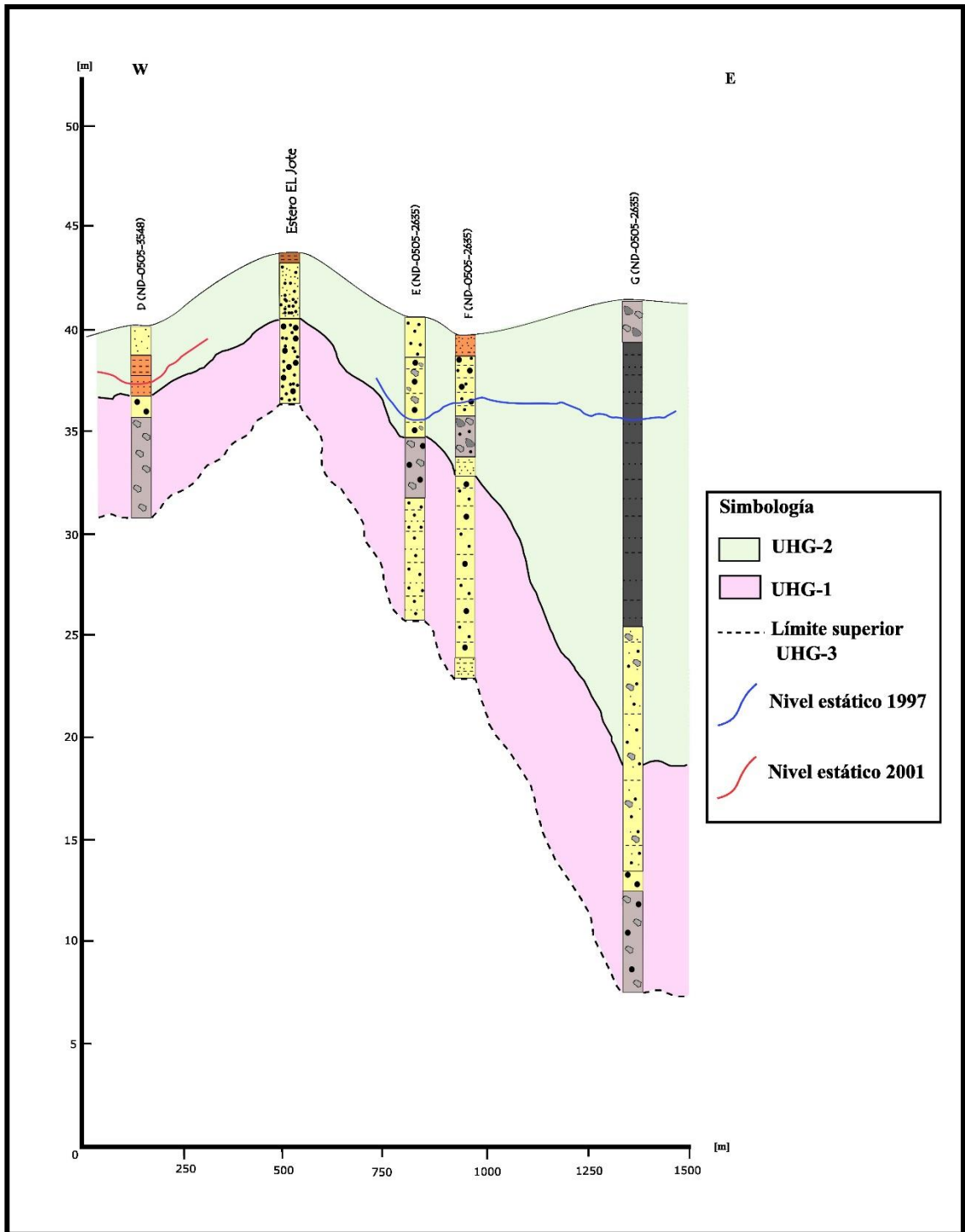


Figura 5.5. Sección estratigráfica D-G, con orientación W-E.

La Figura 5.6 muestra la sección C-TEM 01 la cual presenta el pozo “C” con su información estratigráfica y los TEM 01, 02 y 03. El pozo “C” presenta principalmente limo y arcilla que corresponde a la UHG-2. El perfil que abarca los TEM 01, 02 y 03 (Anexo 2, Figura A.2.4), presenta en su parte superior (UA) resistividades entre 13 a 58 Ohm · m lo que se interpreta como sedimentos superficiales con bajo a nulo contenido de humedad. En su parte inferior (UC) presenta resistividades altas de 2000 Ohm · m, la cual se interpreta como basamento rocoso perteneciente al área de estudio y corresponde a UHG-3.

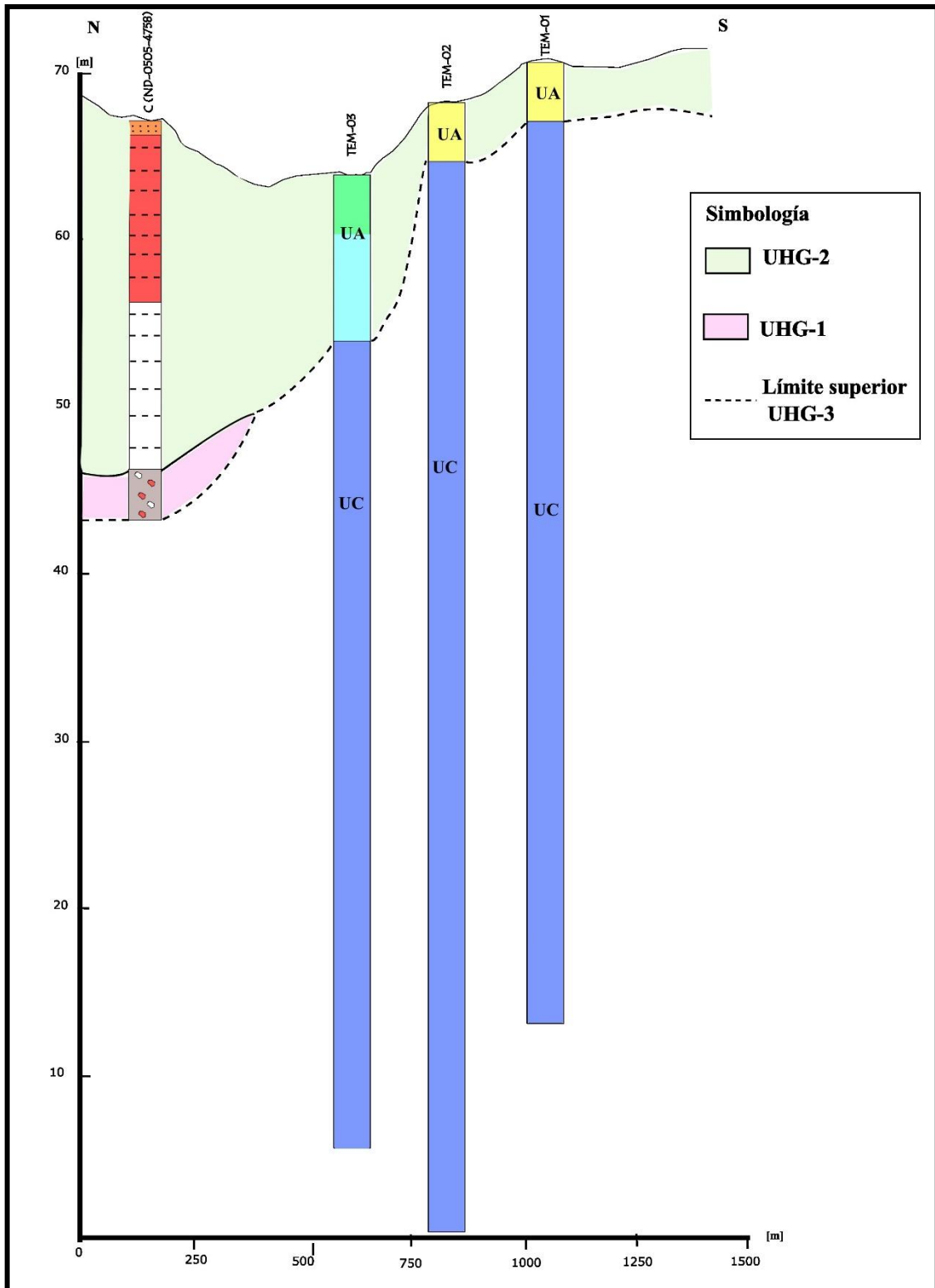


Figura 5.6. Sección estratigráfica C-TEM01, con orientación N-S.

Una vez definidas las unidades hidrogeológicas, se generó un mapa con la distribución espacial de éstas en el área de estudio (Figura 5.7).

