



Escuela de Ingeniería
Ingeniería Civil Geológica

Análisis local de los flujos de agua subterránea mediante modelación numérica en el Acuífero Cuaternario Costero de Pichilemu

Gianfranco López Méndez
Profesor guía: Etienne Bresciani

Tesis para optar al título de Ingeniero Civil Geólogo

Rancagua, Chile
Diciembre, 2023

Agradecimientos

Por sobre todas las cosas quiero agradecer mi hermana Scarlett, por su inquebrantable fe en mí y por su apoyo en los momentos más desafiantes; a mis padres, por su amor incondicional y respaldo constante en cada etapa de este camino.

A mis amigos: Arnaldo Olivares, Natalia Pino, Nicolas Bustamante y Nicolas Urrutia, por su amistad y por los buenos momentos compartidos que hicieron que mis últimos años de universidad fueran más llevaderos y significativos.

Al Proyecto sistema Articulado de Investigación en Cambio Climático y Sustentabilidad de Zonas Costeras de Chile (URO RED21992).

A mi profesor guía Dr. Etienne Bresciani, cuya paciencia, orientación y enseñanzas fueron fundamentales para el desarrollo de esta tesis.

Finalmente quiero agradecer a mis compañeros de carrera y de generación por su ayuda y por los bellos momentos compartidos.

A cada uno de ustedes, mi más sincero agradecimiento por ser parte fundamental en esta travesía.

Índice

Resumen	7
Introducción	8
Objetivos	9
Objetivo General	9
Objetivos Específicos	9
Antecedentes del Área de estudio	10
Ubicación y vías de accesos	10
Marco Geomorfológico	11
Geomorfología Regional	11
Geomorfología local	12
Clima	13
Hidrología	14
Geología del Área	15
Litología	15
Sedimentos	16
Suelo	16
Estructuras	19
Hidrogeología	20
Acuífero	20
Acuitardos y Acuicludos	22
Marco teórico	22
Hidrogeología y Concepto de acuífero	22
Ecuación General de flujo	23
Principios de la modelación numérica de agua subterránea	24
Metodología	26
Modelo conceptual	26
Tipo de acuífero	26
Geometría del Área de estudio	27
Condiciones de bordes	28

Parámetros Hidráulicos	28
Estimación de la Recarga.....	29
Estimación del caudal de Bombeo anual.....	29
Modelo Numérico.....	30
Resultados.....	32
Modelación Base	32
Análisis de sensibilidad.....	35
Caso menos 50% de Recarga	35
Caso menos 50% de Bombeo.....	38
Caso más 50% de Recarga	40
Caso más 50% de Bombeo.....	42
Discusión	44
Conclusión	45
ANEXOS.....	46
Anexo 1	46
Anexo 2	47
Anexo 3	51
Referencias.....	54

Índice de Figuras

Figura 1: Se muestra la ubicación y acceso al área de estudio. Elaboración propia.	10
Figura 2: Principales unidades morfoestructurales en Chile central. Área de estudio enmarcada en celeste. Modificado de Fock (2005).	11
Figura 3: Se muestra los cuatro rasgos morfológicos de la comuna de Pichilemu, el área de estudio se encuentra desplazada en la unidad de las terrazas marinas (En color verde de la Figura). Modificado de PLADECO, (2021).....	12
Figura 4: Climograma Anual de Pichilemu. Elaboración Propia, Fuente: Climate.data.org.....	13
Figura 5: Se muestra la Cuenca y subcuenca, según el inventario de Cuencas de la DGA, además, se muestra la Cuenca San Antonio. Datos obtenidos de DGA (2014a). Elaboración propia.	14
Figura 6: Mapa geológico de la región de Pichilemu. Modificado de Farias et al. (2011), extraído de Calle, (2018).....	17

Figura 7: Se muestra la ubicación de los sondeos realizados por CORFO en 1953, Modificado de SENDOS, (1980).....	17
Figura 8: Estructuras neotectónicas de la región de Pichilemu. Las líneas rojas corresponden al grupo de estructuras extensionales con orientación NO, mientras que las líneas negras son estructuras compresivas orientadas N-S a NNE-SSO. Adaptado de Farías et al. (2011), extraído de Calle, (2018).....	19
Figura 9: Ubicación y extensión del Acuífero Cuaternario de Pichilemu. Extraído de DGA (2014b).	21
Figura 10: Se muestra demarcado en naranja el afloramiento al sur del área a modelar.	27
Figura 11: Mapa del área de estudio, se muestra la geometría y condiciones de borde. Elaboración propia.	28
Figura 12: Se muestra los registro del nivel de agua, en donde los peak de descenso de este nivel es indicativo de bombeo del pozo. Datos extraído del Proyecto URO RED21992.....	30
Figura 13: Configuración empleada en el apartado ‘Time’ en ModelMuse.	31
Figura 14: Se muestra el resultado de la modelación de flujo. Notar la líneas de flujo que ingresan al área de estudio. Nota: la escala de color no es lineal. Elaboración propia.....	33
Figura 16: Se muestra el descenso junto con el límite de influencia del pozo. Nota: la escala de color no es lineal. Elaboración propia.....	34
Figura 15: Se muestra el nivel piezométrico y las curvas isopiezas. Nota: la escala de color no es lineal. Elaboración propia.	34
Figura 17: Se muestra el nivel piezométrico resultante para un 50% menos de Recarga, junto con las líneas de flujos. Nota: la escala de color no es lineal. Elaboración propia.....	36
Figura 18: Se muestra el nivel piezométrico resultante para un 50% menos de Recarga, junto con las curvas isopiezas a un intervalo de 0,002 m. Nota: la escala de color no es lineal. Elaboración propia.	37
Figura 19: Se muestra el descenso junto con el límite de influencia del pozo para un 50% menos de Recarga. Nota: la escala de color no es lineal. Elaboración propia.	37
Figura 20: Se muestra el nivel piezométrico resultante para un 50% menos de Bombeo, junto con las líneas de flujos. Nota: la escala de color no es lineal. Elaboración propia.....	38
Figura 21: Se muestra el nivel piezométrico resultante para un 50% menos de Bombeo, junto con las curvas isopiezas a un intervalo de 0,002 m. Nota: la escala de color no es lineal. Elaboración propia.	39
Figura 22: Se muestra el descenso junto con el límite de influencia del pozo para un 50% menos de Bombeo. Nota: la escala de color no es lineal. Elaboración propia.....	39
Figura 23: Se muestra el nivel piezométrico resultante para un 50% más de Recarga, junto con las líneas de flujos. Nota: la escala de color no es lineal. Elaboración propia.....	40

Figura 24: Se muestra el nivel piezométrico resultante para un 50% más de recarga, junto con las curvas isopiezas a un intervalo de 0,002 m. Nota: la escala de color no es lineal. Elaboración propia.	41
Figura 25: Se muestra el descenso junto con el límite de influencia del pozo para un 50% más de Recarga. Nota: la escala de color no es lineal. Elaboración propia.	41
Figura 26: Se muestra el nivel piezométrico resultante para un 50% más de Bombeo, junto con las líneas de flujos. Nota: la escala de color no es lineal. Elaboración propia.....	42
Figura 27: Se muestra el nivel piezométrico resultante para un 50% más de Bombeo, junto con las curvas isopiezas a un intervalo de 0,002 m. Nota: la escala de color no es lineal. Elaboración propia.	43
Figura 28: Se muestra el descenso junto con el límite de influencia del pozo para un 50% más de Bombeo. Nota: la escala de color no es lineal. Elaboración propia.....	43

Índice de Tablas

Tabla 1: Se muestran parámetros hidromorfométricos de la cuenca San Antonio. Modificado de (Ibarra, 2013).	15
Tabla 2: Sondaje N°1 San Antonio de Petrel. Nota: algunas descripciones fueron realizadas en el año en el que fueron descritas (1953), por lo que algunas definiciones pueden estar obsoletas (están demarcadas con un '¿?'). Fuente: CORFO, 1953; Extraído en (SENDOS, 1980).	18
Tabla 3: Sondaje N°2 Fundo San Antonio de Petrel. Nota: algunas descripciones fueron realizadas en el año en el año 1953, por lo que algunas definiciones pueden estar obsoletas (están demarcadas con un '¿?'). Fuente: CORFO, 1953; Extraído en (SENDOS, 1980).	18
Tabla 4: Se muestra el balance hídrico obtenido de la modelación. Elaboración propia.....	32
Tabla 5: Se muestran los valores sin variación empleados en la modelación base y los valores ajustados en un -50% y un +50%. Elaboración propia.	35
Tabla 6: Se muestra el balance hídrico obtenido de la modelación con menos 50% de Recarga. Elaboración propia.	36
Tabla 7: Se muestra el balance hídrico obtenido de la modelación con menos 50% de Bombeo. Elaboración propia.	38
Tabla 8: Se muestra el balance hídrico obtenido de la modelación con más 50% de Recarga. Elaboración propia.	40
Tabla 9: Se muestra el balance hídrico obtenido de la modelación con más 50% de Bombeo. Elaboración propia.	42

Resumen

En la región costera central de Chile (34°S a $34^{\circ}25'\text{S}$ y de $72^{\circ}01'\text{O}$ a $71^{\circ}53'\text{O}$), se encuentra el acuífero cuaternario costero de Pichilemu, cuyo extremo sur está asociado al Estero San Antonio. Este estero se ve notoriamente influenciado por el océano Pacífico debido a la apertura de la barrera de arena, lo que origina una mezcla entre aguas oceánicas y continentales, generando así un agua salobre. En este contexto, se emplaza el área de estudio, la cual, se encuentra rodeada al este, norte y oeste por el estero San Antonio, en esta misma área se emplaza un pozo, cuya extracción de agua representa una potencial contaminación por intrusión salina por parte del estero. Dado a esta posible vulnerabilidad, el objetivo principal de esta investigación es determinar los flujos anuales promedio de agua subterránea. El análisis se basó en una revisión bibliográfica exhaustiva que permitió caracterizar la zona y desarrollar un modelo conceptual. Este modelo sirvió como base para llevar a cabo la modelación numérica en MODFLOW mediante la interfaz gráfica de ModelMuse. A través de este proceso, se identificaron dos áreas específicas donde se producen convergencia y divergencia de los flujos subterráneos, las cuales, juegan un papel crucial en el intercambio de agua entre el Estero San Antonio y el área de estudio y, por tanto, se concluye que se dan las condiciones para la intrusión salina.

Palabras claves: Acuífero, Modelación numérica, Estero San Antonio, Ambiente costero.

Introducción

El agua es un recurso fundamental para la vida y la salud de los seres humanos, así como para el desarrollo de actividades vitales como la agricultura, la industria y la generación de energía. Sin el suministro de agua adecuado, sería imposible sostener la vida en la Tierra (Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos, 2009).

En el año 2015, la demanda hídrica total consuntiva para la región de O'Higgins fue aproximadamente de $1,83 \cdot 10^9$ m³/año. De esta cantidad, el sector agrícola representa el 90,9% del consumo total, seguido del sector minero con un 3,7%, y, por último, el suministro de agua potable rural y urbano es de un 1,5% y 2,2% respectivamente (Dirección General de Agua, [DGA], 2017, pág. 30).

De cara al año 2040, se anticipa un incremento significativo en la demanda hídrica. Se prevé un aumento del 13% en el sector agrícola y un 27% para el suministro de agua potable urbano (DGA, 2017). Estas proyecciones plantean retos importantes en términos de gestión y preservación del recurso hídrico, pues, Chile es un país con alta vulnerabilidad al cambio climático, entre cuyos principales impactos ha sido la disminución en la disponibilidad de recursos hídricos (Rojas et al., 2019).

El desafío de atender la demanda enfrenta diversas limitaciones vinculadas a la disponibilidad de recursos. Según (Shiklomanov, 1993) el agua en la Tierra se distribuye de una manera particular: el 96,5% está contenido en los océanos, el 0,9% se presenta como agua salina, mientras que solo un 2,3% constituye agua dulce. De este último porcentaje, aproximadamente el 68,9% se encuentra en glaciares y casquetes polares, el 30,1% reside en acuíferos y el restante 1,2% está en la superficie. Es por este motivo que los recursos hídricos en acuíferos se vuelven de suma importancia y es, por lo tanto, necesario entender el comportamiento de estos recursos y su interacción con el medio.

Al norte de la localidad de Pichilemu, se encuentra a la laguna Petrel y estero San Antonio, cuya agua es salobre producto de la combinación entre aguas continentales y oceánicas a causa de la apertura periódica de la barrera de arena que separa a la laguna del océano Pacífico. Aunque

la dinámica de esta barrera aún no se comprende completamente, se ha observado que normalmente se abre durante periodos de marejadas y/o por altos caudales en el estero.

En este mismo ambiente, se encuentra el área de estudio, el cual es una porción del acuífero cuaternario costero de Pichilemu, esta área de investigación se encuentra circundada por el estero San Antonio en sus lados este, norte y oeste, mientras que al sur se encuentra limitado por una colina. En esta misma área, se localiza un pozo utilizado por la municipalidad de Pichilemu para el riego de plazas en épocas estivales.

Esta extracción del pozo plantea una potencial vulnerabilidad ante la intrusión de agua salobre por parte del estero. Por este motivo, se llevará a cabo una modelación numérica con el fin de determinar los flujos subterráneos promedio en el acuífero cuaternario costero de Pichilemu. Esta modelación proporcionará un mayor entendimiento sobre la interacción entre el estero y el acuífero, siendo un aspecto fundamental para investigaciones futuras que busquen evaluar la vulnerabilidad del pozo en este acuífero.

Objetivos

Objetivo General

Determinar los flujos de agua promedios de un acuífero libre mediante software de modelación numérica en MODFLOW.

Objetivos Específicos

- Elaborar un modelo conceptual, contemplando la geología, definición de la geometría, parámetros hidráulicos, condiciones de borde, estimación del bombeo anual de pozo y la recarga.
- Elaborar una modelación numérica de los flujos de agua subterránea en el área de estudio.

Antecedentes del Área de estudio

Ubicación y vías de accesos

El área de estudio cuenta con un área aproximada de 138.940 m², se encuentra limitado al este, norte y sur por el estero San Antonio y en su extremo sur, por una colina. Esta área de estudio se encuentra ubicado a 1,9 Km al este de Pichilemu, Región del Libertador Bernardo O'Higgins, Chile. Una de las vías de acceso a la zona, se efectúa desde Rancagua tomando la Ruta Travesía con dirección al sur. Después de recorrer 10 km, se incorpora a la Ruta Panamericana sur, continuando por esta vía durante 45,4 km hasta llegar a la salida Sta. Cruz/San Fernando. Luego, se sigue por la ruta 90 durante 180 km y, finalmente, se dobla a la izquierda con dirección a la ruta I-448 (Figura 1).



Figura 1: Se muestra la ubicación y acceso al área de estudio. Elaboración propia.

Marco Geomorfológico

Geomorfología Regional

Según Fock (2005) el segmento central de Chile comprendido entre las latitudes 32° a 35° S, se encuentran cinco unidades morfoestructurales principales dispuestas en franjas orientadas norte-sur. Desde oeste a este aparecen en el siguiente orden: Cordillera de la Costa, Depresión Central, Cordillera Principal, Cordillera Frontal y Precordillera, más el antepaís en sector argentino (Figura 2). Según esta segmentación el área de estudio se encuentra en la cordillera de la costa, la cual está compuesta por cerros que en rara vez superan los 2000 m s.n.m. (Fock, 2005). Cabe señalar que las alturas máximas de los cerros de este segmento no se encuentran en la comuna de Pichilemu.

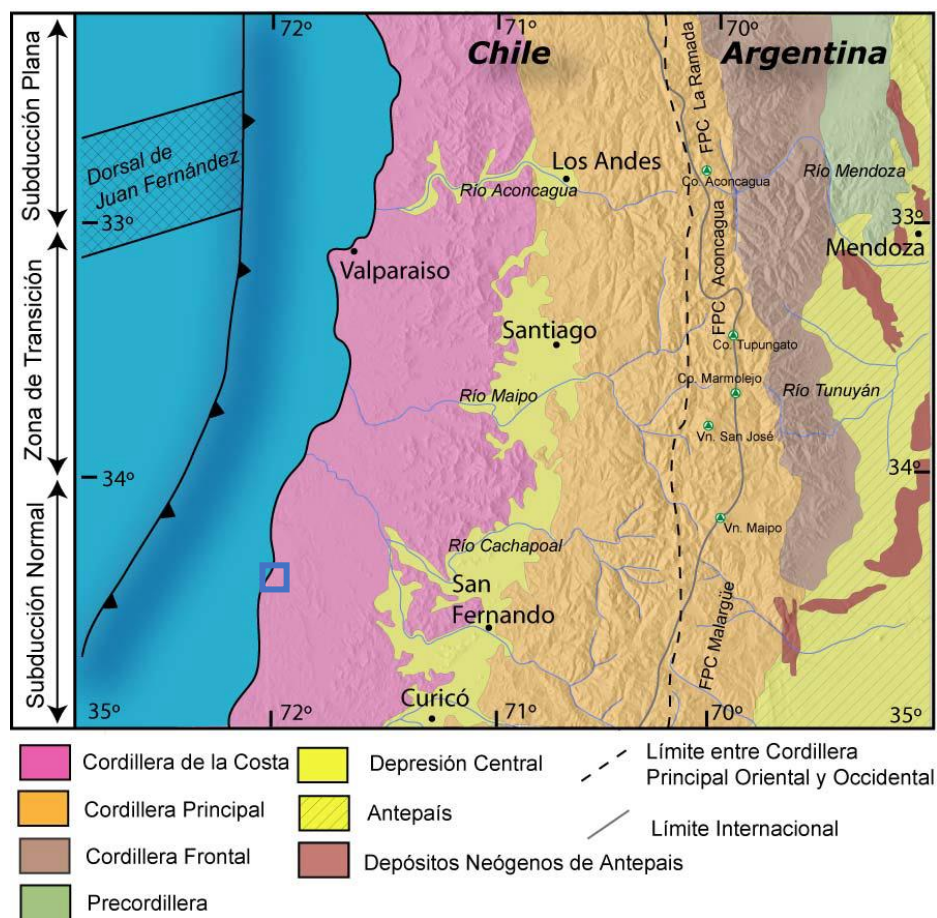


Figura 2: Principales unidades morfoestructurales en Chile central. Área de estudio enmarcada en celeste. Modificado de Fock (2005).

