



**MODELACIÓN NUMÉRICA HIDROGEOLÓGICA
DE FLUJO Y TRANSPORTE DEL ACUÍFERO
ACONCAGUA ENTRE RIO PUTAENDO Y ESTERO
LOS LOROS**

**HYDROGEOLOGICAL NUMERICAL MODELING
OF FLOW AND TRANSPORT OF THE AQUIFER
ACONCAGUA BETWEEN PUTAENDO RIVER AND
LOS LOROS ESTUARY**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA
Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

**PRESENTADO POR:
ESTEBAN RETAMAL GONZÁLEZ**

**DIRIGIDO POR:
FRANCISCO MONTALVÁN
FRANCISCO CARREÑO**

Alcalá de Henares, 7 de Febrero de 2023

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi agradecimiento al profesor Francisco Javier Montalván por la dirección del trabajo realizado, demostrando su profesionalismo y compromiso para la resolución de problemas planteados.

De igual manera a mi familia por el apoyo y colegas en esta etapa realizada.

INDICE DE CONTENIDOS

| | |
|---|----|
| 1. RESUMEN..... | 7 |
| 2. INTRODUCCIÓN | 7 |
| 2.1. OBJETIVOS | 8 |
| 3. METODOLOGÍA | 9 |
| 4. RESULTADOS | 10 |
| 4.1. FASE I | 10 |
| 4.1.1. ÁREA DE ESTUDIO | 10 |
| 4.1.2. GEOLOGÍA | 12 |
| 4.1.3. GEOMORFOLOGÍA | 14 |
| 4.1.4. CLIMA | 15 |
| 4.1.5. HIDROLOGÍA | 18 |
| 4.1.6. HIDROGEOLOGÍA..... | 21 |
| 4.1.7. USO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS..... | 24 |
| 4.1.8. RECARGAS AL ACUÍFERO | 25 |
| 4.1.9. HIDROGEOQUÍMICA..... | 28 |
| 4.1.10. MODELO CONCEPTUAL DEL SISTEMA HIDROGEOLÓGICO..... | 30 |
| 4.2. FASE II: PARÁMETROS DEL MODELO NUMÉRICO..... | 31 |
| 4.2.1. GEOMETRÍA DEL MODELO..... | 31 |
| 4.2.3. DISCRETIZACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL | 32 |
| 4.2.4. CONDICIONES DE BORDE Y CONDICIONES INICIALES..... | 33 |
| 4.2.5. ZONIFICACIÓN DE PARÁMETROS | 33 |
| 4.2.6. POZOS DE EXTRACCIÓN | 34 |
| 4.2.7. CALIBRACIÓN DEL MODELO..... | 34 |
| 4.2.8. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD | 35 |
| 4.2.9. MODELO DE TRANSPORTE DE CONTAMINANTES | 35 |
| 4.3. FASE III. RESULTADOS DE MODELACIÓN | 37 |
| 4.3.1. BALANCE DE MASA | 37 |
| 4.3.2. NIVELES PIEZOMÉTRICOS | 37 |
| 4.3.3. CALIBRACIÓN DE LOS PARÁMETROS MODELO DE FLUJO..... | 38 |
| 4.3.5. MODELO DE TRANSPORTE..... | 42 |
| 5. DISCUSIÓN..... | 45 |
| 6. CONCLUSIONES | 47 |
| 7. BIBLIOGRAFÍA..... | 48 |

INDICE DE FOTOGRAFÍAS

| | |
|--|----|
| Fotografía 1: Vuelo dron – vista dirección oriente de la cuenca. | 11 |
| Fotografía 2: Vuelo dron – vista dirección poniente de la cuenca. | 11 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Diagrama de flujo metodológico. | 9 |
| Figura 2: Área de estudio. Fuente: A partir de datos de IDE Chile, 2022. | 10 |
| Figura 3: Usos de la tierra. | 12 |
| Figura 4: Mapa geológico zona de estudio. Fuente: A partir de datos de SERNAGEOMIN, 2003. | 13 |
| Figura 5: Profundidad basamento rocoso. Fuente: A partir de datos de DICTUC, 2009. | 14 |
| Figura 6: Altitudes topografía área de estudio. Fuente: A partir de datos de IDE Chile, 2016. | 14 |
| Figura 7: Estaciones meteorológicas – temperatura. Fuente: A partir de datos de DGA y DM, 2022. | 15 |
| Figura 8: Temperaturas medias mensuales, serie 2010 a Julio 2021. Fuente: A partir de datos de DGA, 2022. | 15 |
| Figura 9: Promedio de temperaturas medias mensuales de Panquehue 2010 a Julio 2021. Fuente: A partir de datos de DGA, 2022. | 16 |
| Figura 10: Estaciones meteorológicas – pluviometría. Fuente: A partir de datos de DGA, 2022. | 16 |
| Figura 11: Registros precipitaciones – serie 1963 a 2020. Fuente: A partir de datos de DGA, 2022. | 17 |
| Figura 12: Estimación precipitaciones mensuales Cuenca Estudio, serie 2010 a 2020. Fuente: A partir de datos de DGA, 2022. | 17 |
| Figura 13: Estimación promedio precipitaciones mensuales cuenca Estudio, serie 2010 a 2020. Fuente: A partir de datos de DGA, 2022. | 18 |
| Figura 14: Red hídrica de cauces naturales y canales. Fuente: A partir de datos de DGA, 2022. | 19 |
| Figura 15: Caudales medios mensuales, Estación Río Aconcagua en Romeral y Río Aconcagua en San Felipe, serie 1960-2021. Fuente: A partir de datos de DGA, 2022. | 19 |
| Figura 16: Caudales medios mensuales, Estación Río Aconcagua en Romeral, Río Aconcagua en San Felipe y Estero Lo Campo en Lo Campo, serie nov. 2019-dic. 2021. Fuente: A partir de datos de DGA, 2022. | 20 |
| Figura 17: Variación mensual caudales medios, estación “Río Aconcagua en Romeral”, “Río Aconcagua en San Felipe”. Fuente: A partir de datos de DGA, 2022. | 20 |
| Figura 18: Conductividad hidráulica Unidad B. Fuente: A partir de datos de WSP Consulting Chile Ltda, 2019. | 21 |
| Figura 19: Coeficiente de almacenamiento (sy) Unidad B. Fuente: A partir de datos de WSP Consulting Chile Ltda, 2019. | 22 |
| Figura 20: Pozos de observación niveles estáticos. Fuente: A partir de datos de DGA, 2022. | 23 |
| Figura 21: Registros niveles estáticos pozos observación DGA. Fuente: A partir de datos de DGA, 2022. | 23 |
| Figura 22: Registros niveles estáticos pozos de particulares. Fuente: A partir de datos de DGA, 2022. | 24 |
| Figura 23: Derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas y SHAC. Fuente: A partir | |

| | |
|--|----|
| de datos de DGA, 2022. | 25 |
| Figura 24: Distribución de caudales otorgados por tipo de uso. Fuente: A partir de datos de DGA, 2022. | 25 |
| Figura 25: Zonificación de suelo. Fuente: A partir de datos de Agrolab 2016a, 2016b; Calderón, 2018; Herrera, 2018; TRANSELEC, 2019; Catemu Solar Spa., 2020; PUC, 2020; PUC, 2021. | 27 |
| Figura 26: Puntos de muestreo de calidad de aguas subterráneas. Fuente: A partir de datos de DGA y Secretaria Regional del Ministerio de Salud de Valparaíso, 2022..... | 28 |
| Figura 27: Diagrama de piper - calidad de aguas subterráneas. Fuente: A partir de datos de DGA y Secretaria Regional del Ministerio de Salud de Valparaíso, 2022..... | 29 |
| Figura 28: Concentraciones de nitratos y sulfatos- serie 1995 a 2021. Fuente: A partir de datos de DGA y Secretaria Regional del Ministerio de Salud de Valparaíso, 2022. | 29 |
| Figura 29: Modelo conceptual del sistema hidrogeológico..... | 30 |
| Figura 30: Grilla horizontal 100 m x 100 m. Fuente: A partir de datos de SERNAGEOMIN, 2003. | 32 |
| Figura 31: Predio con aplicación de nitrato..... | 36 |
| Figura 32: Balance de masa..... | 37 |
| Figura 33: Niveles piezométricos – stress period 61-Unidad B. | 38 |
| Figura 34: Niveles piezométricos observados v/s simulados, régimen permanente. | 39 |
| Figura 35: Niveles piezométricos observados v/s simulados, régimen transitorio. | 39 |
| Figura 36: Hidrograma Pozo Fundo San Roque- niveles piezométricos observados v/s simulados, régimen transitorio. | 39 |
| Figura 37: Hidrograma Pozo OB-0503-29- niveles piezométricos observados v/s simulados, régimen transitorio. | 40 |
| Figura 38: Hidrograma Pozo OB-0504-634- niveles piezométricos observados v/s simulados, régimen transitorio. | 40 |
| Figura 39: Transporte de nitrato, periodo de simulación N° 2, sin medida de control. | 42 |
| Figura 40: Transporte de nitrato, periodo de simulación N° 20, sin medida de control. | 43 |
| Figura 41: Transporte de nitrato, periodo de simulación N° 61, sin medida de control. | 43 |
| Figura 42: Transporte de nitrato, periodo de simulación N° 61, con 3 pozos 200 l/s c/u para abatimiento. | 44 |
| Figura 43: Transporte de nitrato, periodo de simulación N° 61, con 1 pozo 100 l/s y 2 barreras hidráulicas para abatimiento. | 44 |
| Figura 44: Transporte de nitrato, periodo de simulación N° 61, con 4 barreras hidráulicas para abatimiento. | 45 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1:Litología del área de estudio. Fuente: A partir de datos de SERNAGEOMIN, 2003. | 13 |
| Tabla 2:Canales y respectivos derechos de aprovechamientos de aguas. Fuente: A partir de datos de DGA, 2022. | 25 |
| Tabla 3: Suelos- Capacidades de campo (CC) y punto de marchites permanente (PMP). Fuente: A partir de datos de Agrolab 2016a, 2016b; Calderón, 2018; Herrera, 2018; TRANSELEC, 2019; Catemu Solar Spa., 2020; PUC, 2020; Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC), 2021. | 27 |
| Tabla 4:Zonificación de conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento. Fuente: A partir de datos de WSP Consulting Ltda..... | 34 |

TABLA DE ABREVIATURAS

| | |
|--------------|--|
| CC: | Capacidad de campo. |
| CIREN: | Centro de información de Recursos Naturales. |
| DGA: | Dirección General de Aguas. |
| DM: | Dirección Meteorológica. |
| Mbnt: | Metros bajo nivel de terreno. |
| PMP: | Punto de marchitez permanente. |
| PUC: | Pontificia Universidad Católica de Chile. |
| SEA: | Servicio de Evaluación Ambiental. |
| SERNAGEOMIN: | Servicio Nacional de Geología y Minería. |
| U.H.: | Unidad hidrogeológica. |

1. RESUMEN

El presente trabajo desarrolla la construcción de un modelo conceptual, numérico tridimensional de flujo y transporte de una zona localizada en el acuífero Aconcagua, entre la confluencia del río Aconcagua con el Río Putaendo hasta la confluencia del río Aconcagua con el Estero Los Loros, para lo cual se utiliza el código MODFLOW y en específico, el software ModelMuse, a partir de la información proporcionada respecto a la geología de la zona, precipitaciones, parámetros hidráulicos e hidrogeológicos, niveles piezométricos e hidrogeoquímica, etc.

Para el desarrollo del mismo, se establecieron tres fases de trabajo, la primera de ellas contempla la recopilación de antecedentes, la segunda, la construcción del modelo numérico de flujo y por último la formulación del modelo de transporte de la dispersión de nitrato.

2. INTRODUCCIÓN

Desde el año 2010 a la fecha, el Ministerio de Obras Públicas de Chile, ha decretado la condición de escasez hídrica a la cuenca del río Aconcagua (DGA, 2022), referente a aguas superficiales y subterráneas. En este contexto, se considera necesario contar con herramientas que permitan realizar la eficaz gestión de las aguas subterráneas y para ello resulta imperioso conocer el estado actual y próximo de la disponibilidad de la cantidad y calidad de aguas subterráneas. Entre las herramientas que se dispone a la fecha, la modelación de aguas subterráneas, permite determinar la tendencia de los niveles piezométricos, su evolución y efectos ante la dinámica de variables, tales como la recarga y las extracciones de aguas subterráneas.

En el proceso para conocer las características de un sistema hidrogeológico se pueden distinguir dos grandes etapas: la elaboración del modelo conceptual y la elaboración del modelo numérico (Servicio de Evaluación Ambiental, 2012). El modelo conceptual, considera las características del medio natural, principalmente, la geología, hidrogeología, hidrología, entre otros. Por su parte, el modelo numérico, a través de la identificación de las variables seleccionadas en el modelo conceptual, conduce dichos conceptos a la formulación matemática de las ecuaciones de flujo, requiriendo para su resolución métodos numéricos,

que según Zamorano (2019) destacan entre ellos los métodos de diferencias finitas, elementos finitos y volúmenes finitos.

De acuerdo a los antecedentes expuestos, el presente trabajo de fin de master, genera un modelo numérico hidrogeológico mediante el software Modelmuse, que utiliza el código Modflow (USGS, 2022) mediante el método de diferencias finitas. El modelo realizado representa el medio físico del área de estudio y reproduce los niveles piezométricos y transporte de nitratos del acuífero.

2.1. OBJETIVOS

Objetivo general:

- Elaborar un modelo numérico hidrogeológico de flujo y transporte del acuífero Aconcagua, entre el Rio Putaendo y Estero los Loros, mediante el software ModelMuse para el conocimiento del comportamiento hidrogeológico del recurso hídrico subterráneo.

Objetivos específicos:

- Identificar variables y parámetros modeladores del sistema del acuífero Aconcagua, en base a recopilación de información bibliográfica para ser integradas a un modelo numérico hidrogeológico.
- Desarrollar y calibrar un modelo numérico hidrogeológico de flujo en régimen permanente y transitorio, para el periodo comprendido entre los años 2016 a 2020, mediante el software Modelmuse.
- Desarrollar un modelo de transporte de nitratos, en base al modelo de flujo previamente calibrado y mediante diferentes escenarios, para el establecimiento del comportamiento del contaminante en el acuífero.

3. METODOLOGÍA

Con el objeto de desarrollar la construcción del modelo numérico hidrogeológico de flujo y transporte, se estableció un diagrama de flujo el que considera tres fases. La Fase I, contempla los antecedentes necesarios (obtenidos desde medios bibliográficos y visitas de terreno) del área de estudio, tales como: localización, geometría del acuífero, geología, precipitaciones, recarga, piezometría, etc. y la problemática para la formulación del modelo conceptual de flujo. En la Fase II, se incorporan los antecedentes recopilados de la Fase I, se establece la discretización espacial y temporal, condiciones de borde, entre otros del modelo numérico. Finalmente, en la Fase III se presentan los resultados del modelo numérico, balance hídrico, considerando la calibración del modelo de flujo y distintos escenarios para el modelo de transporte, incluyendo medidas de atenuación.

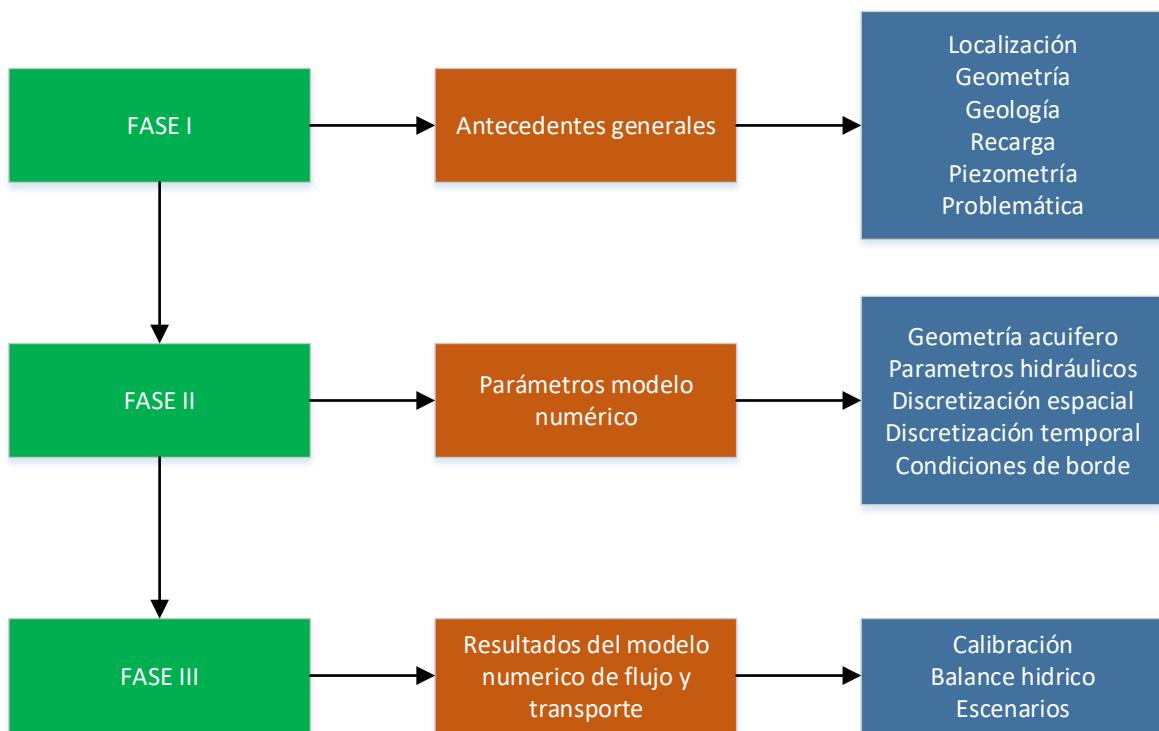


Figura 1: Diagrama de flujo metodológico.

4. RESULTADOS

4.1. FASE I

4.1.1. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se localiza en la Subcuenca denominada “*Río Aconcagua, entre Río Putaendo y Estero Los Loros*”, la que posee una superficie aproximada de 196,49 Km². Respecto a su división administrativa, se localiza en Chile, en la Región de Valparaíso, Provincia de San Felipe, entre las comunas de San Felipe, Catemu, Panquehue y Llay-Llay.

