



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

Modelo numérico hidrogeológico del núcleo del salar de
Atacama considerando los efectos del cambio climático

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

AUTOR/A: Campos Molina, Diego

Tutor/a: Rodrigo Ilarri, Javier

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

Trabajo Fin de Máster

**MODELO NUMÉRICO HIDROGEOLOGICO
DEL NÚCLEO DEL SALAR DE ATACAMA
(CHILE) CONSIDERANDO LOS EFECTOS
DEL CAMBIO CLIMÁTICO**

Intensificación:

ANÁLISIS DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

Autor:

DIEGO IVÁN CAMPOS MOLINA

Tutor:

Dr. JAVIER RODRIGO ILARRI

JUNIO 2024



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma

Resumen del Trabajo de Fin de Máster

| Datos del proyecto |
|--|
| Alumno: Diego Iván Campos Molina |
| Título del TFM en español –obligatorio- (máximo 1000 caracteres Tipo oración¹): Modelo Numérico Hidrogeológico Del Núcleo Del Salar De Atacama (Chile) Considerando Los Efectos Del Cambio Climático |
| Título del TFM en inglés –obligatorio- (máximo 1000 caracteres Tipo oración¹): Hydrogeological Numerical Model In The Core Of The Salar De Atacama (Chile) Considering The Effects Of Climate Change |
| Título del TFM en Valenciano –obligatorio- (máximo 1000 caracteres Tipo oración¹): Model Numèric Hidrogeològic En El Nucli Del Salar De Atacama (Chile) Considerant Els Efectes Del Canvi Climàtic |
| Tutor²: Javier Rodrigo Ilarri |
| Cotutor1 UPV³: |
| Intensificación cursada: ANÁLISIS RECURSOS HÍDRICOS |
| Modalidad⁴: |
| Orientación: <input type="checkbox"/> Profesional <input checked="" type="checkbox"/> Investigadora |
| Idioma de elaboración: Español |
| Resumen español o valenciano –obligatorio- (máximo 5000 caracteres Tipo oración¹): El salar de Atacama ubicado en el norte grande de Chile, es el depósito de sal más grande del país y la mayor reserva de litio del mundo, cuya superficie, blanca y rugosa, oculta a simple vista un gran lago salobre. El tamaño de su cuenca es de 16.000 km ² y puede ser apreciado en su totalidad gracias a que el aire está completamente seco. Este salar está formado por una cuenca de tipo endorreica en una depresión que recibe al río San Pedro y múltiples quebradas por donde se filtra el agua desde la cordillera hasta el núcleo del salar. Además, es el quinto salar más grande del mundo con una gran diversidad de fauna. |

¹ No se debe escribir todo en mayúsculas

² Podrá ser tutor el profesorado que imparta docencia en el título o la haya impartido en los dos cursos anteriores, o esté adscrito a la ERT.

³ Podrá ser cotutor cualquier miembro del PDI de la UPV. En caso de TFM con orientación investigadora deberá ser doctor.

⁴ Para optar a TFM en movilidad el alumno debe estar dado de alta en las bases de datos del SIE u OPI y adjuntar documento acreditativo.

El área de estudio compromete el núcleo del Salar de Atacama, situada en la Región de Antofagasta, al norte de Chile, en una de las regiones más áridas del mundo. Esta ubicación geográfica lo hace especialmente interesante para el estudio de la componente hidrológica y la investigación relacionada con la hidrología subterránea. Ya que, al tener bajas recargas superficiales producto de escasas precipitaciones y altas tasas de evaporación por su aridez, establece un escenario interesante ante el estudio de los efectos de cambio climático en él. Sin lugar a duda también es importante resaltar la alta actividad minera no metálica existente en el área de estudio, ya que desde el año 1986 a la fecha se registran actividades de extracción de salmuera incrementándose a lo largo del tiempo. Con esto también nos permite conocer una gran cantidad de información histórica para el desarrollo del modelo hidrogeológico numérico.

El desarrollo del presente trabajo de investigación comprende la ejecución de un modelo hidrogeológico numérico, según la plataforma ModelMuse y el código MODFLOW 6, la cual permite implementar escenarios históricos del comportamiento hidrogeológico, en donde se basa la calibración del modelo, y también futuros que consideren efectos del cambio climático en el sistema. En el presente modelo se considera incluir todas las condiciones que existe dentro del Núcleo del Salar, actividades de pozos de extracción de salmueras existentes y proyectadas a futuro, y considerar los efectos del cambio climático ante un escenario RCP 8.5. hasta el año 2100.

El Salar de Atacama es un ecosistema único con una serie de características geológicas e hidrogeológicas que lo hacen propicio para el modelado numérico de su comportamiento. El desarrollo de modelos matemáticos y computacionales en este entorno puede contribuir significativamente a la comprensión y preservación de este y sus ecosistemas interconectados, adicionalmente el estudio permite comprender el funcionamiento del sistema en un entorno inhóspito y desértico ante la explotación de recursos inserto bajo el Núcleo del Salar de Atacama, el cual es un sistema de alto interés económico para la región sudamericana.

Resumen inglés –opcional- (máximo 5000 caracteres Tipo oración¹):

The Atacama salt flat, located in Chile's far north, is the largest salt deposit in the country and the world's largest lithium reserve. Its white and rough surface hides a large brackish lake from the naked eye. The vastness of the Salar, whose basin's area is over 16,000 square kilometers, making it the fifth largest salt flat in the world, can be fully appreciated due to the extremely dry air. This salt flat is formed by an endorheic basin in a depression that receives the San Pedro River and multiple ravines channeling water from the mountain range to the core of the Salar. In addition, it boasts a great diversity of fauna.

The study area focuses on the core of the Salar de Atacama, located in the Antofagasta Region of northern Chile, one of the world's most arid regions. This location makes it particularly interesting for studying both surface and underground hydrological processes. With low surface recharge due to scarce rainfall and high evaporation rates driven by its aridity, the Salar presents a fascinating scenario for investigating the effects of climate change. Undoubtedly, the high level of non-metallic mining activity in the study area is also noteworthy. Brine extraction activities have been documented since 1986 and have steadily increased. This extensive historical data is valuable for developing a numerical hydrogeological model.

The development of this research work involves creating a numerical hydrogeological model using the ModelMuse platform and the MODFLOW 6 code. This model will allow simulating historical hydrogeological behavior scenarios, which will be used for model calibration, and future scenarios



that consider the effects of climate change on the system. The model will incorporate all existing conditions within the Salar Core, including current and projected brine extraction wells, and account for climate change impacts based on the RCP 8.5 scenario until the year 2100.