Geomorfología local

Según la Ilustre Municipalidad de Pichilemu en su plan de desarrollo comunal [PLADECO] (2021), la comuna de Pichilemu cuenta con 4 rasgos morfológicos generales, cordillera de la costa, terrazas marinas, planicies litorales y acantilados (Figura 3).

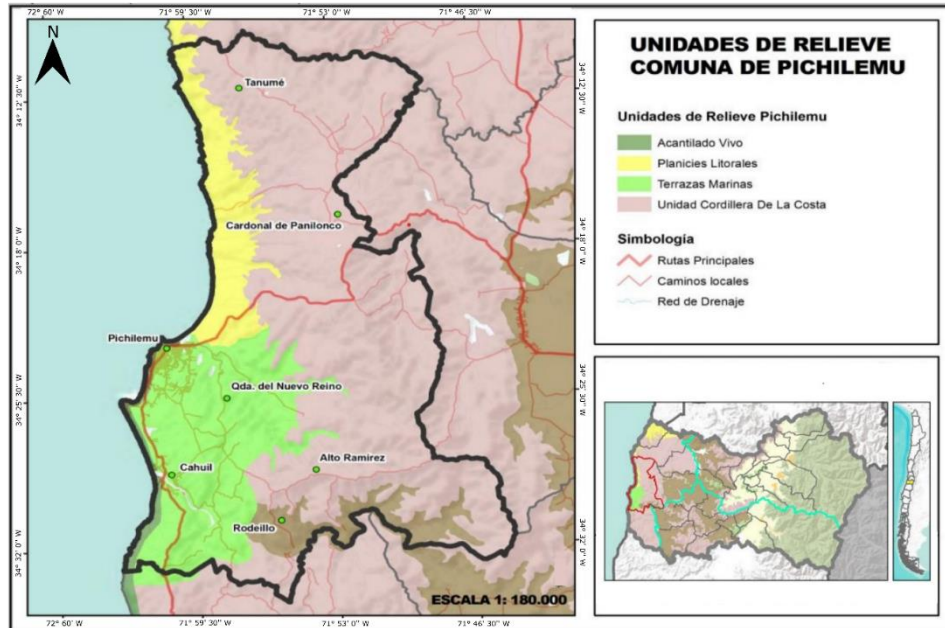


Figura 3: Se muestra los cuatros rasgos morfológicos de la comuna de Pichilemu, el área de estudio se encuentra desplazada en la unidad de las terrazas marinas (En color verde de la Figura). Modificado de PLADECO, (2021).

La Cordillera de la Costa a medida que se extiende hacia el oeste desciende gradualmente en altitud y se conecta con las terrazas de abrasión marina que se forman sobre las rocas metamórficas (García, 2007 en Lorca, 2013).

Las Planicies Litorales se encuentran en la región central-norte de la franja costera comunal, a altitudes que oscilan entre los 100 y 250 m s.n.m., su característica distintiva radica en la ausencia de una topografía fragmentada por quebradas prominentes. Al sur de estas planicies, se extienden terrazas de abrasión marina dispuestas de manera longitudinal (PLADECO, 2021).

Existen tres niveles de terrazas marinas diferenciadas altitudinalmente: Una terraza baja esculpida en rocas del zócalo de esquistos con cobertura de arenas en el sector Infiernillo (se presume que corresponde al área de estudio); una terraza media en el rango de los 50 m s.n.m.

con secuencia estratigráfica basal de rocas esquistosas del zócalo y sobreyacen depósitos de areniscas terciarias del grupo Navidad en la ensenada de Pichilemu; y un nivel superior de 90 a 115 m s.n.m. (Soto, 2005 en Lorca, 2013).

Al sur de Pichilemu, las terrazas marinas se ven interrumpidas por acantilados, tanto vivos como estabilizados. Estos acantilados exhiben escarpes de pendiente pronunciada, resultado de la erosión marina en rocas metamórficas. A lo largo de la totalidad de la línea costera, se extienden extensas áreas de playas y dunas (PLADECO, 2021).

Clima

Según la clasificación taxonómica de Köppen, la cual se basa en las características de precipitaciones y temperaturas de un determinado lugar, el área de estudio se encuentra dentro de la unidad climática denominada Mediterráneo, con temperaturas moderadas y estación seca en verano. La temperatura media mensual oscila entre los 9,3°C y los 18,6°C (Figura 4). Cabe mencionar que la humedad relativa es de 70% la mayor parte de los meses del año incluso aumenta en los meses de invierno hasta un 88%. Esto es resultado de la influencia marítima. La precipitación promedio anual es de 469 mm y el mes de mayor precipitación es en junio (Lorca, 2013; Climate.data.org).

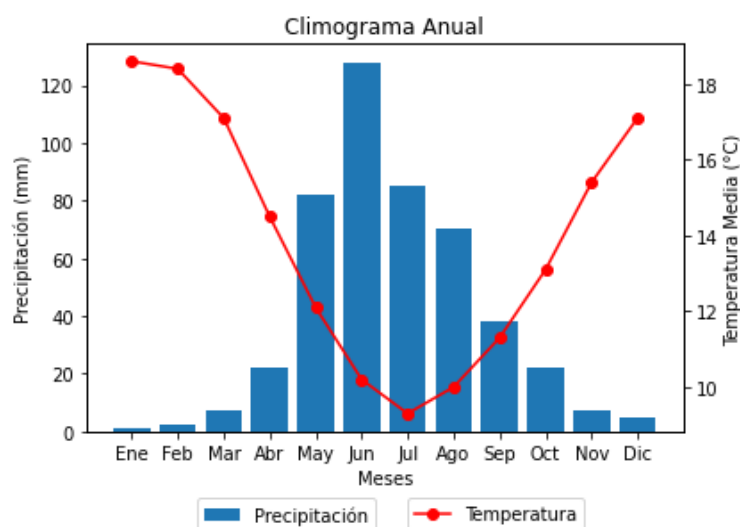
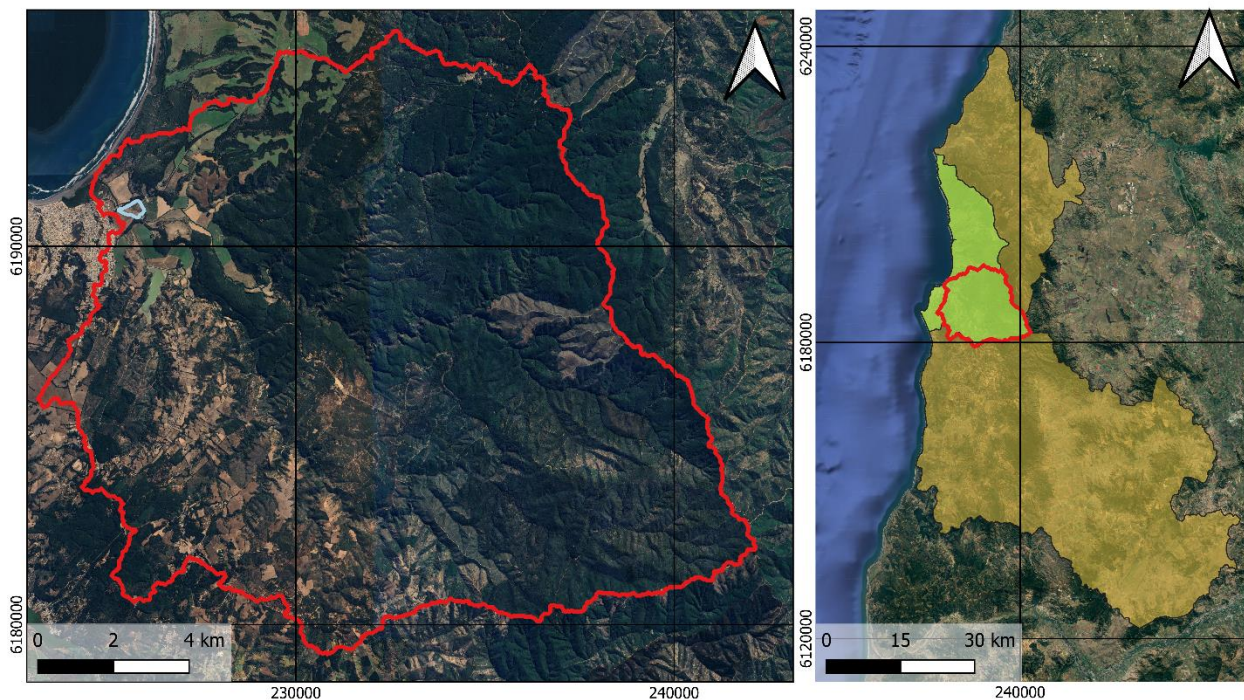


Figura 4: Climograma Anual de Pichilemu.
Elaboración Propia, Fuente: Climate.data.org

Hidrología

Según la DGA (2014a), en su división de cuencas se puede dar cuenta que, el área de estudio se ubica en la denominada ‘Cuenca Costeras Rapel – Estero Nilahue’, y a su vez pertenece a la ‘Subcuenca Entre Estero Topocalma y Estero Nilahue’ (Figura 5). Esta última, corresponde a un conjunto de pequeñas cuencas generadas en la cordillera de la Costa, cuya principal característica es que sus regímenes son esencialmente pluviales, característicos de la zona (PLADECO, 2021).

Dentro de este conjunto de cuencas que conforman la ‘Subcuenca Entre Estero Topocalma y Estero Nilahue’, y de la cual se ubica el área de estudio, se encuentra la denominada cuenca San Antonio, identificada en color rojo en la Figura 5 (Ver anexo 1), Según Ibarra (2013), esta cuenca presenta características hidromorfológicas que se detallan en la Tabla 1.



Leyenda

- Cuenca Costeras Rapel – Estero Nilahue
- Subcuenca Entre Estero Topocalma y Estero Nilahue
- Cuenca Estero San Antonio
- Área de Estudio

Figura 5: Se muestra la Cuenca y subcuenca, según el inventario de Cuencas de la DGA, además, se muestra la Cuenca San Antonio. Datos obtenidos de DGA (2014a). Elaboración propia.

Tabla 1: Se muestran parámetros hidromorfométricos de la cuenca San Antonio. Modificado de (Ibarra, 2013).

Nombre de la cuenca	San Antonio	Nombre de la cuenca	San Antonio
Área de Drenaje (Km ²)	199,3	Frecuencia de drenaje	1,07
Perímetro (Km)	65,2	Densidad de drenaje (Km/Km ²)	1,1
Pendiente media del área de estudio (°)	10,3	Numero de rugosidad	677,6
Desnivel máximo (m)	616	Coeficiente de compacidad	1,3
Longitud del cauce principal (km)	21	Magnitud de la cuenca	1172
Tiempo de concentración (Hrs)	2,7	Frecuencia de drenaje de los canales de primer orden	5,9

Geología del Área

Litología

La geología de la zona de Pichilemu, ubicada entre las coordenadas 34°S y 35°S, y entre los 71° 30'O y 72° 10'O, se caracteriza por la presencia del complejo metamórfico de Pichilemu del Paleozoico Tardío, el cual se divide en dos series principales: la Serie Oeste ubicada al sur de Pichilemu y la Serie Este al noreste de esta misma ciudad (Figura 6). Además de estas características, en la región también se encuentran cuerpos plutónicos graníticos calcoalcalinos, los cuales, se encuentran emplazados en la Serie Oeste, cabe mencionar que las unidades anteriormente descritas corresponden al basamento, el cual es cubierto en mayor parte por una capa de suelo grueso (Farias et al. 2011; Wilner, 2005).

Serie Oeste: Las rocas de la Serie Oeste se componen de esquistos verdes, esquistos azules, metacherts, metabasaltos de almohadilla y rocas calcosilicatadas. Esta se diferencia de la Serie Este, por poseer una foliación penetrativa menos espaciada y con minerales metamórficos de alta presión (Palape Reyes, 2014).

Serie Este: Las rocas de la Serie Este consisten en turbiditas deformadas, desarrollando porfidoblastos en las capas más lutíticas. En esta serie se identifican mica-esquistos de biotita,

mica-esquistos de granate, mica-esquistos de estaurolita y andalucita, gneises de sillimanita (Palape Reyes, 2014).

Sedimentos

A continuación, se proporcionará una descripción de los sedimentos que se encuentran en el área de estudio, estos, se ubican al norte y noreste de Pichilemu, y que cubren la Serie Este.

Sedimento cuaternario Q1: Está compuesto por depósitos granulares que abarcan desde gravas, arenas, limos y arcillas, distribuidos en alternancia entre depósitos granulares gruesos y depósitos granulares finos (Tabla 2 y Tabla 3). Estos sedimentos cuaternarios generalmente tienen un espesor regional relativamente reducido, oscilando entre 10 y 25 m desde la superficie (Servicio de Obras Sanitarias [SENDOS], 1980; Sernageomin, 2003).

Sedimentos Antiguos: De acuerdo con los registros geológicos los sondeos los cuales se ubican al sureste del área de estudio (Figura 7; Tabla 2 y Tabla 3), estos sedimentos se sitúan por debajo de los sedimentos cuaternarios, comenzando a unos 12 m de profundidad y extendiéndose hasta aproximadamente los 75 m. En esta capa, se encuentran tanto estratos aluviales de origen continental como capas de origen marino, además, se muestran alternancias entre capas de materiales finos y capas materiales gruesos (SENDOS, 1980).

Suelo

El mapa básico de suelos y capacidad de uso, derivado del 'Estudio Agrológico VI Región' realizado por CIREN en 1996, identifica tres series en el área de estudio: 'Asociación Alto Colorado', 'Terrazas del valle costero' y 'Asociación Matanzas'. Según los datos del proyecto URO RED 21992 sobre las características del terreno, se observa que el suelo se asemeja más a las características de la serie 'Asociación Matanzas'. Esta serie se caracteriza por ser un “suelo profundo, de textura superficial franco limosa de color pardo rojizo oscuro en el tono 5 YR y texturas arcillo limosa y arcillosa de color negro en el 5 YR y pardo rojizo oscuro en el tono 5 YR en profundidad” (CIREN, 1996, p. 431).

Es importante destacar que en el marco del proyecto URO RED 21992, se llevó a cabo una instalación de sensores en el suelo. Durante este proceso, se verificó el desarrollo de horizontes

y se identificaron rasgos redoximórficos. Estos hallazgos sugirieron que la zona en cuestión podría clasificarse como un Inceptisol. Sin embargo, se requeriría realizar una evaluación detallada del suelo con el objetivo de llevar a cabo su caracterización.

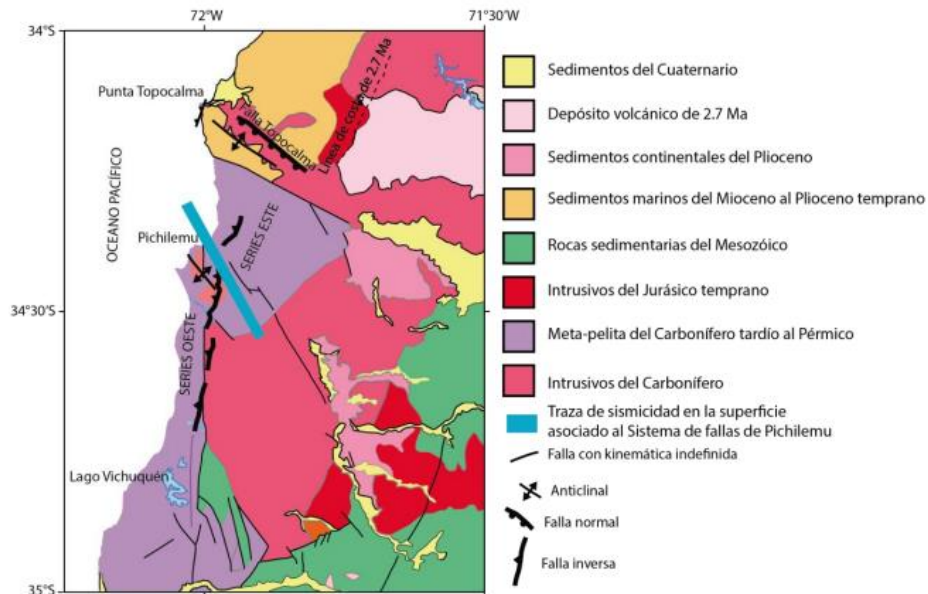


Figura 6: Mapa geológico de la región de Pichilemu. Modificado de Farias et al. (2011), extraído de Calle, (2018).



Figura 7: Se muestra la ubicación de los sondajes realizados por CORFO en 1953, Modificado de SENDOS, (1980).

Tabla 2: Sondaje N°1 San Antonio de Petrel. Nota: algunas descripciones fueron realizadas en el año en el que fueron descritas (1953), por lo que algunas definiciones pueden estar obsoletas (están demarcadas con un '¿?'). Fuente: CORFO, 1953; Extraído en (SENDOS, 1980).

Nombre	Profundidad [m]	Descripción	Clasificación Hidrogeológica
Sedimentos Cuaternario reciente	0 – 1	¿Tierra vegetal?	
	1 – 9	¿Terreno muy arcilloso?	
	9 – 12	Arena gruesa y ripio	Acuífero
Sedimentos antiguos	12 – 45	¿Terreno muy arcilloso?	
	45 – 49	Arena gruesa y ripio Acuífero	Acuífero
	49 – 69	Sin datos en registro CORFO	

Tabla 3: Sondaje N°2 Fundo San Antonio de Petrel. Nota: algunas descripciones fueron realizadas en el año en el año 1953, por lo que algunas definiciones pueden estar obsoletas (están demarcadas con un '¿?'). Fuente: CORFO, 1953; Extraído en (SENDOS, 1980).