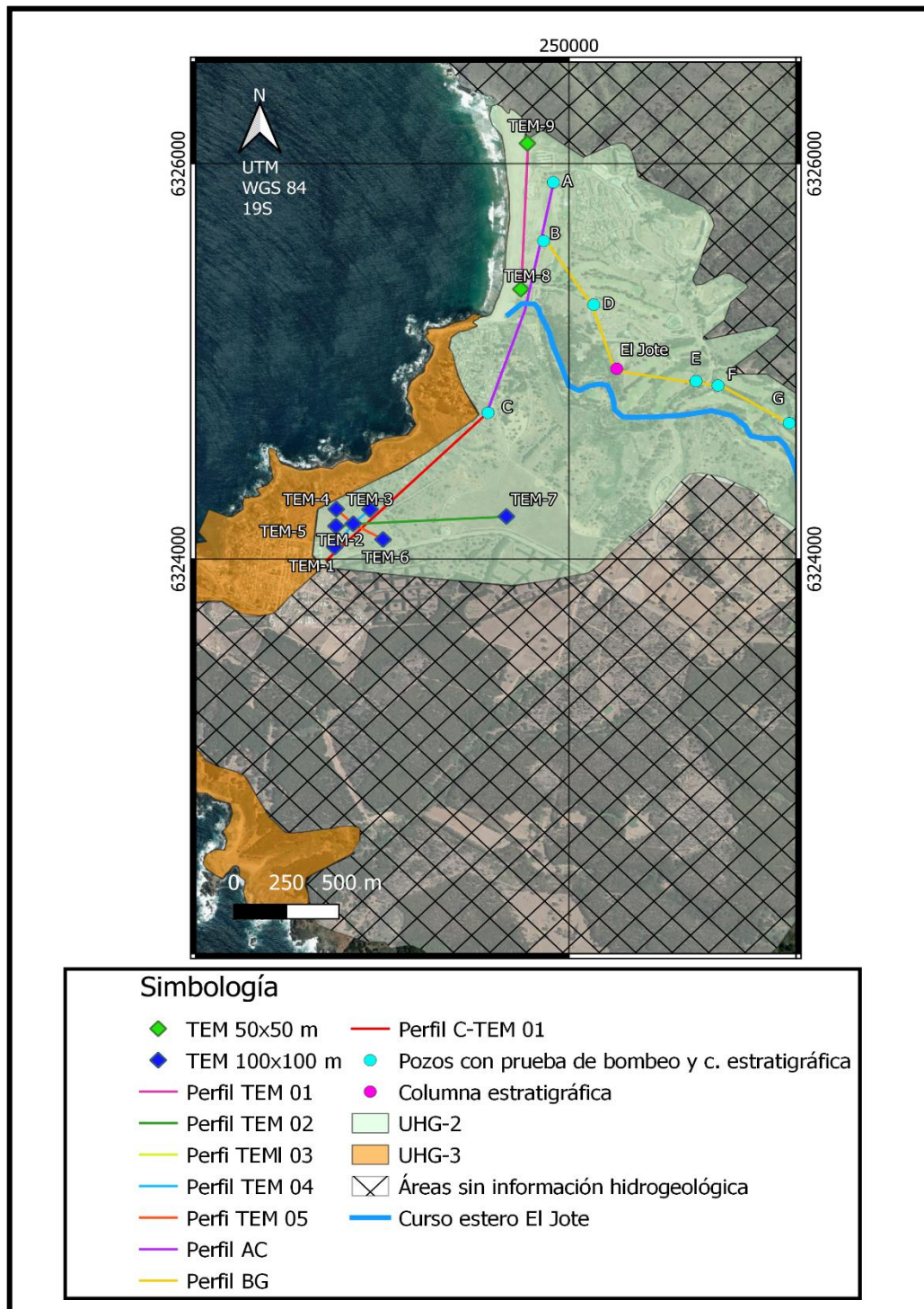


Figura 5.7. Mapa con la distribución en superficie de las unidades hidrogeológicas interpretadas en Quintay.

5.2. Distribución y volumen de recursos subterráneos

A partir de la información estratigráfica de los pozos (Tabla 4.1) y el estudio geofísico TEM (Anexo 2), se estimó el espesor máximo que posee el acuífero del área de estudio, que corresponde a 5 m (Figura 5.8).

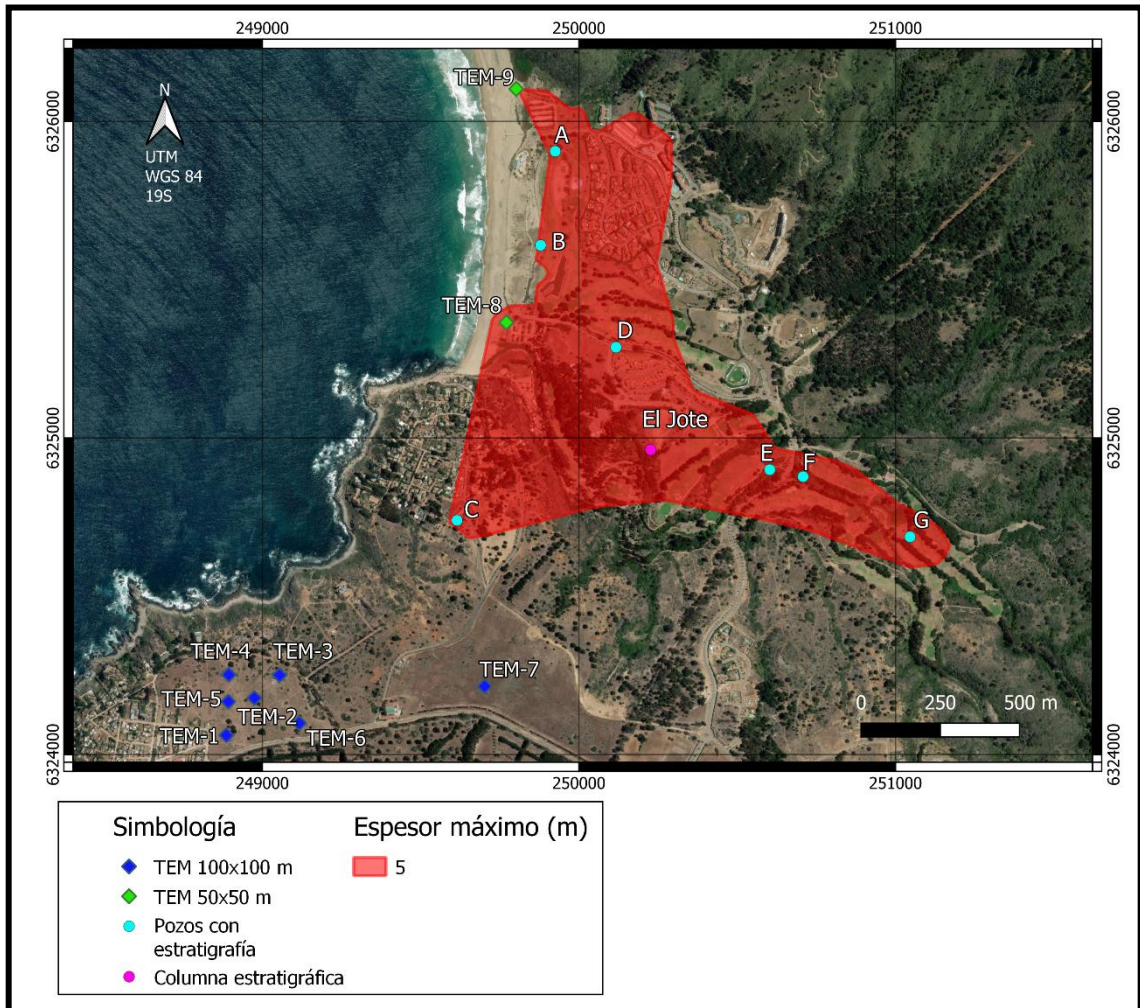


Figura 5.8. Mapa del espesor del acuífero correspondiente a la UHG-1.

Basándose en la información de la distribución de los recursos subterráneos, se estima que el acuífero tiene un área aproximada de 945.000 m², y la unidad hidrogeológica con mayor potencial (UHG-1) tiene un espesor promedio de 5 m, por lo que el volumen de agua almacenado sería aproximadamente de 4.725.000 m³.

5.3. Balance hídrico

El balance hídrico se realizó utilizando el último registro disponible de la DGA de las precipitaciones y temperaturas medias mensuales, correspondientes al año 2018 de la estación meteorológica Lago Peñuelas y la demanda de agua que existe en la zona determinada por el MINVU en el año 2017.

5.3.1. Entradas y salidas hídricas

La principal fuente de recarga natural en el área de estudio, son las precipitaciones que se concentran principalmente en los meses de invierno. En Quintay, caen un total de 342,70 mm de precipitaciones anuales, con una temperatura media anual de 13,08 °C (Tabla 5.2).

Tabla 5.2. Temperaturas medias y precipitaciones estación meteorológica Lago Peñuelas correspondiente al año 2018.

Mes	Precipitaciones (mm)	Temperatura media (°C)
Enero	0,3	16,63
Febrero	0	16,99
Marzo	0,4	14,87
Abril	0	12,94
Mayo	42,5	10,55
Junio	119	8,22
Julio	138,5	8,99
Agosto	16,5	10,54
Septiembre	18	12,53
Octubre	7,5	12,93
Noviembre	0	15,67
Diciembre	0	16,05

Para las salidas hídricas, se estimó la demanda asociada que existe en la zona que corresponde a un 7,5 l/s, en donde las proyecciones indican que existirá un aumento en la población en aproximadamente entre 13 a 22 años, lo que aumentará la demanda a 14 l/s (MINVU, 2017). Las pérdidas de volumen ocurren por medio de la evapotranspiración, la cual se calcula por medio del método de Thornthwaite, mediante la siguiente ecuación:

$$e = 16\left(10\frac{t}{I}\right)^a$$

Donde:

- e: evapotranspiración mensual en mm
- t: temperatura media mensual en °C
- I: índice térmico anual
- a: exponente que varía con el índice anual de valor de la localidad

Hay que considerar un factor de corrección para determinar las horas de sol de la estación meteorológica Lago Peñuelas ubicada en la latitud de 33°S. Ahora se calcula la evapotranspiración de referencia mensual corregida en mm, mediante la siguiente fórmula:

$$ET0 = f \cdot e$$

Donde:

- ET0: evapotranspiración corregida en mm
- f: factor de corrección
- e: evapotranspiración mensual sin corregir en mm

El valor de la evapotranspiración sin corregir según el método de Thornthwaite, indica el valor térmico anual (I) de 51,9941 y el valor del exponente (a) de 1,31059. Con estos valores se obtiene la evapotranspiración corregida, multiplicando “e” con el factor de corrección (Anexo 3) (Tabla 5.3)

Tabla 5.3. Datos de evapotranspiración.