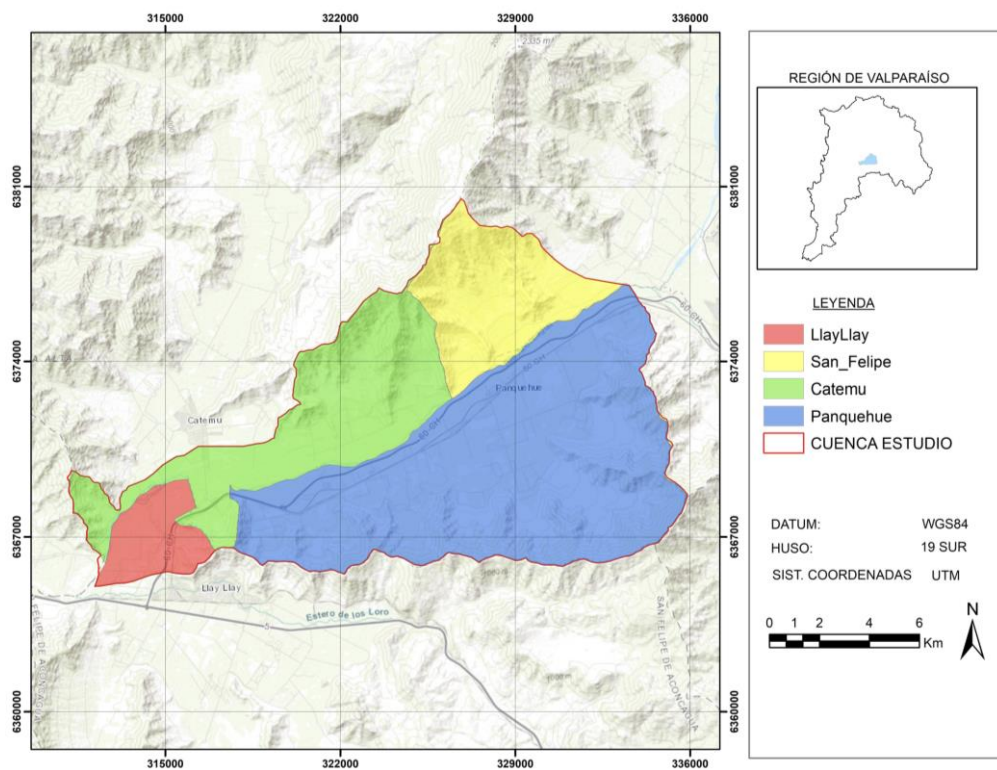


Figura 2: Área de estudio. Fuente: A partir de datos de IDE Chile, 2022.



Fotografía 1: Vuelo dron – vista dirección oriente de la cuenca.



Fotografía 2: Vuelo dron – vista dirección poniente de la cuenca.

Respecto a los usos de la tierra, el 2% del territorio es utilizado para el asentamiento de viviendas, un 0,5 % para la minería y un 51% para el cultivo de hortalizas y árboles frutales, destacándose la plantación de vid de mesa y aguacate, según Centro de información de Recursos Naturales (CIREN), 2020.

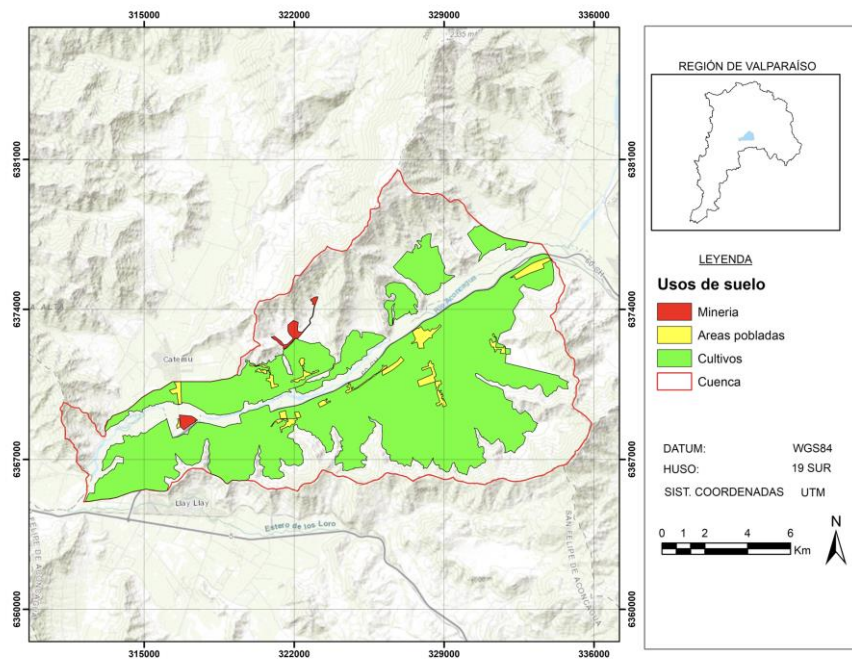


Figura 3: Usos de la tierra.

4.1.2. GEOLOGÍA

La identificación de la litología del área de estudio se determinó en base al Mapa Geológico de Chile escala 1:1.000.000, versión 2003 elaborado por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). De dicho estudio se desprende que la geología de la zona de interés está compuesta principalmente por secuencias sedimentarias y volcánicas en los cordones montañosos, junto con depósitos aluviales, coluviales y fluviales en el valle, pertenecientes a los periodos cretácico y pleistoceno- holoceno, respectivamente.

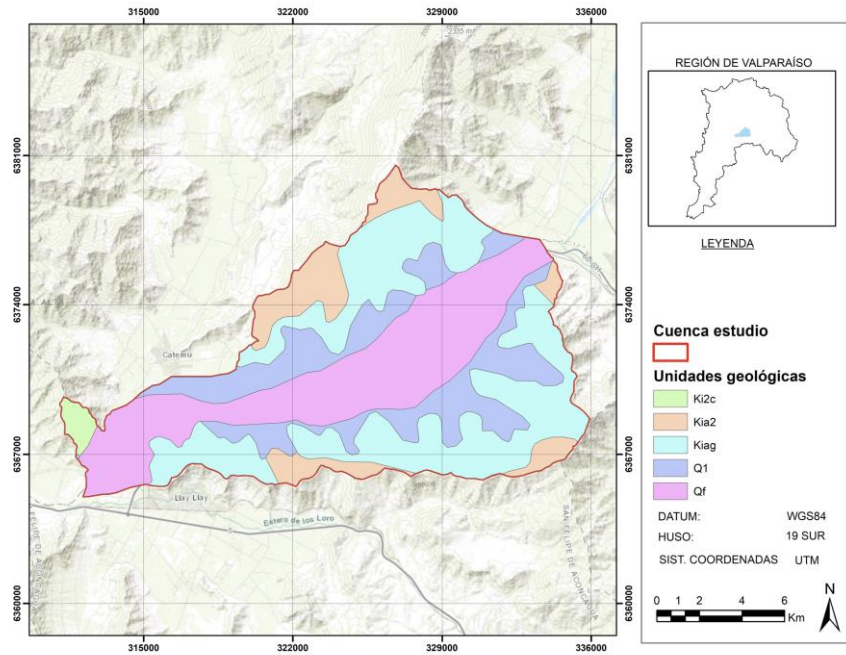


Figura 4: Mapa geológico zona de estudio. Fuente: A partir de datos de SERNAGEOMIN, 2003.

Tabla 1: Litología del área de estudio. Fuente: A partir de datos de SERNAGEOMIN, 2003.

| Código | Periodo | Descripción |
|--------|---|--|
| Ki2c | Cretácico Inferior- Cretácico Superior | Secuencias sedimentarias y volcánicas continentales, con lavas andesíticas, ocoítas, conglomerados, areniscas y limolitas. |
| Kia2 | Cretácico Inferior alto- Cretácico Superior bajo | Secuencias sedimentarias y volcánicas: rocas epiclásticas, piroclásticas y lavas andesíticas y basálticas. |
| Kia1 | Cretácico Inferior alto- Cretácico Superior bajo | Dioritas y monzodioritas de piroxeno y hornblenda, granodioritas, monzogranitos de hornblenda y biotita. |
| Q1 | Pleistoceno-Holoceno | Depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa; en menor proporción fluvioglaciales. |
| Qf | Pleistoceno-Holoceno | Depósitos fluviales: gravas, arenas y limos del curso actual de los ríos mayores o de sus terrazas subactuales y llanuras de inundación. |

Respecto a la profundidad del basamento rocoso, que subyace a los depósitos aluviales, coluviales y fluviales, según DICTUC (2009) establece un promedio de profundidades máximas de 200 metros bajo el nivel de terreno.

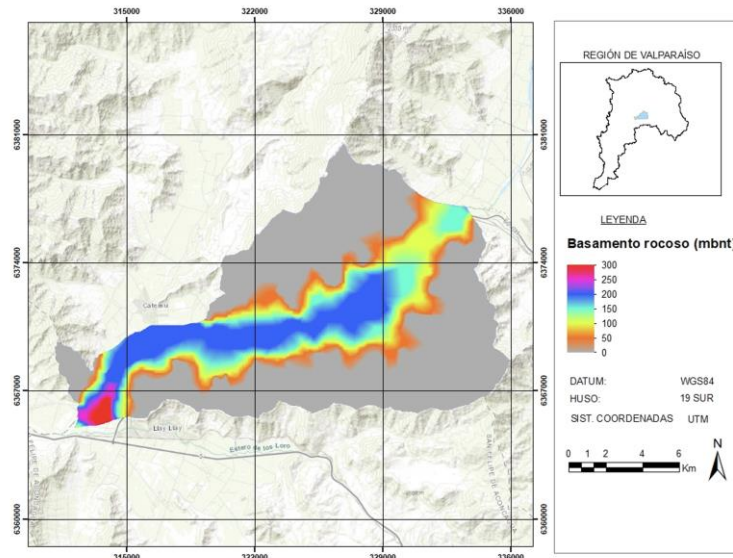


Figura 5: Profundidad basamento rocoso. Fuente: A partir de datos de DICTUC, 2009.

4.1.3. GEOMORFOLOGÍA

Según Börgel (1983), el área de estudio se encuentra integrada por las unidades geomorfológicas, correspondientes a “cordillera de la costa”, “cordones transversales” y “cuenca transición semiárida”, la que según IDE Chile (2016), conforme el modelo digital de elevación Alos Palsar, la cuenca posee una topografía en el valle con una altitud en el rango de 360 msnm a 1100 msnm, y una cota máxima en las montañas de 2135 msnm, lo que genera pendientes en torno al 0,8% en el valle y mayor al 100% en el talud de los cordones montañosos.

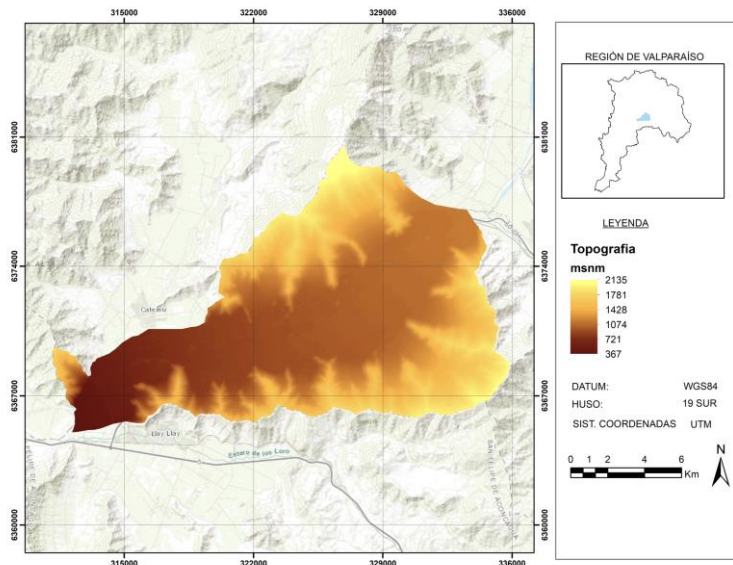


Figura 6: Altitudes topografía área de estudio. Fuente: A partir de datos de IDE Chile, 2016.

4.1.4. CLIMA

Temperatura

Según la clasificación Köppen-Geiger, elaborado por la Universidad de Chile (2017), el área de estudio se encuentra comprendida en su mayoría por un clima del tipo semiárido de lluvia invernal. Complementariamente, con base en el registro de temperaturas del periodo 2010 a 2021 de la estación meteorológica de la Dirección Meteorológica (DM) de Chile, denominada “Panquehue”, rellena por la serie de registros de la estación “Vilcuya” de la Dirección General de Aguas (DGA) de Chile, que entre ambas poseen un coeficiente de determinación de 0,87, puede observarse una tendencia sin alteraciones significativas de las temperaturas medias mensuales, con una estacionalidad que registra un incremento desde diciembre a marzo (verano) y menor en los meses de mayo a agosto (otoño- invierno).

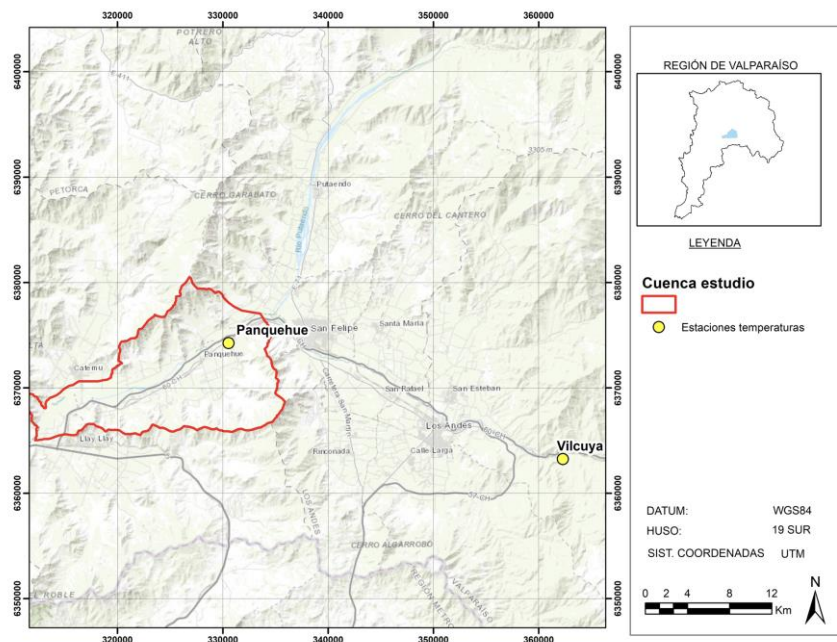


Figura 7: Estaciones meteorológicas – temperatura. Fuente: A partir de datos de DGA y DM, 2022.

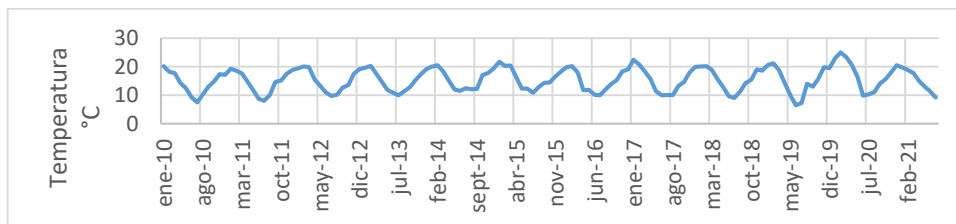


Figura 8: Temperaturas medias mensuales, serie 2010 a Julio 2021. Fuente: A partir de datos de DGA, 2022.

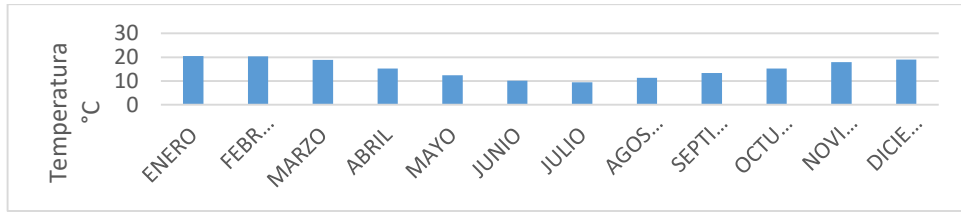


Figura 9: Promedio de temperaturas medias mensuales de Panquehue 2010 a Julio 2021. Fuente: A partir de datos de DGA, 2022.

Pluviometría

Respecto a la pluviometría, se cuenta con al menos 4 estaciones meteorológicas de la Dirección General de Aguas de Chile, vinculadas a la cuenca de estudio, denominadas “Catemu”, “Las Chilcas”, “Río Aconcagua en Romeral”, “Río Aconcagua en San Felipe”.

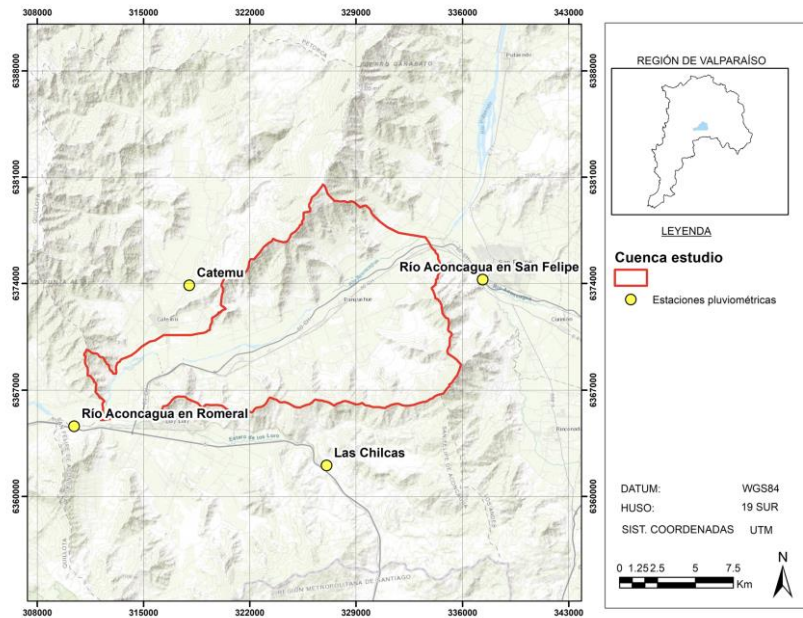


Figura 10: Estaciones meteorológicas – pluviometría. Fuente: A partir de datos de DGA, 2022.