Nombre	Profundidad [m]	Descripción	Clasificación Hidrogeológica
Sedimentos Cuaternario reciente	0 – 1	¿Tierra vegetal?	
	1 – 4	Arcilla	
	4 – 6	Arcilla y Arena	
	6 – 8,2	Arena y Arcilla	
	8,2 – 9	Ripio y Arcilla	Acuífero
	9 – 12	Arena y Arcilla	
	12 – 13	Ripio y poca Arcilla	Acuífero
Sedimentos antiguos	13 – 33,5	Arcilla y arena con fósiles	
	33,5 – 46	Arcilla compactada	
	46 – 49	¿Terreno arcilloso?	
	49 – 54,5	Ripio, arena y arcilla	Acuífero
	54,5 – 55,5	Conglomerado arcilloso	
	55.5 – 61	¿Tosca y roca?	
	61 – 75	¿Piedras? y ripio grueso cementado	

Estructuras

Según Farias et al. (2011), en la región de Pichilemu se encuentran estructuras neotectónicas que están asociadas a estructuras del cuaternario, de estas se pueden separar en dos grupos, según sus características de orientación y cinemática. En el primer grupo, línea negra de la Figura 8, las estructuras se encuentran orientadas N-S a NNE-SSO, y está relacionado con la deformación compresional asociado a un efecto producido en la etapa intersísmica del ciclo sísmico. En el segundo grupo, líneas rojas en la Figura 8, las estructuras están orientadas NO-SE a NNO-SSE, y su formación está relacionada con la deformación extensional asociado a un efecto producido en la etapa cosísmica del ciclo sísmico (Farías et al., 2011). Es importante destacar que, dentro de este último grupo, la traza de sismicidad superficial se localiza en las cercanías del área a modelar. Este podría ser el mecanismo por el cual se haya producido el afloramiento rocoso al sur de esta área.

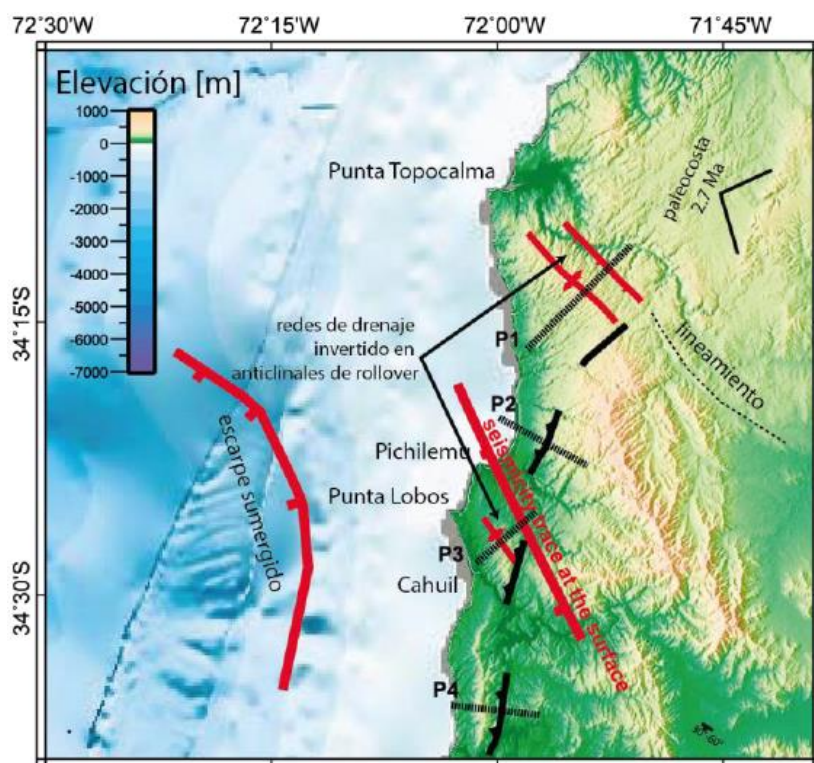


Figura 8: Estructuras neotectónicas de la región de Pichilemu. Las líneas rojas corresponden al grupo de estructuras extensionales con orientación NO, mientras que las líneas negras son estructuras compresivas orientadas N-S a NNE-SSO. Adaptado de Farías et al. (2011), extraído de Calle, (2018).

Hidrogeología

Acuífero

En conformidad a la geología, se identifica dos formaciones permeables en la zona, la primera, corresponde a los sedimento cuaternario, caracterizados por una granulometría de gravas, conglomerados, arenas y limos. La segunda formación permeable corresponde a estratos de sedimentos grueso (grava, arena gruesa) en la capa de sedimento antiguos ([SENDOS], 1980; Sernageomin, 2003)).

De acuerdo con el informe de SENDOS en 1980 sobre la descripción hidrogeológica de Pichilemu, estas dos formaciones permeables son identificadas como acuíferos y se disponen una sobre la otra. El acuífero superior es caracterizado como del tipo libre y se encuentra en sedimentos cuaternarios con una potencia de hasta 10 m desde la superficie y está situado sobre una capa impermeable. En contraste, el acuífero inferior es del tipo confinado y está contenido en sedimentos antiguos, ubicado a profundidades de 40 a 70 m. En su parte superior está limitado por la capa de sedimentos impermeable, mientras que su base está delimitado por el basamento geológico de la región.

Según la DGA (2014b), se denomina 'Acuífero Cuaternario Costero de Pichilemu' al acuífero libre previamente descrito por SENDOS en 1980. Este acuífero se encuentra al norte de Pichilemu y abarca una longitud de 10,8 Km de norte a sur, con una superficie de 37 km² (Figura 9). El acuífero se dispone al oeste en forma longitudinal a la línea de costa y es limitado lateralmente por los contactos de pizarras y filitas, las cuales rodean en su totalidad a la formación (DGA, 2014b), el límite inferior es estima alrededor de los 10 m desde la superficie, dado que se encuentra un contacto un una capa impermeable de arcilla (SENDOS, 1980).

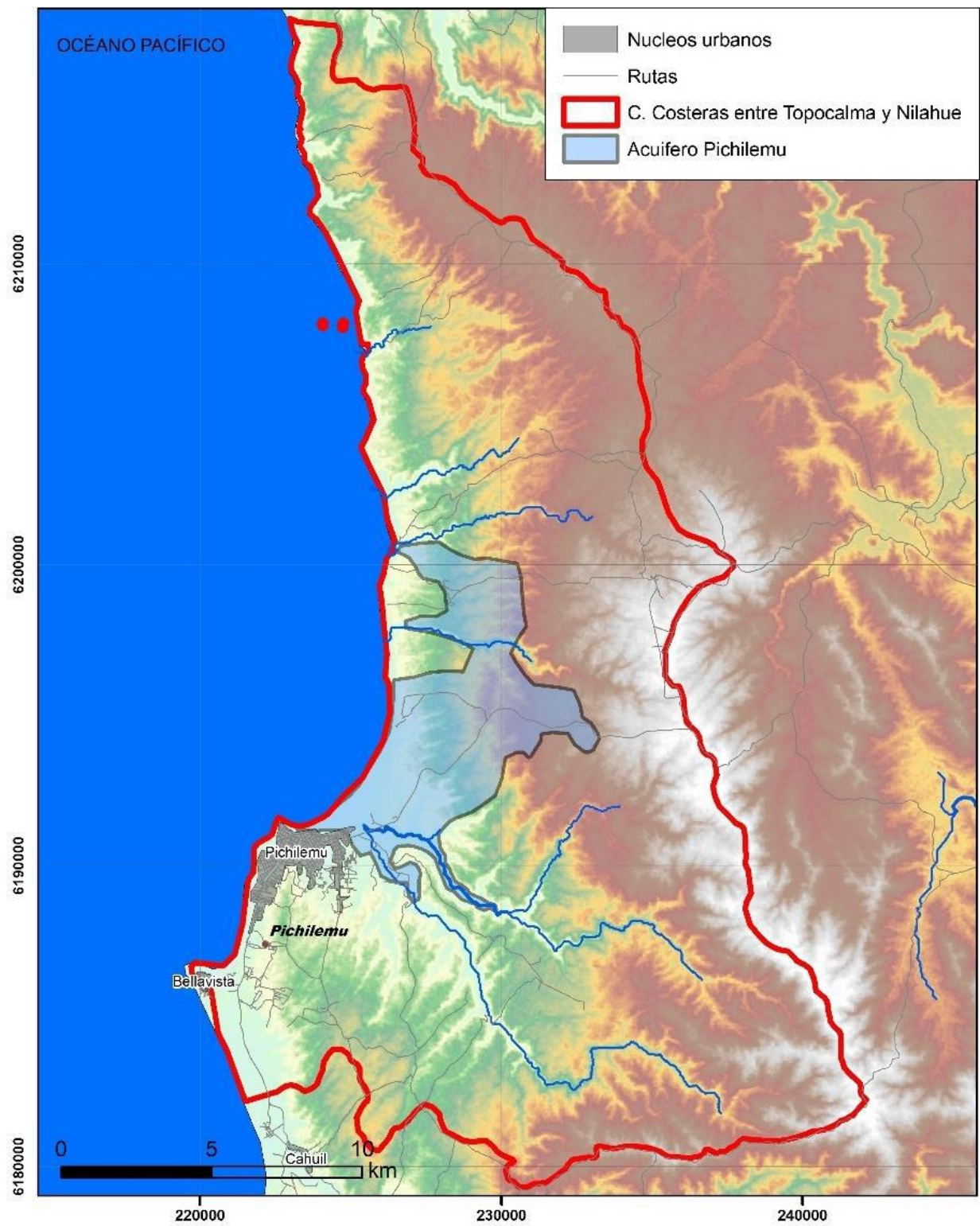


Figura 9: Ubicación y extensión del Acuífero Cuaternario de Pichilemu. Extraído de DGA (2014b).

Acuitardos y Acuicludos

Acuitardo: En este grupo se presenta la formación de pizarras y filitas Pz4b (Complejo metamórfico de Pichilemu), cuya permeabilidad primaria es considerada nula, pero, debido a la fisuración y fracturación, puede presentar una permeabilidad secundaria muy baja (DGA, 2013).

Acuicludo: Este corresponde a un estrato que constituye la separación entre el acuífero superior (Acuífero Cuaternario Costero de Pichilemu) y el acuífero inferior (acuífero confinante). Se trata de una capa de arcilla con un espesor de 33 metros (ver Tabla 2; Tabla 3). Debido a su composición, tiene la capacidad de almacenar agua, aunque su capacidad de transmisión es limitada.

Marco teórico

Hidrogeología y Concepto de acuífero

La hidrogeología estudia la ocurrencia, distribución, movimiento e interacción del agua subterránea, y se basa en la geología y la mecánica de fluidos (Hiscock, K. et al., 2014, Organización Meteorológica Mundial [OMM], 2012).

Las aguas subterráneas se encuentran en muchos tipos de formaciones geológicas; las más importantes son las conocidas como acuíferos. Un acuífero puede definirse como una formación que contiene suficiente material permeable saturado para proporcionar cantidades significativas de agua a pozos y manantiales. Esto implica la capacidad de almacenar y transmitir agua (Todd, D. K., & Mays, L. W. 2005).

Según Martínez et al., (2006), es posible clasificar los acuíferos en función de su estructura, y se identifican los siguientes tipos:

- **Acuíferos libres:** Estos acuíferos se caracterizan por tener un lecho impermeable en su base y una parte superior que se encuentra a presión atmosférica. La recarga de agua se produce de manera directa mediante la infiltración de las precipitaciones a través de la zona no saturada.

- **Acuíferos confinados:** Los acuíferos confinados se encuentran restringidos en su parte superior por una unidad geológica con una permeabilidad muy baja. La presión hidrostática en el nivel del techo es mayor que la atmosférica, y la recarga de agua ocurre de manera lateral.
- **Acuíferos semiconfinados:** En este tipo de acuífero, tanto la base como la parte superior están compuestas por estratos de roca con baja permeabilidad, lo que dificulta, pero no impide la circulación vertical del agua.

Ecuación General de flujo

La Ley de Darcy es una ley empírica que describe el flujo del agua a través de medios porosos saturados (1). Fue formulada por el ingeniero hidráulico francés Henry Darcy en 1856 y establece la relación entre la velocidad del flujo del agua, el área de sección transversal del medio poroso, la diferencia de carga hidráulica entre dos puntos, la conductividad hidráulica, y la longitud del camino que recorre el agua (Martínez et al., (2006)). La expresión matemática de la Ley de Darcy es la siguiente:

$$Q = A \cdot K \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (1)$$

Donde:

- Q es el caudal circulante [L^3T^{-1}].
- A es la sección del tubo normal al flujo subterráneo [L^2].
- K es la conductividad hidráulica [LT^{-1}].
- Δh es la pérdida de energía que experimenta el agua [L].
- Δl es la distancia recorrida por el agua a través de la arena [L].

De la aplicación de esta ley junto al principio de conservación de masa a un elemento de un acuífero, se deduce la ecuación general del flujo subterráneo (2), que define el movimiento tridimensional de agua subterránea a través de un sistema poroso (Martínez et al., (2006)).

A continuación, se presenta la ecuación general de flujo para un régimen transitorio ($\frac{\partial h}{\partial t} \neq 0$) en un medio homogéneo:

$$\left(K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - W \quad (2)$$

Donde K_x , K_y y K_z

son valores de conductividad hidráulica a lo largo de x, y, z. La variable h es la carga hidráulica. S_s es el almacenamiento específico del material poroso, t es el tiempo y W es el flujo volumétrico por unidad de volumen y representa el aporte y/o salida del agua.

Según Martínez P. et al. 2006, la ecuación general de flujo puede abordarse de tres maneras diferentes.

- Gráficamente: es aplicable solo en el régimen permanente, se trabaja sobre representaciones graficas de la situación del acuífero en un tiempo determinado.
- Analíticamente: Para un régimen ya sea permanente o transitorio, y para un acuífero confinado, semiconfinado y libre, se obtiene una solución analítica de la ecuación general de flujo, que es la ecuación de la superficie piezométrica en el entorno de un pozo a una determinada condiciones de bombeo.
- Numéricamente: Se resuelve la ecuación diferencial del flujo subterráneo mediante métodos numéricos. Mediante software permite la modelación del flujo subterráneo en una, dos y tres dimensiones, en medios homogéneos, heterogéneo, isótropos y anisótropos.

Principios de la modelación numérica de agua subterránea

Según Domenico & Schwartz (1997), la construcción de un modelo de aguas subterráneas requiere una serie de tareas diferentes. Los pasos principales incluyen: el desarrollo de un modelo conceptual, la creación del modelo y la ejecución de diversas pruebas, la evaluación de los resultados del modelo y la recopilación de nuevos datos o pruebas de validación en función del éxito de la calibración.

La herramienta de modelación de flujo de aguas subterráneas más utilizada es MODFLOW, este, un programa de código abierto distribuido por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Dentro de las numerosas interfaces gráficas de usuario (GUI) disponibles para MODFLOW, destaca Modelmuse, una aplicación desarrollada también por el USGS (Hughes, Langevin, & Banta, 2017).

MODFLOW es un modelo tridimensional de diferencias finitas. Este programa simula flujos en estado estable y transitorio en el cual las capas del acuífero pueden ser confinadas, libres o una combinación de ellos (Winston, 2009). Según Harbaugh A. (2005), la ecuación (3) es la base para la simulación de diferencias finitas, a partir de la ecuación diferencial parcial que define el movimiento tridimensional del agua subterránea:

$$\begin{aligned}
 & CR_{i,j-\frac{1}{2},k} (h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CR_{i,j+\frac{1}{2},k} (h_{i,j+1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + \\
 & CC_{i-\frac{1}{2},j,k} (h_{i-1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CC_{i+\frac{1}{2},j,k} (h_{i+1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + \\
 & CV_{i,j,k-\frac{1}{2}} (h_{i,j,k-1}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k+\frac{1}{2}} (h_{i,j,k+1}^m - h_{i,j,k}^m) + \\
 & P_{i,j,k} h_{i,j,k}^m + Q_{i,j,k} = SS_{i,j,k} (DEL R_j \cdot DEL C_i \cdot THICK_{i,j,k}) \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t^m - t^{m-1}}
 \end{aligned} \tag{3}$$

Donde: $h_{i,j,k}^m$, es el nivel hidráulico en una celda i, j, k en un periodo de tiempo m , CV, CR y CC son las conductancias entre los nodos i, j, k . $P_{i,j,k}$ es la suma de coeficientes de los niveles en términos de fuentes o salidas de agua. $Q_{i,j,k}$ es la suma de constantes en términos de las fuentes y salidas, donde si $Q_{i,j,k} < 0,0$ es un flujo de salida del sistema de agua subterránea y si $Q_{i,j,k} > 0,0$ es un flujo que ingresa. $SS_{i,j,k}$ es el almacenamiento específico. $DEL R_j, DEL C_i, THICK_{i,j,k}$ son las dimensiones de la celda i, j, k que multiplicadas representan el volumen de la celda. t^m es el tiempo en un periodo m .

Estas aproximaciones requieren que el dominio y el tiempo sean discretizados. En el proceso de discretización los dominios del modelo son representados por una malla de celdas (grid) de los elementos y el tiempo de la simulación es representado como etapas de tiempo. La precisión del modelo numérico dependerá de la calidad de la información de entrada en el modelo, del tamaño de la celda y la discretización del tiempo (a mayor tamaño de celda o paso de tiempo mayor error numérico) (Lamadrid, 2021).