The Salar de Atacama is a unique ecosystem with a combination of geological and hydrogeological characteristics that make it ideal for numerical modeling of its behavior. Developing mathematical and computational models in this environment can significantly contribute to understanding and preserving this ecosystem and its interconnected ones. Additionally, the study offers insights into the functioning of this system in a harsh desert environment, particularly in the context of resource exploitation within the Salar Core, an area of high economic importance for the South American region.

Palabras clave español o valenciano: modelación matemática, Hidrogeología, Salar, cambio climático, litio.

Palabras clave inglés: mathematical modeling, Hydrogeology, salt flats, climate change, lithium.

Fecha: Junio 2024

AGRADECIMIENTOS

A Camila por su fiel amor, compromiso y compañía en esta vida, a mis padres Veronica y Patricio por su entrega incondicional de amor, valores y principios, a mis hermanas Sofia y Martina por brindarme de su alegría cada día y a toda mi familia que siempre me acompaña en cada paso que doy.

A mis amigas y amigos de todas las partes en este mundo España, Argentina, Italia, India, Alemania, Ecuador, Perú, México, Escocia, Colombia, Lituania, Republica Dominicana y Chile, por su grandeza incondicional.

De forma especial agradezco al Dr. Javier Rodrigo Ilarri, por brindarme de conocimientos, herramientas y de su tiempo en el desarrollo del presente trabajo. A Eduardo Cassiraga por sus sabios consejos y recomendaciones, a María Elena Rodrigo-Clavero por su perspectiva y buena disposición.

A mis colegas y mentores del Grupo de Hidrogeología IIAMA por su sabiduría y entrega, por cada consejo y opinión.

Y finalmente a MODELING.cl, por lo que ha sido y lo que será en el futuro...



Tabla de Contenido

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUCCIÓN..... | 14 |
| 1.1 | Objetivos Del Trabajo | 15 |
| 1.2 | Antecedentes | 15 |
| 2 | CONTEXTO | 17 |
| 2.1 | Localización Del Área De Estudio..... | 17 |
| 2.2 | Clima | 20 |
| 2.3 | Temperatura | 20 |
| 2.4 | Precipitación | 21 |
| 2.5 | Cambio Climático | 22 |
| 2.6 | Hidrología e Hidrogeología | 23 |
| 2.6.1 | Sistema De Agua..... | 23 |
| 2.6.2 | Zona Norte | 23 |
| 2.6.3 | Zona Este | 24 |
| 2.6.4 | Zona Sur | 24 |
| 2.6.5 | Zona Oeste | 24 |
| 2.6.6 | Sistema De Salmuera..... | 25 |
| 2.7 | Geología..... | 25 |
| 2.8 | Usos De Agua..... | 31 |
| 3 | MODELO CONCEPTUAL | 32 |
| 3.1 | Unidades Hidrogeológicas | 32 |
| 3.1.1 | Unidad Hidrogeológica Núcleo Superior | 32 |
| 3.1.2 | Unidad Hidrogeológica Núcleo Intermedio | 32 |
| 3.1.3 | Unidad Hidrogeológica Núcleo Profundo..... | 33 |
| 3.2 | Funcionamiento y Dominio Hidrogeológico..... | 38 |
| 3.3 | Recarga Directa | 38 |
| 3.4 | Flujo Lateral Subterráneo..... | 40 |



| | | |
|------------|--|-----------|
| 3.5 | Evaporación | 42 |
| 3.6 | Extracciones | 44 |
| 3.6.1 | SQM..... | 44 |
| 3.6.2 | ALBEMARLE | 46 |
| 3.7 | Reinyección | 48 |
| 4 | <i>CÓDIGO UTILIZADO</i> | 50 |
| 5 | <i>CONSTRUCCIÓN DEL MODELO</i> | 51 |
| 5.1 | Geometría y Límites..... | 51 |
| 5.2 | Discretización Horizontal..... | 51 |
| 5.3 | Discretización Vertical | 52 |
| 5.4 | Discretización Temporal | 54 |
| 5.5 | Condición Inicial | 54 |
| 5.6 | Asignación De Parámetros Hidráulicos..... | 54 |
| 5.6.1 | Conductividades Hidráulicas | 55 |
| 5.6.2 | Rendimiento Específico (Sy) | 56 |
| 5.6.3 | Coficiente De Almacenamiento (Ss)..... | 57 |
| 5.7 | Condiciones De Borde..... | 58 |
| 5.7.1 | Paquete Recarga (RCH) | 58 |
| 5.7.2 | Paquete Pozos (WELL)..... | 58 |
| 5.7.3 | Paquete Evapotranspiración (ETS)..... | 59 |
| 5.8 | Puntos De Observación..... | 59 |
| 5.9 | Solver..... | 60 |
| 6 | <i>CALIBRACIÓN.....</i> | 61 |
| 6.1 | Parametrización..... | 61 |
| 6.1.1 | Conductividades Hidráulicas Calibradas | 62 |
| 6.1.2 | Rendimiento Específico Calibrado (Sy) | 63 |
| 6.1.3 | Coficiente De Almacenamiento Calibrado (Ss)..... | 64 |
| 6.2 | Ajuste De Series Piezométricas | 65 |



| | | |
|------------|--|-----------|
| 6.3 | Balance Hídrico En Régimen Estacionario | 72 |
| 6.4 | Balance Hídrico En Régimen Transitorio | 74 |
| 7 | <i>SIMULACIÓN</i> | 78 |
| 7.1 | Recarga Directa | 78 |
| 7.2 | Recarga Lateral Subterránea..... | 79 |
| 7.3 | Evaporación | 79 |
| 7.4 | Reinyecciones | 80 |
| 7.5 | Extracciones | 80 |
| 7.5.1 | Escenario 1..... | 80 |
| 7.5.2 | Escenario 2..... | 81 |
| 7.6 | Resultados | 81 |
| 7.6.1 | Hidrogramas De Niveles..... | 81 |
| 7.6.2 | Balance Hídrico Para Simulación | 82 |
| 7.6.3 | Mapa De Piezometrías | 83 |
| 7.6.4 | Mapa De Descensos | 85 |
| 8 | <i>CONCLUSIONES.....</i> | 86 |
| 9 | <i>LINEAS DE FUTURA INVESTIGACION.....</i> | 87 |
| 10 | <i>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i> | 88 |
| 11 | <i>ANEXOS.....</i> | 89 |