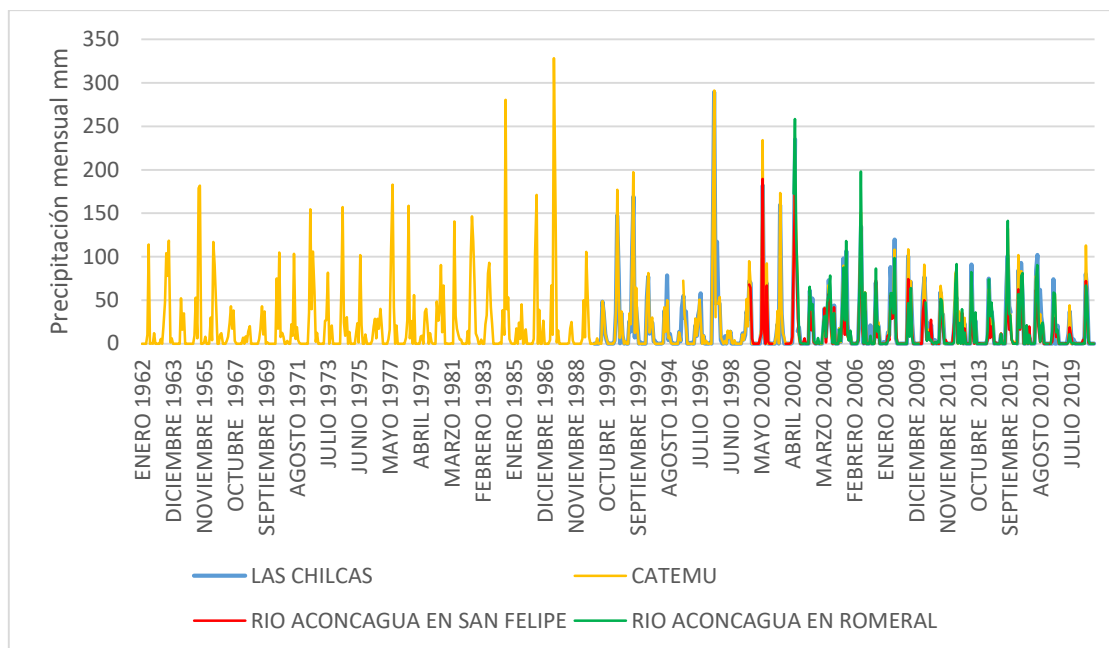


Figura 11: Registros precipitaciones – serie 1963 a 2020. Fuente: A partir de datos de DGA, 2022.

De los registros de precipitaciones observados, es posible concluir que la Estación Catemu la que ostenta mayor cantidad de datos, en la década de los años “80” y “90”, presenta las mayores magnitudes. En cambio, ya en la década de 2010 en adelante, las precipitaciones son menores respecto a la serie de datos.

Los registros de las estaciones Rio Aconcagua en San Felipe y Catemu (más próximas a la cuenca de estudio), entre ellas presentan un coeficiente de determinación (R^2) de 0,9 y una desviación estándar de 4,9 mm para la serie 2010 a 2020, lo que permite estimar las precipitaciones de la cuenca en base al promedio de los registros que se detallan a continuación:

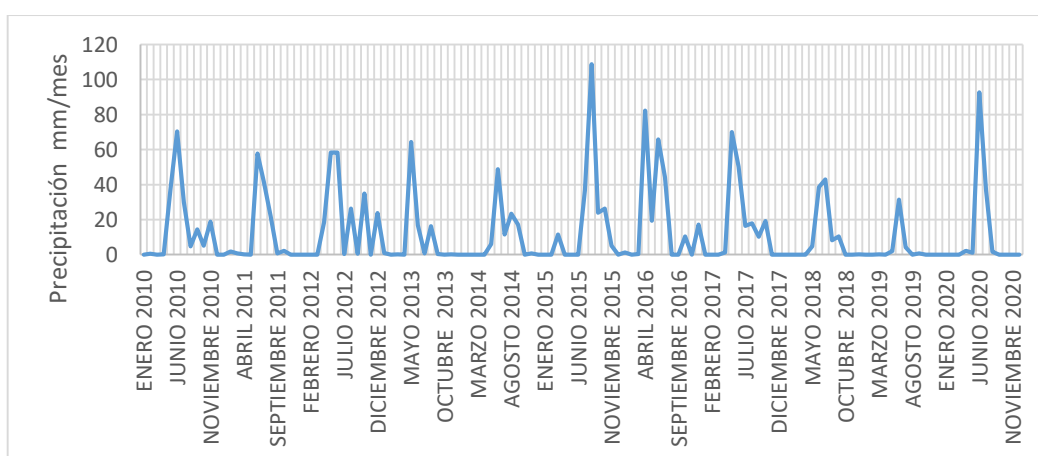


Figura 12: Estimación precipitaciones mensuales Cuenca Estudio, serie 2010 a 2020. Fuente: A partir de datos de DGA, 2022.

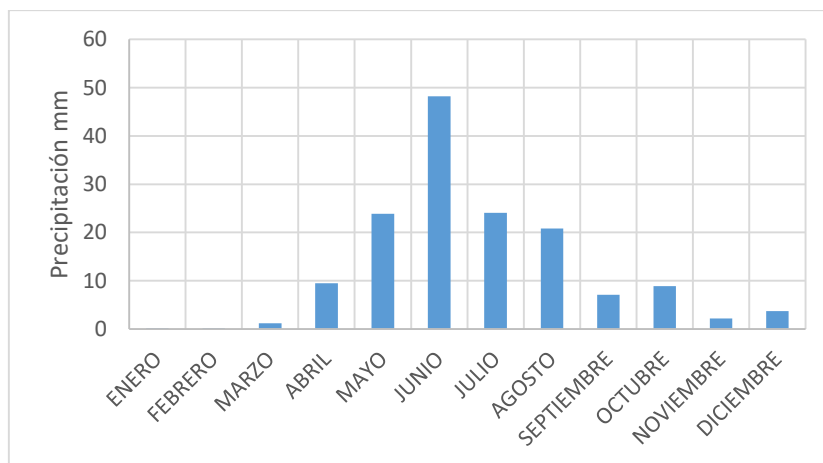


Figura 13: Estimación promedio precipitaciones mensuales cuenca Estudio, serie 2010 a 2020. Fuente: A partir de datos de DGA, 2022.

4.1.5 HIDROLOGÍA

El área de estudio se encuentra integrada por una serie de cauces naturales y cauces artificiales (canales), destacándose entre ellos, el Río Aconcagua y Estero Lo Campo. El Río Aconcagua formado por la confluencia del Río Juncal y Río Blanco en la cordillera de Los Andes, a 53 Km aguas arriba del área de estudio, que recibe el aporte de lluvias, deshielos y afloramiento de aguas subterráneas. Para el caso del Estero Lo Campo, nace al interior del área de estudio en el valle central, concebido por el afloramiento de aguas subterráneas, lluvias y la desecación de predios (JRM Asesorías, 2017).

En relación a la red canales, éstos se encuentran bajo la jurisdicción de la Segunda Junta de Vigilancia del Río Aconcagua, que son utilizados para el transporte de agua captada desde el Río Aconcagua y Estero Lo Campo para el riego de predios agrícolas, destacándose entre ellos, los canales “Comunero”, “Valdesano”, “Catemu Alto”, “Las Vegas”, “Lorino”, “Campino”, “Comunidad de Panquehue”, entre otros.

En la siguiente figura se presenta la red hídrica ya descrita:

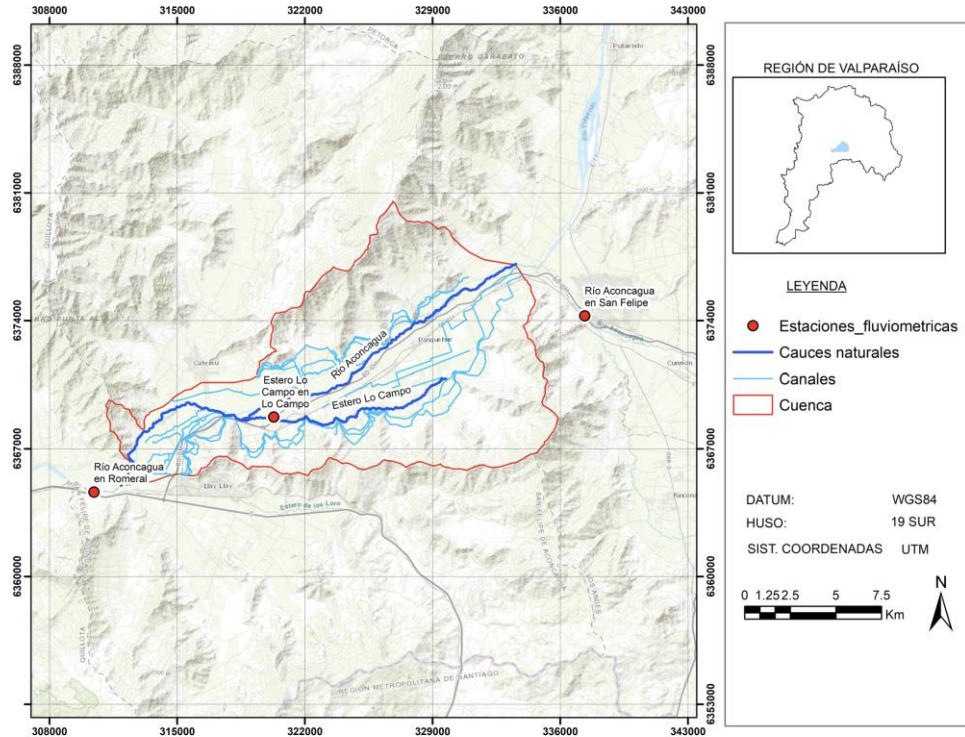


Figura 14: Red hídrica de cauces naturales y canales. Fuente: A partir de datos de DGA, 2022.

Se cuenta con una red de estaciones fluviométricas situadas en diferentes tramos del río Aconcagua, como así del Estero Lo Campo, del cual es posible obtener las siguientes series de datos, pudiendo visualizar la disminución en las magnitudes de los caudales del río Aconcagua, desde el año 2010, para las estaciones “Río Aconcagua En Romeral” y “Río Aconcagua en San Felipe”.

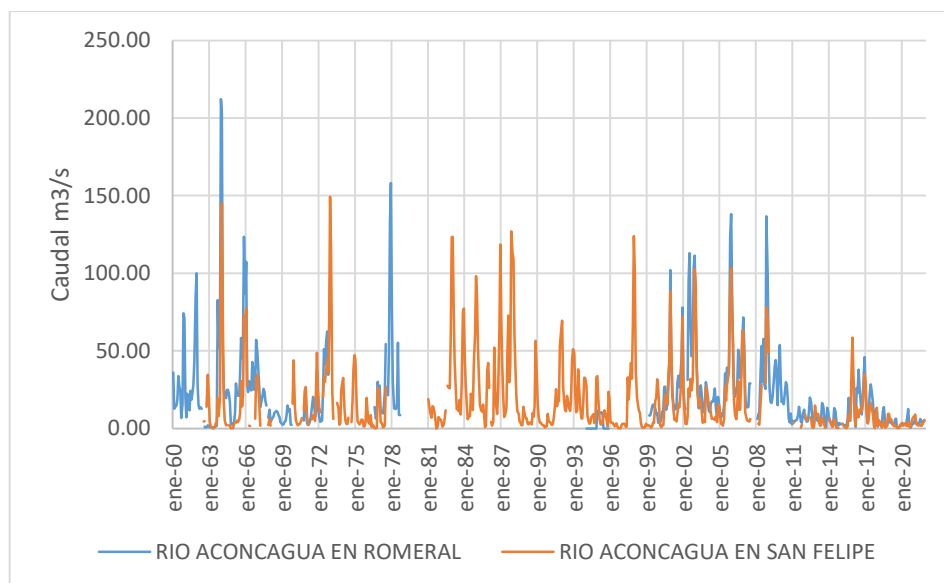


Figura 15: Caudales medios mensuales, Estación Río Aconcagua en Romeral y Río Aconcagua en San Felipe, serie 1960-2021. Fuente: A partir de datos de DGA, 2022.

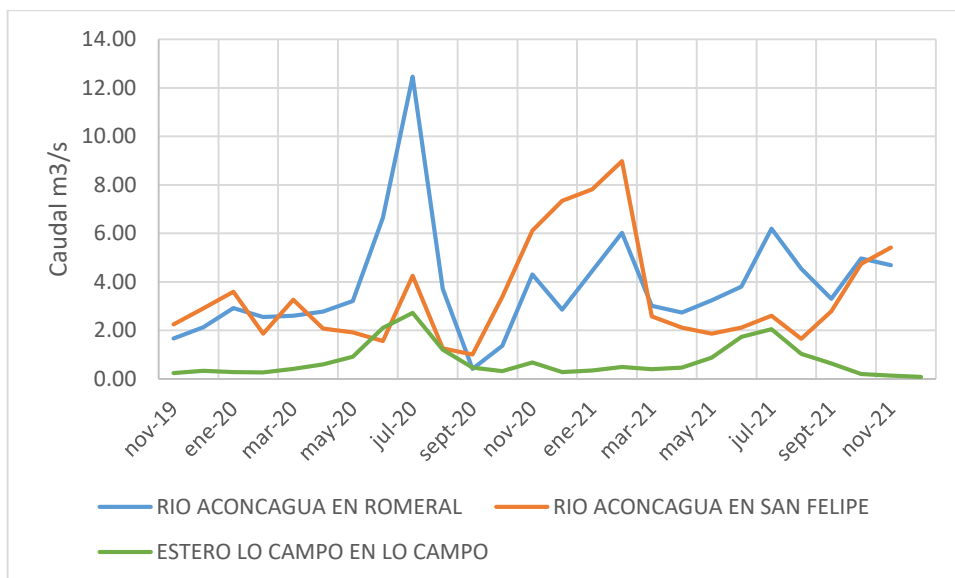


Figura 16: Caudales medios mensuales, Estación Río Aconcagua en Romeral, Río Aconcagua en San Felipe y Estero Lo Campo en Lo Campo, serie nov. 2019-dic. 2021. Fuente: A partir de datos de DGA, 2022.

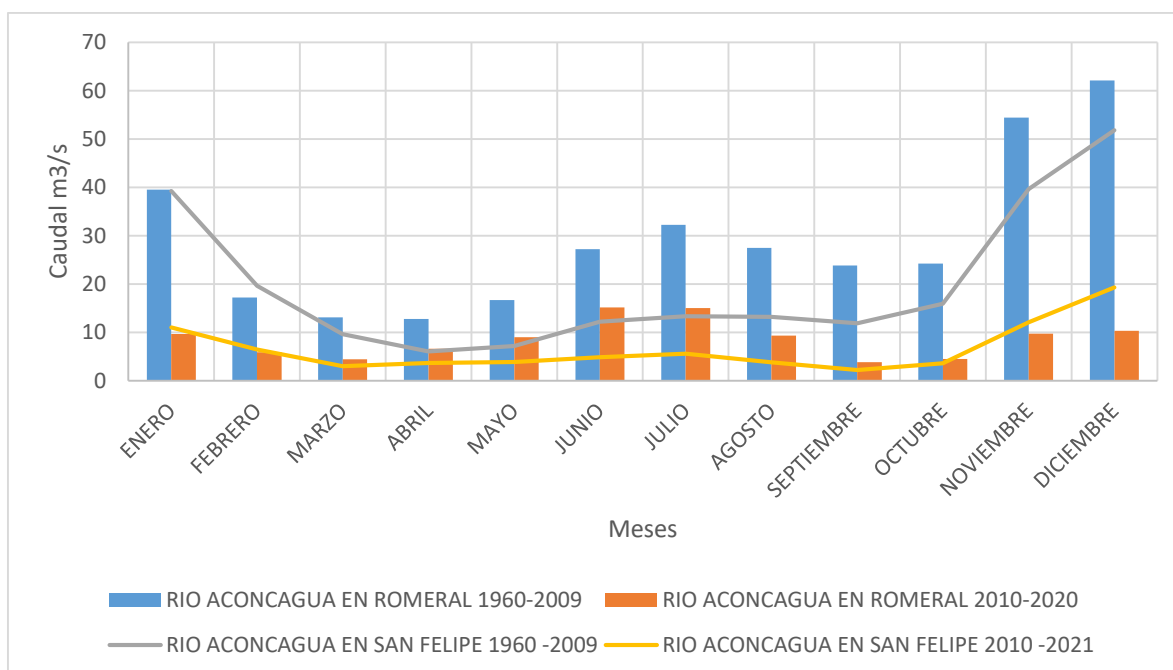


Figura 17: Variación mensual caudales medios, estación “Río Aconcagua en Romeral”, “Río Aconcagua en San Felipe”. Fuente: A partir de datos de DGA, 2022.

4.1.6 HIDROGEOLOGÍA

El área de estudio conforme a los trabajos de DICTUC (2009) y WSP Consulting Chile Ltda. (2019), se encuentra comprendido por el Acuífero Aconcagua, delimitado por el basamento rocoso y formado por depósitos aluviales, coluviales y fluviales del Cuaternario. Dicho acuífero se encuentra a su vez, subdividido por dos unidades hidrogeológicas “Unidad B” y la “Unidad D”.

Según WSP Consulting Chile Ltda (2019), la unidad B corresponde a sedimentos de gruesa a mediana granulometría, de ripios, con una matriz arenosa, una conductividad hidráulica en promedio que se encuentra entre los 3 a 600 m/d, un espesor promedio de 70 m y un coeficiente de almacenamiento (sy) que varía entre 1 a 12. La Unidad D por su parte, que subyace a la Unidad B, contiene sedimentos de fina granulometría del tipo arenas limosas con abundante matriz de arcilla, permeabilidad en un rango de 0,3 m/día a 60 m/d, coeficiente de almacenamiento de 3 a 12 y un espesor promedio de 110 m.