Meses	Temperaturas (°C)	e (mm)	f	ET0 (mm)
Enero	16,63	73,43	1,2	88,116
Febrero	16,99	75,52	1,03	77,7856
Marzo	14,87	63,41	1,06	67,2146
Abril	12,94	52,85	0,95	50,2075
Mayo	10,55	40,44	0,92	37,2048
Junio	8,22	29,16	0,85	24,786
Julio	8,99	32,79	0,9	29,511
Agosto	10,54	40,39	0,96	38,7744
Septiembre	12,53	50,67	1	50,67
Octubre	12,93	52,8	1,12	59,136
Noviembre	15,67	67,92	1,14	77,4288
Diciembre	16,05	70,09	1,21	84,8089

5.3.2. Estimación del balance hídrico

El cálculo del balance hídrico se basa en la diferencia entre las precipitaciones mensuales y la evapotranspiración corregida. Cuando existen valores negativos en el contexto del balance hídrico (Tabla 5.4), se refiere a que hay una pérdida de agua durante los meses especificados, en donde la evapotranspiración supera a las precipitaciones. Sin embargo, esta tendencia cambia en los meses de mayo, junio y julio, en donde las precipitaciones superan la evapotranspiración, y el área de estudio experimenta una acumulación de recursos hídricos durante ese periodo.

Tabla 5.4. Valores de estimación del balance hídrico.

Meses	Precipitaciones (mm)	ET0 (mm)	P - ET0
Enero	0,3	88,116	-87,816
Febrero	0	77,7856	-77,7856
Marzo	0,4	67,2146	-66,8146
Abril	0	50,2075	-50,2075
Mayo	42,5	37,2048	5,2952
Junio	119	24,786	94,214
Julio	138,5	29,511	108,989
Agosto	16,5	38,7744	-22,2744
Septiembre	18	50,67	-32,67
Octubre	7,5	59,136	-51,636
Noviembre	0	77,4288	-77,4288
Diciembre	0	84,8089	-84,8089

Balance hídrico Año 2018	342,7	685,6436	-342,9436
--------------------------	-------	----------	-----------

Considerando que desde el año 2015 la demanda hídrica de Quintay es de 0,014 m³/s para una operación de 24 horas al día, la demanda diaria es de 1209,4 m³ y anualmente 441.504 m³. Teniendo en cuenta que las descargas del acuífero son mayores que las recargas, y las tasas de extracciones actuales, se estima que el volumen de agua almacenado tendría una duración de 10 años aproximadamente.

5.3.3. Modelo hidrogeológico

Después de identificar las entradas y salidas hídricas, se realizó un modelo hidrogeológico conceptual (Figura 5.9) que se compone de 3 unidades hidrogeológicas. Este modelo se realizó con el objetivo de comprender la distribución y comportamiento de agua subterránea, identificando las características de cada una de las unidades hidrogeológicas.

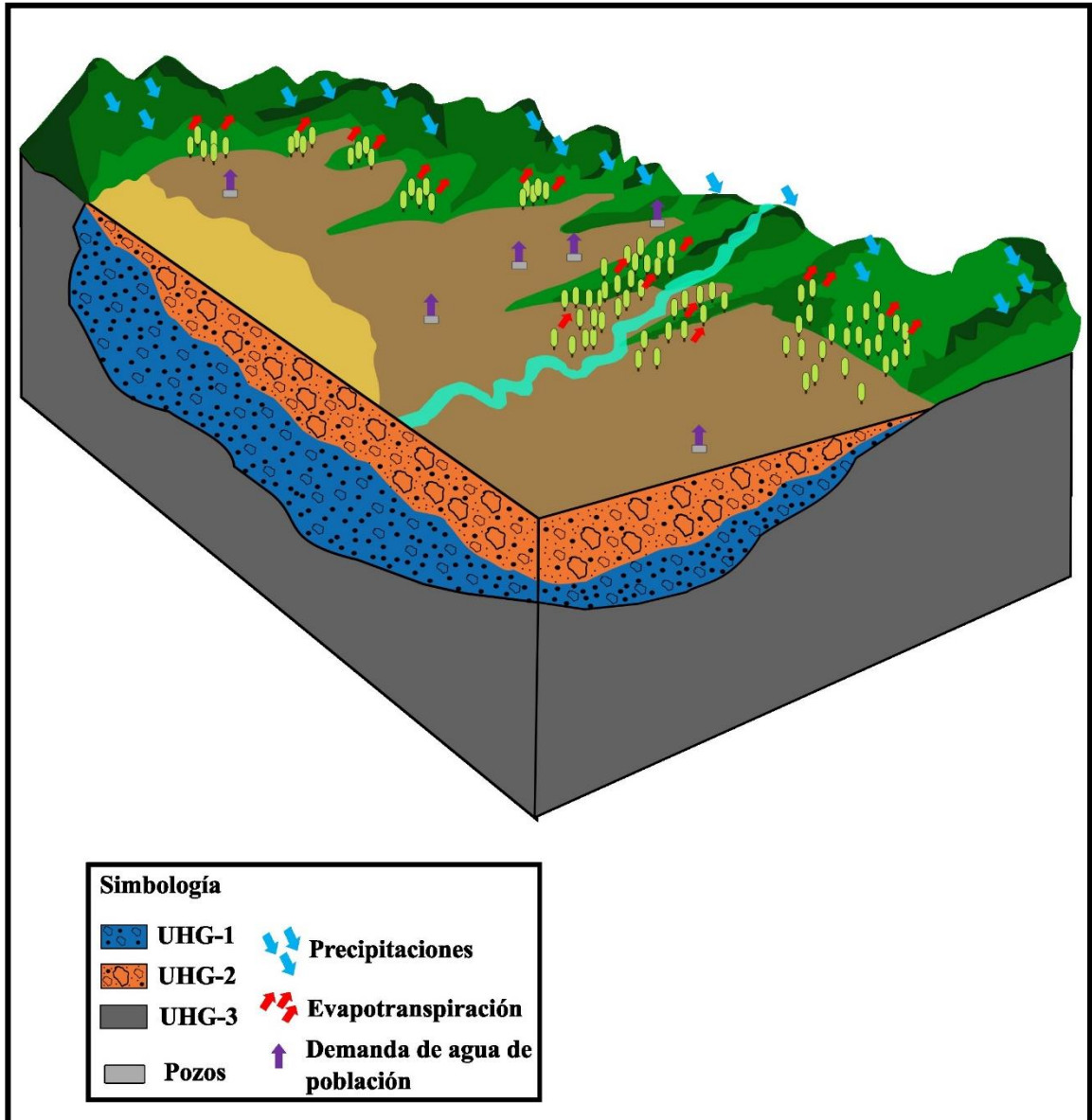


Figura 5.9. Modelo conceptual hidrogeológico.

6. DISCUSIÓN

La estratigrafía se estableció en base a los expedientes de la construcción de obras de captación de aguas de la DGA. Estos registros presentan detalles sobre el ubicación, profundidad, nombre y tamaño de los sedimentos encontrados al realizar los pozos, y esta información se utilizó para la construcción de columnas y secciones estratigráficas, las cuales son fundamentales para realizar la caracterización de las unidades hidrogeológicas presentes en el área de estudio. Cabe mencionar, que de los 23 pozos en Quintay, solo se dispone de información completa de 7 de ellos. Sin embargo, estos carecen de información como la composición, madurez textural, grado de selección, redondeamiento, empaquetamiento o fábrica de los sedimentos. Estas características texturales de los sedimentos, sirven para complementar la estimación de recarga y almacenamiento de aguas subterráneas.

Las precipitaciones en Quintay constituyen la principal fuente de recarga para el acuífero de la zona. Sin embargo, desde el año 2010 existe una disminución pluviométrica entre las regiones de Coquimbo y la Araucanía (Figura 6.1) cercana al 30% (CR2, 2015). Esta disminución afecta directamente la disponibilidad y sostenibilidad en el tiempo de los recursos hídricos subterráneos de Quintay. Las descargas de agua subterránea, ocurren por la demanda hídrica generada por la vegetación, cultivos agrícolas y las extracciones de agua subterránea para usos domésticos, industriales y agrícolas.