Índice de figuras

| | |
|---|-----------|
| Figura 1 Ubicación Salar de atacama, Región de Antofagasta, Chile. Fuente: Mapoteca DGA Chile. | 17 |
| Figura 2 Localización de las Estaciones Meteorológicas consideradas para la evaluación de la precipitación. Fuente: Estaciones meteorológicas DGA Chile y SQM..... | 18 |
| Figura 3 Temperatura Promedio Mensuales en estaciones ubicadas en la cuenca del Salar de Atacama. Fuente: Estaciones meteorológicas DGA y SQM. | 20 |
| Figura 4 Precipitación Media Mensual período 1986-2020. Fuente: Estaciones meteorológicas DGA y SQM. | 21 |
| Figura 5 Escenarios de emisión Quinto Informe de Evaluación (AR5, 2014) del IPCC Hidrología e Hidrogeología. Fuente: Cubasch et al., 2013. ECPs: escenarios extendidos. | 23 |
| Figura 6 Mapa Geología Salar de Atacama. Fuente: Niemeyer (2013), Ramírez y Gardeweg (1982), Marinovic y Lahsen (1984), Bevacqua (1992). | 28 |
| Figura 7 Secciones A-A' y B-B' (Figura 5) que conceptualizan la geología subsuperficial del Salar de Atacama en dirección sur-norte (a) y suroeste-noreste (b), respectivamente, hasta a 500 metros de profundidad desde la superficie del núcleo. Fuente: SQM con datos internos y de Rockwood (2016), Dalannais (1979) y Díaz Del Río (1972). | 29 |
| Figura 8 Secciones C-C' y D-D' (Figura 3-2) que conceptualizan la geología subsuperficial del Salar de Atacama en dirección este-oeste (a) y noroeste-sureste en el norte del salar (b), respectivamente, hasta a 500 metros de profundidad desde la superficie del núcleo. Fuente: SQM con datos internos y de Dalannais (1979) y Díaz Del Río (1972). | 30 |
| Figura 9 Mapa de unidades hidrogeológicas de la cuenca del Salar de Atacama. Se incluyen aquellos sondajes utilizados para la construcción de las secciones hidrogeológicas y las trazas en planta de dichas secciones..... | 34 |
| Figura 10 Secciones hidrogeológicas regionales A-A' y B-B'. Trazas de las secciones en Figura 9. | 35 |
| Figura 11 Secciones hidrogeológicas regionales C-C' y D-D'. Trazas de las secciones en Figura 9. | 36 |
| Figura 12 Secciones hidrogeológicas regionales J-J' y K-K'. Trazas de las secciones en Figura 9. | 37 |
| Figura 13 Zona de recarga superficial. Fuente: Elaboración propia en base a DGA Chile y SRK (2020)..... | 39 |

| | |
|---|-----------|
| Figura 14 Distribución de la recarga directa. Fuente: Elaboración propia en base a DGA y SQM. | 40 |
| Figura 15 Ubicación Zonas de Recarga Lateral Subterránea. Fuente: Elaboración propia..... | 41 |
| Figura 16 Gráfico de Recarga Lateral Subterránea. Fuente: Actualización del Modelo Hidrogeológico Conceptual del Salar de Atacama, 2023, REF 3.SQM. | 42 |
| Figura 17 Zona de evaporación. Fuente: Actualización del Modelo Hidrogeológico Conceptual del Salar de Atacama, 2023, REF 3..... | 43 |
| Figura 18 Evaporación mensual promedio histórico en Estaciones Meteorológicas. Fuente: Estaciones meteorológicas DGA y SQM. | 44 |
| Figura 19 Pozos de extracción de SQM implementado – Núcleo superior. Fuente: SQM. | 45 |
| Figura 20 Pozos de extracción de SQM implementado – Núcleo profundo. Fuente: SQM. | 45 |
| Figura 21 Extracción total de salmuera por depósito MOP/SOP. Fuente: SQM. | 46 |
| Figura 22 Pozos de extracción de Albemarle implementados. Fuente: Albemarle. | 47 |
| Figura 23 Extracción total de salmuera Albemarle. Fuente: Albemarle. | 47 |
| Figura 24 Extracción total de agua industrial Albemarle. Fuente: Albemarle. | 48 |
| Figura 25 Ubicación de los puntos de reinyección. Fuente: SQM..... | 49 |
| Figura 26 Caudal reinyectado. Fuente: SQM. | 49 |
| Figura 27 Discretización horizontal. Fuente: Elaboración propia..... | 51 |
| Figura 28 Perfil secciones verticales Modelo Numérico, Fuente: Elaboración Propia. | 53 |
| Figura 29 Conductividad hidráulica base, Fuente: Elaboración Propia en base a REF4..... | 55 |
| Figura 30 Rendimiento específico base, Fuente: Elaboración Propia en base a REF4..... | 56 |
| Figura 31 Coeficiente de almacenamiento base Fuente: Elaboración Propia en base a REF4. | 57 |
| Figura 32 Puntos de observación. Fuente: Elaboración Propia en base a SQM y Albemarle..... | 60 |

| | |
|--|-----------|
| Figura 33 Conductividad hidráulica horizontal calibrada, Fuente: Elaboración Propia. | 62 |
| Figura 34 Rendimiento específico calibrado, Fuente: Elaboración Propia. ... | 63 |
| Figura 35 Coeficiente de almacenamiento calibrado Fuente: Elaboración Propia. | 64 |
| Figura 36 Valor residual para 82 piezometrías de puntos observados v/s simulados. Fuente: Elaboración Propia. | 65 |
| Figura 37 Histogramas de residuos para 82 Puntos observados v/s simulados. Fuente: Elaboración Propia. | 66 |
| Figura 38 Hidrograma punto E-324 piezometrías observadas v/s simuladas. Fuente: Elaboración Propia en base a MODFLOW y Python. | 67 |
| Figura 39 Hidrograma punto M-7 piezometrías observadas v/s simuladas. Fuente: Elaboración Propia en base a MODFLOW y Python. | 67 |
| Figura 40 Valor residual para 80 piezometrías de puntos observados v/s simulados. Fuente: Elaboración Propia. | 68 |
| Figura 41 Histogramas de residuos para 80 Puntos observados v/s simulados. Fuente: Elaboración Propia. | 69 |
| Figura 42 Hidrograma punto 1024P piezometrías observadas v/s simuladas. Fuente: Elaboración Propia en base a MODFLOW y Python. | 69 |
| Figura 43 Hidrograma punto L2-17 piezometrías observadas v/s simuladas. Fuente: Elaboración Propia en base a MODFLOW y Python. | 70 |
| Figura 44 Hidrograma punto 2022P piezometrías observadas v/s simuladas. Fuente: Elaboración Propia en base a MODFLOW y Python. | 70 |
| Figura 45 Hidrograma punto Zar-C-S piezometrías observadas v/s simuladas. Fuente: Elaboración Propia en base a MODFLOW y Python. | 70 |
| Figura 46 Mapa de Isopiezas en régimen estacionario Núcleo Superior. Fuente: Elaboración propia..... | 73 |
| Figura 47 Mapa de Isopiezas en régimen estacionario Núcleo Intermedio. Fuente: Elaboración propia..... | 73 |
| Figura 48 Mapa de Isopiezas en régimen estacionario Núcleo Profundo. Fuente: Elaboración propia..... | 74 |
| Figura 49 Balance hídrico modelo transitorio calibración. Fuente: Elaboración propia..... | 75 |
| Figura 50 Mapa de Isopiezas en régimen Transitorio Núcleo Superior. Fuente: Elaboración propia..... | 76 |