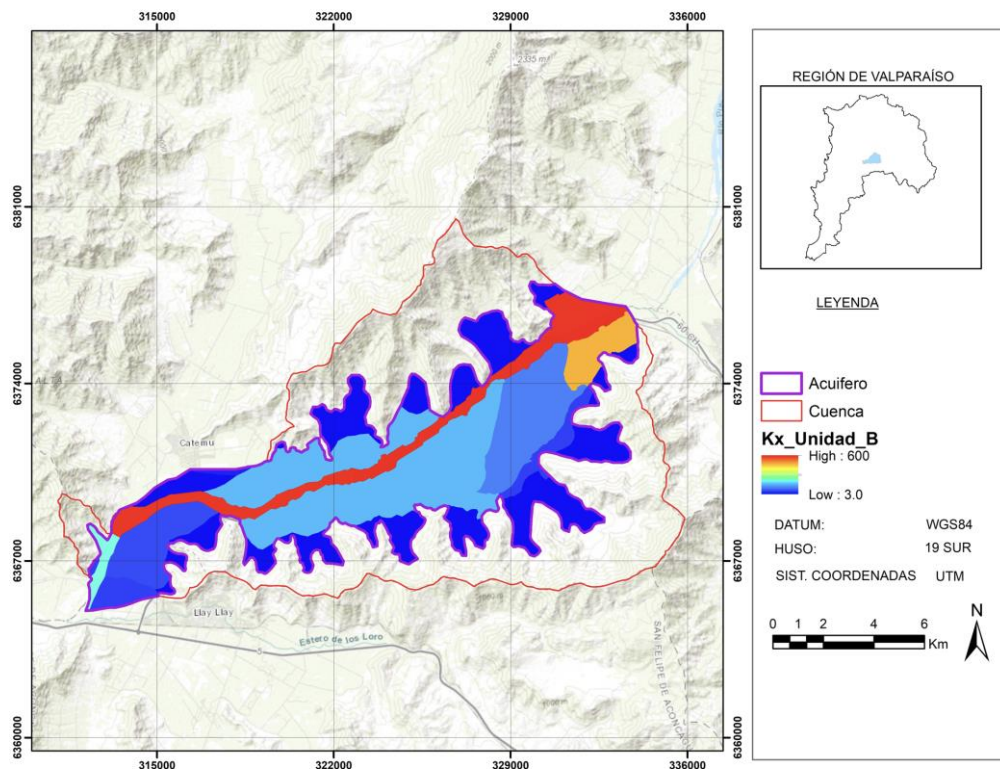


Figura 18: Conductividad hidráulica Unidad B. Fuente: A partir de datos de WSP Consulting Chile Ltda, 2019.

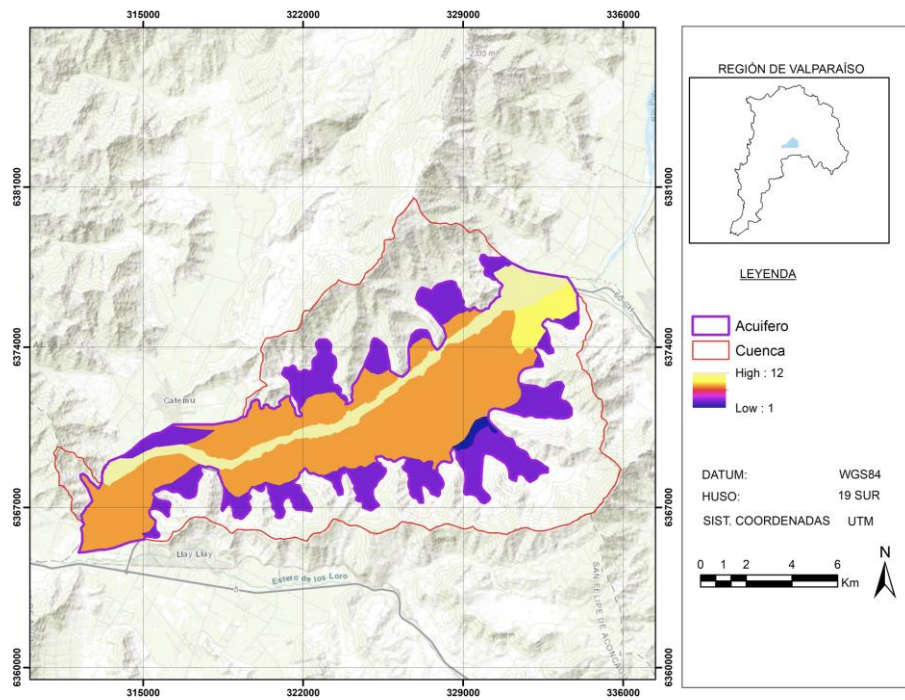


Figura 19: Coeficiente de almacenamiento (sy) Unidad B. Fuente: A partir de datos de WSP Consulting Chile Ltda, 2019.

La sección del acuífero en estudio, posee una superficie de 106,2 Km², la que presenta un alto grado de conexión con el río Aconcagua, produciendo afloramientos de aguas subterráneas en el río e infiltraciones en él (WSP Consulting Ltda., 2019), situación similar ocurre con el Estero Lo Campo, según JRM Asesorías (2017). A su vez, se cuenta con pozos de observación de la Dirección General de Aguas y de particulares, quienes reportan los niveles estáticos para conocimiento del público. De dichos registros, es posible visualizar en el valle, profundidades en promedio del nivel freático en torno a los 2 a 5 mbntn., con una tendencia a aumentar su profundidad.

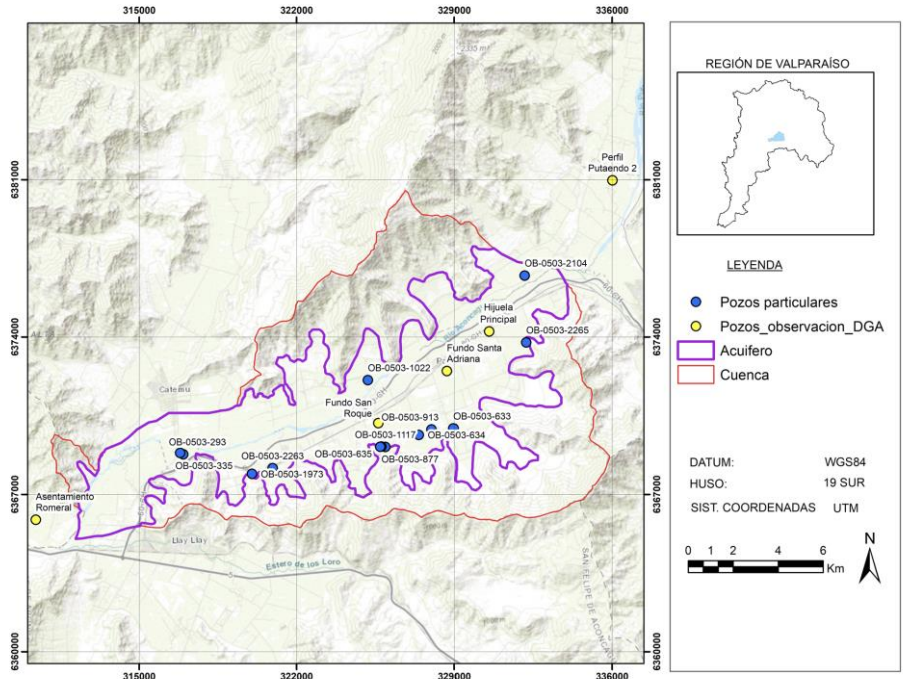


Figura 20: Pozos de observación niveles estáticos. Fuente: A partir de datos de DGA, 2022.

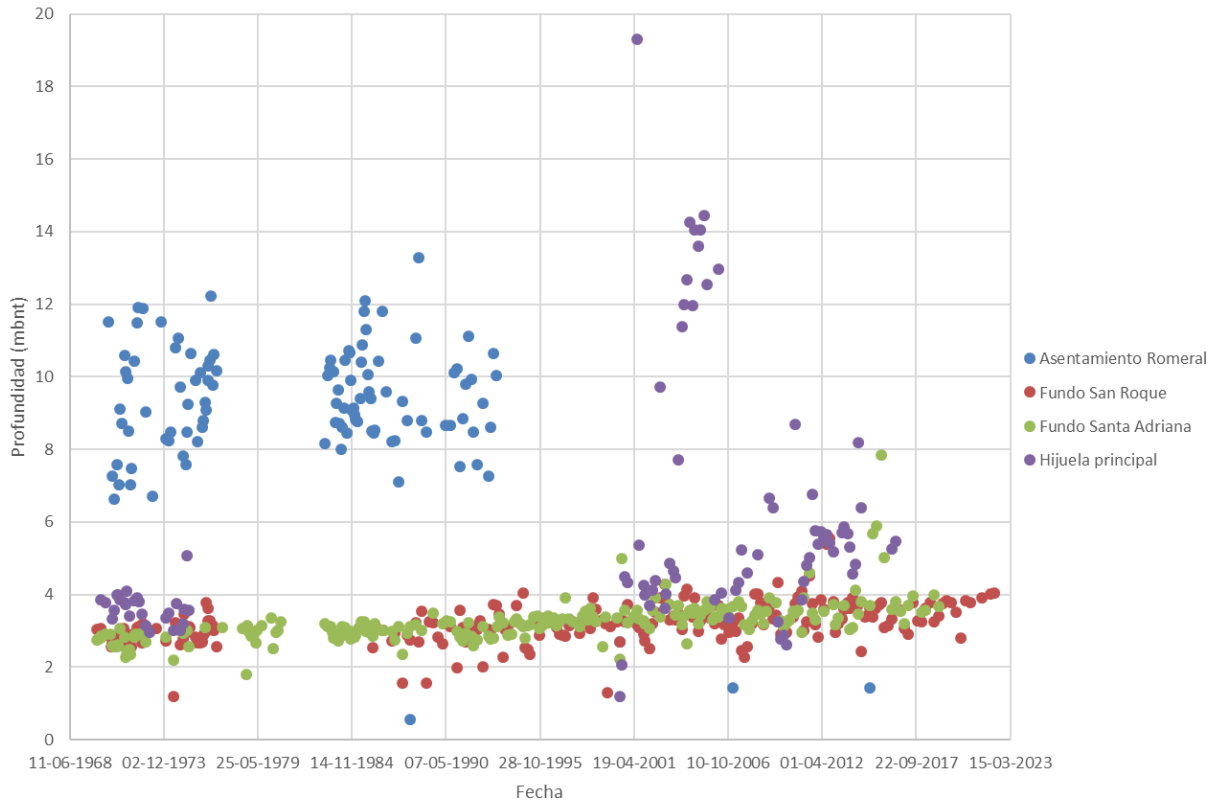


Figura 21: Registros niveles estáticos pozos observación DGA. Fuente: A partir de datos de DGA, 2022.

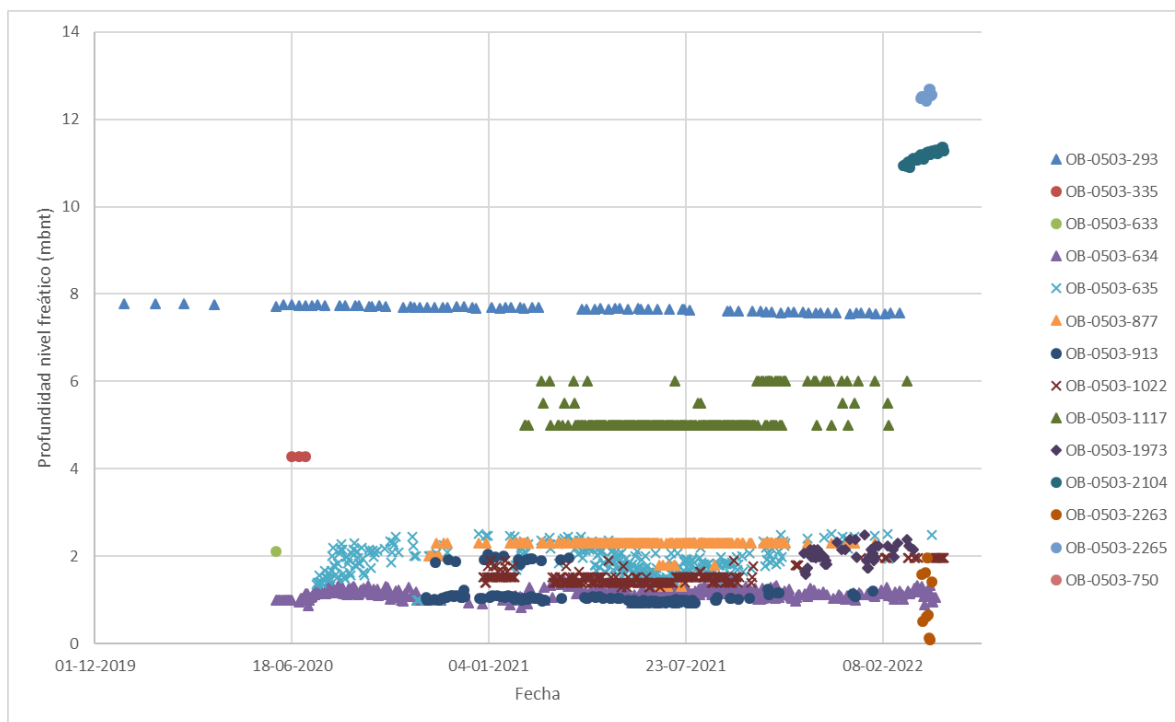


Figura 22: Registros niveles estáticos pozos de particulares. Fuente: A partir de datos de DGA, 2022.

4.1.7. USO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Desde el punto de vista administrativo y jurídico del uso de aguas subterráneas, la DGA, es el organismo encargado de planificar el desarrollo del recurso hídrico del estado de Chile (Ministerio de Justicia, 1981). Para ello, en base a características hidrológicas espaciales y temporales, ha establecido en el acuífero de estudio, dos sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común (SHAC), correspondientes a los sectores denominados “Acuífero 3 - Panquehue” y “Acuífero 4 – Catemu”, los que en la actualidad se encuentran declarados como de zonas de prohibición para nuevas explotaciones de aguas subterráneas, esto debido a que la demanda comprometida supera a toda la disponibilidad determinada por la DGA, contando con 92 derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas otorgados a terceros, por un caudal de 5,77 m³/s y distribuidos según se presenta a continuación:

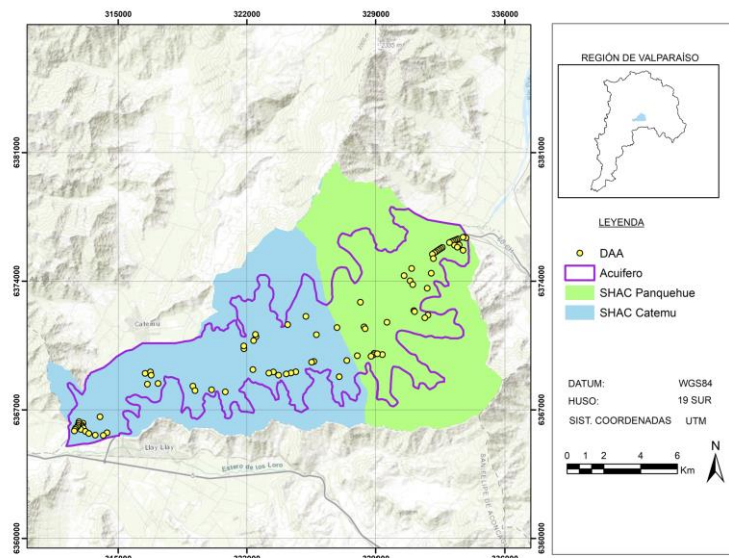


Figura 23: Derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas y SHAC. Fuente: A partir de datos de DGA, 2022.

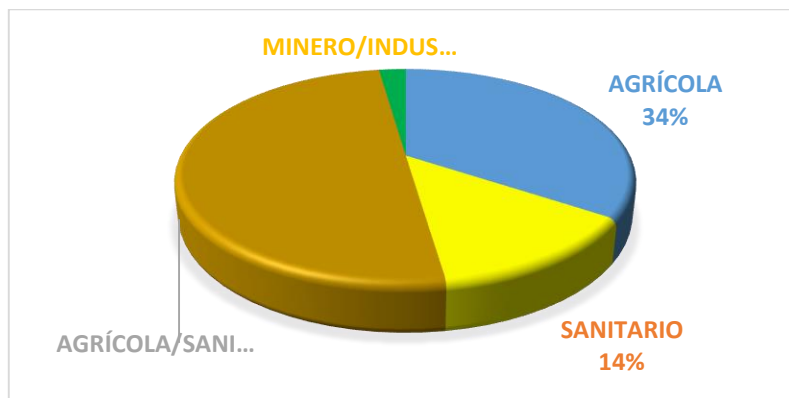


Figura 24: Distribución de caudales otorgados por tipo de uso. Fuente: A partir de datos de DGA, 2022.

4.1.8. RECARGAS AL ACUÍFERO

MEDIANTE CANALES

Considerando lo visualizado en terreno con fecha 23/04/2022 a 24/04/2022, gran parte de los canales del área de estudio se encuentran sin revestir, es decir, no impermeabilizados, por lo que se estima la recarga de aguas a través de ellos. Considerando el tipo de suelo y su capacidad de campo (CC), la recarga efectiva se estima mediante la iteración de los resultados del modelo numérico hasta conseguir la calibración deseada.

Tabla 2: Canales y respectivos derechos de aprovechamientos de aguas. Fuente: A partir de datos de DGA, 2022.

| Canal | Fuente | Derechos de aprovechamiento (caudal l/s) |
|------------------------|-------------------|---|
| Santa Isabel | Rio Aconcagua | 500 |
| Catemu del Alto | Rio Aconcagua | 3700 |
| Catemu del Bajo | Rio Aconcagua | 2000 |
| Turbina | Rio Aconcagua | 500 |
| Pepino | Rio Aconcagua | 1650 |
| Chacay | Rio Aconcagua | 1200 |
| Comunidad Panquehue | Rio Aconcagua | 1600 |
| Del Cerro | Rio Aconcagua | 400 |
| Valdesano | Rio Aconcagua | 2500 |
| Comunero | Rio Aconcagua | 3000 |
| Las Vegas | Rio Aconcagua | 1678 |
| Campino | Estero Lo Campo | 567 |
| Lorino | Estero Lo Campo | 945 |
| Pala Yankee | Estero Lo Campo | 167 |
| Viña Errazuriz | Estero Lo Campo | 342 |
| Dren Borgino | Dren | 193 |
| La Redonda o Agustinos | Estero Bellavista | 500 |

MEDIANTE PRECIPITACIONES

La recarga al acuífero proveniente de precipitaciones, se ha estimado utilizando el software “EasyBalan” (Vázquez-Suñé y Castro, 2002), el que por medio de la fórmula de Thornthwaite, estima la recarga de la magnitud de precipitaciones mensuales, temperaturas medias mensuales y tipos de suelos, considerando en este último la capacidad de campo, el punto de marchitez permanente, su respectiva superficie, entre otros parámetros.