Metodología

Con el propósito de evaluar la posible intrusión salina mediante la modelación de los flujos de agua subterránea, es esencial tener en cuenta la velocidad de dichos flujos, ya que, por lo general, se caracterizan por ser lentos. Esta baja velocidad conlleva a que el transporte de solutos también lo sea, ya que la advección se presenta como el principal mecanismo de transporte. Por tanto, para evaluar la potencial intrusión salina, se debe considerar periodos prolongados, periodos en donde se producen cambios sustanciales en los valores de recarga y extracción del pozo. Sin embargo, estas variaciones son oscilatorias, con periodos de retorno probablemente cortos en comparación al tiempo de transporte de soluto entre el estero y el pozo, por lo que se espera que el efecto de estas variaciones sobre el transporte se cancele aproximadamente a lo largo del tiempo. En este contexto, no es muy relevante simular estas variaciones, sino que basta con simular un régimen permanente representativo de las condiciones promedios de recarga y bombeo. Esta elección proporciona una aproximación que representa los procesos que ocurren en promedio a lo largo plazo, es decir considerando varios años, incluyendo variaciones interanuales. Además, la ventaja adicional radica en que este enfoque no requiere una carga computacional elevada.

En primer lugar, se llevó a cabo una recopilación, revisión y sistematización de los antecedentes cartográficos, geológicos, hidrológicos e hidrogeológicos disponibles. Estos datos servirán como base para la conceptualización, diseño y construcción del modelo, siguiendo criterios geomorfológicos, hidrológicos e hidrogeológicos.

Modelo conceptual

Tipo de acuífero

El área que se va a modelar forma parte del Acuífero Cuaternario Costero de Pichilemu, el cual, como se mencionó anteriormente corresponde a un acuífero libre que se emplaza en sedimentos granulares de grava, arena y arcilla. Como se apreció en los sondajes, existe una clara heterogeneidad en el eje vertical producto de la superposición de las capas de sedimentos. Sin embargo, se supondrá, como primera aproximación que este depósito de sedimentos es homogéneo e isotrópico.

Geometría del Área de estudio

Para definir la geometría del área de estudio, se estableció en primera instancia dos límites laterales, el primer límite se ajustó a la orilla del estero San Antonio, rodeando así el área a modelar en sus lados este, norte y oeste. El segundo límite, se determinó en función de las características geomorfológicas propias de la zona, donde se identifica la presencia de una colina (Figura 10), la cual se presume, que sea producto del emplazamiento del basamento rocoso, lo que, a su vez, puede deberse al efecto de la falla anteriormente mencionada. teniendo esto en cuenta, y asumiendo que la permeabilidad del basamento sea despreciable, se emplazó este límite siguiendo el inicio de la colina. El planteamiento anteriormente señalado es congruente por lo delimitado por la DGA (2014b), para este acuífero (Figura 9). Cabe señalar que este último límite, no conecta con el Estero San Antonio al oeste, por lo que se conectó arbitrariamente con el primer límite.

En cuanto a los límites superior e inferior, se asume que son paralelos entre sí (entiéndase como límite superior como la superficie topográfica). Esta suposición se fundamenta en el principio de superposición de los estratos sedimentarios y a la morfología distintiva del área de estudio, que exhibe una planicie aluvial con cambios topográficos despreciables. El límite inferior se establecerá a una profundidad 10 m desde la superficie, este valor, es concordante a la profundidad en donde comienza el emplazamiento de la capa de sedimento de arcilla.



Figura 10: Se muestra demarcado en naranja el afloramiento al sur del área a modelar.

Condiciones de bordes

La justificación de las condiciones de borde aplicadas a los límites mencionados anteriormente se basa en la manera en que fueron establecidos. El primer límite se considerará como un límite de carga impuesta, pues, este límite es el más conveniente para una cuerpo de agua, como es el caso para el Estero San Antonio. Para el segundo limite, se impondrá como un límite impermeable, dado que se asumirá que el afloramiento rocoso cuenta con permeabilidad despreciable, tal como lo menciona la DGA (2014b), bajo esta misma suposición, el límite inferior actuara de la misma forma, dado al horizonte arcilloso que para efecto de la modelación actuará como límite impermeable (Figura 11).

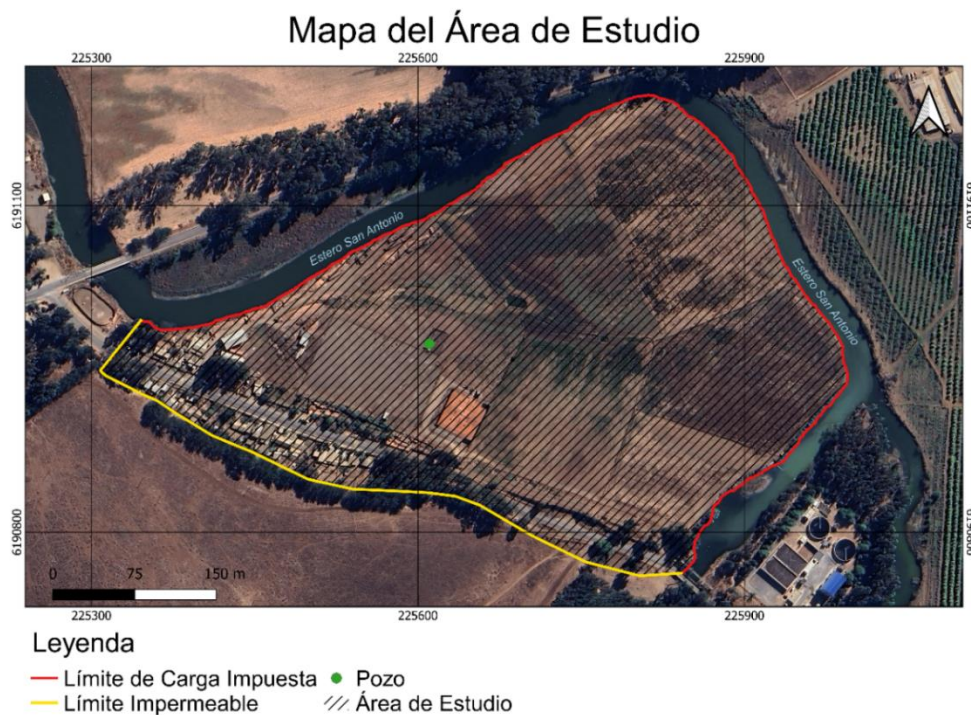


Figura 11: Mapa del área de estudio, se muestra la geometría y condiciones de borde. Elaboración propia.

Parámetros Hidráulicos

Según los datos recopilados por el proyecto URO RED 21992, se cuentan con valores de transmisividad obtenidos de una prueba de bombeo que tuvo una duración total de 2,4 hrs, con una descarga constante de 1,8 l/s. En esta evaluación se emplearon dos soluciones para el flujo radial de acción infinita. La primera solución, utilizando el método de Theis, dio como resultado

una transmisividad de $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Posteriormente, se aplicó la solución de Neuman, que arrojó una transmisividad de $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

En una prueba de bombeo más reciente y prolongada, de 3 hrs de duración, se corrigieron los datos mediante la corrección de Jacob y se empleó la solución de Theis. Esto condujo a obtener una transmisividad de $1,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (consultar desarrollo en el anexo 2). Cabe mencionar que se advierte cierta incertidumbre en este valor debido al efecto de almacenamiento del pozo y a la corta duración de la prueba de bombeo. A pesar de ello, se optó por utilizar este valor para la obtención del coeficiente de permeabilidad de $1,3 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ (consultar desarrollo en el anexo 2), del cual, se empleó en la modelación.

Estimación de la Recarga

En un estudio llevado a cabo por la DGA en 2013, se determinó la recarga de la 'Subcuenca Entre Estero Topocalma y Estero Nilahue'. Este parámetro se determinó mediante una caracterización del suelo, considerando el espesor radicular y la capacidad de campo, cuyos valores fueron extraídos del 'Estudio Agrológico VI Región' realizado por el Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), (1996). Posteriormente, utilizando el software EASY_BAL, que emplea el método de Thornthwaite, se estimó una recarga hídrica anual, cuyo valor es 68,39 mm, cabe mencionar que este valor puede ser poco representativo dado a que solo se contempló un año para el cálculo de la recarga, pero aun así se utilizará para la posterior modelación, pues, es el valor con menor incertidumbre encontrado en la documentación disponible (Anexo 3). Ante esta incertidumbre se realizará un análisis de sensibilidad para este parámetro, cuya características se detallarán posteriormente.

Estimación del caudal de Bombeo anual

El propietario del terreno, Don Eugenio Leiva, ha comunicado que la municipalidad de Pichilemu extrae agua proveniente del pozo de estudio para el riego de los parques comunales. Este proceso se lleva a cabo durante los meses de verano (en los días de semana), comprendidos entre noviembre y marzo, este relato es congruente con los datos recopilados por el sensor instalado en el pozo (Figura 12).

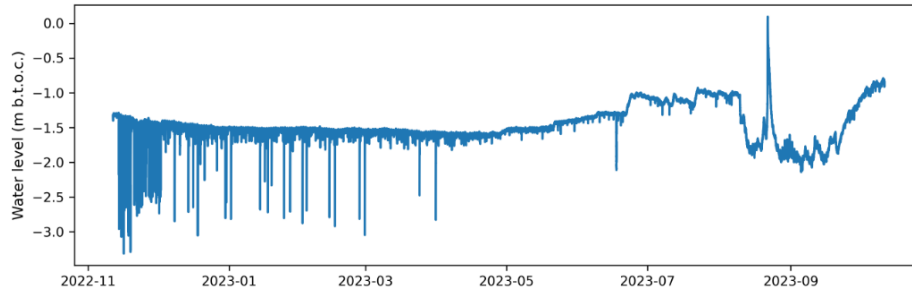


Figura 12: Se muestra los registro del nivel de agua, en donde los peak de descenso de este nivel es indicativo de bombeo del pozo. Datos extraído del Proyecto URO RED21992.

Para llevar a cabo esta operación, llenan un camión aljibe con capacidad para 15.000 l en cada visita. Se estima que realizan múltiples viajes al día, alcanzando una extracción total diaria de aproximadamente 100.000 l. Estas extracciones se llevan a cabo cinco días a la semana, a excepción de los feriados o días de lluvia.

Dado a que la modelación a realizar es un promedio anual, se llevará esta extracción de cinco meses a una extracción promedio anual. Para esto, se considera un bombo del pozo de 100.000 L por día, 5 días por semana, durante 5 meses (noviembre–marzo), esto resulta en 100 días de extracción efectivas (Formula 4), ya con esto con esto se obtiene el volumen total extraído en los días de extracción.

$$\text{Días de Extracción} = 5 \text{ días} \cdot 4 \text{ semanas} \cdot 5 \text{ meses} = 100 \text{ días} \quad (4)$$

$$\text{Volumen extraído} = \text{volumen diario} \cdot \text{días de Extracción} = 100.000 \left(\frac{l}{\text{Día}} \right) \cdot 100 (\text{Día})$$

$$\text{Volumen extraído} = 10.000.000 \text{ l}$$

y considerando los días en un año son uno 365 días, se tiene un caudal de bombeo anual promedio de 27.397,2603 l/día o $3,1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$. Al igual que para la recarga, se realizará un análisis de sensibilidad para este paramento, cuya características se detallarán posteriormente.

Modelo Numérico

Tras definir los parámetros del área de estudio, se procedió a utilizar MODFLOW–2005 en la interfaz gráfica ModelMuse, este modelo se configuró con unidades en metros y en segundos, además, se utilizó un EPSG igual a 32719, posteriormente se creó una grilla de 5x5 m. El solver empleado es el ‘Preconditioned Conjugate Gradient package’ (PCG en sus siglas en ingles), cuya

configuración se dejó por defecto, a excepción de dos parámetros: 'Max. Abs change in head (HCLOSE)' y 'Max. Abs. Residual (RCLOSE)', que, dada a las pequeñas variaciones de carga hidráulica en el área de estudio, se aplicó un criterio más estricto que lo usual, resultando un valor asignado de 0,0001 m y de 0,0001 m³/s respectivamente.

Se activaron los paquetes de MODFLOW correspondientes: CHD (*Time-Variant Specified-Head package*), RCH (*Recharge Package*) y WEL (*Well Package*). Es fundamental resaltar que se fijó el nivel de la superficie del área de estudio en una coordenada z de 0 m. Además, se estimó la piezometría del estero San Antonio en -0,2 m (20 cm por debajo de la superficie).

El modelo se configuró con dos periodos (Figura 13), con el propósito de analizar el descenso provocado por la extracción del pozo y, con esto, poder determinar su área de influencia. Para este estudio, se estableció el límite del área de influencia para un descenso igual a 0,01 m (1 cm). El primer periodo, se configuró sin bombeo y se determinó como el de referencia (Figura 13), a diferencia del segundo período en el cual se aplicó el efecto del bombeo. Es importante destacar que tanto la recarga como la carga impuesta se mantuvieron constantes en ambos periodos.

Stress period	Starting time	Ending time	Length	Max first time step length	Multiplier	Steady State/ Transient	Drawdown reference	Number of steps (calculated)
1	0	86400	86400	86400	1	Steady state	☒	1
2	86400	172800	86400	86400	1	Steady state	☐	1

Figura 13: Configuración empleada en el apartado 'Time' en ModelMuse.

Posteriormente, se llevó a cabo un análisis mediante MODPATH con el objetivo de determinar el área de captación del pozo y las líneas de flujo. La configuración de MODPATH se realizó de la siguiente manera: se eligió el tipo de simulación 'Pathlines', se estableció la dirección de las trayectorias como 'Backward' y se optó por la opción 'Stop at termination points' para finalizar las trayectorias. Además, se definió el objeto 'Pozo' con MODPATH activado, generando una cuadrícula de partículas en las caras laterales de la celda (20x10x10 partículas por lado). Similarmente, se configuró el límite de carga constante para que en cada celda haya una partícula, lo que permitió obtener las líneas de flujo para toda el área de estudio. Al concluir este proceso,

se exportaron los resultados y se creó un polígono en QGIS utilizando la parte final de las líneas, obteniendo así el área de captación del pozo.

Resultados

Modelación Base

A continuación, se presentan los resultados de la modelación base en las figuras 14, 15 y 16, destacando un porcentaje de discrepancia del 0,14% para el primer periodo y un -0,04% para el segundo.

El análisis del balance hídrico, detallado en la Tabla 4, revela aspectos significativos sobre el flujo de agua en dos períodos distintos. Durante el primer periodo, la entrada de agua al área de estudio proviene exclusivamente de la recarga, y la salida del agua se efectuó totalmente hacia el estero San Antonio.

En el segundo periodo, con la implementación del bombeo del pozo, se observa que el 80,06% del agua que llega al área de estudio proviene de la recarga, mientras que el 19,94% proviene directamente del estero San Antonio. Del flujo total que sale del área de estudio, el 73,15% se extrae mediante el bombeo del pozo, mientras que el 26,85% restante se dirige hacia el estero.

Tabla 4: Se muestra el balance hídrico obtenido de la modelación. Elaboración propia.

Primer Periodo (m ³ /s)				Segundo Periodo (m ³ /s)			
IN		OUT		IN		OUT	
Carga Const.	Recarga	Carga Const.	Pozo	Carga Const.	Recarga	Carga Const.	Pozo
0	3,469·10 ⁻⁴	3,465·10 ⁻⁴	0	8,641·10 ⁻⁵	3,469·10 ⁻⁴	1,164·10 ⁻⁴	3,171·10 ⁻⁴

Este ingreso de agua desde el estero se visualiza claramente en la Figura 14, donde se aprecia que el área de captura del pozo alcanza el límite de carga impuesta, lo que provoca la entrada de agua del estero San Antonio al área de estudio. Por otro lado, en la Figura 14 y 15 se observa la salida de agua desde el área de estudio hacia el estero, esto producto de una franja de elevado nivel piezométrico, que se ubica principalmente al este del área de estudio, con una

extensión mínima al suroeste del modelo (representada en tonos rojizos), esta franja evidencia una bifurcación en los flujos de agua: en donde una porción se dirige hacia el estero, mientras que otra se encamina hacia el pozo debido al efecto del cono de depresión generado por el bombeo.