| | |
|---|-----------|
| Figura 51 Mapa de Isopiezas en régimen Transitorio Núcleo Intermedio. Fuente: Elaboración propia..... | 76 |
| Figura 52 Mapa de Isopiezas en régimen Transitorio Núcleo Profundo. Fuente: Elaboración propia..... | 77 |
| Figura 53 Recarga directa total para simulación en el dominio. Fuente: Elaboración propia..... | 78 |
| Figura 54 Recarga lateral subterránea para simulación en el dominio. Fuente: Elaboración propia..... | 79 |
| Figura 55 Evaporación total para simulación en el dominio. Fuente: Elaboración propia..... | 79 |
| Figura 56 Reinyecciones totales para simulación en el dominio. Fuente: Elaboración propia..... | 80 |
| Figura 57 Extracciones de SQM Escenario 1 en el dominio. Fuente: Elaboración propia..... | 80 |
| Figura 58 Extracciones de SQM y Albemarle Escenario 2 en el dominio. Fuente: Elaboración propia..... | 81 |
| Figura 59 Hidrograma simulación punto SOPE-6. Fuente: Elaboración propia. | 81 |
| Figura 60 Balance hídrico simulación Escenario 1. Fuente: Elaboración propia. | 82 |
| Figura 61 Balance hídrico simulación Escenario 2. Fuente: Elaboración propia. | 83 |
| Figura 62 Comparación de piezometrías Estado Estacionario, Simulación Escenario 1 y Simulación Escenario 2. Fuente: Elaboración propia. | 84 |
| Figura 63 Descensos entre Estado Estacionario y Simulación Escenario 1. Fuente: Elaboración propia..... | 85 |

Índice de tablas

| | |
|--|-----------|
| Tabla 1 Antecedentes de modelos conceptuales y numéricos disponibles. Fuente: SEIA Chile..... | 16 |
| Tabla 2 Conductividad hidráulica conceptual y almacenamiento modelo numérico..... | 38 |
| Tabla 3. Recarga por centroide en estado estacionario, 0,282 m³/s para todo el dominio. Fuente: DGA y SQM..... | 39 |
| Tabla 4 Recarga lateral. Fuente: DGA y SQM. | 41 |
| Tabla 5 Parámetros de evaporación estado estacionario. Fuente: Datos de ensayos medidos en el dominio, REF 3..... | 43 |
| Tabla 6 Pruebas de bondad de ajuste del modelo..... | 71 |
| Tabla 7 Balance hídrico régimen estacionario. Fuente: Elaboración propia. | 72 |

1 INTRODUCCIÓN

El salar de Atacama ubicado en el norte grande de Chile, es el depósito de sal más grande del país y la mayor reserva de litio del mundo, cuya superficie, blanca y rugosa, oculta a simple vista un gran lago salobre. Su tamaño es de 3.000 kilómetros cuadrados y puede ser apreciado en su totalidad gracias a que el aire está completamente seco.

Este salar está formado por una cuenca de tipo endorreica en una depresión que recibe al río San Pedro y múltiples quebradas por donde se filtra el agua desde la cordillera hasta el núcleo del salar. Además, es el quinto salar más grande del mundo con una gran diversidad de fauna.

El área de estudio compromete el núcleo del Salar de Atacama (1.100 km²), esta se encuentra en la Región de Antofagasta, al norte de Chile, en una de las regiones más áridas del mundo. Esta ubicación geográfica lo hace especialmente interesante para el estudio de la componente hidrológica y la investigación relacionada con la hidrología subterránea. Ya que, al tener bajas recargas superficiales producto de escasas precipitaciones y altas tasas de evaporación por su aridez, establece un escenario interesante ante el estudio de los efectos de cambio climático en él.

Sin lugar a duda también es importante resaltar la alta actividad minera no metálica existente en el área de estudio, ya que desde el año 1986 a la fecha se registran actividades de extracción de salmuera incrementándose a lo largo del tiempo. Con esto también nos permite conocer una gran cantidad de información histórica para el desarrollo del modelo hidrogeológico numérico.

El desarrollo del presente trabajo de investigación comprende la ejecución de un modelo hidrogeológico numérico, según la plataforma ModelMuse y el código MODFLOW 6, la cual permite implementar escenarios históricos del comportamiento hidrogeológico, en donde se basa la calibración del modelo, y también futuros que consideren efectos del cambio climático en el sistema. En el presente modelo se considera incluir todas las condiciones de borde del Núcleo del Salar, actividades de pozos de extracción de salmueras existentes y proyectadas y considerar los efectos del cambio climático ante un escenario RCP 8.5. hasta el año 2100.

El Salar de Atacama es un ecosistema único con una serie de características geológicas e hidrogeológicas que lo hacen propicio para el modelado numérico de su comportamiento. El desarrollo de modelos matemáticos y computacionales en este entorno puede contribuir significativamente a la comprensión y preservación de este y sus ecosistemas interconectados, adicionalmente el estudio permite comprender el funcionamiento en un entorno inhóspito y desértico ante la explotación de recursos inserto bajo el Núcleo del Salar de Atacama considerando que es un sistema de alto interés económico para la región sudamericana.