Para el presente caso, se consideró la serie de precipitaciones y temperaturas registradas entre los años 2010 a 2020. En relación a los tipos de suelos, estos fueron obtenidos mediante análisis de laboratorios, los que evidencian diferentes tipos de texturas respecto a su distribución espacial, observándose magnitudes de capacidades de campo superiores en el pie de montes en contraste a zonas adyacentes al río Aconcagua.

Tabla 3: Suelos- Capacidades de campo (CC) y punto de marchites permanente (PMP). Fuente: A partir de datos de Agrolab 2016a, 2016b; Calderón, 2018; Herrera, 2018; TRANSELEC, 2019; Catemu Solar Spa., 2020; PUC, 2020; Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC), 2021.

| N° | Textura | CC % | PMP | Sector |
|----|----------------------------|------|------|-------------------------------|
| 1 | Franco limosa | 66,7 | 45,1 | Pie de monte |
| 2 | Franco arenosa | 19,4 | 10,6 | Adyacente río |
| 3 | Franco limosa | 30,5 | 14,9 | Intermedio río y pie de monte |
| 4 | Franca | 12,3 | 5,8 | Adyacente río |
| 5 | Franca | 31,9 | 17,2 | Intermedio río y pie de monte |
| 6 | Areno francosa | 17,6 | 12,8 | Adyacente río |
| 7 | Arcillo limosa | 23 | 13 | Adyacente río |
| 8 | Franco arcillosa limosa | 38,4 | 21,9 | Intermedio río y pie de monte |
| 9 | Franco | 56,6 | 14,7 | Pie de monte |

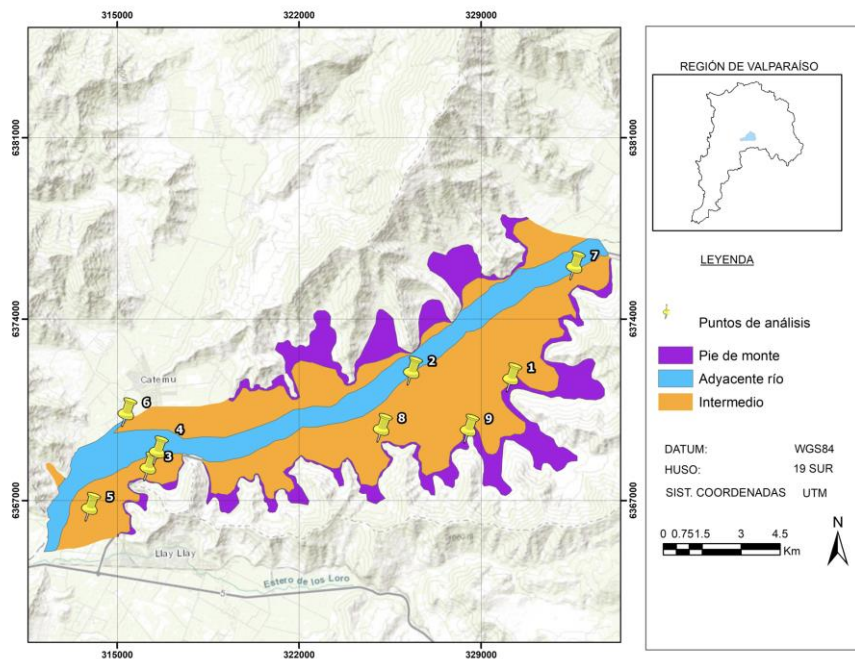


Figura 25: Zonificación de suelo. Fuente: A partir de datos de Agrolab 2016a, 2016b; Calderón, 2018; Herrera, 2018; TRANSELEC, 2019; Catemu Solar Spa., 2020; PUC, 2020; PUC, 2021.

4.1.9 HIDROGEOQUÍMICA

Se recopiló información de la hidrogeoquímica del sector, obtenida de antecedentes incorporados en solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas e información proporcionada por la DGA y la Secretaria Regional del Ministerio de Salud de Valparaíso, antecedentes aportados en los sitios web de ambos servicios (<https://dga.mop.gob.cl/Paginas/default.aspx> y <https://seremi5.redsalud.gob.cl/>), los que mediante el análisis de concentración de iones, permite clasificarlas como aguas bicarbonatadas cálcicas y sulfatadas cálcicas, con una dureza alta (concentraciones entre 200 a 450 CO_3Ca mg/L), según Martínez (2006). Junto a ello, es posible visualizar una tendencia al incremento de nitratos y sulfatos, con concentraciones de nitrato de 2,3 mg/L (año 1998) a 28 mg/L (año 2017) y para sulfatos 110 mg/L (año 2000) hasta 388 mg/L (año 2019), ambos casos producto posiblemente por el aumento de la aplicación de fertilizantes artificiales en la zona.

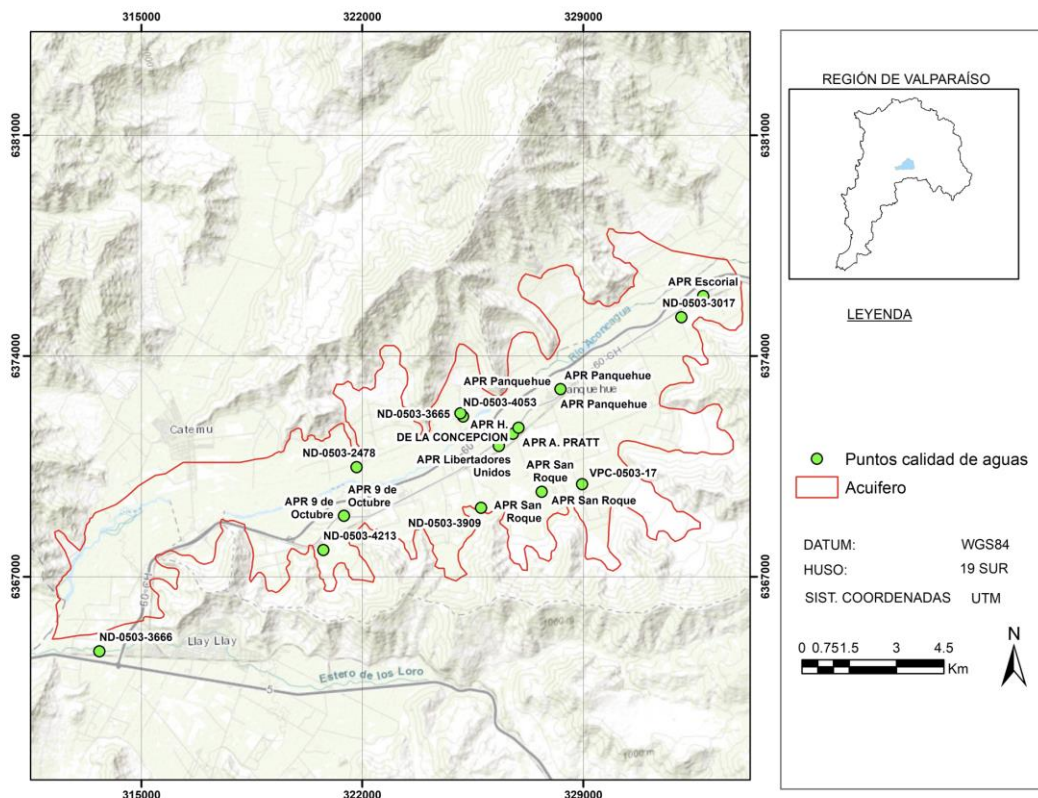


Figura 26: Puntos de muestreo de calidad de aguas subterráneas. Fuente: A partir de datos de DGA y Secretaria Regional del Ministerio de Salud de Valparaíso, 2022.

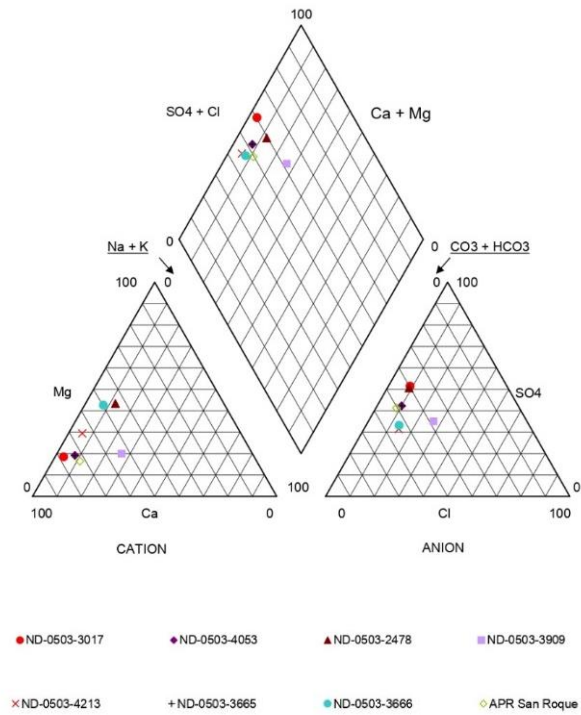


Figura 27: Diagrama de piper - calidad de aguas subterráneas. Fuente: A partir de datos de DGA y Secretaria Regional del Ministerio de Salud de Valparaíso, 2022.

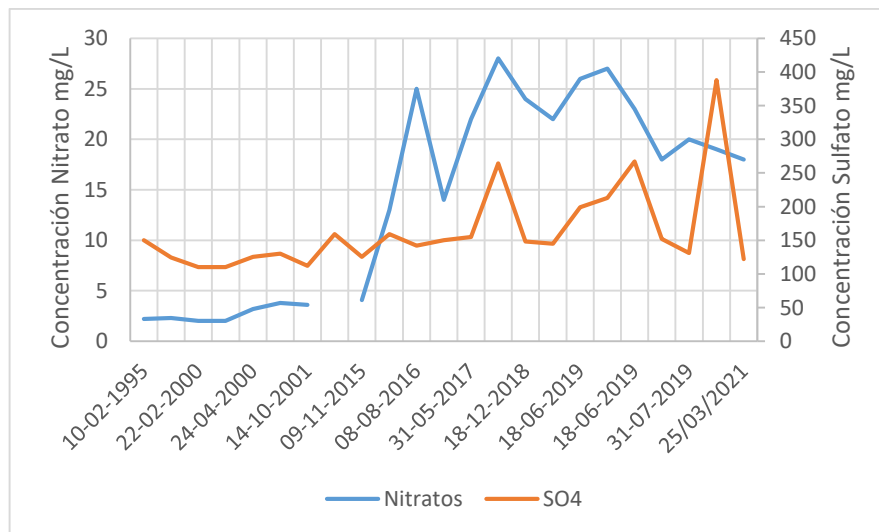


Figura 28: Concentraciones de nitratos y sulfatos- serie 1995 a 2021. Fuente: A partir de datos de DGA y Secretaria Regional del Ministerio de Salud de Valparaíso, 2022.

4.1.10 MODELO CONCEPTUAL DEL SISTEMA HIDROGEOLÓGICO

Luego de conocer las variables relevantes que dominan el sistema hidrogeológico, es preciso establecer un modelo hidrogeológico conceptual, necesario para la construcción del modelo numérico, definiendo como entradas y salidas del sistema las siguientes variables:

Entradas

- Entrada flujo subterráneo desde el oriente del acuífero
- Recarga lluvia
- Recarga canales

Salidas

- Salida flujo subterráneo desde el poniente del acuífero
- Extracción por bombeos de pozos
- Afloramientos de aguas subterráneas
- Evapotranspiración

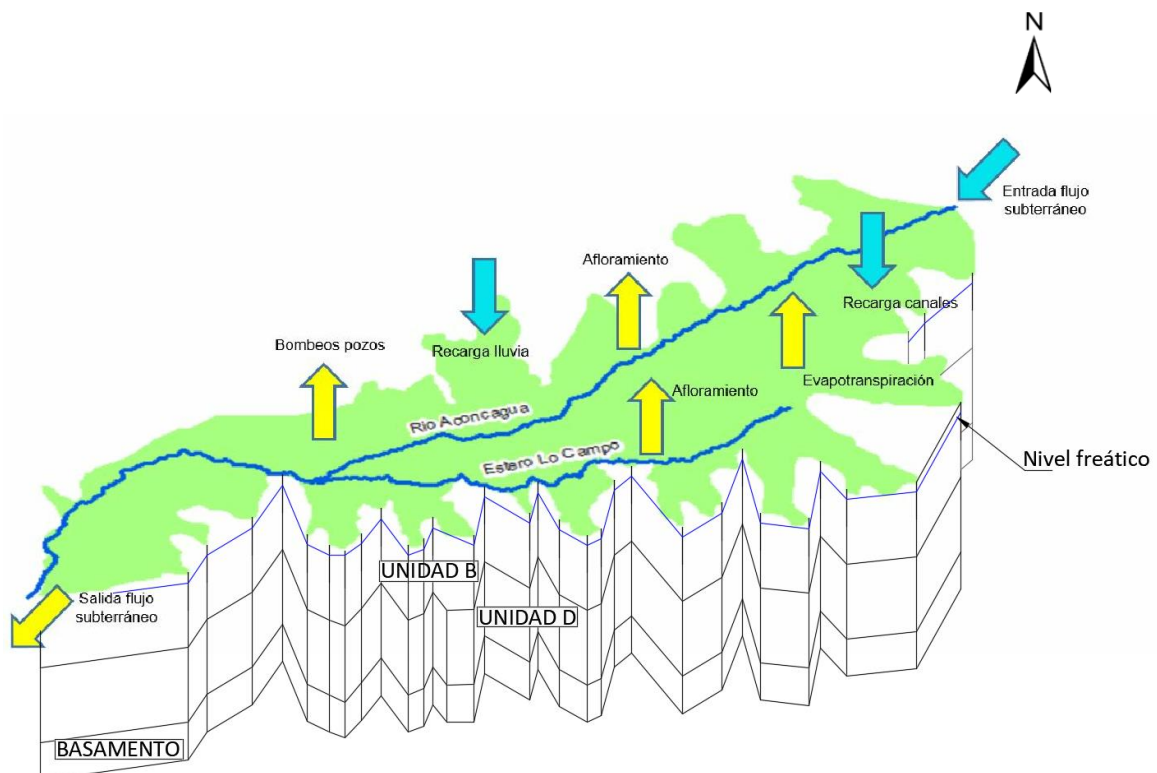


Figura 29: Modelo conceptual del sistema hidrogeológico.

La principal entrada al sistema corresponde al ingreso de flujo subterráneo, que proviene desde el oriente del acuífero y éste a su vez, es recargado por los aportes de la cuenca del río Aconcagua de una superficie aproximada mayor de 4.500 Km² en el área de estudio, con tal solo una superficie de 106,2 Km².

Respecto a las salidas, las extracciones de aguas y afloramiento de aguas subterráneas, representan las variables de mayor relevancia.

4.2. FASE II: PARÁMETROS DEL MODELO NUMÉRICO

Para la elaboración del modelo numérico hidrogeológico de flujo y transporte, se utilizó el software Model Muse, que emplea el código Modflow, programa desarrollado por U.S. Geological Survey, basado en el método de diferencias finitas, y que según Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) (2012) consiste en una *“técnica de discretización numérica para resolver ecuaciones diferenciales parciales, reemplazando el dominio continuo de interés por una grilla rectangular y expresando las derivadas como diferencias.”*

El modelo, requiere el ingreso de variables tales como: geometría del acuífero, valores de conductividades hidráulicas, coeficientes de almacenamiento, condiciones de borde, recargas, captaciones de aguas subterráneas con sus respectivos caudales e incorporación de elementos vinculantes en el balance hídrico.

4.2.1. GEOMETRÍA DEL MODELO

La geometría del modelo y extensión del mismo (dominio de la modelación), se limitó lateralmente y en profundidad desde la superficie de terreno hasta el contacto entre los depósitos no consolidados del Cuaternario y el basamento rocoso, dentro del sector seleccionado, el que se encuentra entre la confluencia del río Aconcagua con el Río Putaendo y la confluencia del río Aconcagua con el Estero Los Loros.

4.2.3. DISCRETIZACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL

Se estableció una discretización espacial horizontal, mediante un mallado rectangular de tamaño de celda de 100 m x 100 m, lo que pretende generar resultados representativos dentro del contexto de un modelo regional. En relación a la discretización espacial vertical conforme la litología y estudios hidrogeológicos el modelo cuenta con 3 capas, correspondientes a la “Unidad B”, “Unidad D” y Basamento, ya descritos en el apartado correspondiente a hidrogeología.

La discretización temporal del modelo, se realizó para régimen permanente y transitorio, siendo éste último para el periodo desde Enero 2016 a Diciembre 2020 (5 años), dividido en 60 intervalos de tiempo (meses).

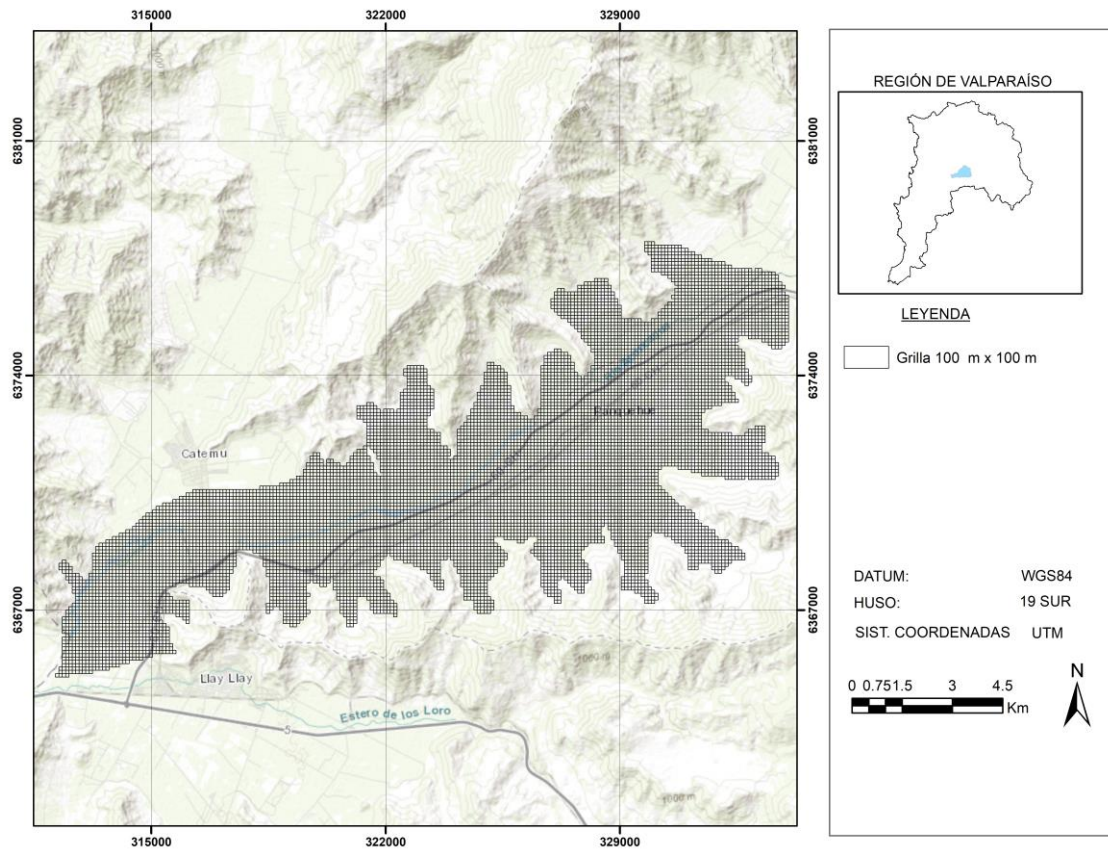


Figura 30: Grilla horizontal 100 m x 100 m. Fuente: A partir de datos de SERNAGEOMIN, 2003.