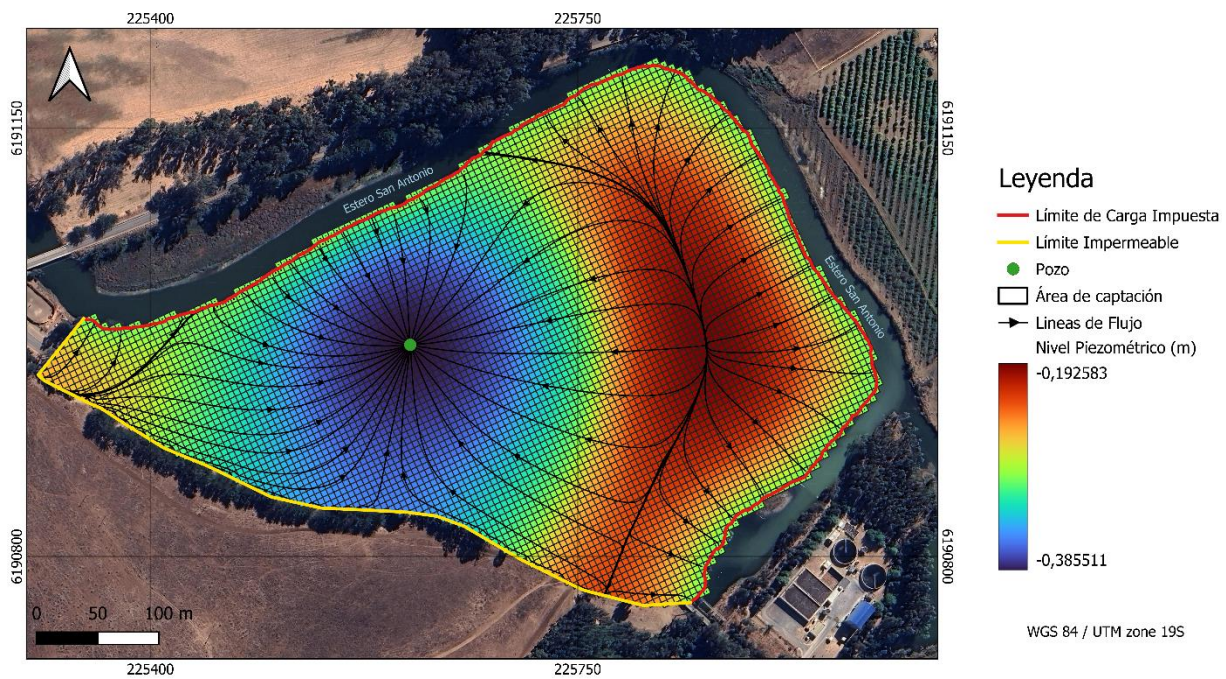
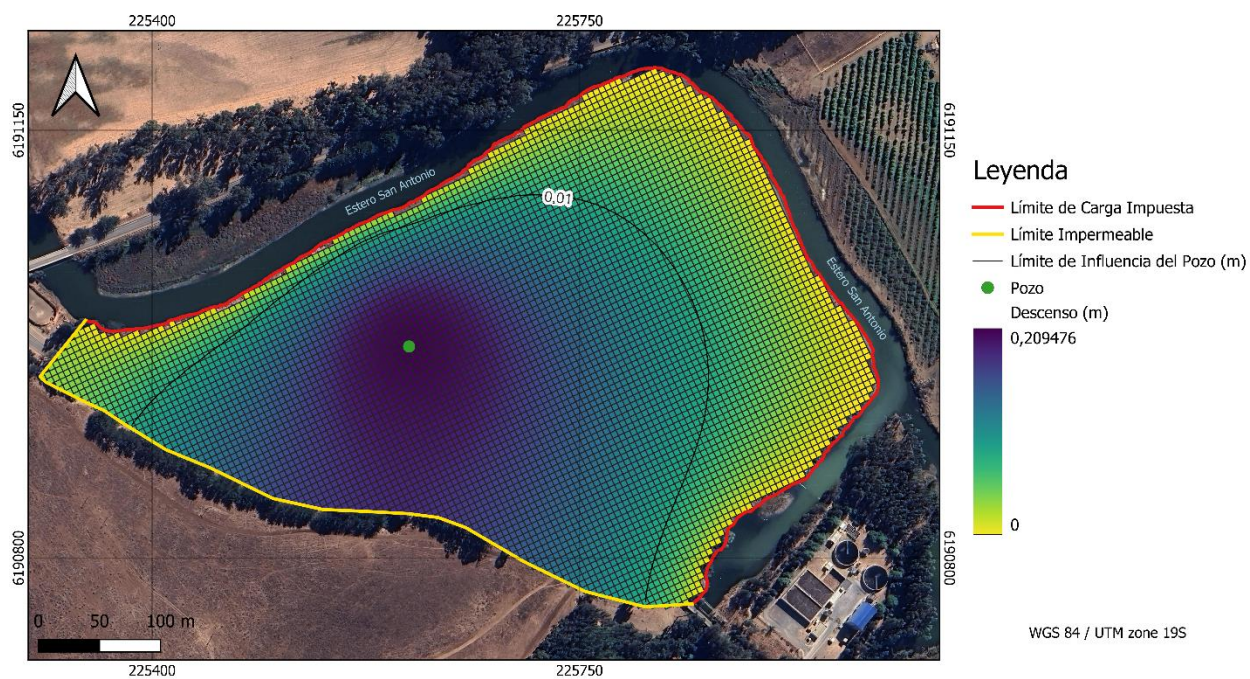
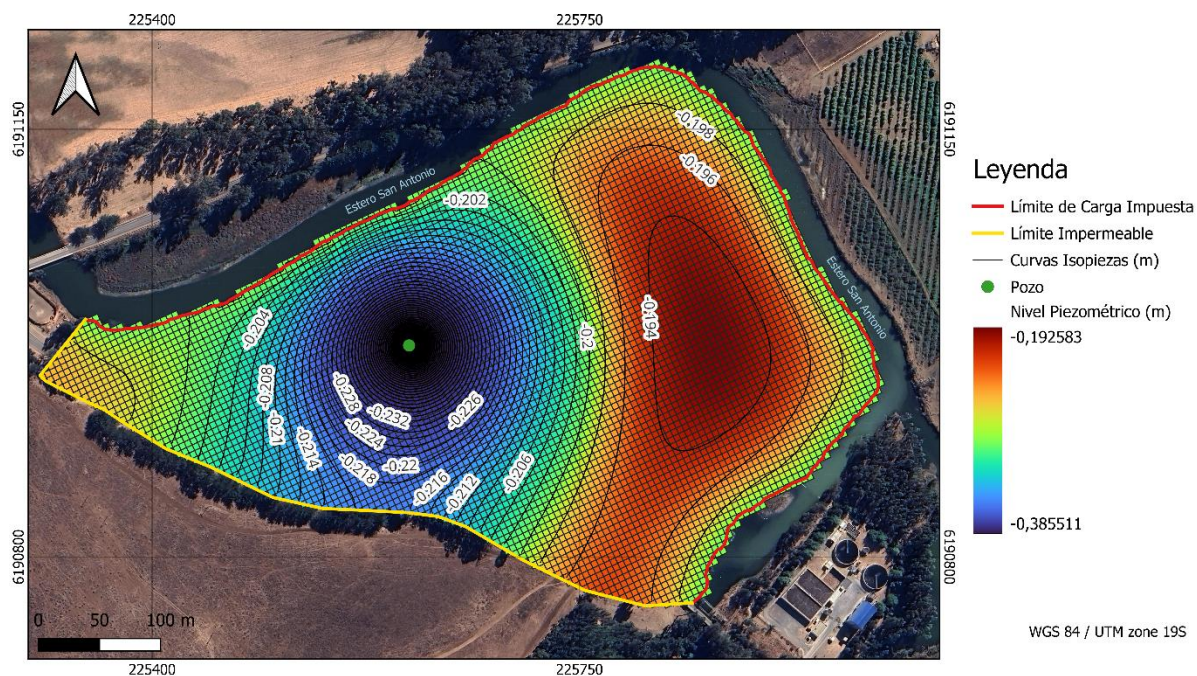


Figura 14: Se muestra el resultado de la modelación de flujo. Notar la líneas de flujo que ingresan al área de estudio. Nota: la escala de color no es lineal. Elaboración propia.



Análisis de sensibilidad

Frente a la incertidumbre relacionada con los parámetros utilizados en el proceso de modelación, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad centrado en los dos parámetros de mayor incertidumbre: el caudal de bombeo y la recarga. Se diseñaron modelos que incorporaron variaciones del -50% al +50% en estos valores, lo que derivó en la creación de cuatro modelos distintos, cuyos resultados, se muestran en las figuras 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27 y 28. La Tabla 5 detalla los valores ajustados en cada uno de ellos.

Tabla 5: Se muestran los valores sin variación empleados en la modelación base y los valores ajustados en un -50% y un +50%. Elaboración propia.

Parámetros	-50%	Valores sin variación	+50%
Recarga (m/s)	$1,1 \cdot 10^{-9}$	$2,17 \cdot 10^{-9}$	$3,2 \cdot 10^{-9}$
Bombeo (m^3/s)	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$3,1 \cdot 10^{-4}$	$4,7 \cdot 10^{-4}$

Caso menos 50% de Recarga

Para esta variación de la recarga, se tiene que el agua que ingresa al área de estudio se distribuye en un 48,12% proveniente del estero San Antonio y un 51,88% proviene de la recarga. Por otro lado, se tiene que el agua total que sale del área de estudio tiene un 5,17% que se descarga hacia el estero y un 94,83% es extraído por el bombeo del pozo (Tabla 6). En las Figuras 17 y 18, se observa que la franja de divergencia disminuye y se desplaza hacia el noreste del área de estudio, manifestándose en un área de captación considerablemente mayor, la cual abarca casi en su totalidad el área de estudio (Figura 14 y 17). No obstante, no se aprecia diferencias en el límite de influencia del pozo, ya que es prácticamente idéntico al caso base (Figura 16 y 19).

Tabla 6: Se muestra el balance hídrico obtenido de la modelación con menos 50% de Recarga. Elaboración propia.

Primer Periodo (m ³ /s)				Segundo Periodo (m ³ /s)			
IN		OUT		IN		OUT	
Carga Const.	Recarga	Carga Const.	Pozo	Carga Const.	Recarga	Carga Const.	Pozo
0	$1,735 \cdot 10^{-4}$	$1,734 \cdot 10^{-4}$	0	$1,609 \cdot 10^{-4}$	$1,735 \cdot 10^{-4}$	$1,730 \cdot 10^{-5}$	$3,171 \cdot 10^{-4}$

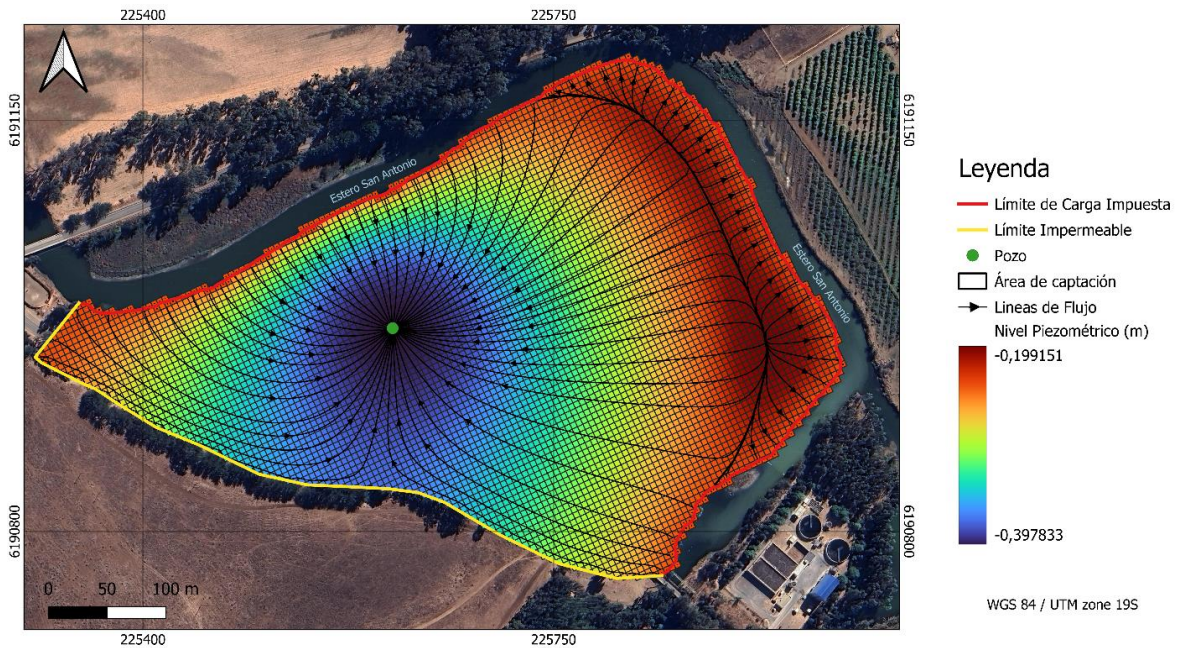
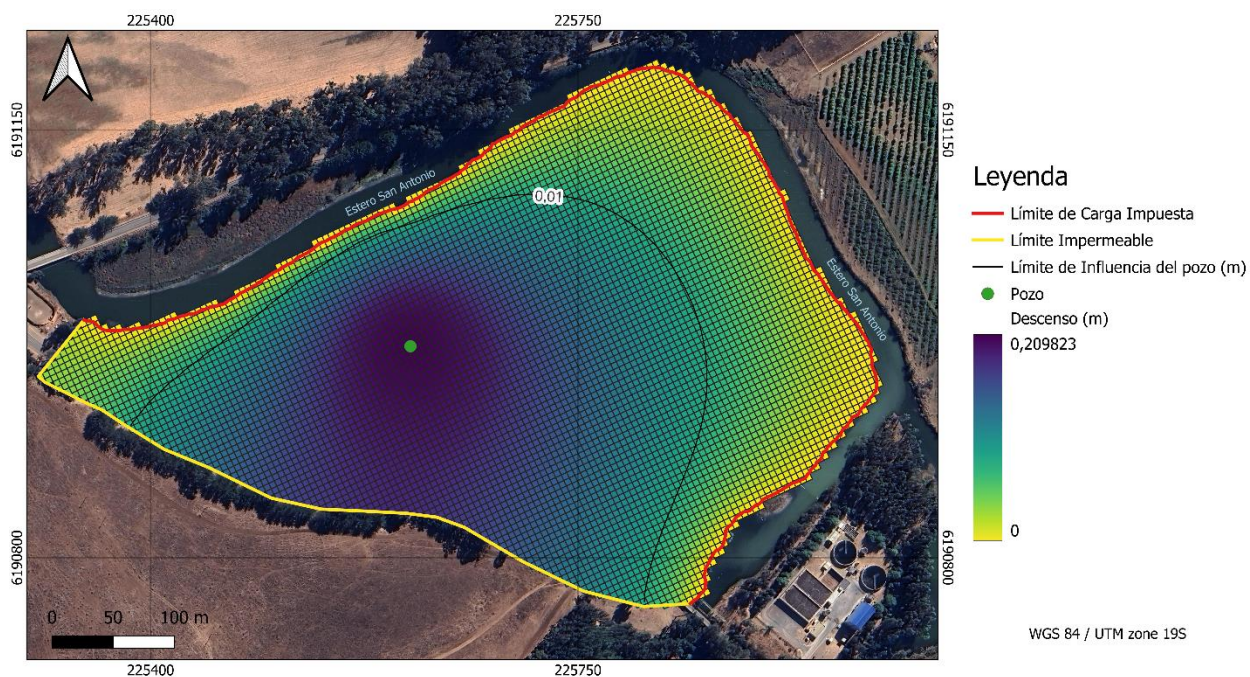
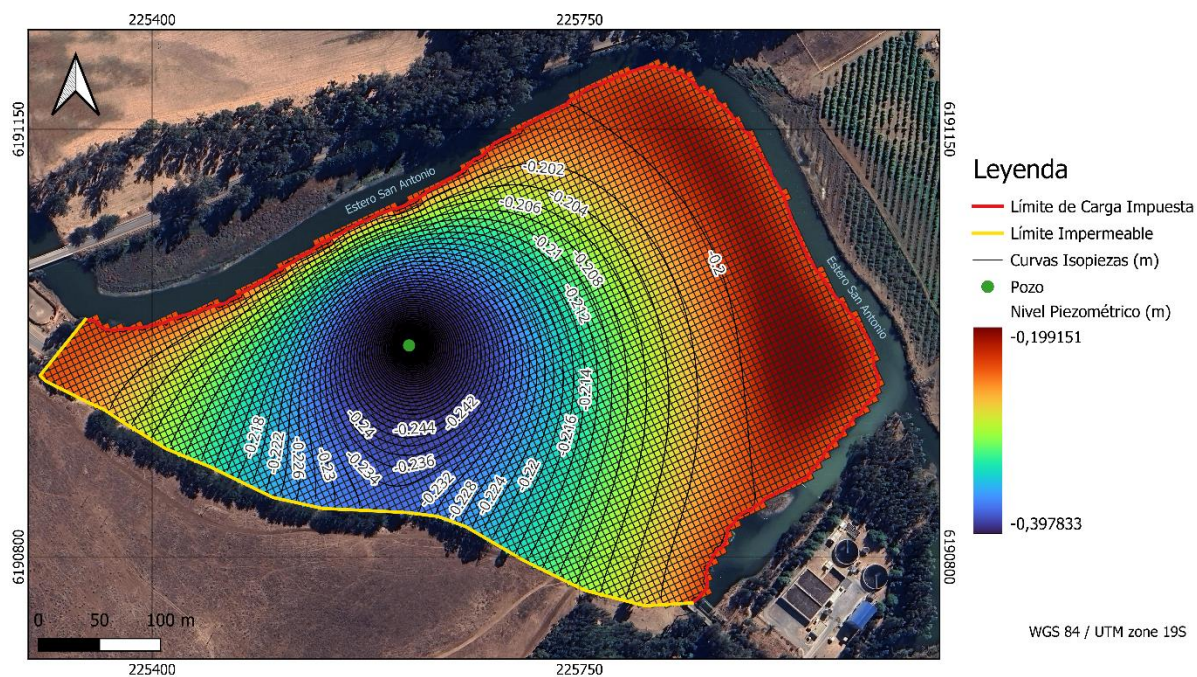


Figura 17: Se muestra el nivel piezométrico resultante para un 50% menos de Recarga, junto con las líneas de flujos. Nota: la escala de color no es lineal. Elaboración propia.



Caso menos 50% de Bombeo

En este escenario con menor bombeo, el 1,63% del agua que ingresa al área de estudio proviene del estero, mientras que el 98,37% se origina en la recarga. En cuanto al total del agua que sale del área de estudio, un 55,14% se descarga en el estero San Antonio y un 44,86% se extrae del pozo (Tabla 7). En las Figuras 20 y 21, se observa que la franja de mayor valor de piezometría mencionada anteriormente aumenta su extensión en contraste con el cono de depresión, cuyo límite de influencia disminuye, al igual que su área de captura en comparación con la modelación base (Figura 20, 21 y 22).

Tabla 7: Se muestra el balance hídrico obtenido de la modelación con menos 50% de Bombeo. Elaboración propia.