1.1 Objetivos Del Trabajo

El objetivo principal del estudio es conocer numéricamente el comportamiento hidrogeológico actual y futuro del núcleo del Salar de Atacama.

Los objetivos secundarios son los siguientes:

- Desarrollar un modelo numérico de flujo subterráneo que comprenda el acuífero contenido en el núcleo del Salar de Atacama
- Reproducir el comportamiento real de la masa de agua subterráneo a nivel histórico y futuro.
- Proyectar un escenario futuro del estado del núcleo del Salar de Atacama ante un escenario de Cambio Climático RCP 8.5.

1.2 Antecedentes

Los antecedentes considerados en el presente trabajo corresponden a material bibliográfico, mapas cartográficos, capas de datos geométricos geoespaciales, datos numéricos de estaciones meteorológicas, piezómetros y pozos. Estos antecedentes fueron obtenidos desde plataformas públicas, principalmente de Proyectos evaluados ambientalmente mediante Estudios de Evaluación de Impactos Ambientales (EIA) en el SEIA de Chile dispuestos en el Salar de Atacama, además de documentos que determinan Planes de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico (PSAH) de los Proyectos y finalmente de organismos estatales como la Dirección General de Aguas (DGA).

Desde los informes del PSAH que se reportan periódicamente a la autoridad desde el año 2007 a la fecha, se dispone de un gran volumen de información relativa al funcionamiento hidrogeológico (cualitativo y cuantitativo) del Salar de Atacama y su entorno. Es así como existen numerosos documentos e informes sobre geología, geofísica, ensayos hidráulicos, datos de precipitaciones y cálculo de la recarga, evaluación de la evaporación, datos de las redes de control ambiental, etc. Con el objeto de abordar el modelo numérico, se ha ido realizando un seguimiento de trabajo de datos para verificar la información necesaria de los puntos principales de interés (pozos).

Inicialmente, se dispone de los siguientes datos:

- Imágenes satelitales.
- Modelo digital de elevaciones (MDE) de origen satelital ALOS PALSAR.
- Datos geológicos: estratigrafía y estructura (fallas u otros elementos singulares).
- Datos de campañas geofísicas.
- Datos meteorológicos.
- Datos de evaporación (lisímetros y domos).
- Datos hidroquímicos.
- Datos isotópicos.
- Datos de niveles y concentraciones de interés.
- Datos de conductividad hidráulica (K) y porosidad (a partir de ensayos hidráulicos).
- Datos de bombeos y reinyecciones.
- Datos de coordenadas y elevaciones en puntos de control

Adicionalmente se tienen como antecedentes de importante consideración en el presente estudio, modelos conceptuales del funcionamiento del núcleo del Salar de Atacama y modelos numéricos desarrollados. Estos se especifican en la siguiente tabla:

Tabla 1 Antecedentes de modelos conceptuales y numéricos disponibles. Fuente: SEIA Chile.

| FECHA | TIPO DE MODELO | NOMBRE | SOFTWARE | AUTOR | TITULAR | ARCHIVOS DE MODELO |
|-----------------|----------------|---|----------------------|----------------------------|---------------------------------|--------------------|
| Septiembre 2005 | Numérico | MODELO DE SIMULACIÓN DE FLUJO SISTEMA SALAR DE ATACAMA | Visual MODFLOW | GCF INGENIEROS CONSULTORES | Sociedad Chilena de Litio Ltda. | NO |
| Abril 2020 | Conceptual | MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO DEL SALAR DE ATACAMA | N/A | SQM | SQM | NO |
| Diciembre 2021 | Conceptual | MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DEL SALAR DE ATACAMA | N/A | SQM | SQM | NO |
| Diciembre 2021 | Numérico | MODELO HIDROGEOLÓGICO NUMÉRICO DEL NÚCLEO DEL SALAR DE ATACAMA | FEFLOW | SQM | SQM | SI |
| Diciembre 2022 | Numérico | ACTUALIZACIÓN MODELO NUMÉRICO DEL NÚCLEO DEL SALAR DE ATACAMA | FELFOW | SQM | SQM | SI |
| Enero 2023 | Conceptual | ACTUALIZACIÓN MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DEL SALAR DE ATACAMA | N/A | SQM | SQM | NO |
| Septiembre 2023 | Numérico | Actualización Modelo Numérico Hidrogeológico del Núcleo | Groundwater Vistas 8 | Hidroestudios | SQM | SI |

2 CONTEXTO

2.1 Localización Del Área De Estudio

La cuenca del salar de Atacama es de tipo endorreica y se ubica en la Región de Antofagasta en el norte de Chile, aproximadamente a 150 kilómetros al sureste de la ciudad de Calama, entre los 22°57' y 23°47' latitud sur. La cuenca corresponde a una cuenca endorreica donde el núcleo del Salar de Atacama se ubica en la parte más baja de la cuenca homónima, el núcleo del salar tiene forma elipsoidal con un eje mayor de 55 km y una anchura máxima de 50 km. La parte central se encuentra a 2300 m.s.n.m. (Muñoz et al., 2004).