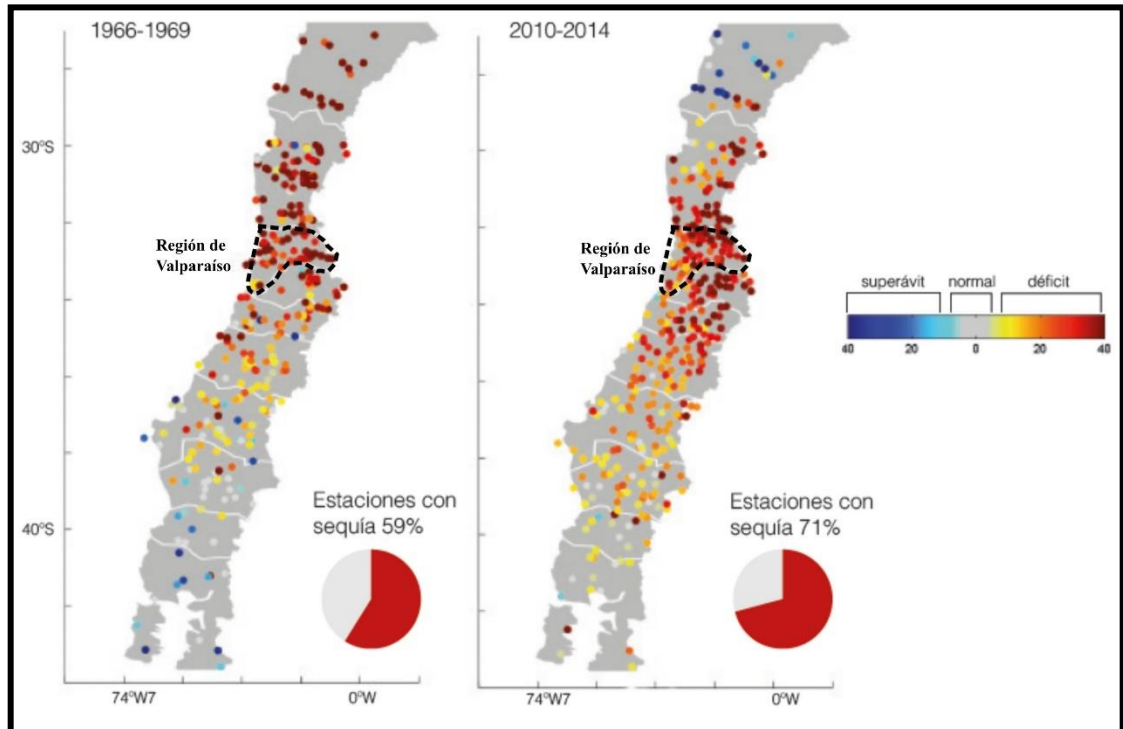


Figura 6.1. Déficit o superávit pluviométrico de la Región de Valparaíso entre los periodos 1966-1969 y 2010-2014. Modificado de CR2, (2015).

Dentro de Quintay, de los 23 pozos que aparecen en los registros de la DGA, solo existe información del nivel estático en 10 de ellos. Esta información sirve para comprender la dinámica de los acuíferos y, por ende, una gestión efectiva sobre los recursos hídricos subterráneos en Quintay. Cabe mencionar que los datos de nivel estático de estos 10 pozos fueron medidos entre 1989 y 2008. Dado el contexto actual de disminución de precipitaciones en la región, es probable que los niveles estáticos de estos pozos presenten cambios significativos.

El estero El Jote es el principal curso de agua en Quintay, el cual ha experimentado tanto cambios en su caudal original como en la calidad de agua que contiene. Estos cambios impactan directamente la sostenibilidad del recurso hídrico del área de estudio, en donde se han identificado problemáticas como: un alto nivel de turbidez en el agua y un elevado contenido de hierro y manganeso en el agua del estero (I. Municipalidad de Casablanca, 2022).

La determinación de los espesores del acuífero en Quintay se basó en la estratigrafía y un estudio geofísico TEM en el área de estudio. Hay que considerar que la mayor parte de los datos del TEM fueron medidos en zonas urbanas por lo que la calidad de los datos fue regular en algunas estaciones (TEM-02 y TEM-04). Además, los valores obtenidos en las mediciones (Anexo 3) no siempre están perfectamente ajustados o explicados por los modelos de resistividad obtenidos. Según Subterránea (2023), la mayoría de los modelos ajustan los datos con un error menor RMS menor al 10%, como por ejemplo el TEM-01 (Figura 6.2) el cual tiene un RMS de 3.75% donde entre los 10 y 200 milisegundos se ajusta bien al modelo y corresponde al RMS más bajo. Por otro lado, el TEM-02 (Figura 6.3) presenta un RMS de 12.36% donde solo entre los 20 y 40 milisegundos se ajusta bien al modelo, por lo que tanto la calidad de los datos como del ajuste es malo, y corresponde al RMS más alto.

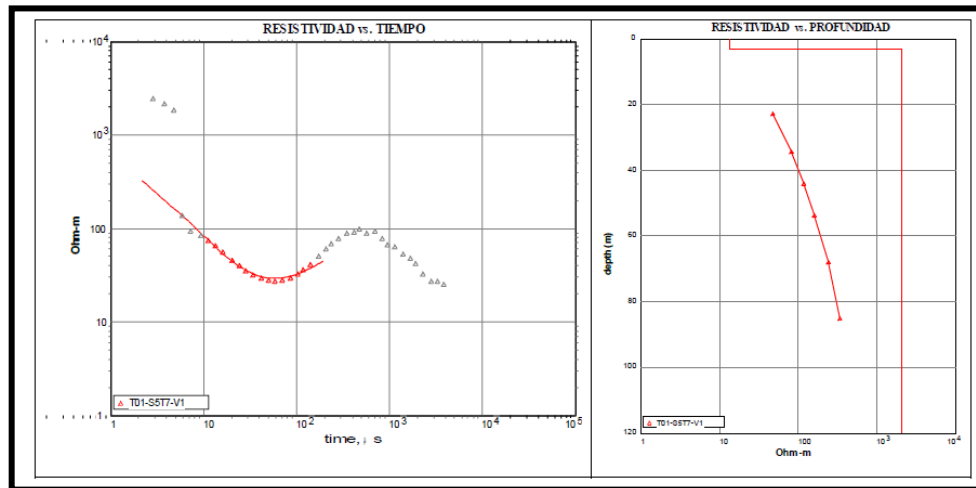


Figura 6.2. Ajuste de la inversión (izq) y modelos de capas y suavizado (der) para TEM-01 (RMS=3.75%) (Subterránea, 2023).

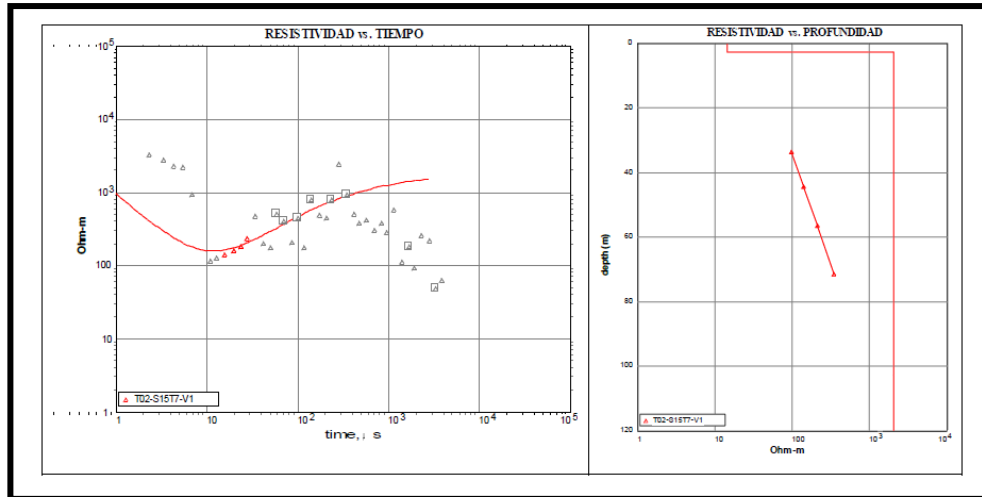


Figura 6.3. Ajuste de la inversión (izq) y modelos de capas y suavizado (der) para TEM-02 (RMS=12.36%) (Subterránea, 2023).

Cabe mencionar que gran parte de los datos estratigráficos obtenidos se centraron en la zona cercana al estero El Jote, que es la fuente principal de agua en Quintay. Sin embargo, existen otras áreas de interés en Quintay que no presentan información. Se identificaron dos quebradas relevantes, Quebrada Los Gatos y Quebrada Honda, en las cuales existen redes hídricas, en donde hasta el momento no existen datos de pozos en estas ubicaciones. La obtención de estos datos, podría proporcionar información para la comprensión del acuífero en Quintay, y así evaluar la relación entre las fuentes de aguas superficiales y acuíferos, lo que resulta esencial para comprender la recarga y disponibilidad de recursos hídricos subterráneos.

7. CONCLUSIONES

En esta tesis se estimó la disponibilidad de recursos hídricos subterráneos en el área de Quintay. Las unidades hidrogeológicas fueron determinadas a partir de la estratigrafía de la zona, y un análisis textural de los sedimentos presentes en los pozos. Se interpretaron 3 unidades hidrogeológicas, según su potencial para almacenar y transmitir el agua: la unidad hidrogeológica 1 está compuesta por intercalaciones de arenas gruesas a medias con gravas y ripios, y se definió como la de mayor importancia hidrogeológica. La unidad hidrogeológica 2 está compuesta por secuencias de mala selección que van desde bloques a arcillas intercalados con arenas y gravas, y se definió con una importancia hidrogeológica de media a baja. La unidad hidrogeológica 3 está compuesta por rocas metamórficas e intrusivas, la cual se definió con una importancia hidrogeológica nula.