4.2.4. CONDICIONES DE BORDE Y CONDICIONES INICIALES

Mediante las condiciones de contorno, también llamadas condiciones de borde, se incorpora al modelo las interacciones entre las masas de aguas subterráneas y el medio externo. Las que pueden ser clasificadas en el siguiente sentido:

Condición de Dirichlet: De primer tipo, con potencial hidráulico o altura piezométrica conocida. La que se estableció para el modelo en el límite de flujo poniente, con una altura de 575 m y en el límite de flujo oriente de éste con una altura de 360 m, mediante el método “constant head”.

Condición de Neumann: De segundo tipo, con un gradiente hidráulico prescrito. Esta condición fue utilizada para la condición “well” (pozos de extracción) y “recharge” (recarga)

Condición de Cauchy: O tercer tipo, también conocida como condición mixta, siendo una combinación de las anteriores, utilizada en el modelo mediante la función “*Drain*”, en específico para el río Aconcagua y el Estero Los Loros.

Para la condición inicial en régimen permanente se estableció que el nivel piezométrico se inicia igual a la superficie de terreno, conforme los registros de niveles freáticos del sector y potencial afloramiento de aguas subterráneas cercanos al río Aconcagua.

4.2.5. ZONIFICACIÓN DE PARÁMETROS

Para el desarrollo del modelo numérico, se zonificaron las variables de conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento, recarga por canales y extracción de aguas subterráneas, mediante pozos.

Para el caso de la conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento (S_y y SS), de acuerdo a lo señalado en el apartado de hidrogeología, se establecieron los siguientes rangos de valores:

Tabla 4: Zonificación de conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento. Fuente: A partir de datos de WSP Consulting Ltda.

| Variable | U.A. | Rango | Ubicación |
|---|-----------|---------------------|--|
| Conductividad hidráulica (m/día) horizontal ($K_x=K_y$) y vertical ($K_z=K_x/10$) | Unidad B | 3 m/día -600 m/día | Valores menores adyacente a límites de acuífero con el basamento. |
| | Unidad D | 0,7 m/día -60 m/día | |
| | Basamento | 0,5 m/día | |
| Coeficiente de almacenamiento | Unidad B | 0,03- 0,12 | Valor mayores en torno al cauce del río Aconcagua. |
| | Unidad D | | |
| | Basamento | 0,03 | |
| Coeficiente de almacenamiento específico (1/m) | Unidad B | 1E-8 – 1E-5 | Valores menores en torno al cauce del río Aconcagua y mayores adyacente límites de acuífero con el basamento |
| | Unidad D | 1E-8 – 1E-5 | |
| | Basamento | 8E-6 – 1E-5 | |

En relación a la recarga mediante canales y extracción de aguas subterráneas, su funcionamiento se escoge en función del trazado y ubicación de los mismos.

4.2.6. POZOS DE EXTRACCIÓN

En base al catastro que posee la Dirección General de Aguas en el sector del Acuífero en estudio, se utilizó un total de 92 pozos, los que ascienden a un caudal total de 5,77 m³/s.

4.2.7. CALIBRACIÓN DEL MODELO

Considerando que la calibración consiste en la variación sistemática de ciertos parámetros del modelo (SEA, 2012), para el presente trabajo se analizó el ajuste que existe entre los niveles piezométricos observados en los pozos “Fundo San Roque”, “OB-0503-1022”, “OB-0503-1973”, “OB-0503-2104”, “OB-0503-2263”, “OB-0503-2265”, “OB-0503-293”, “OB-0503-335”, “OB-0503-633” y “OB-0503-634” y simulados, tanto para régimen permanente y régimen transitorio, mediante calibración manual o calibración prueba y error. Para ello, en una primera instancia, se desarrolló el modelo con una grilla de 1000 m x 1000 m, luego 500 m x 500 m, una rotación de la grilla o malla, se consideró un medio homogéneo e isotrópico, se hizo variar el espesor de cada unidad hidrogeológica (U.H.), entre otros. En función de las variaciones en las entradas del modelo, se seleccionan los criterios de

aceptación para los estadísticos tal como el error medio absoluto (MAE), raíz del error cuadrático medio (RMSE) y porcentaje de discrepancia del balance hídrico, considerándose que el modelo se encuentra calibrado con un MAE y RMSE menor al 5%, acorde con los criterios de cierre recomendados por la “*Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA*” (SEA, 2012) y porcentaje de discrepancia menor al 1%, considerando que representa la realidad del medio físico natural.

4.2.8. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad corresponde a la variación de resultados producto de la desviación de las variables de entradas. “*Los parámetros utilizados comúnmente para llevar a cabo el análisis de sensibilidad en un modelo hidrogeológico son las constantes elásticas, conductividades, coeficientes asociados a los mecanismos de transporte e incluso variables de entrada, como las tasas o caudales de recarga*” (SEA, 2012). En este contexto, se procedió a realizar análisis de sensibilidad a la recarga desde lluvia, recarga desde canales, bombeos de pozos y conductividad hidráulica, aumentando al doble y disminuyendo a la mitad las magnitudes.

4.2.9. MODELO DE TRANSPORTE DE CONTAMINANTES

De acuerdo a los antecedentes recopilados respecto a la calidad de aguas subterráneas del sector, que evidencian un incremento de nitratos, alcanzado el modelo de flujo calibrado, se seleccionó un predio de 184 m² de superficie, el que se encuentra en la parte media alta de la cuenca, indicándole al modelo que luego de la infiltración y en contacto con el nivel freático se genera un derrame con una concentración de 50 mg/L en un medio saturado previamente, sin la presencia de nitratos y solo por un periodo de 3 meses desde el inicio de la modelación hasta el último paso de tiempo de la simulación (N° 61), para determinar la trayectoria a través de los mecanismos de transporte por advección y dispersión, sin considerar reacciones de sorción (adsorción, quimisorción, absorción e intercambio iónico) y biodegradación. Luego de ello, se procede a incorporar tres medidas de abatimiento de transporte de contaminantes, consideradas como barreras hidráulicas, las que se describen a continuación:

1. En el primer escenario, se incorpora el bombeo de extracción de 3 pozos, en toda la Unidad B, funcionando simultáneamente con un caudal de 200 l/s cada uno.

2. Segundo caso, se modifica la litología de espesor de toda la Unidad B, asignando una conductividad hidráulica de $8,6 \text{ E-4 m/día}$ circundante en dos lados del polígono, junto con la incorporación de un pozo que extrae 100 l/s .
3. Tercer escenario, se encierra totalmente el polígono con modificación de la litología en los mismos términos señalados que el segundo escenario.

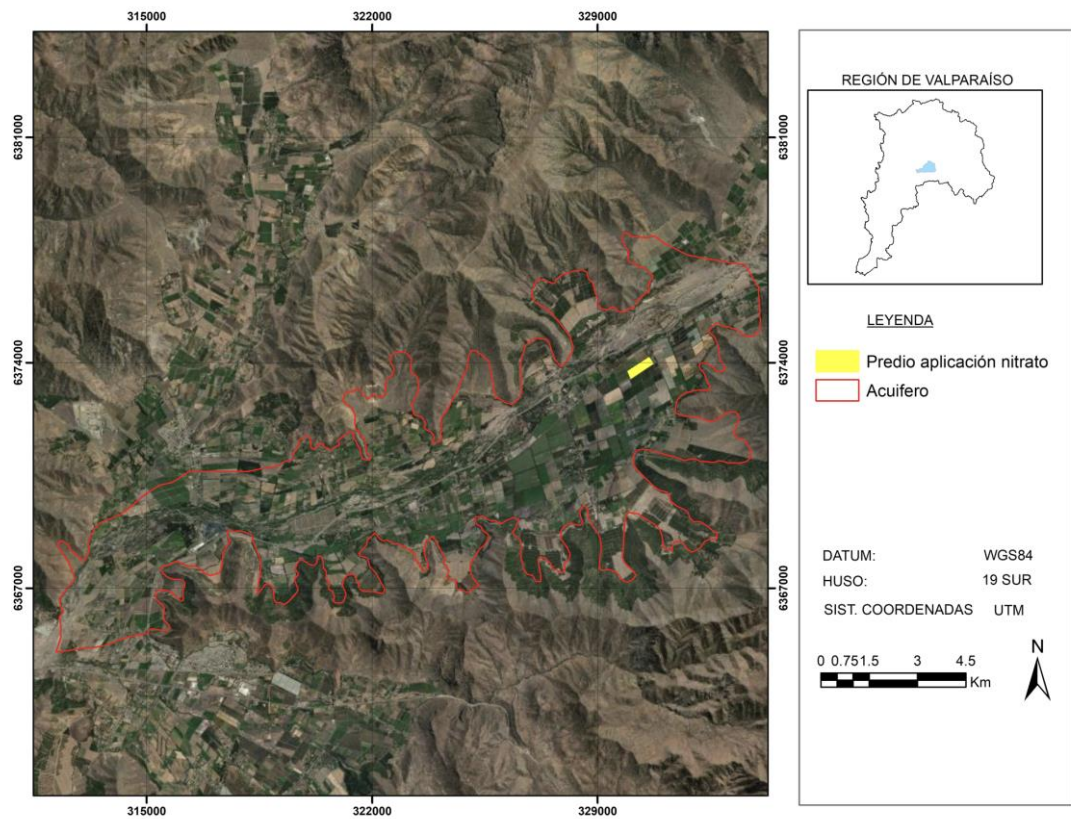


Figura 31: Predio con aplicación de nitrato.

4.3. FASE III. RESULTADOS DE MODELACIÓN

4.3.1. BALANCE DE MASA

Alcanzado el desarrollo del modelo numérico de flujo, se obtuvo un balance de flujo para régimen permanente y 60 balances de masas conformes los periodos de simulación o “stress periods” para régimen transitorio. Las entradas del sistema conciernen a: recarga, carga constante entrada, almacenamiento entrada; y las salidas: drenaje, pozos, almacenamiento salida y carga constante salida.

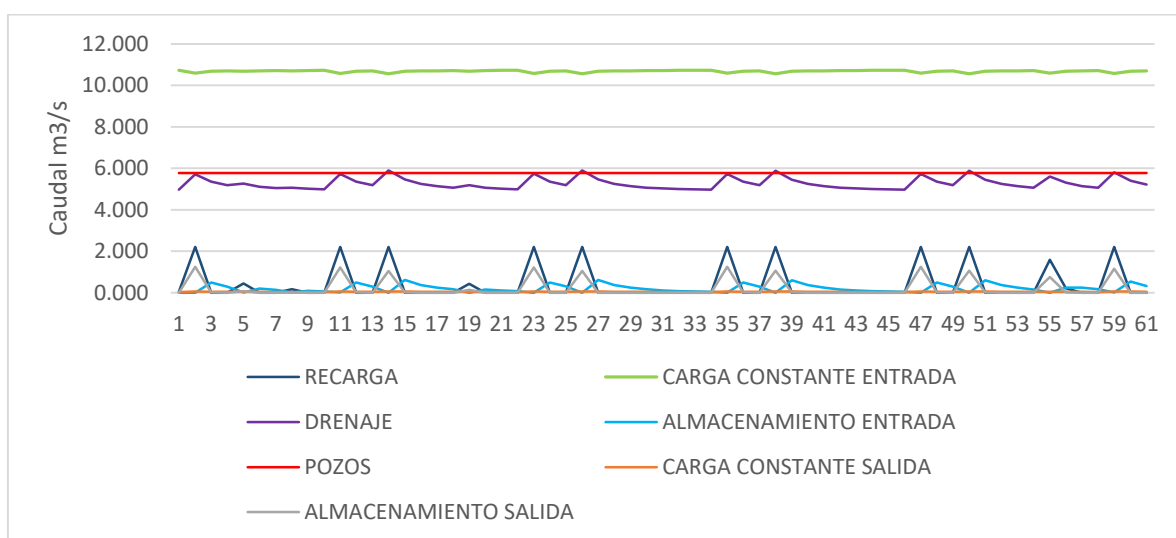


Figura 32: Balance de masa.

4.3.2. NIVELES PIEZOMÉTRICOS

De acuerdo al desarrollo del modelo numérico, se obtuvieron los niveles piezométricos para toda el área de estudio, configurando mayores potenciales hidráulicos hacia el oriente del acuífero con valores en torno a 575 m y menores hacia el poniente de éste (360 m), lo que se traduce en un gradiente hidráulico cercano a 0,84%, una profundidad del nivel freático de 3 m en promedio, siendo influenciados por las extracciones de aguas subterráneas, generando los respectivos conos de bombeos, la conductividad hidráulica, recargas, entre otros.

Respecto a la estacionalidad, modelada para los 60 periodos de simulación, demuestra una variabilidad cíclica, con depresiones de los niveles piezométricos durante los meses relativos a invierno (junio, julio y agosto) y un aumento en los meses de verano (diciembre a marzo).

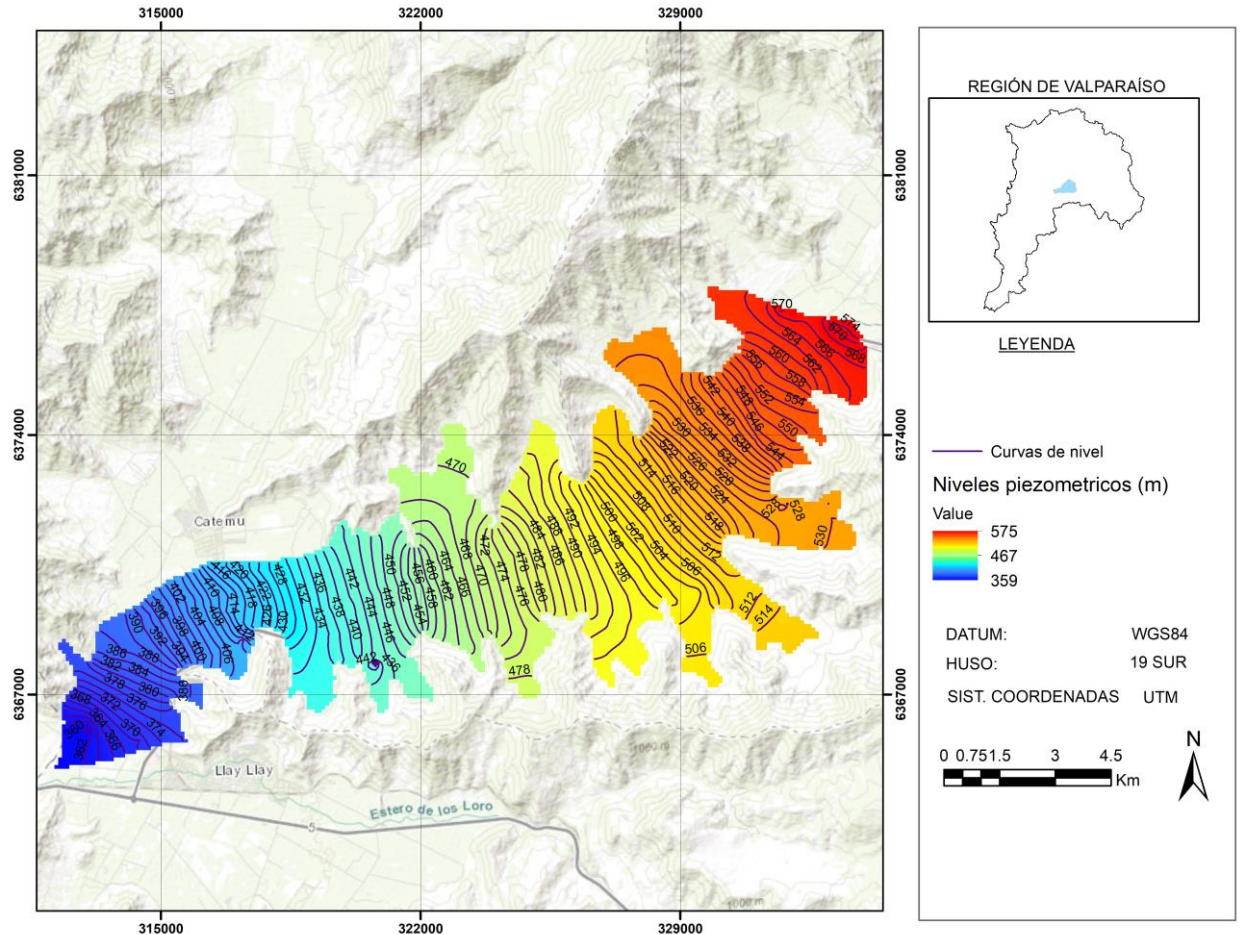


Figura 33: Niveles piezométricos – stress period 61-Unidad B.

4.3.3. CALIBRACIÓN DE LOS PARÁMETROS MODELO DE FLUJO

Acorde al modelo de flujo en régimen permanente y transitorio, se obtuvo un RMSE de 0,72 m y un MAE de 0,54 m, equivalentes a 1,7% y 1,2 %, respectivamente para los niveles piezométricos y un porcentaje de discrepancia máxima de 0,01 para el balance de masa. Considerando que se ha adoptado los criterios de aceptación de 5% para MAE y RMSE, y para porcentaje de discrepancia un 1%, se determina que el modelo numérico hidrogeológico se encuentra calibrado.