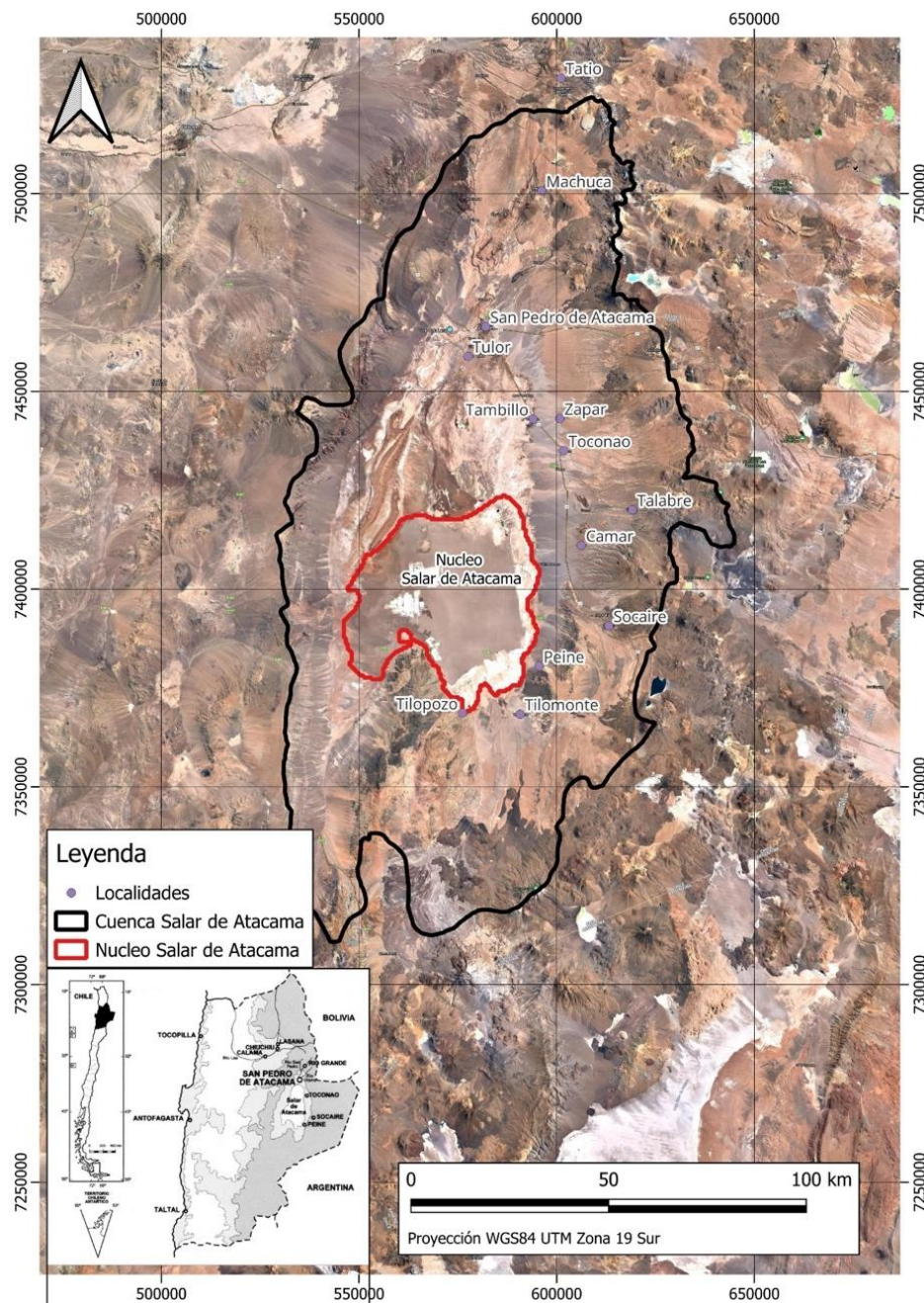


Figura 1 Ubicación Salar de atacama, Región de Antofagasta, Chile. Fuente: Mapoteca DGA Chile.

La cuenca del Salar de Atacama comprende un área total de 15.998 km², y la delimita la Cordillera de los Andes en sus márgenes norte, este y sur, y la Cordillera de Domeyko por su margen oeste. El Salar de Atacama en específico, se comprende en tres zonas: núcleo, zona de transición y zona marginal.

La parte más baja de la cuenca (núcleo, zona de transición este y zona marginal) se encuentra a una altura aproximada de 2.300 m.s.n.m., abarcando un área aproximada de 3.100 km². En el núcleo del Salar correspondiente al área de estudio, se ubican las faenas extractivas de salmuera, posee una superficie aproximada de 1.100 km², y está rodeado por la zona marginal y zona de transición de unos 2.000 km² de extensión aproximadamente.

Para comprender la ubicación de las estaciones meteorológicas existentes y consideradas en el presente estudio, a continuación, se muestra la Figura 2 que representa las ubicaciones de estas.