Al realizar el balance hídrico en el área de estudio, se concluye que las tasas de descarga de agua superan a las tasas de recarga. Este desequilibrio ejerce un impacto negativo en la sostenibilidad de los recursos hídricos subterráneos, ya que agota de manera gradual las reservas de agua almacenadas en el subsuelo. El volumen de agua almacenado estimado es 4.725.000 m³, considerando que existe un balance hídrico negativo y las tasas actuales de extracción, este volumen se agotaría en aproximadamente 10 años. Esta situación compromete la gestión sostenible de recursos hídricos subterráneos, lo que genera impactos negativos en la seguridad hídrica y el bienestar de la comunidad de Quintay.

Para una correcta gestión de los recursos hídricos subterráneos, se requiere de un enfoque a largo plazo que considere aspectos como los cambios climáticos, cambios en la demanda de agua y posibles impactos ambientales que puedan afectar al área de estudio.

En base a la nueva información y análisis presentados en este trabajo, se recomienda:

- Ampliar la recopilación de datos adicionales a los pozos, como la inclusión de análisis químicos de los recursos hídricos subterráneos, actualización de los niveles estáticos y nuevos estudios geofísicos principalmente aguas arriba del estero El Jote, para así obtener una mejor estimación de los recursos hídricos disponibles.
- Expandir el área de estudio, para así obtener una visión más general de la hidrogeología presente en Quintay.
- Complementar la información estratigráfica del área de estudio, ya que la existente se basa principalmente en las proximidades del estero El Jote, para así establecer si existen más zonas con potenciales hídricos.
- Actualización de las temperaturas y precipitaciones de la estación Lago Peñuelas, ya que, los últimos registros disponibles son del año 2018.
- Complementar el modelo hidrogeológico con el objetivo de determinar el flujo del agua, para simular como este se desplaza a través de las unidades hidrogeológicas y observar como este se comporta a cambios en las condiciones, como un aumento en las extracciones o variaciones de precipitaciones.

REFERENCIAS

- ASTM D6431. 1999. Standard guide for using the direct current resistivity method for subsurface investigation, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. 2012. Informe sequía quinta región. Santiago de Chile, Chile.
- Budds, J. 2009. Contested H₂O: Science policy and politics in water resources management in Chile. *Geoforum*. 40, 418-430.
- Budds, J. 2012. La demanda, evaluación y asignación del agua en el contexto de escasez: Un análisis del ciclo hidrosocial del valle del río La Ligua, Chile. *Revista de geografía norte grande*. 54, 167-184.
- Budds, J. 2018. Securing the market: Water security and internal contradictions of Chile's water code. *Geoforum*. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2018.09.027>.
- Celis, F. 2018. Petrogénesis de los gneises de Quintay, Región de Valparaíso, Chile. Memoria de pregrado para optar al Título de Geóloga. Universidad Andrés Bello, Viña del Mar.
- Cossio, H. 2021. La agonía seca de Quintay: inmobiliaria Santa Augusta concentra el 99% de los derechos de agua mientras habitantes no tiene para beber. *El mostrador*. <https://www.elmostrador.cl/destacado/2021/04/20/la-agonia-seca-de-quintay-inmobiliaria-santa-augusta-concentra-el-99-de-los-derechos-de-agua-mientras-habitantes-no-tienen-para-beber/>.
- Claramunt, V., y Naranjo, J. 2018. Informe preliminar: Caracterización de la flora y fauna de Quintay (Issue 636). Disponible en: www.quintaybiodiversidad.cl.
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2). 2015. Report to the Nation: The Central Chile Mega-Drought. Technical report from the Center for Climate and Resilience Research.

- Deckart, K., Herve, F., Fanning, M., Ramírez, V., Calderón, M., y Godoy, E. 2014. U Pb Geochronology and Hf-O Isotopes of zircons from the Pennsylvanian Coastal Batholith, South-Central Chile. *Andean Geology*, 50-62.
- de la Vega, Francisca. 2021. Sequía: Los desafíos para Chile de un futuro con menos agua. <https://portaluchile.uchile.cl/noticias/168766/sequia-los-desafios-para-chile-de-un-futuro-con-menos-agua>.
- DGA, 1996. Estudio del Mapa Hidrogeológico Nacional, escalas 1:1.000.000 y 1:2.500.000. Ministerio de Obras Públicas.
- DGA. 2005. Evaluación de los recursos subterráneos de las cuencas costeras de la V Región. Santiago, Chile: Elaborador por Departamento de Administración de Recursos Hídricos.
- DGA. 2014b. Definición del Modelo Conceptual del Acuífero de Casablanca, V Región. Informe técnico. Santiago, Chile: Elaborado por Departamento de Estudios y Planificación.
- DGA. 2015. Actualización de la modelación hidrogeológica e integrada de los acuíferos de la Cuenca del Estero Casablanca. Informe Final. Santiago, Chile: Elaborado por RIZZO Associates Chile S.A.
- DGA. 2019. Isoyetas. Infraestructura de Datos Geoespaciales.
- DGAC. 2022. Reporte anual de la evolución del clima en Chile. Dirección Meteorológica de Chile.
- DOH. 2007. Informe Final de Evaluación Programa Agua Potable Rural.
- DOH. 2019. Tríptico de la Historia de los APR.
- Hispagua. Sistema Español de Información sobre el agua. 2020. Hidrogeología.; <https://hispagua.cedex.es/datos/hidrogeologia#2>.
- Gaete, N. 2021. Estudio hidrogeológico de la implementación de una planta desalinizadora de agua para abastecimiento del lago Peñuelas. Memoria de pregrado para optar al título de Geólogo. Universidad Andrés Bello. Viña del Mar.

- Gana, P.; Tosdal, R. 1996. Geocronología U-Pb y K-Ar en intrusivos del Paleozoico y Mesozoico de la Cordillera de la Costa, Región de Valparaíso, Chile. *Revista Geológica de Chile* 23 (2): 151-164.
- Gana, P., Wall, R., Gutiérrez, A. 1996. Mapa Geológico del Área de Valparaíso-Curacaví, escala 1:100.000: Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Garreaud y Boisier. 2017. The 2010–2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation.
- Garreaud y Boisier. 2019. The Central Chile mega drought (2010-2018): A climate dynamics perspective.
- Guajardo, F. 2023. Propuesta técnica y económica para la implementación de una desalinizadora bajo contexto de seguridad hídrica en el sector de Quintay, comuna de Casablanca, Región de Valparaíso. Memoria de titulación para optar al Título de Ingeniero Civil Químico. Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago.
- Henriquez, C., Aspee, N. y Quense, J. 2016. Zonas de catástrofes por eventos hidrometeorológicos en Chile y aportes para un índice de riesgos climáticos. *Revista de geografía norte grande*. 66, 27-44.
- Ilustre Municipalidad de Casablanca. 2019. Plan regulador comunal de Casablanca. Memoria explicativa.
- Ilustre Municipalidad de Casablanca. 2022. Solicitud de reconocimiento de humedal urbano. Estero El Jote, Quintay, Casablanca. Dirección de Gestión Medio Ambiental.
- Intendencia Valparaíso. 2019. Presidente de la república decreta zona de catástrofe por sequía a todas las comunas continentales de la región de Valparaíso. Disponible en: <http://www.intendenciavalparaiso.gov.cl/noticias/presidente-de-la-republica-decreta-zona-de-catastrofe-por-sequia-a-todas-las-comunas-continentales-de-la-region-de-valparaiso/>.
- Kirsch, R., Ed. 2006. *Groundwater Geophysics: A Tool for Hydrogeology*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 493p.

- Lara, S. 2020. Valor de los sistemas de captación de agua lluvia en viviendas urbanas como dispositivo para adaptación para el cambio climático en contexto de sequía. Caso Casablanca, Quinta Región. Tesis para optar al Título profesional de Arquitecto y grado académico de Magister en Arquitectura, Escuela de Arquitectura, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago.
- Ministerio de Agricultura. 2019. Catastro y Actualización de los Recursos Vegetacionales y Uso de la Tierra de la Región de Valparaíso (V). Infraestructura de Datos Espaciales.
- Ministerio de Bienes Nacionales. 2023. Nueva versión de la Cartografía de la Red Hídrica en el Sitio Web de IDE Chile. Infraestructura de Datos Geoespaciales.
- Poeter, E., Fan, Y., Cherry, J., Wood, W., y Mackay, D. (Eds.). 2020. Groundwater in Our Water Cycle: Getting to Know Earth's Most Important Fresh Water Source. <https://doi.org/10.21083/978-1-7770541-1-3>.
- Ramírez, V. 2010. Plutonismo del Carbonífero Superior y Jurásico Medio en el tramo costero entre Laguna Verde y Tunquén (33°05'-33°15'S), Chile Central. Memoria para optar al Título de Geóloga.
- Riffo Rosas, M., y Castro Osorio, P. 2010. Modernización vitivinícola del Valle de Casablanca: potencialidades y vulnerabilidad de la actividad. Investigaciones Geográficas, (42), Pág. 37–56. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2010.21868>.
- Sánchez, J. 2014. Conceptos Fundamentales de Hidrogeología; Clasificación de las formaciones geológicas según su comportamiento hidrogeológico.
- Secretaría Regional Ministerial de Vivienda y Urbanismo Región de Valparaíso. 2017. Actualización Plan Regulador Comunal de Casablanca: “Adecuación Estudio de Diagnóstico y Proposición para modificar el Plan Regulador Comuna de Casablammca 1990”. Casablanca, Chile.
- Struckmeier, W.F. y Margast, J. 1995. Hydrogeological Maps: A Guide and a Standard Legend. International Association of Hydrogeologists (IAH). International Contributions to Hydrogeology. Vol 17: 177 pp. Hannover: Heise.