Primer Periodo (m ³ /s)				Segundo Periodo (m ³ /s)			
IN		OUT		IN		OUT	
Carga Const.	Recarga	Carga Const.	Pozo	Carga Const.	Recarga	Carga Const.	Pozo
0	$3,472 \cdot 10^{-4}$	$3,467 \cdot 10^{-4}$	0	$5,763 \cdot 10^{-6}$	$3,472 \cdot 10^{-4}$	$1,949 \cdot 10^{-4}$	$1,586 \cdot 10^{-4}$

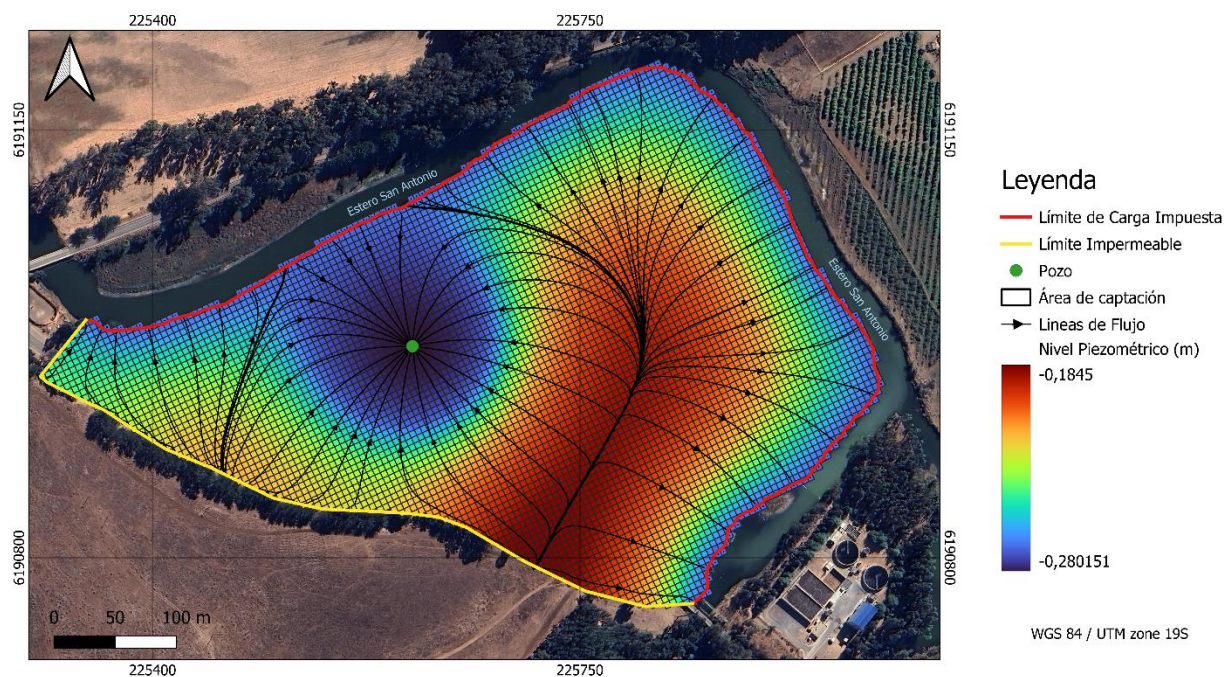
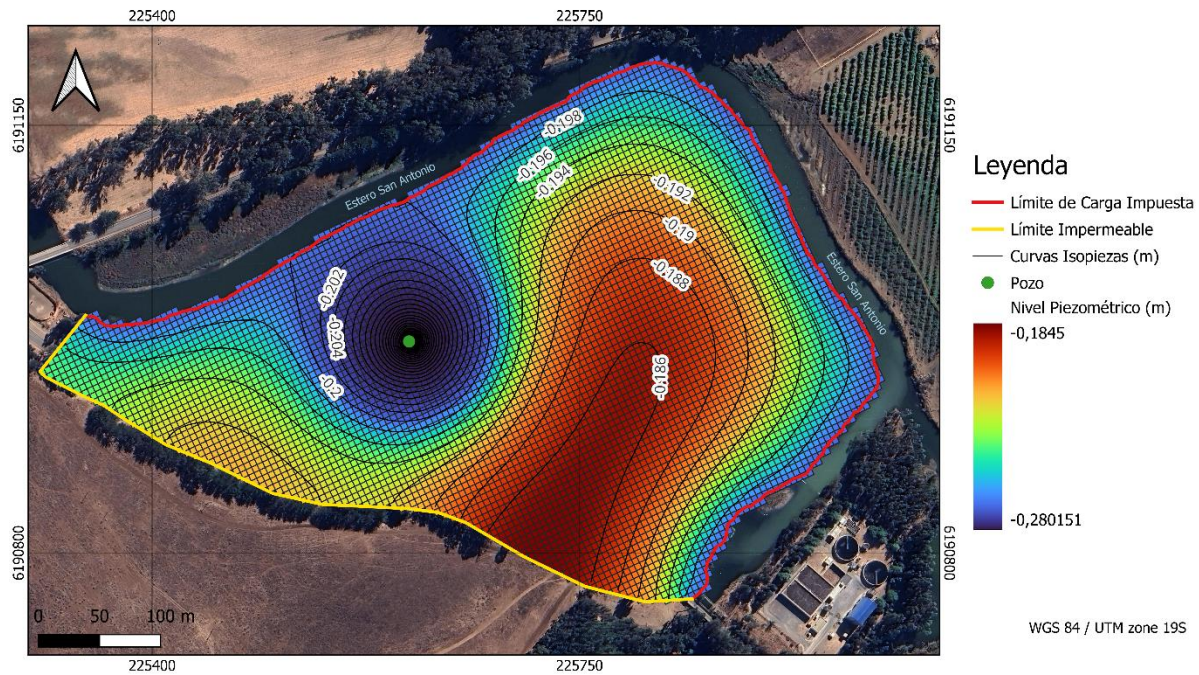


Figura 20: Se muestra el nivel piezométrico resultante para un 50% menos de Bombeo, junto con las líneas de flujos. Nota: la escala de color no es lineal. Elaboración propia.



Caso más 50% de Recarga

En este escenario de mayor recarga se tiene que el agua que ingresa al área de estudio proviene en un 7,25% del estero y en un 92,75% proviene de la recarga. Del total de agua que sale del área de estudio, un 43,51% es descargada al estero san Antonio y un 56,49% es extraída del pozo (Tabla 8). En las Figura 23 y 24, se aprecia que la franja de mayor valor de piezometría aumenta su extensión al igual que para la variación de 50% menos de bombeo, esto en contraste al cono de depresión, cuyo límite de influencia disminuye, así como también su área de captura en comparación a la modelación base (Figura 23, 24 y 25).

Tabla 8: Se muestra el balance hídrico obtenido de la modelación con más 50% de Recarga. Elaboración propia.

Primer Periodo (m ³ /s)				Segundo Periodo (m ³ /s)			
IN		OUT		IN		OUT	
Carga Const.	Recarga	Carga Const.	Pozo	Carga Const.	Recarga	Carga Const.	Pozo
0	$5,205 \cdot 10^{-4}$	$5,199 \cdot 10^{-4}$	0	$4,071 \cdot 10^{-5}$	$5,205 \cdot 10^{-4}$	$2,443 \cdot 10^{-4}$	$3,171 \cdot 10^{-4}$

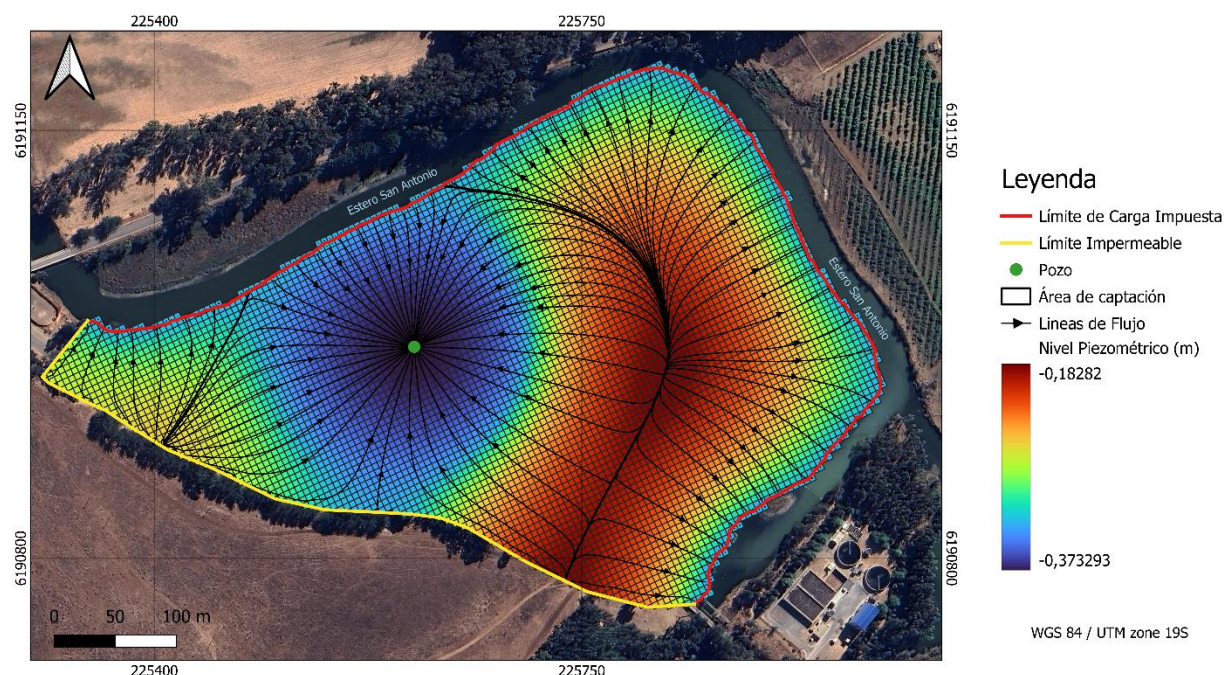
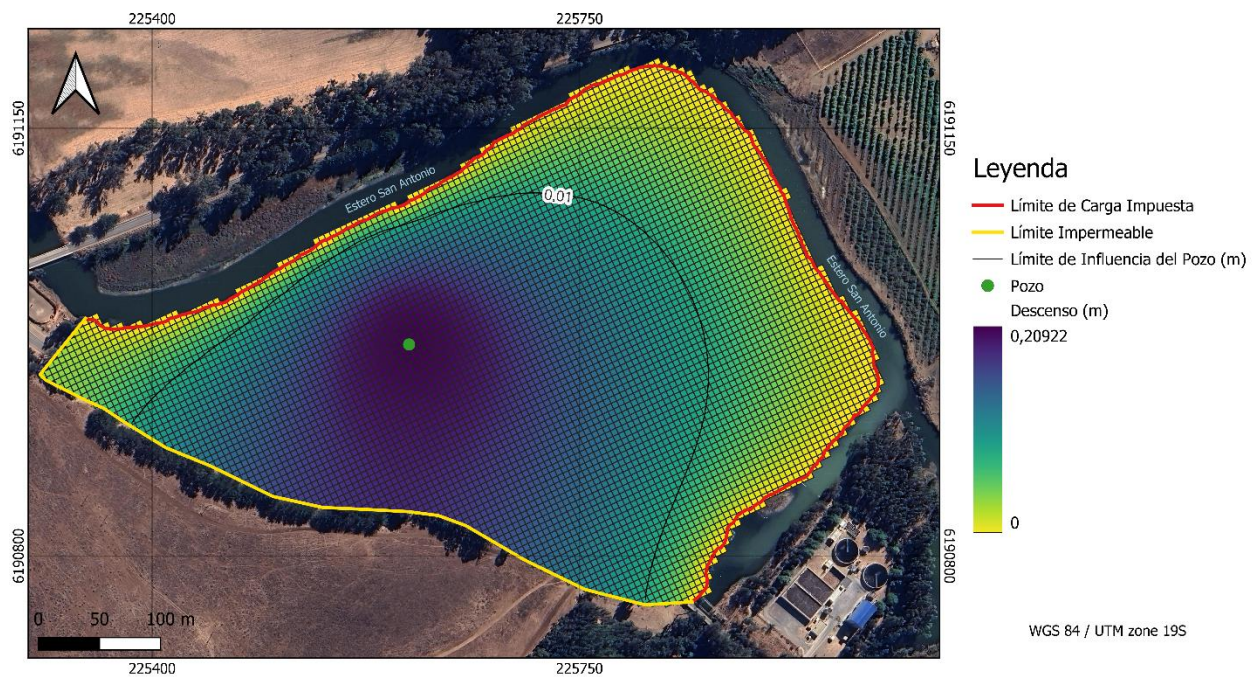
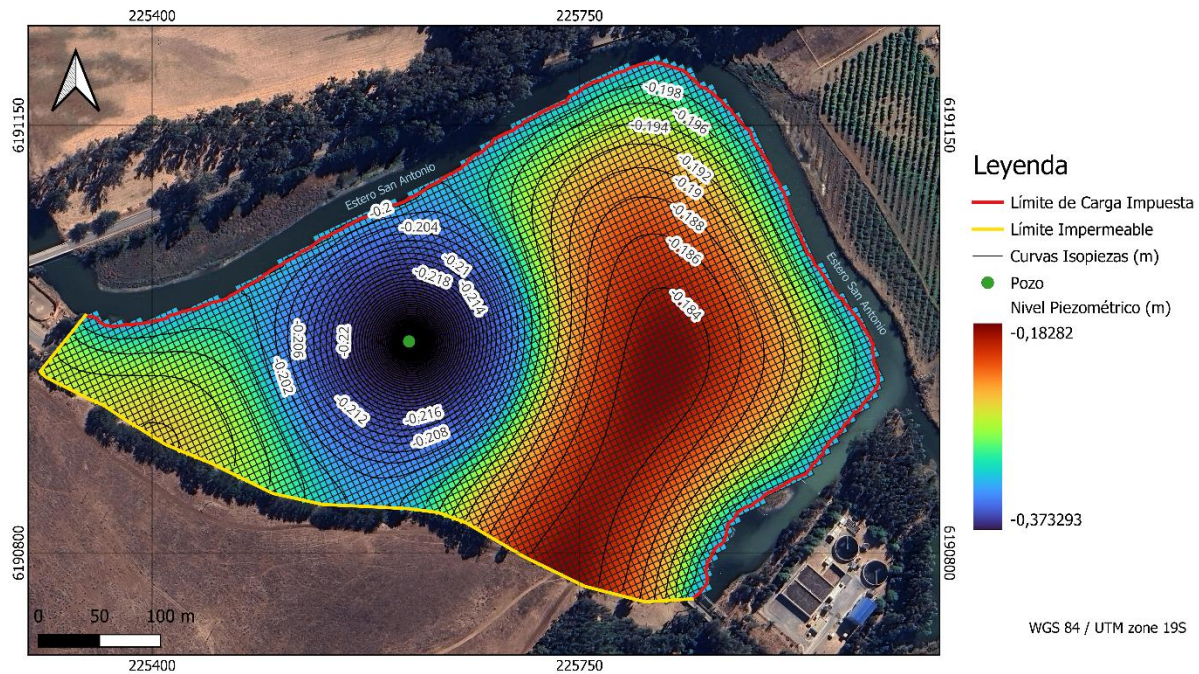


Figura 23: Se muestra el nivel piezométrico resultante para un 50% más de Recarga, junto con las líneas de flujos. Nota: la escala de color no es lineal. Elaboración propia.



Caso más 50% de Bombeo

En este escenario, se tiene que el agua que ingresa al área de estudio proviene en un 35,80% del estero y en un 64,20% proviene de la recarga. En contraparte, del total de agua que sale del área de estudio, un 12,06% es descargada al estero san Antonio y un 87,94 % es extraída del pozo. En la Figura 26 y 27 se aprecia un efecto similar al escenario de menos 50% de recarga, en donde la franja de mayor valor de piezometría se ve disminuida y desplazada al noreste del área de estudio. Pero en contraste, se tiene un mayor área de influencia, pero una menor área de captación que se traduce en una única entrada de agua en el parte noroeste, a diferencia al caso de menos 50% de recarga, la cual tiene dos zonas de ingreso de agua desde el estero (Figuras 26, 27 y 28).

Tabla 9: Se muestra el balance hídrico obtenido de la modelación con más 50% de Bombeo. Elaboración propia.