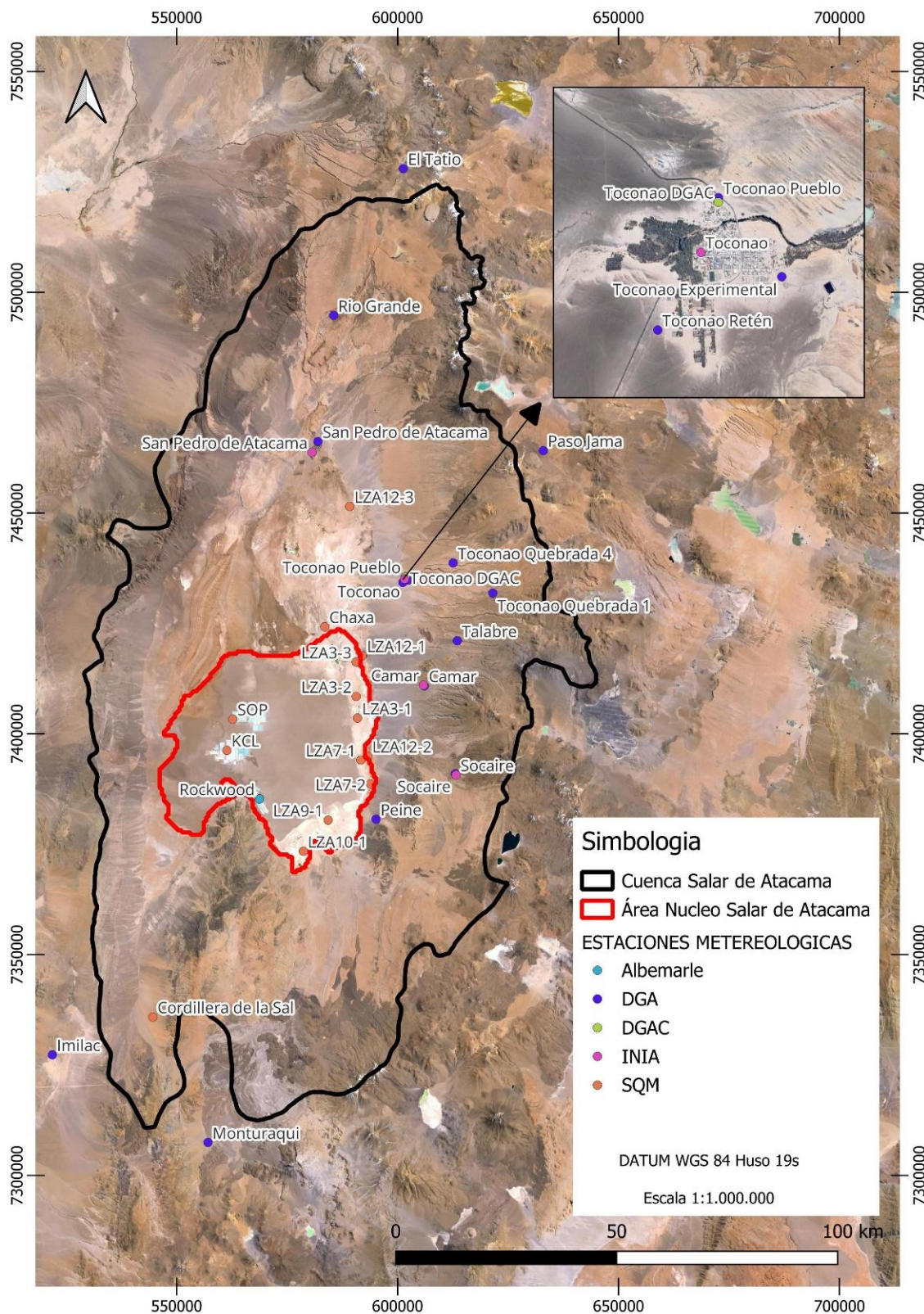


Figura 2 Localización de las Estaciones Meteorológicas consideradas para la evaluación de la precipitación. Fuente: Estaciones meteorológicas DGA Chile y SQM.

2.2 Clima

La cuenca del Salar de Atacama se encuentra a una latitud en que, para los meses entre abril y noviembre, las precipitaciones son prácticamente nulas por la presencia del Anticiclón del Pacífico, cinturón de altas presiones de gran estabilidad climática. En los meses de verano el Anticiclón se desplaza hacia latitudes mayores permitiendo la penetración del Frente Ecuatorial de bajas presiones, lo que genera inestabilidad atmosférica en el altiplano con corrientes ascendentes de aire y formación de nubes. Este fenómeno se reconoce como el invierno altiplánico y se caracteriza por presentar importantes precipitaciones.

De acuerdo con la clasificación climática de Köppen-Gieger, dentro de la cuenca del Salar se distinguen 2 tipos de zonas climáticas. En la parte baja de la cuenca se observa un clima seco-árido frío (BWk), con una temperatura media anual inferior a los 18°C y humedades que bordean el 45%. En el sector alto se observa un clima frío de tundra (ETH) debido a las grandes alturas con precipitaciones estivales producto del invierno altiplánico con temperaturas del orden de los 11°C y humedad relativa del 45%.

2.3 Temperatura

En la Figura 3 mostrada a continuación se muestran los promedios mensuales de temperaturas en la cuenca del Salar de Atacama entre los años 1980-2020 para los registros de temperatura en las estaciones meteorológicas existentes.

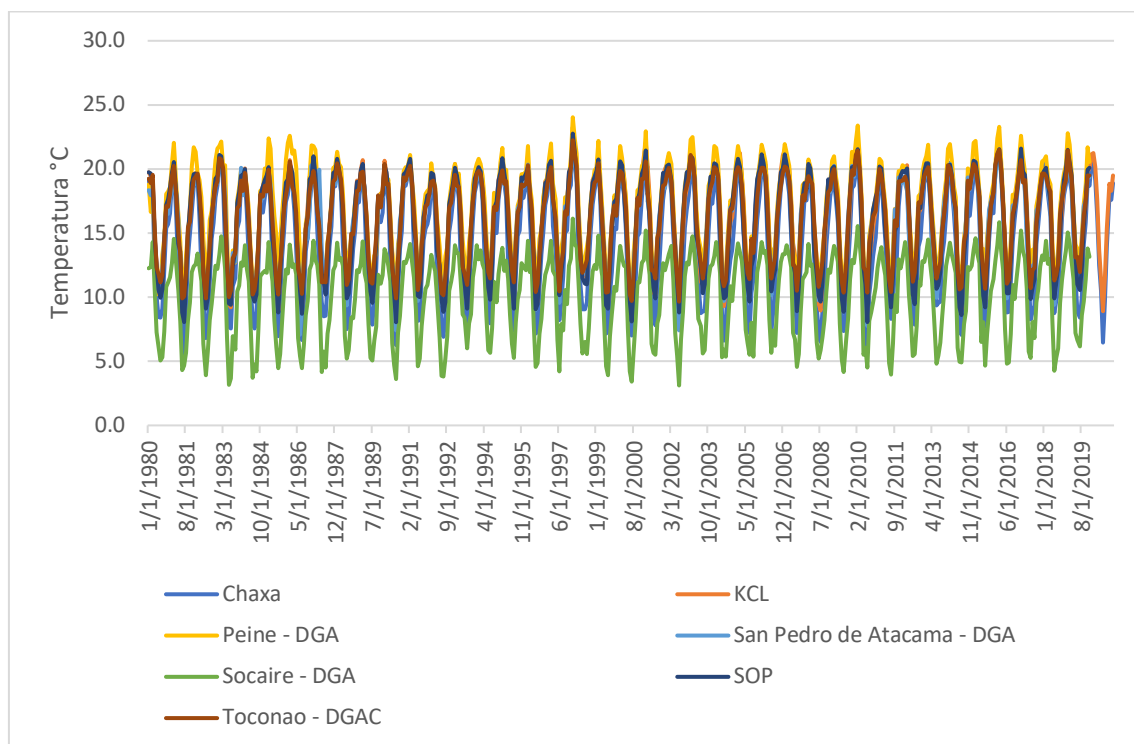


Figura 3 Temperatura Promedio Mensuales en estaciones ubicadas en la cuenca del Salar de Atacama. Fuente: Estaciones meteorológicas DGA y SQM.

De la figura anterior se logra desprender que las temperaturas representan un cambio en la estacionalidad anual junto con demostrar una máxima en torno a los 25°C versus una mínima cercana a los 5°C.

2.4 Precipitación

La precipitación en la cuenca del Salar de Atacama proviene principalmente del Atlántico, donde las masas de aire pueden venir desde el Océano Atlántico Norte a través de la cuenca del Amazonas, desde el Océano Atlántico Sur a través de la cuenca del río de la Plata y el Gran Chaco, y desde el Océano Pacífico (Valdivielso, et al. 2021). En los meses de verano se producen las mayores magnitudes de lluvia producto de las masas de aire húmedo procedentes del noreste (Amazonas), fenómeno conocido como invierno altiplánico. No obstante, durante los meses de invierno es posible identificar algunos eventos de precipitación, de menor magnitud que los ocurridos durante los meses estivales, cuyo origen está asociado a las masas de aire provenientes del Pacífico.

Para la caracterización de la precipitación se ha realizado un inventario de las estaciones meteorológicas con registros de precipitación existentes en la cuenca del Salar de Atacama (Figura 4). Estas estaciones pluviométricas son propiedad de la DGA, la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC), el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Albemarle y SQM.