Subterránea consultores. 2023. Estudio geofísico mediante Transiente Electromagnético sector Quintay, Región de Valparaíso. Para Universidad Técnica Federico Santa María. Proyecto ANID N° FSEQ210038.

Tarbuck, E. J., y Lutgens, F. K. 2013. Ciencias de la Tierra: Una Introducción a la Geología Física (10th ed.).

Thornthwaite, CW. 1948. An approach toward a rational classification of climate. American Geographical Society. 38 (1): 55-94.

ANEXOS

Anexo 1 (A.1) Columnas estratigráficas

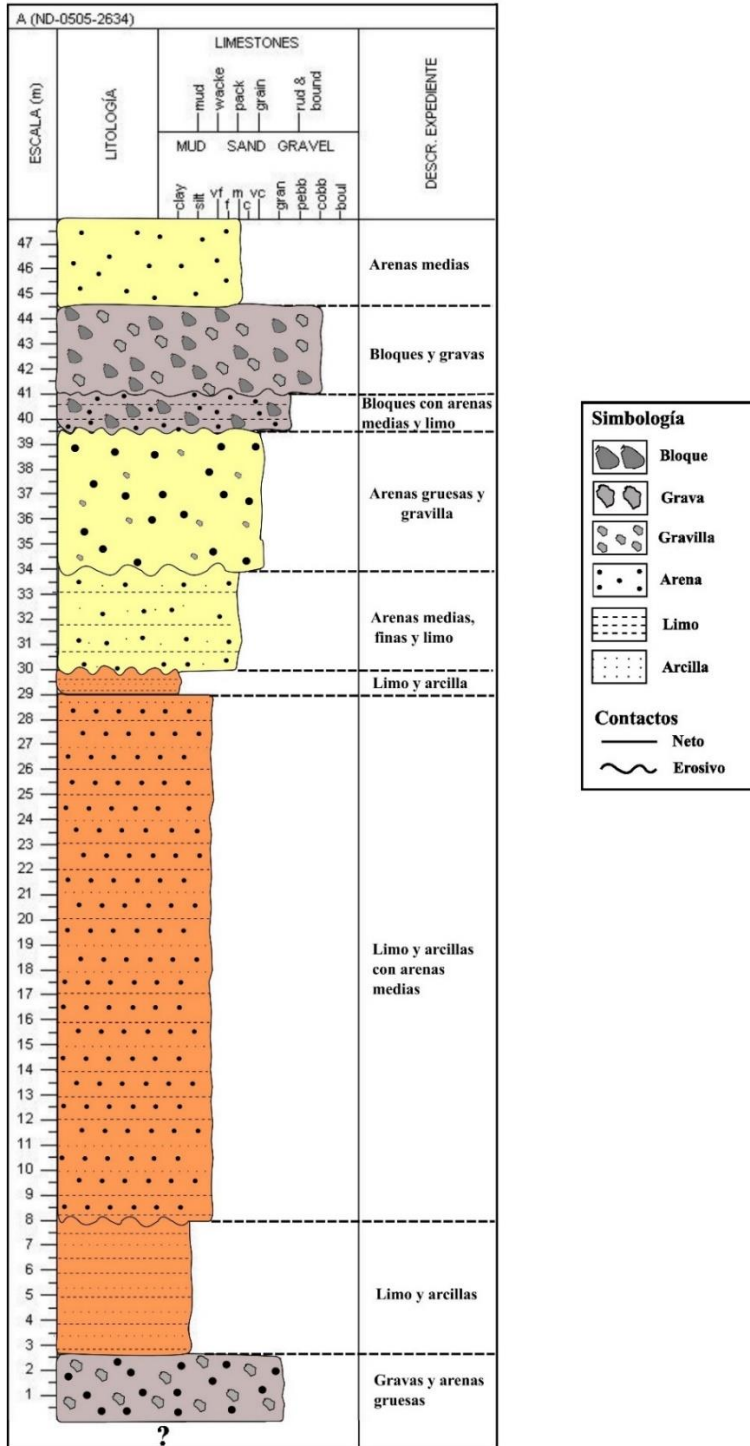


Figura A.1.1. Representación estratigráfica del pozo "A"

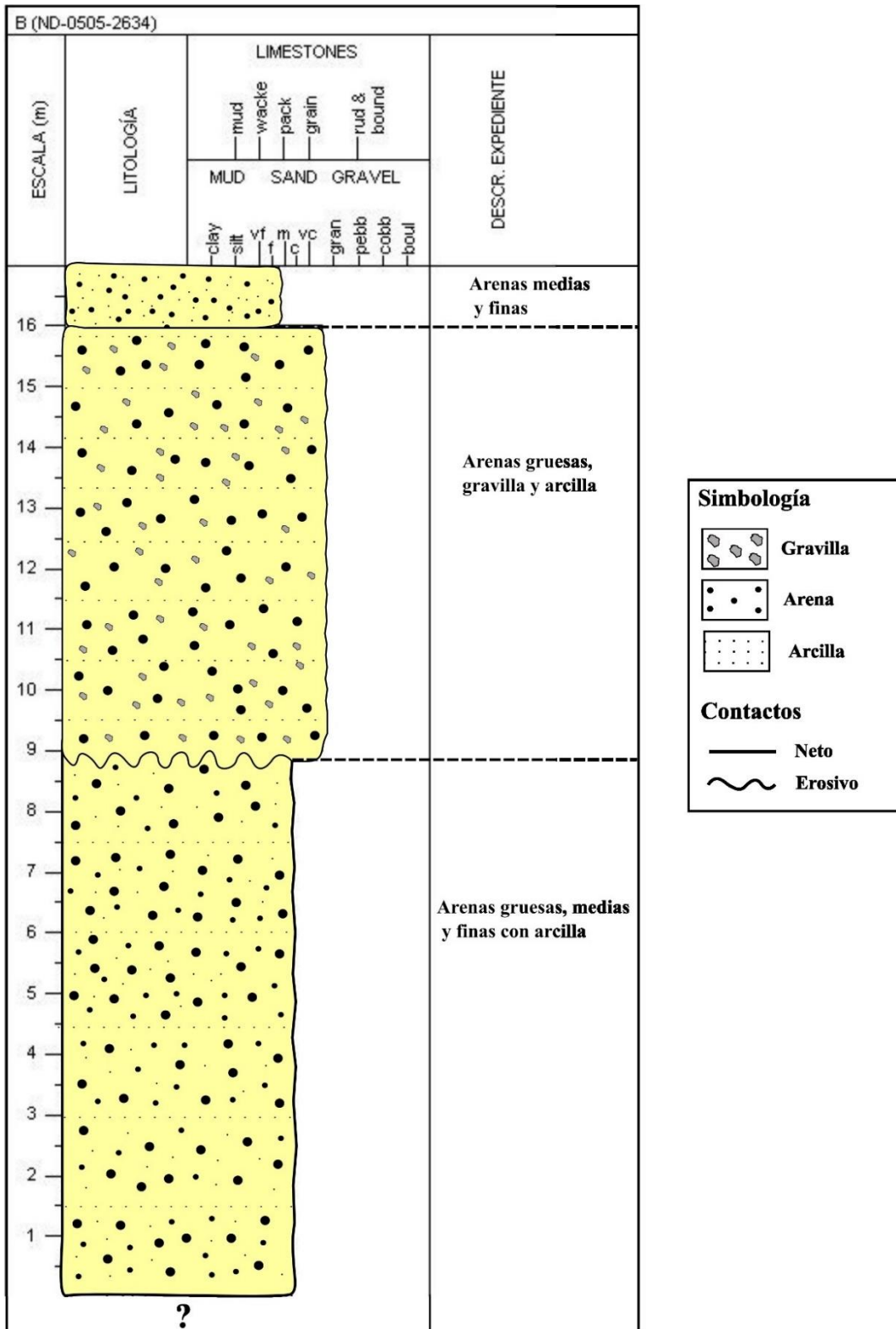


Figura A.1.2. Representación estratigráfica del pozo "B"