Primer Periodo (m³/s)				Segundo Periodo (m³/s)			
IN		OUT		IN		OUT	
Carga Const.	Recarga	Carga Const.	Pozo	Carga Const.	Recarga	Carga Const.	Pozo
0	$3,472 \cdot 10^{-4}$	$3,467 \cdot 10^{-4}$	0	$1,936 \cdot 10^{-5}$	$3,472 \cdot 10^{-4}$	$6,525 \cdot 10^{-4}$	$4,757 \cdot 10^{-4}$

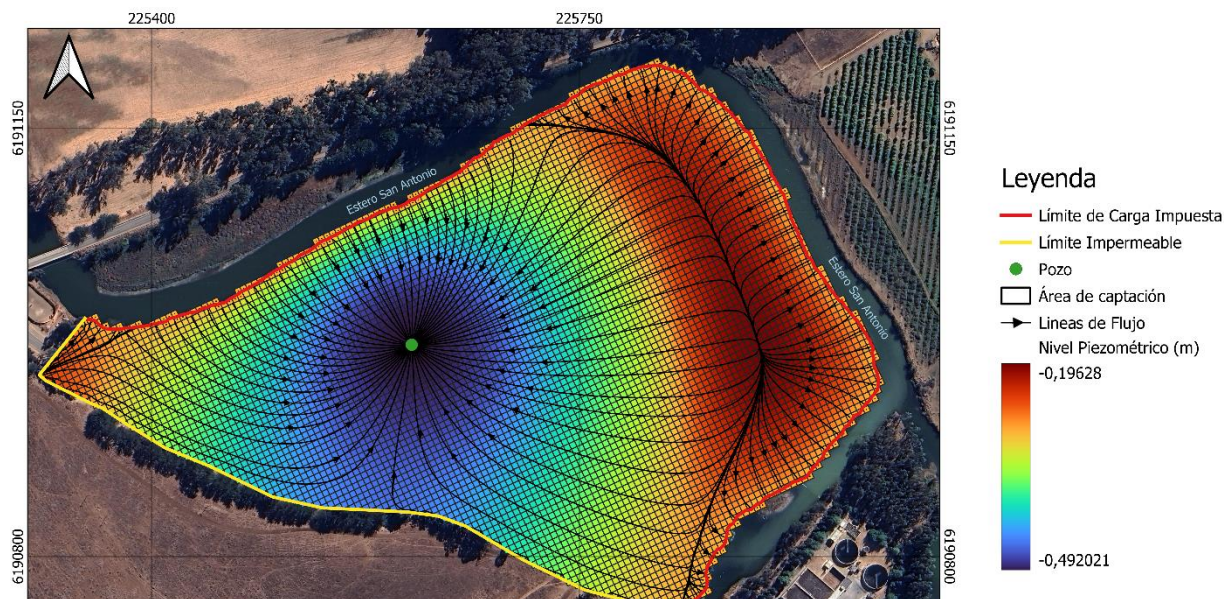
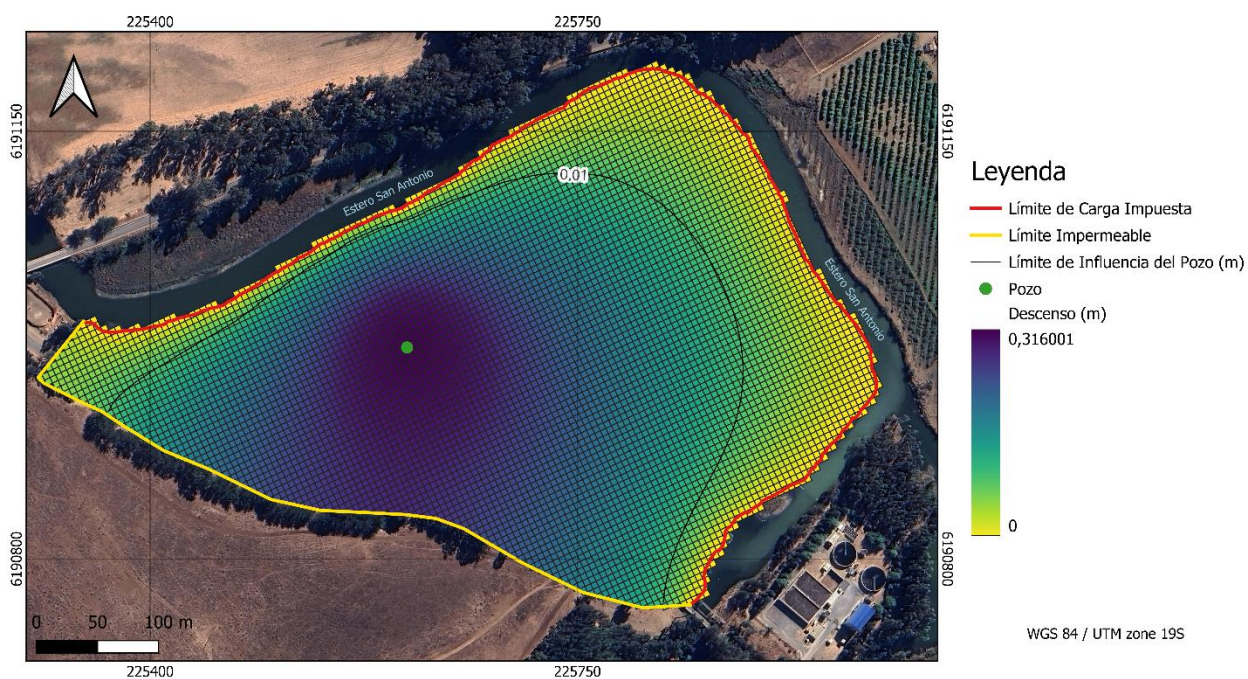
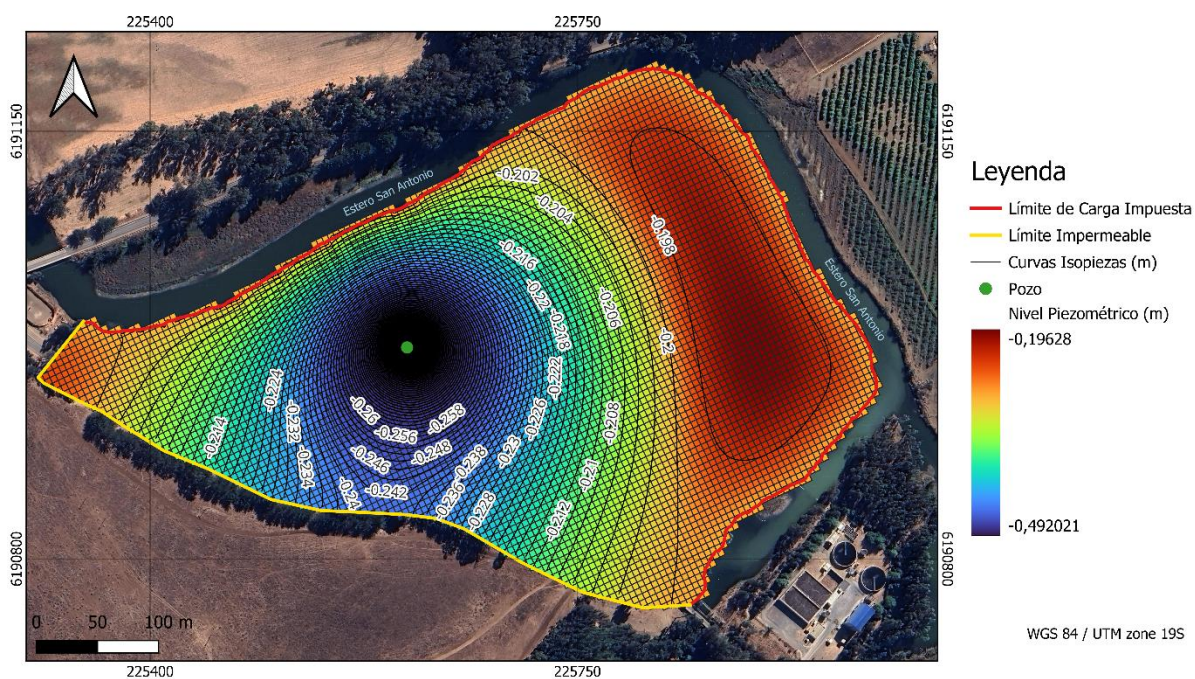


Figura 26: Se muestra el nivel piezométrico resultante para un 50% más de Bombeo, junto con las líneas de flujos. Nota: la escala de color no es lineal. Elaboración propia.



Discusión

En el segundo periodo del modelo base, donde se incorporó el efecto del bombeo, se observa que este provocó la entrada de agua desde el Estero San Antonio, ya que el área de captación alcanzó el límite de carga impuesta en la parte noroeste del área de estudio. Además, se identifica una franja de divergencia ubicada al noreste y este del área de estudio. En esta franja, una parte del flujo se dirige hacia el pozo, mientras que la otra parte se desplaza hacia el estero.

Este resultado para la modelación base, se vio reflejado en todos los resultados del análisis de sensibilidad, por lo que se puede afirmar que el estero alimenta al área de estudio y el área de estudio alimenta el estero. Cabe destacar que, este efecto para el análisis de sensibilidad se puede clasificarse en dos grupos según su similitud, el primer grupo, correspondería a los casos de menos 50% de bombeo y más 50% de recarga, cuyos resultados tienen un menor aporte de agua desde el estero hacia el área de estudio, siendo el primero (menos 50% de bombeo), el que menor aporte tiene, esto se refleja en su menor área de captura, así como también un menor perímetro correspondiente al límite de influencia.

En el segundo grupo, correspondiente al caso de más del 50% de bombeo y menos del 50% de recarga, se presentan resultados que evidencian un mayor aporte de agua desde el estero hacia el área de estudio. Específicamente, el segundo caso (con menos del 50% de recarga) muestra el mayor aporte de agua en comparación al primero, lo cual se refleja en su área de captación. Es relevante destacar que, para este caso, el área de captación alcanza el límite de carga constante en su lado sureste, lo que confirma su mayor contribución desde el estero hacia el área de estudio.

Conclusión

Tanto en los resultados de la modelación base como en el análisis de sensibilidad mencionado anteriormente, se evidencia un claro intercambio de agua entre el estero y el área de estudio. En este proceso, el área de estudio alimenta al Estero San Antonio, mientras que este último también alimenta el área de estudio. Esta dinámica revela una vulnerabilidad notable del sistema ante la intrusión de agua salobre desde el Estero.

Es importante resaltar que el escenario con una recarga del 50% menor exhibe la mayor vulnerabilidad en este intercambio. En este caso específico, la zona de captación alcanza el límite de carga constante en la parte noroeste y en una sección al sureste, generando un aumento significativo en la entrada de agua desde el estero hacia el área de estudio. Este hallazgo cobra relevancia, ya que el cambio climático, se manifiesta principalmente en la reducción de las precipitaciones y como consecuencia, se produciría una menor recarga, que se traduce en una mayor vulnerabilidad del pozo.

Es esencial destacar que la modelación presentada conlleva un grado de incertidumbre inherente, el cual debe ser considerado debido a los parámetros utilizados. Por otro lado, es relevante señalar que el modelo no fue sometido a un proceso de calibración. Además, dado que se empleó un modelo en estado permanente, su capacidad se limita a proporcionar una aproximación anual de los flujos, excluyendo la capacidad de describir variaciones estacionales. En virtud de estas consideraciones, se sugiere interpretar los resultados con cautela.

En conclusión, se recomienda llevar a cabo ensayos de campo que permitan obtener parámetros representativos del área de estudio, contribuyendo así a reducir la incertidumbre asociada al modelo. Además, se aconseja implementar un proceso de calibración del modelo para mejorar su precisión. Por otro lado, se sugiere explorar la posibilidad de desarrollar una modelación a densidad variable, considerando las diferencias de densidades entre el agua del estero y la del acuífero. Esto podría proporcionar una representación más precisa de los procesos en el acuífero. Por último, se recomienda elaborar un modelo de transporte de solutos con el objetivo de cuantificar la contaminación generada por la intrusión salina.

ANEXOS

Anexo 1

Obtención de la cuenca hidrográfica

Para la delimitación de la cuenca hidrográfica, se descargaron dos Modelos Digitales de Elevación (DEM) con una resolución de 1 segundo de arco (SRTM1S35W072V3 y SRTM1S35W073V3) desde la plataforma Earth Explorer de la USGS¹. Estos DEM forman parte del conjunto de datos de la Misión Topográfica del Radar del Transbordador Espacial, en siglas en ingles SRTM.

Posteriormente se utilizó el software QGIS, el cual es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de Código Abierto licenciado bajo GNU – General Public License y es desarrollado por Open Source Geospatial Foundation (OSGeo)².

Con este software se utilizaron los siguiente pasos:

Añadir DEM y proyectar

- A. Se cargan los DEM al programa.
- B. Se utiliza la herramienta ‘Combar(Reproyectar)’: desde el sistema de referencia de coordenadas por defecto (EPSG:4326 – WGS 84) se transformó a EPSG:32719 WGS 84/ UTM zone 19S.
- C. Se utilizo la herramienta combinar para obtener un único DEM.

Análisis de cuencas hidrográficas

- A. Se utilizo la herramienta ‘r.fill.dir’ de Grass, con el objetivo de rellenar los sumideros.
- B. Se utilizo ‘r.watersheed’ de GRASS, con el fin de Identificar dirección de flujo, con esto se obtuvo un raster que indica la dirección de flujo y otro que indica el segmento de flujo.

¹ <https://earthexplorer.usgs.gov/>

² <https://www.qgis.org/es/site/about/index.html>

C. Con la herramienta 'r.water'.outlet de GRASS, se obtuvo la cuenca, se utilizó el raster de dirección de flujo y de acuerdo con el Raster de dirección de flujo se determinó el punto de salida de la cuenca hidrográfica.

D. Finalmente se vectorizó la cuenca con la herramienta 'r.to.vect' de GRASS.

Anexo 2

Prueba de Bombeo

El pozo ubicado en el área de estudio, con sus especificaciones detalladas en la Tabla A2-1, fue sometido a una prueba de bombeo el 17 de junio de 2021, comenzando a las 11:55 y concluyendo a las 14:55. Durante este período de 3 hrs, se mantuvo una descarga constante de 1,7 l/s. Los datos recolectados durante esta evaluación se detallan en la Tabla A2-2. Es relevante destacar que se llevaron a cabo mediciones a intervalos específicos: los primeros 300 s se midieron cada 30 s; entre los 300 y 600 s, cada 60 s (1 min); de 600 a 1200 s, cada 120 s (2 min); posteriormente, entre los 1200 y 3600 s, cada 300 s (5 min); luego, de 3600 a 7200 s, cada 800 s (10 min); y finalmente, desde los 7200 s hasta los 10800 s, se realizaron mediciones cada 1800 s (30 min).

Tabla A2-1: Características del pozo de bombeo

	Ubicación	Profundidad (m)	Diámetro (m)
Pozo	19H 225610,416 6190973,107	4	2.85

Tabla A2-2: Se muestra los datos registrado en la prueba de bombo. Datos obtenidos del proyecto URO RED21992.

Tiempo (s)	Prof. (m)	Des. (m)	Tiempo (s)	Prof. (m)	Des. (m)	Tiempo (s)	Prof. (m)	Des. (m)
0	1,39	0	480	1,49	0,1	3000	1,87	0,48
30	1,39	0	540	1,49	0,1	3300	1,9	0,51
60	1,39	0	600	1,5	0,11	3600	1,92	0,53
90	1,39	0	720	1,53	0,14	4200	1,95	0,56
120	1,39	0	840	1,54	0,15	4800	2,01	0,62
150	1,39	0	960	1,57	0,18	5400	2,04	0,65
180	1,39	0	1080	1,58	0,19	6000	2,06	0,67

210	1,41	0,02
240	1,41	0,02
270	1,43	0,04
300	1,43	0,04
360	1,45	0,06
420	1,49	0,1

1200	1,63	0,24
1500	1,65	0,26
1800	1,7	0,31
2100	1,75	0,36
2400	1,79	0,4
2700	1,84	0,45

6600	2,08	0,69
7200	2,09	0,7
9000	2,13	0,74
10800	2,15	0,76

Mediciones de caudal

Se realizaron cinco mediciones de caudal a intervalos específicos: a las 11:55, 12:05, 12:15, 12:45 y 14:55 hrs, todas tomadas en el extremo de la manguera de la bomba. Durante este proceso, se registró en tres ocasiones el tiempo necesario para llenar un volumen conocido de 20 l. Al dividir este volumen por el tiempo registrado en cada ocasión, se calculó el caudal, obteniendo un promedio. Adicionalmente, se determinó la desviación estándar de estas tres mediciones, presentada en la Tabla A2-3. Estas estimaciones culminaron en un caudal promedio general de $1,7 \cdot 10^{-3}$ m/s.

Tabla A2-3: Se muestra el detalle de la medición de caudal para la prueba de bombeo.

Medición de Caudal	Tiempo (s)	Caudal (m³/s)	Promedio (m³/s)	Des. Estándar	Hora de medición
1a	13,4	0,001492537	0,001729568	0,0002150	11:55
1b	11,21	0,001784121			
1c	10,46	0,001912046			
2a	11,43	0,001749781	0,001740724	0,0000144	12:05
2b	11,6	0,001724138			
2c	11,44	0,001748252			
3a	11,62	0,00172117	0,001727126	0,0000052	12:15
3b	11,56	0,001730104			
3c	11,56	0,001730104			
4a	11,63	0,00171969	0,001730146	0,0000105	12:45
4b	11,49	0,001740644			
4c	11,56	0,001730104			
5a	12,29	0,001627339	0,001662911	0,0000900	14:55
5b	12,53	0,001596169			
5c	11,33	0,001765225			

Para el análisis de la prueba de bombeo, se realizaron ajustes a los datos de descenso mediante la aplicación de la corrección de Jacob (A2-1). Esto permitió obtener un descenso corregido que toma en consideración la reducción del espesor saturado, atribuible al hecho de que el acuífero de estudio es del tipo libre.

$$s_{corr} = s - \frac{s^2}{2b} \quad (A2-1)$$

Donde:

- s_{corr} es el descenso corregido.
- s es el descenso medido.
- b es el espesor del acuífero

Posteriormente, los datos corregidos fueron representados en un gráfico semi-logarítmico en el software de interpretación de prueba de bombeo 'OUAIP'. Se procedió a examinar los datos plotados, considerando especialmente el efecto del almacenamiento del pozo, que en este caso ejerce una considerable influencia debido a su radio. La evaluación de este efecto se llevó a cabo mediante la aplicación de la fórmula (A2-2), que calcula la duración del efecto de almacenamiento.

$$t = \frac{10 \cdot r_c^2}{T} \quad (A2-2)$$

Donde:

- t es el tiempo de duración del efecto de almacenamiento.
- r_c es el radio del pozo.
- T es la transmisividad.

Los resultados indican que este efecto tiene una magnitud del orden de horas, como se detalla en la Tabla A2-4. A pesar de que la prueba de bombeo tiene una duración menor a la que se muestra en la Tabla A2-4, se llevó a cabo un ajuste de la solución de Theis en la parte lineal de los datos, considerando un tiempo superior a los 4500 segundos (Figura A2-1). Con este ajuste de la solución de Theis, se obtuvo una transmisividad (T) de $1,3 \cdot 10^{-3}$ m²/s. Teniendo en cuenta este valor, además, considerando un espesor de 10 m. Se empleó la ecuación A2-3 y se obtuvo un coeficiente de permeabilidad de $1,3 \cdot 10^{-4}$ m/s.