En las siguientes figuras se presenta la relación entre los niveles piezométricos observados v/s los simulados, para régimen permanente y transitorio.

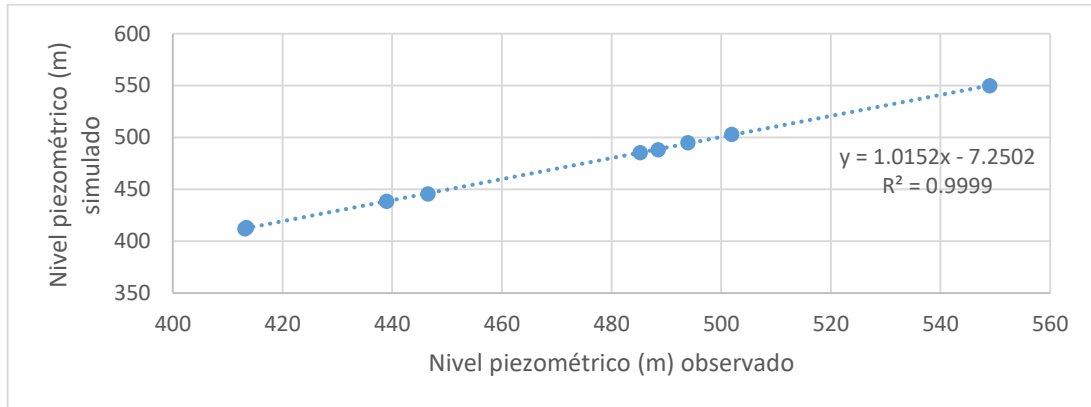


Figura 34: Niveles piezométricos observados v/s simulados, régimen permanente.

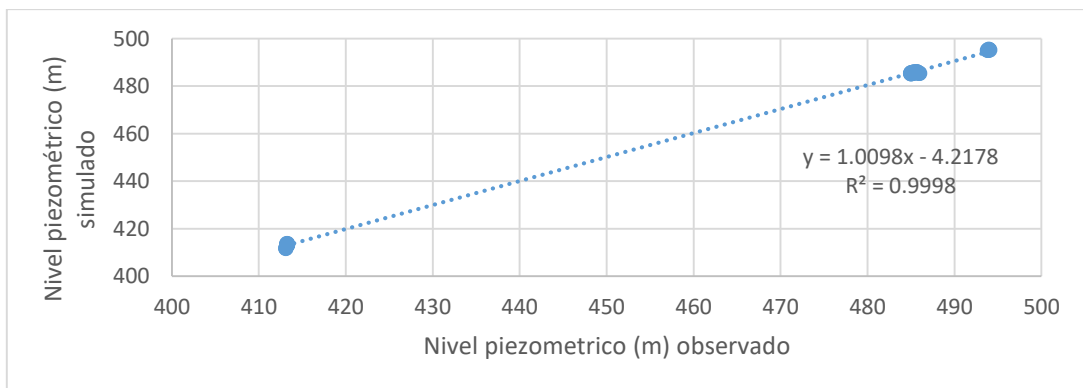


Figura 35: Niveles piezométricos observados v/s simulados, régimen transitorio.

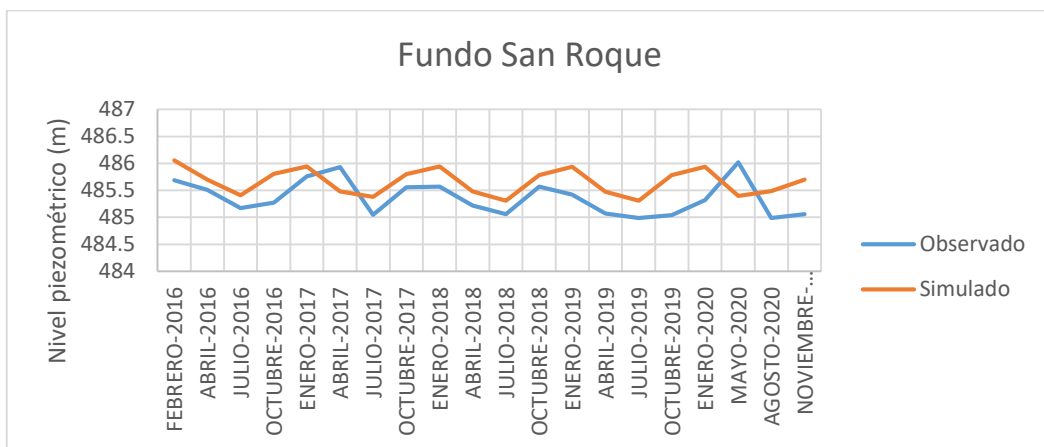


Figura 36: Hidrograma Pozo Fundo San Roque- niveles piezométricos observados v/s simulados, régimen transitorio.

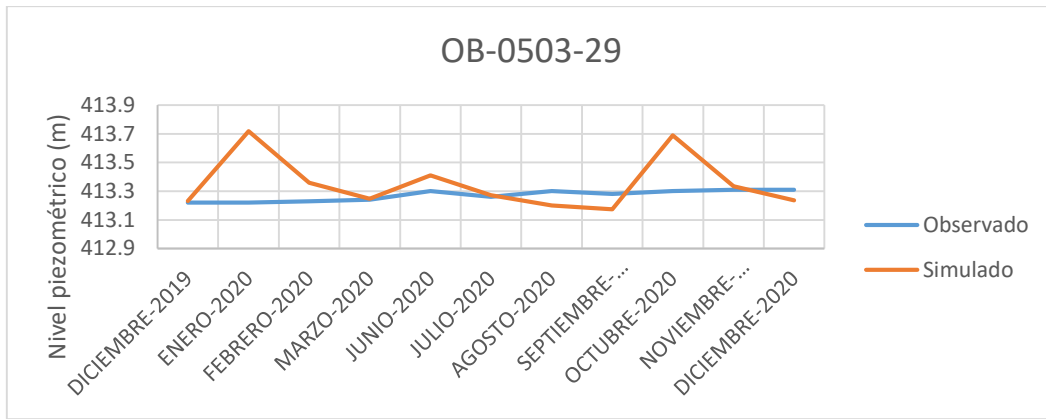


Figura 37: Hidrograma Pozo OB-0503-29- niveles piezométricos observados v/s simulados, régimen transitorio.

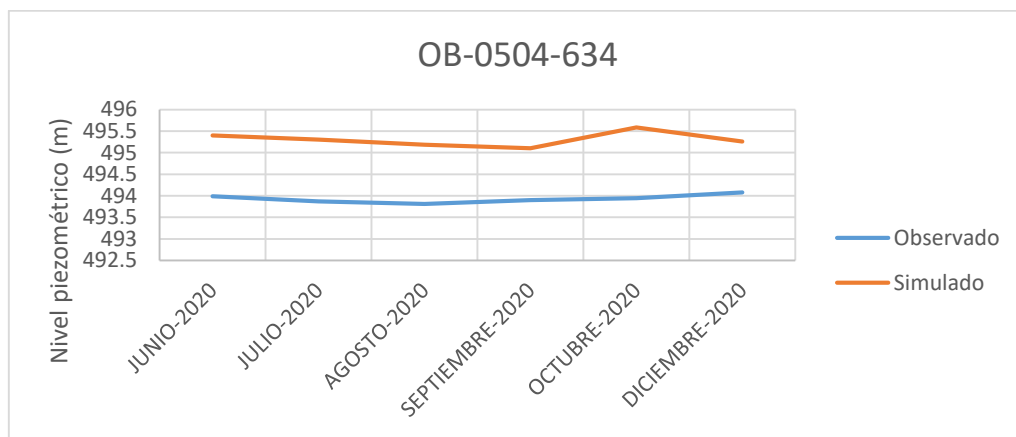


Figura 38: Hidrograma Pozo OB-0504-634- niveles piezométricos observados v/s simulados, régimen transitorio.

4.3.4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO DE FLUJO

Variación recarga

Al disminuir la recarga a la mitad, solo se observan diferencias en los niveles piezométricos en torno a 1 m respecto al modelo ya calibrado, obteniéndose un RMSE de 0,65 m, considerando un resultado aún más preciso. Caso contrario (aumenta al doble la recarga), igual situación ocurre no generándose variación superior a la unidad de los niveles piezométricos, no obstante, el RMSE aumenta a 0,9 m. Sin embargo, en ambos casos el modelo continúa calibrado.

Variación de bombeos de pozos

La modificación de los caudales de bombeo al doble de la extracción, es decir, $11,54 \text{ m}^3/\text{s}$, produce una disminución de los niveles piezométricos, generando en el límite oriente (entrada del acuífero) un potencial hidráulico de 575 m y en su límite poniente (salida del acuífero) una carga hidráulica de 319 m, generando un RMSE de 3 m, superando de esta forma el límite de RMSE del 5% (2,11 m), por lo que el modelo ya no se encontraría calibrado. Situación contraria ocurre al disminuir a la mitad los caudales de bombeos de los pozos al $2,88 \text{ m}^3/\text{s}$, obteniendo un potencial hidráulico mayor de 575 m y menor de 360 m, con un RMSE de 1,35 m, con diferencias residuales de más de 2 m entre valores observados en contraste a los simulados, considerándose calibrado el modelo.

Variación conductividad hidráulica

Al disminuir la conductividad hidráulica a la mitad, el potencial hidráulico mínimo alcanza los 332 m, mientras el máximo se mantiene en 575 m, se obtiene además un RMSE de 3,8 m, con la mayor diferencia entre los valores observados v/s los valores simulados en 9 m. Por lo que se considera que el modelo no se encuentra calibrado.

Al aumentar al doble la conductividad hidráulica, se obtiene un potencial hidráulico mínimo de 360 m y un máximo de 575 m, un RMSE 1,96 m, con un mayor desvío de mayor a 3 m. Conforme a ello, se considera que el modelo se encuentra calibrado.

4.3.5. MODELO DE TRANSPORTE

Obtenido el modelo numérico hidrogeológico de flujo debidamente calibrado, se realiza el modelo de transporte de la dispersión de nitrato, mediante el vertimiento de dicho compuesto iniciado en el nivel freático por un periodo de 3 meses, con el fin de analizar su comportamiento en el tiempo y espacio, hasta el periodo de simulación N° 61, correspondiente a Diciembre de 2020. En las figuras N° 39, N° 40 y N° 41, se obtiene el resultado que permite visualizar la pluma de dispersión sin ninguna medida de abatimiento o control, para los periodos de simulación N° 2, N° 20 y N° 61, del cual se desprende que la velocidad de transporte promedio es de 14,7 m/día. En la figura N° 42, se incorpora el bombeo de tres pozos de extracción, cada uno por un caudal de 200 l/s, aplicados desde el periodo de simulación N° 2 hasta el final de ésta (periodo 61), luego en Figura N° 43, se reemplaza dicha medida por la aplicación de 2 barreras hidráulicas con una conductividad de 1E-8 m/s en dos lados del predio seleccionado, junto al funcionamiento de un pozo de extracción por un caudal de 100 l/s y finalmente (Figura 44) con la delimitación del predio en todo su contorno bajo las mismas magnitudes de conductividad hidráulica y periodo de simulación.

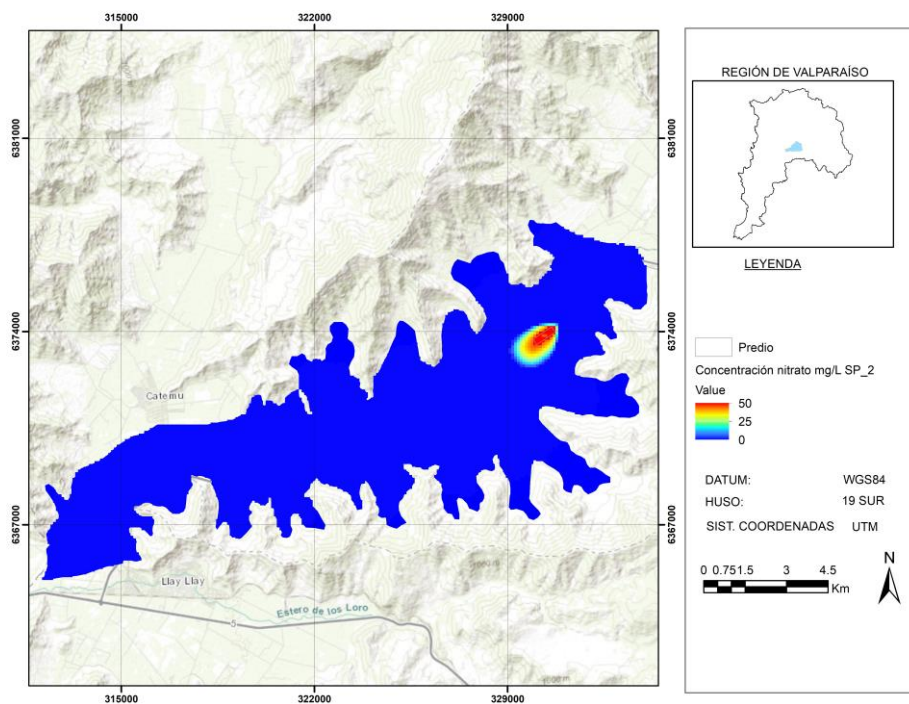


Figura 39: Transporte de nitrato, periodo de simulación N° 2, sin medida de control.

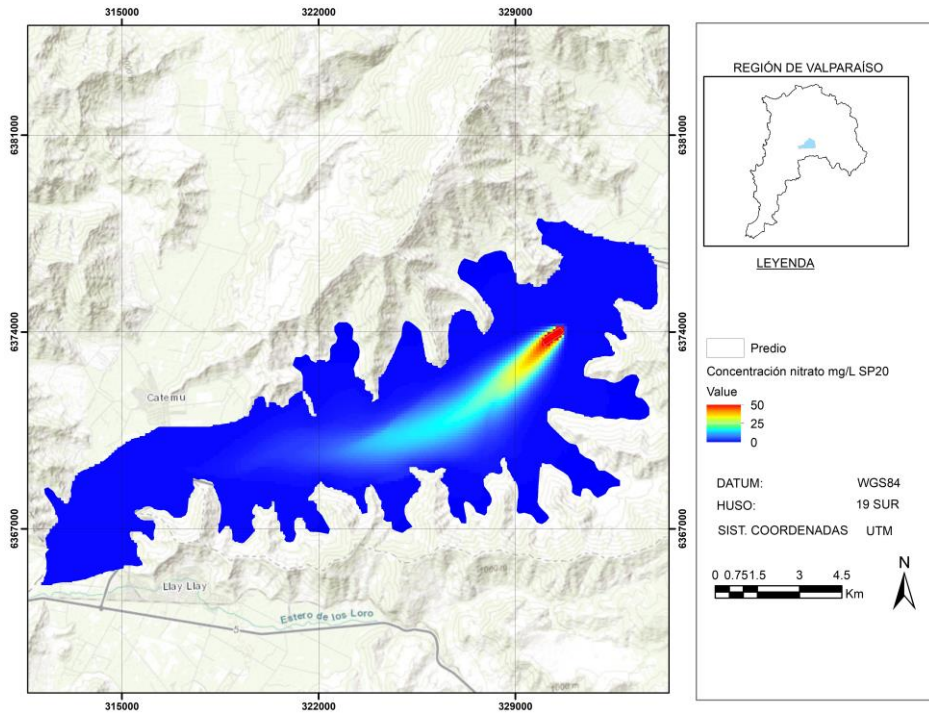


Figura 40: Transporte de nitrato, periodo de simulación N° 20, sin medida de control.

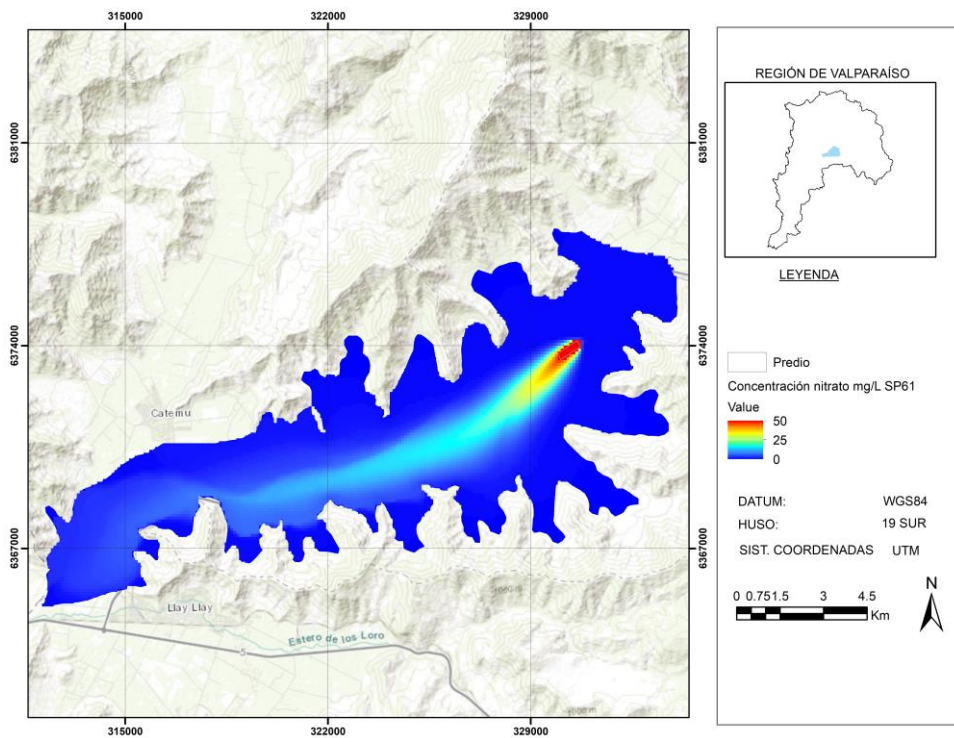


Figura 41: Transporte de nitrato, periodo de simulación N° 61, sin medida de control.