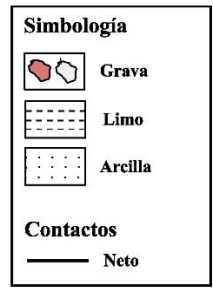
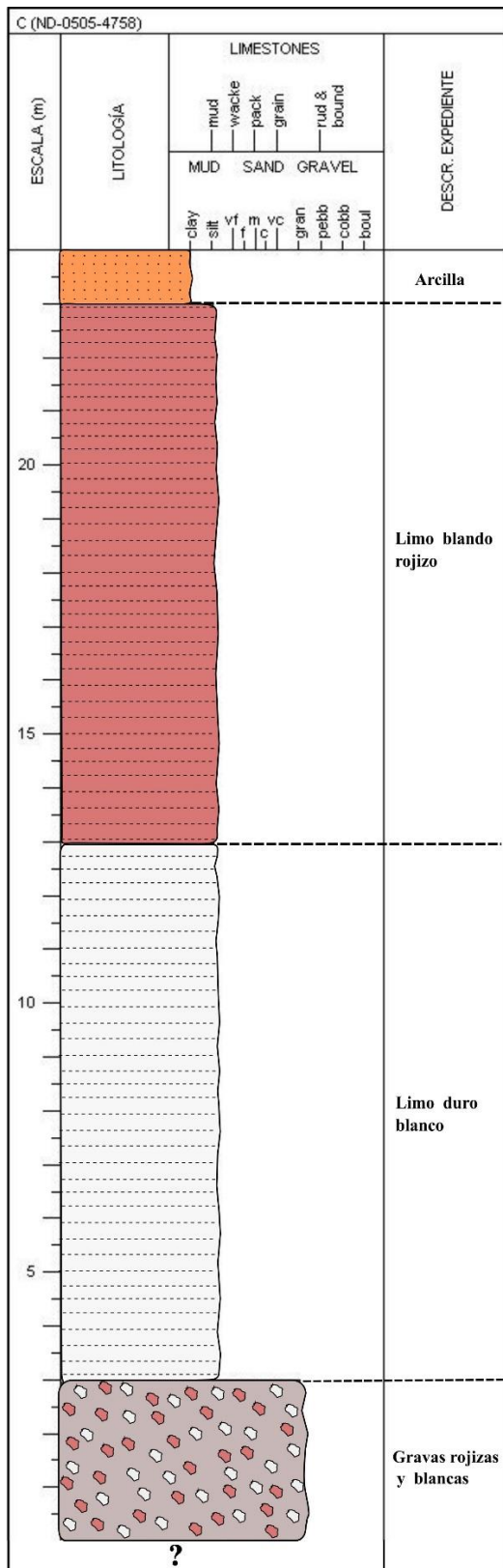


Figura A.1.3. Representación estratigráfica del pozo "C"

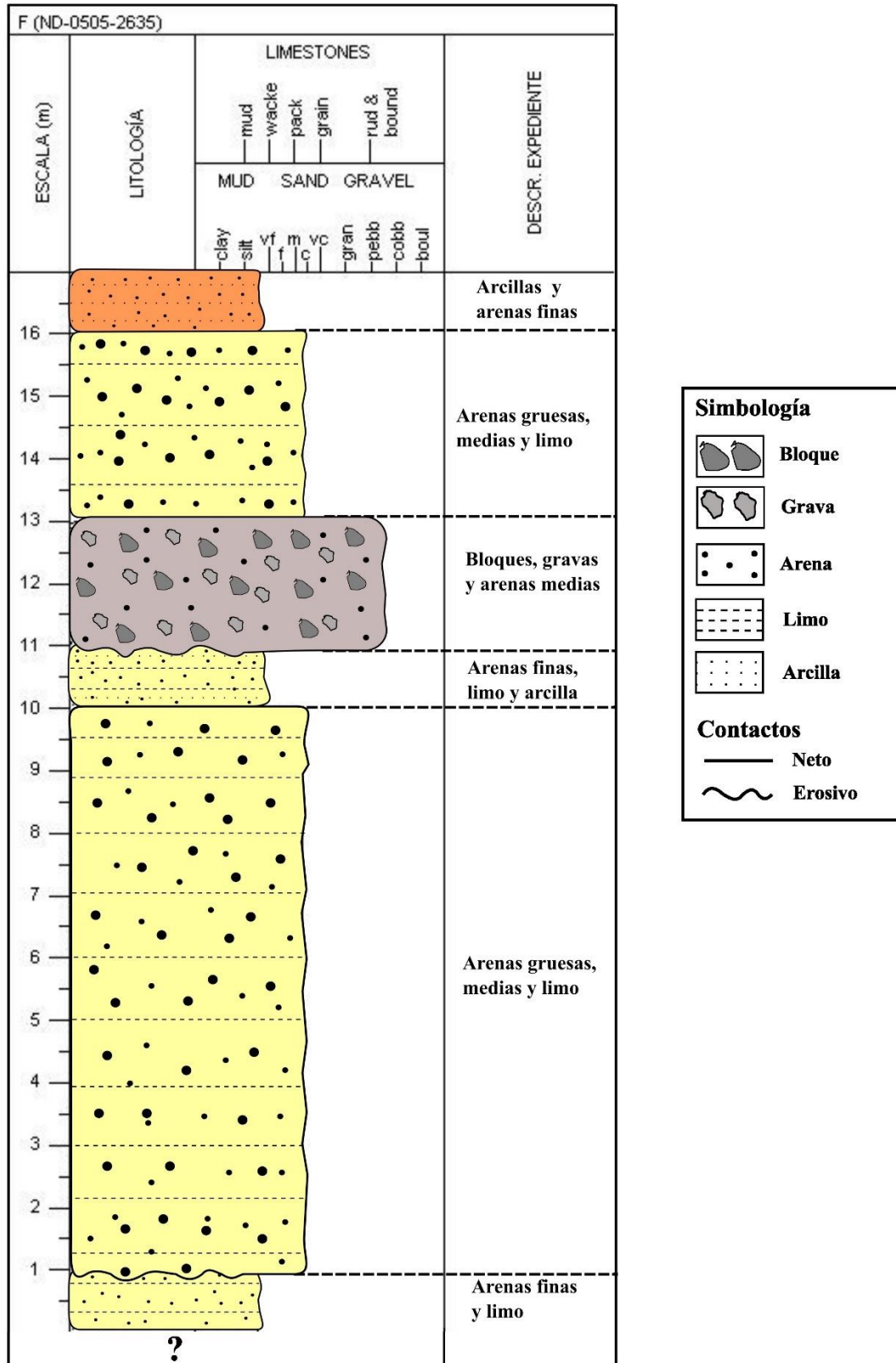


Figura A.1.6. Representación estratigráfica del pozo "F"

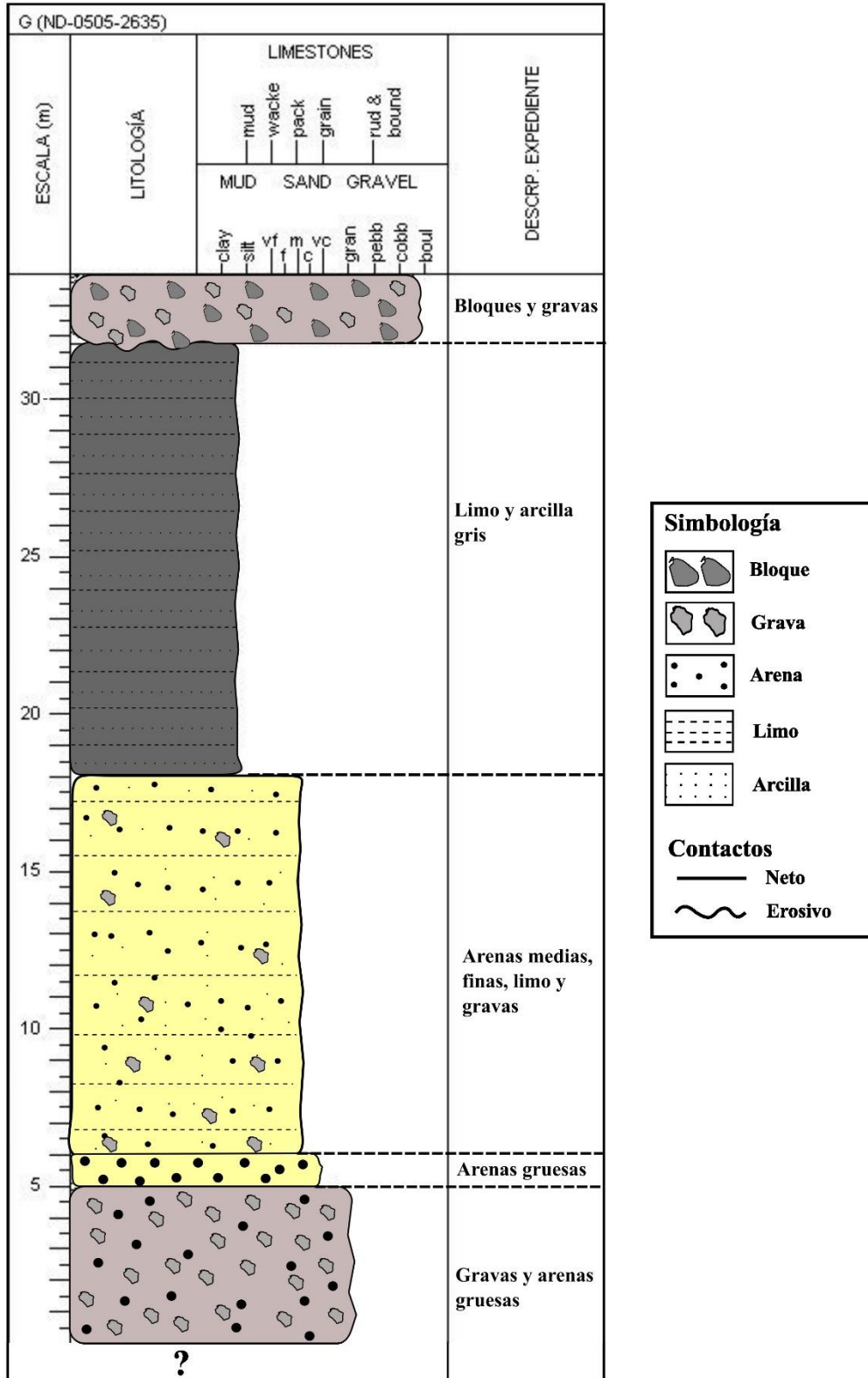


Figura A.1.7. Representación estratigráfica del pozo "G".