Tabla A2-4: Se muestra los resultado de la pueba de bombeo para .

Prueba de Bombeo	T	Efecto del Almacenamiento (hr)	Duración (hr)	Caudal de bombeo (m ³ /s)
Theis - Corrección de Jacob (Calculado)	0,001348	4,18	3	0,002099446
Theis (URO RED21992)	0,00150	3,76	2,39	0,0018
Neuman (URO RED21992)	0,00250	2,25		

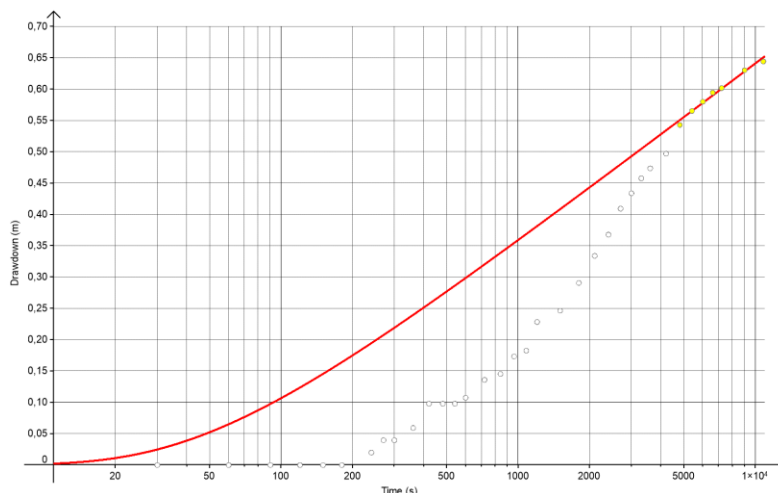


Figura A2-1: Los resultados se presentan en un gráfico de escala semilogarítmica. En el gráfico, la línea roja representa la solución de Theis, con los siguientes valores determinados: $T = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, $S = 8,49 \cdot 10^{-3}$ y un $r = 1,425 \text{ m}$ (radio del pozo). Los puntos en el gráfico representan los resultados obtenidos, y los puntos de color amarillo son aquellos que se han considerado para ajustar la solución. Elaboracion propia, software empleado OUAIP, data obtenida del proyecto URO RED21992.

$$K = \frac{T}{E} \quad (\text{A2-3})$$

Donde:

- T es la transmisividad.
- E es el espesor del acuífero.

Discusión de resultados

La transmisividad determinada mediante la prueba de bombeo es de $1,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Este valor es similar al obtenido en una prueba de bombeo anterior realizada en el mismo pozo (Tabla A2-4). Sin embargo, es importante destacar que estos valores están sujetos a revisión, ya que las pruebas de bombeo realizadas son de corta duración en comparación con el efecto de

almacenamiento del pozo. Por este motivo, se recomienda llevar a cabo una prueba de bombeo de mayor duración para obtener valores más confiables. Por último, es necesario señalar que el valor obtenido para la capacidad de almacenamiento (S) es poco fiable, dado que se basa en datos del mismo pozo del cual se está extrayendo. Además, es crucial observar que, considerando el tipo de acuífero, este valor sería bastante pequeño.

Anexo 3

Según el informe técnico de la DGA (2021), se estimó la recarga para el sector hidrogeológico del estero San Antonio (Figura A3-1), esta estimación se determinó mediante una evaluación de las precipitaciones medias de la zona, la cual a su vez se obtuvo mediante una interpolación de la información histórica de la precipitación media anual (Balance 2017), ya con esta información, se calculó el

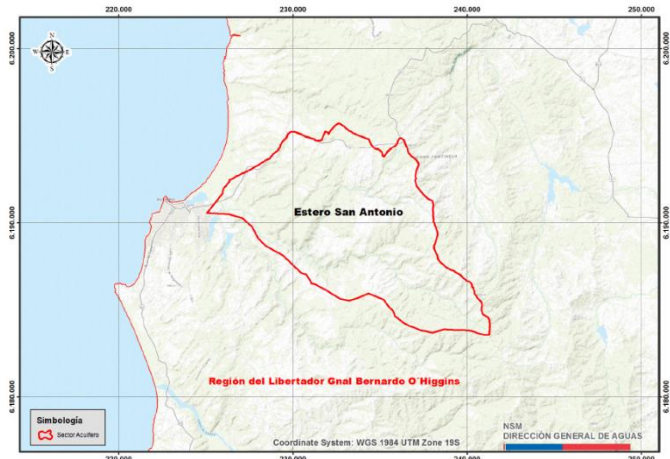


Figura A3-1: Se muestra el área de estudio del informe DGA SDT N° 359, de julio de 2014.

área estudiada y se utilizó un coeficiente de infiltración del 2% (Tabla A3-1), cabe señalar que este coeficiente fue utilizado en el informe de la DGA SDT N° 359, de julio de 2014, pero no se encontró metodología alguna que lo respalde. Con todo esto se utilizó la formula (A3-1), cuyo resultado es de 12 mm/año.

Tabla A3-1: de muestra los paramentos empleados para el cálculo de la recarga, Extraído de DGA (2021).

Sector	Área (km ²)	Precipitación (mm/año)	Coeficiente de infiltración (-)
Estero San Antonio	99	586	0.02

$$\text{Recarga} = \text{Área} \cdot \text{Precipitación} \cdot \text{Coeficiente de infiltración} \quad (\text{A3-1})$$

En un estudio llevado a cabo por Crosbie et al. (2010), se emplearon conjuntos de datos sobre la recarga obtenidos a partir de estudios anteriores en Australia. Estos conjuntos de datos se utilizaron para establecer correlaciones con varios parámetros, como la precipitación, el tipo de vegetación, la clasificación Koppen–Geiger, el índice de aridez, el tipo de suelo y la geología superficial. Dentro de estos parámetros, se identificó que el tipo de suelo, el tipo de vegetación y la precipitación son los principales factores que influyen en la recarga (Figura A3–2 y A3–3). La fórmula para determinar la recarga se describe en detalle a continuación.

$$R = 10^{(a \cdot P + b)} \quad (\text{A3-2})$$

Como se indicó previamente, el suelo más probable en el área de estudio se asemeja a un Inceptisol, y siguiendo la equivalencia propuesta por Morand, (2013)³, se clasificaría como un suelo del tipo Tenosoles, ya con esto, y teniendo una precipitación anual de 469 mm. Además, considerando todos los tipos de vegetación (debido a que representan el único ajuste en el estudio). Se determinó una tasa de recarga de 2,95 mm/año. Cabe señalar que según el mismo estudio destaca que esta metodología conlleva una incertidumbre de un orden de magnitud, por lo que se descartó utilizar el valor obtenido mediante esta metodología.

³ Morand, D. (2013), *The World Reference Base for Soils (WRB) and Soil Taxonomy: an appraisal of their application to the soils of the Northern Rivers of New South Wales*. DOI: 10.1071/SR12144

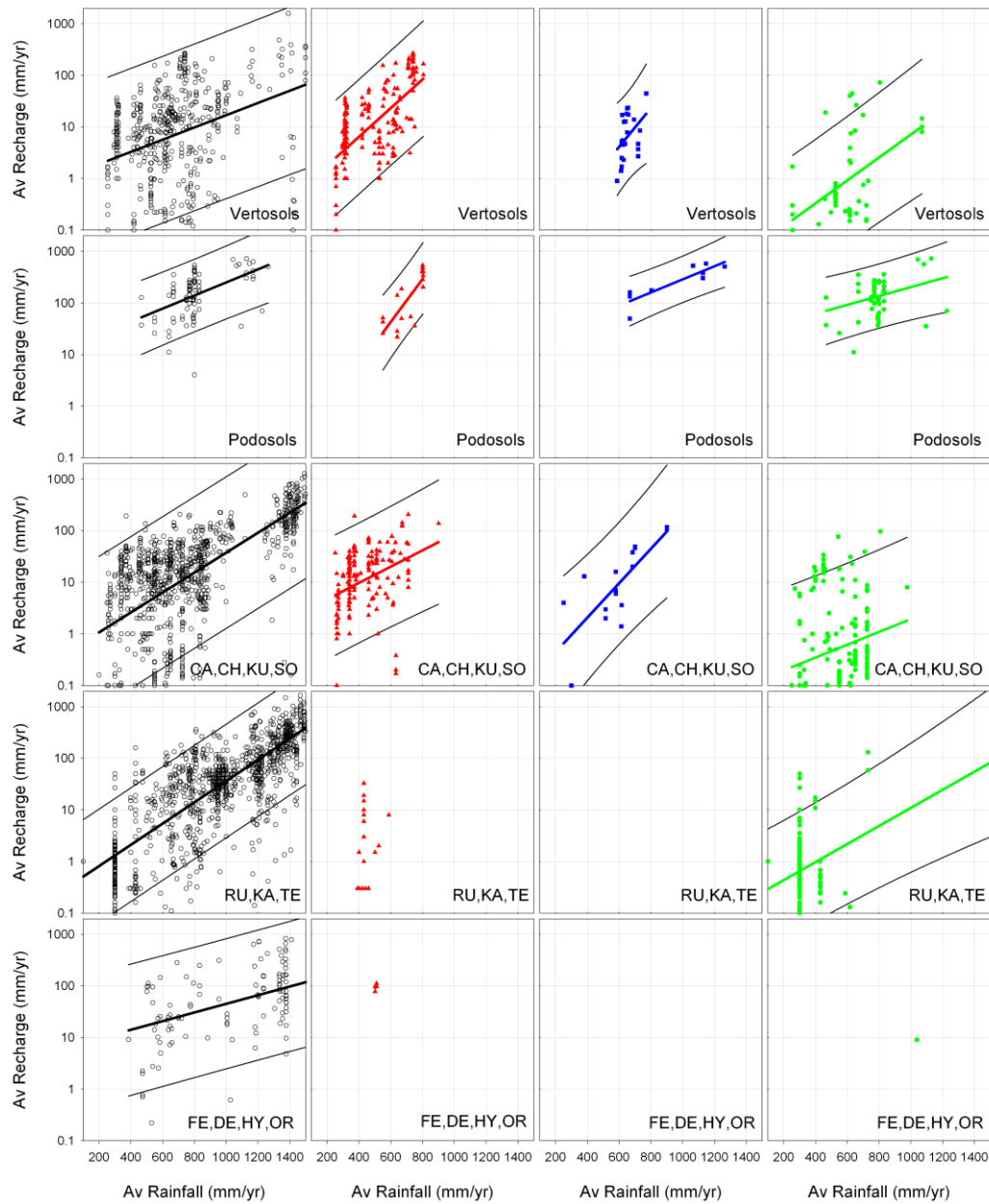


Figura A3-2: se muestra gráficamente los ajustes obtenidos del análisis empleados.

Soil Group	All			Annuals			Perennials			Trees		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r</i> ²	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r</i> ²	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r</i> ²	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r</i> ²
VE	1.18E-03	0.04	0.20	2.78E-03	-0.30	0.42	3.77E-03	-1.65	0.16	2.22E-03	-1.37	0.37
PO	1.27E-03	1.13	0.29	4.16E-03	-0.86	0.64	1.27E-03	1.19	0.77	8.63E-04	1.44	0.17
CA, CH, KU, SO	1.93E-03	-0.36	0.54	1.58E-03	0.36	0.11	3.34E-03	-1.02	0.58	1.24E-03	-0.96	0.05
RU, KA, TE	2.06E-03	-0.50	0.69							1.75E-03	-0.71	0.14
FE, DE, HY, OR	8.39E-04	0.81	0.26									

Figura A3-3: se muestra los coeficientes que se obtuvieron en el ajuste obtenido en la Figura A3-2.

Referencias

- Calle Gardella, D. T. (2018). *Tomografía sísmica pasiva 3D de estructuras corticales en el margen costero de Chile Central: Caracterización en profundidad de la falla de Pichilemu*. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/168419>.
- Centro de Información de Recursos Naturales. (1996). *Estudio agrológico VI región. Descripciones de suelos, materiales y símbolos*. Santiago: Publicación CIREN – Centro de Información de Recursos Naturales. Obtenido de Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14001/36259>
- CIREN. (1996). *Estudio Agrológico VI Región – Mapa básico de suelos y capacidad de uso*. Obtenido de <https://www.geoportal.cl/geoportal/catalog/25114/Estudio%20Agrol%C3%B3gico%20VI%20Regi%C3%B3n%20-%20Mapa%20b%C3%A1sico%20de%20suelos%20y%20capacidad%20de%20uso>
- Dirección General de Aguas. (2013). *LEVANTAMIENTO HIDROGEOLÓGICO EN CUENCAS PLUVIALES COSTERAS EN LA REGIÓN DEL LIBERTADOR GENERAL BERNARDO O'HIGGINS Y REGIÓN DEL BÍO-BÍO INFORME FINAL*.
- Dirección General de Aguas. (2014a). *Inventario de Cuencas, Subcuenca y Subsubcuencas de Chile*. Obtenido de <https://snia.mop.gob.cl/sad/CUH5690.pdf>
- Dirección General de Aguas. (2014b). *LEVANTAMIENTO HIDROGEOLÓGICO EN CUENCAS PLUVIALES COSTERAS EN LA REGIÓN DEL LIBERTADOR GENERAL BERNARDO O'HIGGINS Y REGIÓN DEL BÍO-BÍO, ETAPA 2*.
- Dirección General de Aguas. (2017). *Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos Hídricos en Chile*. Disponible en: <https://dga.mop.gob.cl/Estudios/04%20Resumen%20Ejecutivo/Resumen%20Ejecutivo.pdf>.
- Dirección General de Aguas. (2021). *Reevalúa estimación de la recarga de aguas subterráneas en el sector hidrogeológico aprovechamiento común Estero San Antonio en la Región del Libertador General Bernardo O´Higgins*. INFORME TECNICO N° 116, Santiago.
- Domenico, P. A., & Schwartz, F. W. (1997). *Physical and Chemical Hydrogeology*. John Wiley & Sons.
- Farias, M., Comte, D., Roecker, S., Carrizo, D., & Pardo, M. (2011). Crustal extensional faulting triggered by the 2010 Chilean earthquake: The Pichilemu Seismic Sequence. *Tectonics*, 30(6). doi:doi:10.1029/2011TC002888.

- Fock Kunstmann, A. I. (2005). *Cronología y tectónica de la exhumación en el neógeno de Los Andes de Chile Central entre los 33° y los 34° S*. Disponible en: https://www.bibliotecadigital.uchile.cl/permalink/56UDC_INST/1uuvhmk/alma991004381059703936.
- Harbaugh, A. (2005). MODFLOW-2005 : the U.S. Geological Survey modular ground-water model-the ground-water flow process. En 6.-A. T. Methods. doi:<https://doi.org/10.3133/tm6A16>
- Hiscock, K., & Bense, V. (2014). *Hydrogeology: Principles and Practice* (2nd edition ed.). Wiley-Blackwell.
- Hughes, J. D., Langevin, C. D., & Banta, E. R. (2017). *Documentation for the MODFLOW 6 framework*. Office of Ground Water. doi:10.3133/tm6A57
- Ibarra Cofré, I. E. (2013). *Geomorfología aplicada en la evaluación y análisis de amenazas naturales en la zona sur de la Comuna de Pichilemu : sectores de Punta Lobos Cahuil Estero Nilahue VI Región Chile*. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/114013>.
- Ilustre Municipalidad de Pichilemu. (2021). *Plan de Desarrollo Comunal 2021-2026*.
- Lamadrid, M. A. (2021). *DETERMINACIÓN DE UN ÍNDICE DE VULNERABILIDAD POR INTRUSIÓN SALINA EN SISTEMAS HIDROGEOLÓGICOS COSTEROS EN ZONAS ÁRIDAS CONSIDERANDO EL CAMBIO CLIMÁTICO Y FACTORES ANTROPOGÉNICOS*. Universidad Autónoma de Baja California Sur .
- Lorca Carrizo, J. P. (2013). *Riesgos y desarrollo en la zona costera de la comuna de Pichilemu, VI región del Libertador General Bernardo O'Higgins*. Disponible en: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/115774>.
- Martinez Alfaro, Martínez Santos, P., & Castaño Castaño, S. (2006). *Fundamentos de Hidrogeología*. Mundi-Prensa.
- Organización Meteorológica Mundial. (2012). *International Glossary of Hydrology*.
- Palape Reyes, C. J. (2014). *Deformación del basamento metamórfico paleozoico en la transecta Tanumé - Pichilemu, entre los 34,2° y 34,5° S, Cordillera de la costa, Chile Central*. Disponible en: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/116874>.
- Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos. (2009). *Hechos y cifras, el 3er informe sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo: el agua en un mundo en constante cambio*. Disponible en: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000374903>.

- Rojas, M., Aldunce, P., Farias, L., González, H., Marquet, P., Muñoz, J. C., . . . Vicuña, S. (2019). . *Evidencia científica y cambio climático en Chile: Resumen para tomadores de decisiones. Santiago: Comité Científico COP25.* Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.
- Servicio Nacional de obras Sanitarias. (1980). *Informe hidrogeológico de la zona de Pichilemu IV Región del libertador Bernardo O'Higgins.*
- Shiklomanov, I. (1993). *Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources; Chapter: 'World fresh water resources'.*
- Todd, D. K., & Mays, L. W. (2005). *Groundwater hydrology* (3rd ed. ed.). John Wiley & Sons.
- Willner, A. P. (September de 2005). Pressure-Temperature Evolution of a Late Palaeozoic Paired Metamorphic Belt in North-Central Chile (34°–35°30'S). *Journal of Petrology*, 46, 1805–1833. doi:<https://doi.org/10.1093/petrology/egi035>
- Willner, A. P., Richter, P. P., & Ring, U. (2009). Structural overprint of a late Paleozoic accretionary system in north-central Chile (34°–35°S) during post-accretional deformation. *Andean geology*, 36(1), 17–36. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-71062009000100003>