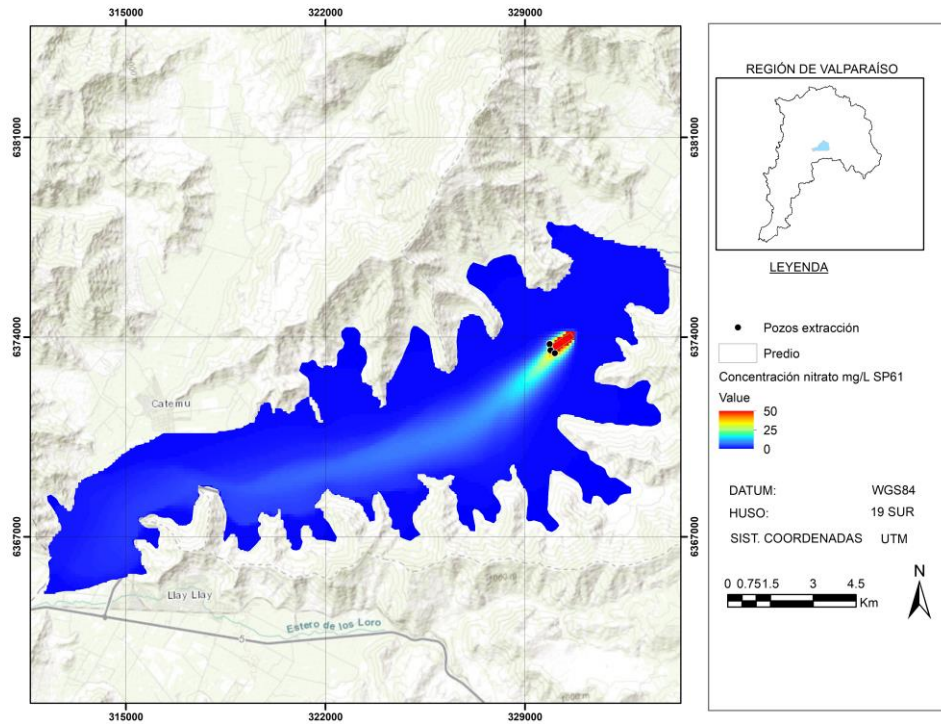


Figura 42: Transporte de nitrato, periodo de simulación N° 61, con 3 pozos 200 l/s c/u para abatimiento.

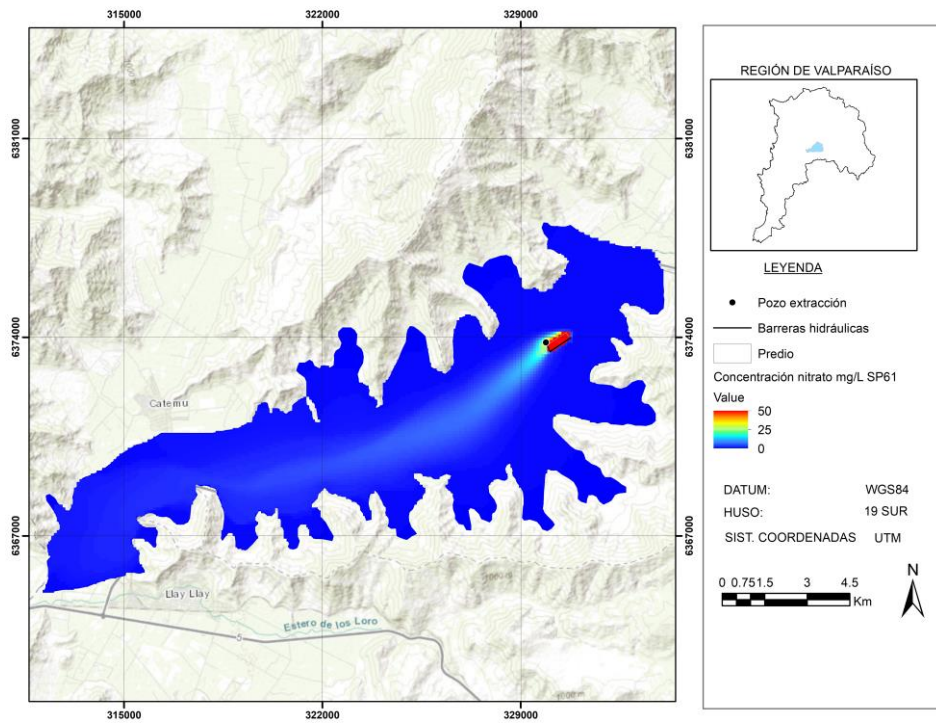


Figura 43: Transporte de nitrato, periodo de simulación N° 61, con 1 pozo 100 l/s y 2 barreras hidráulicas para abatimiento.

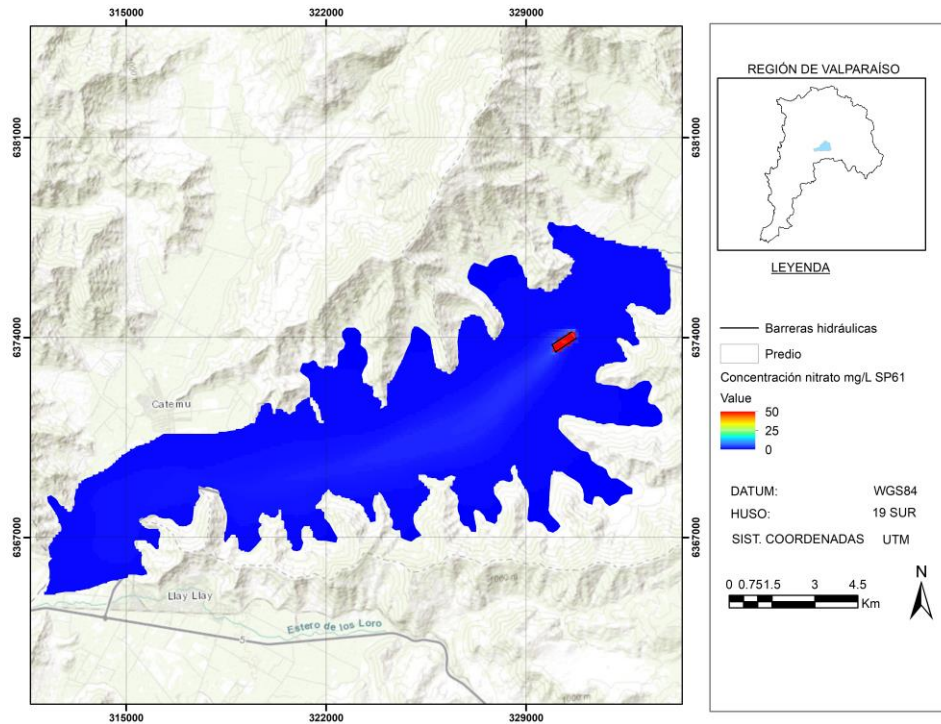


Figura 44: Transporte de nitrato, periodo de simulación N° 61, con 4 barreras hidráulicas para abatimiento.

5. DISCUSIÓN

Alcanzado el desarrollo del modelo conceptual y modelo numérico de flujo y transporte, es posible establecer:

El área de estudio se localiza en una sección del acuífero Aconcagua, formada por una litología compuesta por depósitos no consolidados que se sobrepone a rocas ígneas plutónicas, que integran el basamento (SERNAGEOMIN, 2003). Su clima es del tipo semiárido de lluvia invernal, con temperaturas máximas durante verano y mínimas en invierno (Universidad de Chile, 2017). Con una pluviometría anual en descenso desde la década de 2010 en adelante y en promedio a 100 mm al año (DGA, 2022). Una red hídrica compuesta por cauces naturales, destacándose entre ellos, el río Aconcagua y el Estero Lo Campo, y canales para el abastecimiento de riego que captan las aguas desde las fuentes naturales señaladas.

Respecto a la hidrogeología del área de estudio, se encuentra compuestas por dos unidades hidrogeológicas (Unidad B y Unidad D), siendo la primera de ellas integrada por sedimentos

de gruesa a mediana granulometría y en donde se localizan gran parte de las captaciones de aguas subterráneas (WSP Consulting Chile Ltda. (2019).

El sentido de escurrimiento de las aguas subterráneas, es coincidente a las direcciones de flujo del río Aconcagua y del Estero Lo Campo, con un gradiente hidráulico similar a la pendiente media topográfica del valle, aproximada del 0,8%, con resultados similares al trabajo de WSP Consulting Chile Ltda. (2019).

Los cauces naturales (Río Aconcagua y Estero Lo Campo), se comportan como drenajes tras el afloramiento de aguas subterráneas (JRM Asesorías, 2017).

Las entradas al sistema, dependen en su mayoría por el aporte de flujo subterráneo proveniente de recargas al acuífero Aconcagua en sus tramos superiores. En tanto las principales salidas, apuntan a las extracciones de aguas subterráneas y afloramiento de éstas, en lineamiento con los trabajos de DICTUC (2009), WSP Consulting Chile Ltda. (2019) y Utp Hidrica Consultores Spa (2020).

De acuerdo a registros de niveles piezométricos, se aprecia una tendencia a la profundización de éstos, influenciado por el decaimiento de las precipitaciones y la continuidad de las extracciones de aguas subterráneas, lo cual es reproducible, incluso en el modelo numérico, respecto al pozo denominado “Fundo San Roque”.

Tanto las mediciones como los resultados del modelo numérico, reproducen una variabilidad cíclica, con depresiones de los niveles piezométricos durante los meses relativos a invierno (junio, julio y agosto) y un aumento en los meses de verano (diciembre a marzo).

En relación a los pozos con información aportada por particulares, el modelo numérico no se ajusta estrictamente a la variabilidad de los niveles piezométricos, no obstante, considerando que dichas mediciones no se encuentran validadas por un servicio del Estado, organismo certificador o por el propio autor, se desconoce su efectiva representatividad en la variabilidad. No obstante, el modelo sigue la tendencia de los niveles medidos, por lo que se considera adecuado.

De acuerdo al análisis de sensibilidad realizado, se determina que las variables más significativas corresponden a la extracción de aguas desde los pozos y la conductividad hidráulica, las que influyen expresamente en la calibración del modelo.

El modelo numérico de flujo, si bien presenta limitaciones tales como: incertidumbre en las magnitudes de las recargas, contacto real entre las unidades hidrogeológicas y el basamento,

no cuenta con una serie de registros de niveles piezométricos en toda la extensión del acuífero junto al detalle de funcionamiento de los pozos de extracción, permite conocer el funcionamiento del sistema, reconociendo las variables que lo dominan.

Respecto a los análisis de calidad de aguas subterráneas recabados, es posible clasificarlas como aguas bicarbonatadas cálcicas y sulfatadas cálcicas, con tendencias al incremento de nitratos y sulfatos desde las últimas dos décadas, producto posiblemente por la utilización de fertilizantes requeridos para la expansión de cultivos en la cuenca.

En relación al modelo de transporte, éste se simula a partir de la advección y difusión del nitrato, cuyo primer término se encuentra gobernado por el gradiente hidráulico y las direcciones de flujo. Si bien no se aborda la calibración de la calidad de aguas, permite generar una estimación de las potenciales concentraciones de la pluma de dispersión de nitrato, para fines conceptuales. Respecto a las medidas de abatimiento, la más efectiva corresponde al encapsulamiento de la pluma de dispersión o derrame al cambiar su litología y a su vez la disminución de la conductividad hidráulica, no obstante, dicha medida se estima no ser factible ya que requiere que sea aplicada en torno a todo el predio analizado y en toda unidad hidrogeológica “Unidad B”. En segundo lugar, se observa que la combinación del cambio de litología acompañado por la operación de pozo de extracción para un caudal de 100 l/s, se estima ser la medida más adecuada.

6. CONCLUSIONES

Tras el desarrollo del presente trabajo, ha sido posible identificar las variables y parámetros modeladores del sistema del acuífero, siendo ellas: la litología, geometría del acuífero, extracciones de aguas subterráneas, conductividad hidráulica, recarga lateral, recarga mediante precipitaciones e infiltración desde canales de regadío. En función de ello, ha sido posible determinar que la principal entrada al sistema, corresponde al ingreso de flujo subterráneo, que proviene desde el oriente del acuífero, siendo recargado por los aportes de la cuenca del río Aconcagua de una superficie en torno a 4.500 Km² y conducidas en el área de estudio (106,2 Km²). Respecto a las salidas del sistema, se concibe primordialmente por las extracciones de aguas subterráneas y afloramiento de aguas subterráneas.

Identificadas y cuantificadas las variables y parámetros señalados, se desarrolló el modelo hidrogeológico de flujo en régimen permanente y transitorio para el periodo comprendido

entre 2016 a 2020 mediante la utilización del software Modelmuse, siendo necesario establecer los límites geométricos de la zona de estudio, su discretización horizontal y vertical y la incorporación de condiciones de borde. Los resultados logran demostrar una circulación de flujo de oriente a poniente, en sentido paralelo de la circulación de aguas superficiales del río Aconcagua, con niveles piezométricos desde 575 m a 360 m, del cual se obtuvo un RMSE de 0,72 m y un MAE de 0,54 m, equivalentes a 1,7% y 1,2 %, respectivamente para los niveles piezométricos y un porcentaje de discrepancia máxima de 0,01 para el balance de masa. De esta forma, es posible concluir que el modelo desarrollado se encuentra calibrado, en función de los criterios de aceptación del SEA (2012) con un límite del 5% para MAE, 5% RMSE, y para porcentaje de discrepancia un 1%.

Respecto a la modelación de transporte por nitrato, consideró los mecanismos de transporte por advección y difusión, con la aplicación de dicho contaminante en una concentración de 50 mg/L, desde el nivel freático en un predio agrícola, bajo distintos escenarios hipotéticos, que permiten estimar la trayectoria y concentración de partículas de nitrato, siendo uno de ellos, la no aplicación de medidas de abatimiento, en el que se observa una dispersión de la pluma en toda la zona de estudio y concentraciones mayores 25 mg/L en una extensión de al menos 3 Km, en contraste con las aplicaciones de medidas de abatimiento, consistentes en la operación de pozos de extracción y la incorporación de barreras hidráulicas, que permiten en todos los casos, confinar la trayectoria de partículas, logrando concentraciones máximas de 25 mg/L a menos de 1 Km.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Agrolab. (2016). Informe de resultados – N° Orden 123.331- Análisis Suelo. Agrolab, Santiago Chile.
- Agrolab (2016). Informe de resultados – N° Orden 160.795- Análisis suelo. Agrolab, Santiago Chile.
- Börgel, R. (1983). Geografía de Chile. Santiago, Chile. Instituto Geográfico Militar.
- CIREN (2019). Comuna Panquehue, Recursos Naturales. CIREN, Santiago, Chile.
- Calderón, A. (2018). Informe agronómico y antecedentes técnicos ambientales para desarrollar un estudio para el cambio de uso del suelo. proyecto mejoramiento de la infraestructura y del manejo de sub-producto agrícola guano y purines en el plantel

- lechero de Agrícola Panquehue Limitada. Calderón, Panquehue, Chile.
- Catemu Solar Spa. (2020). Adenda Parque Solar Fotovoltaico Yahutela. Anexo O: Caracterización ambiental de suelos. Catemu Solar Spa.
- CIREN (2020). Catastro Frutícola Principales resultados, Región de Valparaíso. CIREN, Santiago, Chile.
- DICTUC (2009). “Modificación Modelos DGA Visual Modflow – MOS y MOS-PS para la determinación de disponibilidad real de aguas subterráneas en el valle del Aconcagua. DICTUC, Santiago, Chile.
- Dirección Meteorológica de Chile (2022). <http://www.meteochile.gob.cl/PortalDMC-web/index.xhtml>. Accedido 10 de agosto de 2022.
- Dirección General de Aguas (2022). <https://dga.mop.gob.cl/Paginas/default.aspx>. Accedido en 5 de septiembre de 2022.
- IDE Chile (2016). DEM Alos Palsar Región de Valparaíso. <https://www.ide.cl/index.php/imagenes-y-mapas-base/item/1571-dem-alos-palsar-region-de-valparaiso>. Accedido en 7 de mayo de 2022.
- IDE Chile (2022). <https://www.ide.cl/index.php/informacion-territorial/descargar-informacion-territorial>. Accedido en 3 de junio de 2022.
- Herrera. R. (2018). Caracterización agrológica y balance hídrico. Viña Errázuriz (Panquehue). Herrera.
- JRM Asesorías (2017). Informe respuesta a oficio ORD N° 1214 de fecha 15 de septiembre de 2017, del Director Regional de Aguas Subrogante de la Región de Valparaíso. JRM Asesorías, Quillota, Chile.
- Martínez, P.E., Martínez, P., Castaño, S. (2006). Fundamentos de Hidrogeología. Madrid. MUNDI-PRENSA LIBROS.
- Ministerio de Justicia (1981). Decreto con Fuerza de Ley 1122. Fija texto del Código de Aguas.
- Pontificia Universidad Católica de Chile (2020). Informe laboratorio N°13204. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago.

Pontificia Universidad Católica de Chile (2021). Informe laboratorio N°16137. Pontificia Universidad Católica de Chile , Santiago, Chile.

SEREMI Región de Valparaíso (2022). <https://seremi5.redsalud.gob.cl/>. Accedido en 10 de septiembre de 2022.

SERNAGEOMIN (2003). Mapa Geológica de Chile: versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital, No. 4 (CD-ROM, versión1.0, 2003). Santiago.

Servicio de Evaluación Ambiental (2012). Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA. Servicio de Evaluación Ambiental. Santiago, Chile.

TRANSELEC (2019). Anexo 9: Caracterización Ambiental DIA Subestación Seccionadora Río Aconcagua 220/110 kV Región de Valparaíso. TRANSELEC. Santiago, Chile.

Universidad de Chile (2017). Zonas climáticas de Chile según Köppen-Geiger escala 1:1.500.000. <https://www.ide.cl/index.php/clima-y-atmosfera/item/1556-zonas-climaticas-de-chile-segun-koepen-geiger-escala-1-1-500-000>. Accedido en 2 de abril de 2022.

USGS (2022). <https://www.usgs.gov/software/modelmuse-a-graphical-user-interface-groundwater-models>. Accedido el 16 de enero de 2022.

Utp Hidrica Consultores Spa (2020). Plan estratégico de gestión hídrica en la cuenca de Aconcagua.

Vásquez-Suñé, E. y Castro, A., (2002). Código de estimación de recarga Easy-Balan. Universidad Politécnica de Cataluña.

WSP Consulting Chile Ltda. (2019). Proyecto actualización de la modelación hidrológica integrada del Aconcagua. WSP Consulting Chile Ltda. Santiago, Chile.

Zamorano, R. (2019). Modelación hidrogeológica del transporte de mercurio en aguas subterráneas: aplicación al caso de quebrada la Coipa, Chile. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico. Universidad de Chile, Santiago, Chile.