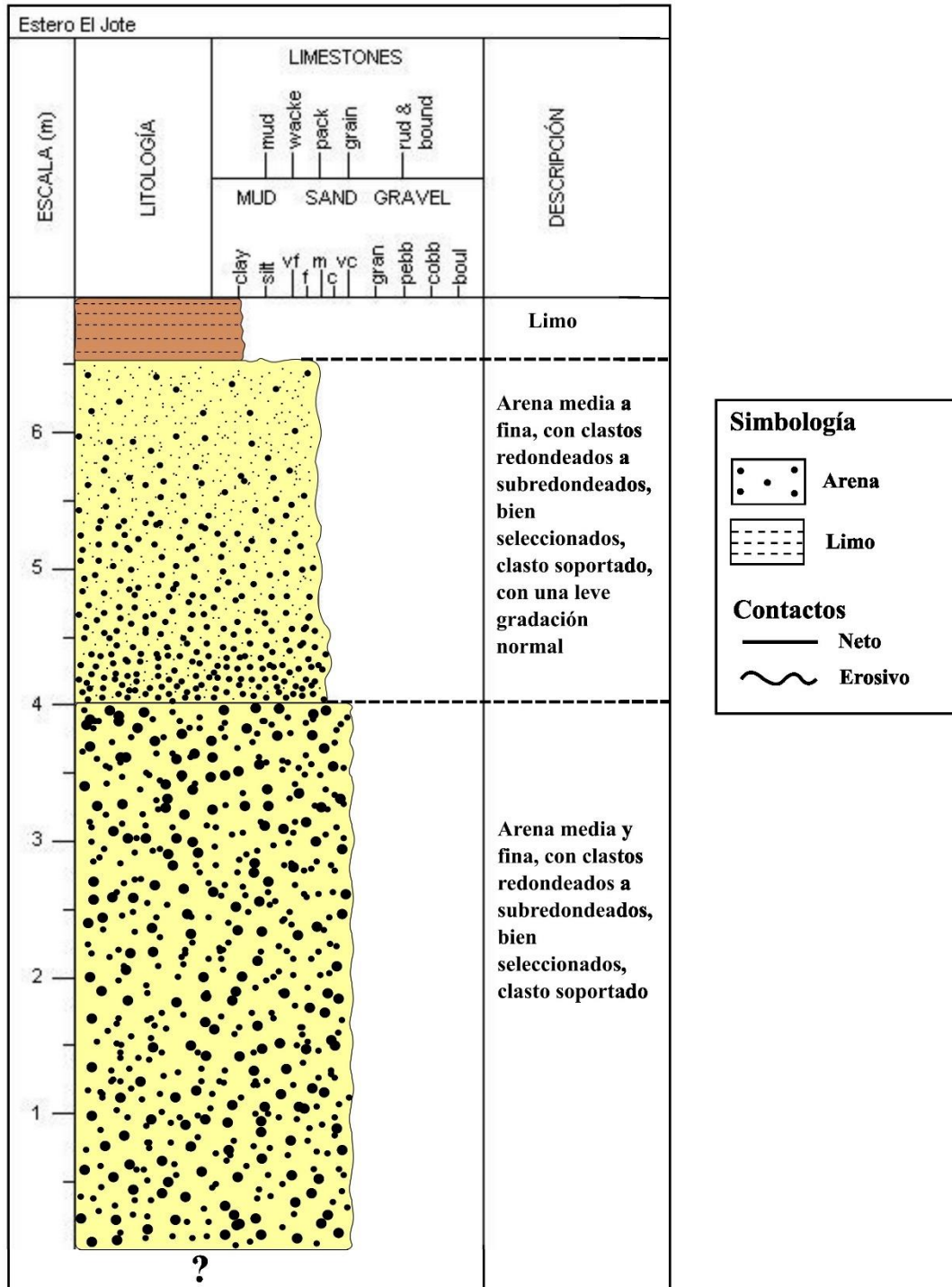


Figura A.1.8. Representación estratigráfica de la ladera del estero El Jote.

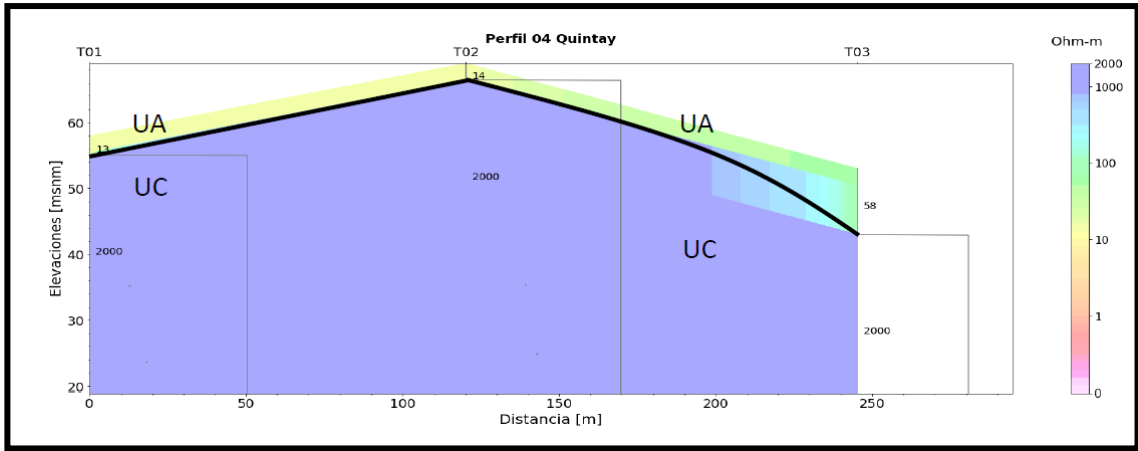


Figura A.2.3. Perfil geoelectrico 4 (Subterranea, 2023).

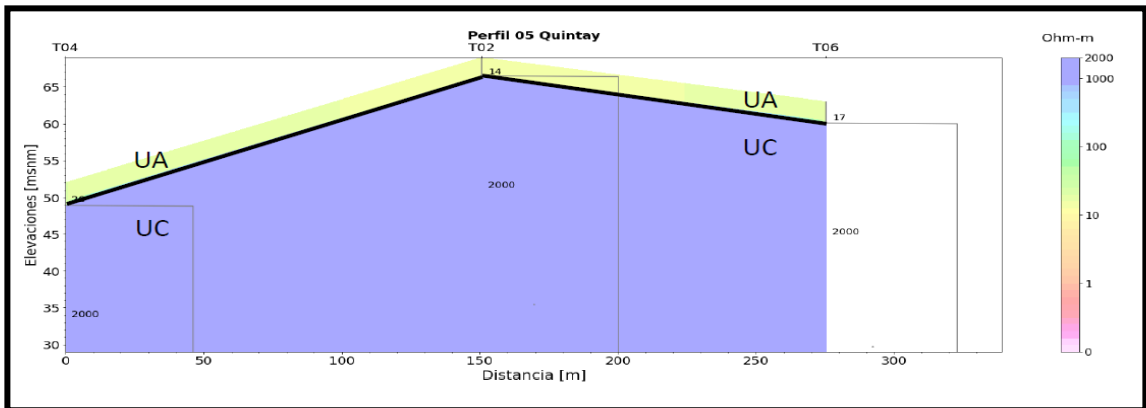


Figura A.2.4. Perfil geoelectrico 5 (Subterranea, 2023).

Tabla A.2.1. Valor RMS de cada sondeo TEM (Subterranea, 2023).

Sondeo	RMS (%)
TEM 1	3.75
TEM 2	12.36
TEM 3	6.23
TEM 4	10.51
TEM 5	9.48

Anexo 3 (A.3) Factores de corrección para cálculos de la evapotranspiración

Tabla A.3.1. Factores de corrección según latitud del área de estudio (Thornthwaite, 1948).

LAT SUR	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
5	1.04	0.95	1.04	1.00	1.02	0.99	1.02	1.03	1.00	1.05	1.03	1.06
10	1.08	0.97	1.05	0.99	1.01	0.96	1.00	1.01	1.00	1.06	1.05	1.10
15	1.12	0.98	1.05	0.98	0.98	0.94	0.97	1.00	1.00	1.07	1.07	1.12
20	1.14	1.00	1.05	0.97	0.96	0.91	0.95	0.99	1.00	1.08	1.09	1.15
25	1.17	1.01	1.05	0.96	0.94	0.88	0.93	0.98	1.00	1.10	1.11	1.18
30	1.20	1.03	1.06	0.95	0.92	0.85	0.90	0.96	1.00	1.12	1.14	1.21
35	1.23	1.04	1.06	0.94	0.89	0.82	0.87	0.94	1.00	1.13	1.17	1.25
40	1.27	1.06	1.07	0.93	0.86	0.78	0.84	0.92	1.00	1.15	1.20	1.29
45	1.31	1.10	1.07	0.91	0.81	0.71	0.78	0.90	0.99	1.17	1.26	1.36
50	1.37	1.12	1.08	0.89	0.77	0.67	0.74	0.88	0.99	1.19	1.29	1.41