En la siguiente figura se muestran las precipitaciones medias mensuales para el período 1986-2020, donde las series se encuentran ordenadas de forma descendente según la elevación de la estación.

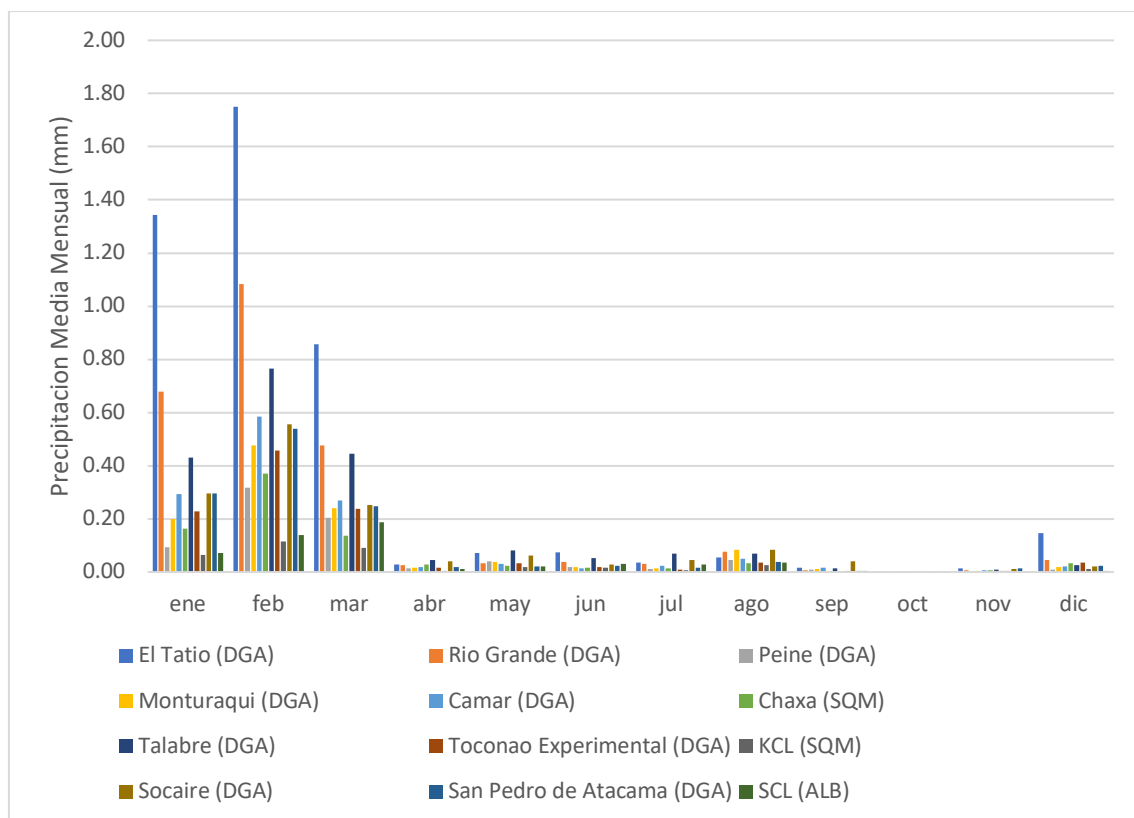


Figura 4 Precipitación Media Mensual período 1986-2020. Fuente: Estaciones meteorológicas DGA y SQM.

Los resultados obtenidos reflejan que el régimen de precipitaciones está influenciado principalmente por el invierno altiplánico, con una temporada húmeda durante los meses de verano, presentando la influencia del invierno continental en menor magnitud. Por otro lado, se puede observar una relación entre la magnitud de las precipitaciones con

respecto a la ubicación del punto de medición, donde a mayor elevación y en las zonas más orientales de la cuenca se registran mayores precipitaciones

2.5 Cambio Climático

La variabilidad climática ocurre de forma natural dentro del sistema climático, debido a procesos de interacción física "internos", como el intercambio de calor a través y entre la atmósfera y el océano. Una segunda fuente de variabilidad climática proviene de factores "externos" al sistema climático, los cuales tienen la capacidad de alterar el balance radiativo de la tierra y la atmósfera.

Los factores externos también se conocen como "forzantes", y generan un desbalance en la radiación neta de la Tierra, es decir, la diferencia entre la radiación recibida y emitida. Las forzantes negativas tienen el efecto de enfriar el sistema climático, mientras que las forzantes positivas tienen el efecto de calentarlo. En ese sentido, los GEI son una forzante positiva, ya que retienen una parte de la radiación emitida por la Tierra al mismo tiempo que aumentan la absorción de la radiación solar

La comunidad científica, reunida en el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático⁵ (IPCC), en sus Informes de Evaluación (Assessment Report, AR) utiliza posibles escenarios futuros representativos de concentración (Representative Concentration Pathways, RCP), que describen la evolución temporal de los GEI. Luego, mediante modelos de circulación general atmosférica (global climate models, GCM), es posible modelar y predecir el comportamiento de ciertas variables atmosféricas de interés para diferentes escenarios futuros de emisión de GEI.

Las emisiones futuras de GEI de fuentes antropogénicas son altamente inciertas, ya que se ven influenciadas por incógnitas tales como el crecimiento económico y demográfico, el desarrollo y transferencias tecnológicas, y cambios políticos y sociales.

Debido a lo anterior, en el Quinto Informe de Evaluación (ARS, 2014), el IPCC seleccionó cuatro escenarios de emisión (Figura 5), los cuales ofrecen conjuntos de datos de resolución espacial del cambio de uso del suelo y de emisiones sectoriales de contaminantes atmosféricos, especificando cuáles serán las concentraciones de GEI y las emisiones antropogénicas anuales hasta el 2100. Estos escenarios de RCP se basan en una combinación de modelos de evaluación integrados, modelos climáticos, modelos de la química atmosférica y modelos del ciclo global del carbono (IPCC, 2013).

Los RCP se nombran en función de la magnitud de la forzante radiativa que ejercen. En este sentido, el RCP8.5 es el escenario que proyecta una forzante radiativa de 8.5 W/m² al 2100, donde se asume una baja reducción en las emisiones de CO₂. Por su parte, el RCP2.6 corresponde a un escenario ambicioso respecto de la reducción de emisiones, alcanzando una emisión máxima cercana al 2020 y luego bajando rápidamente.

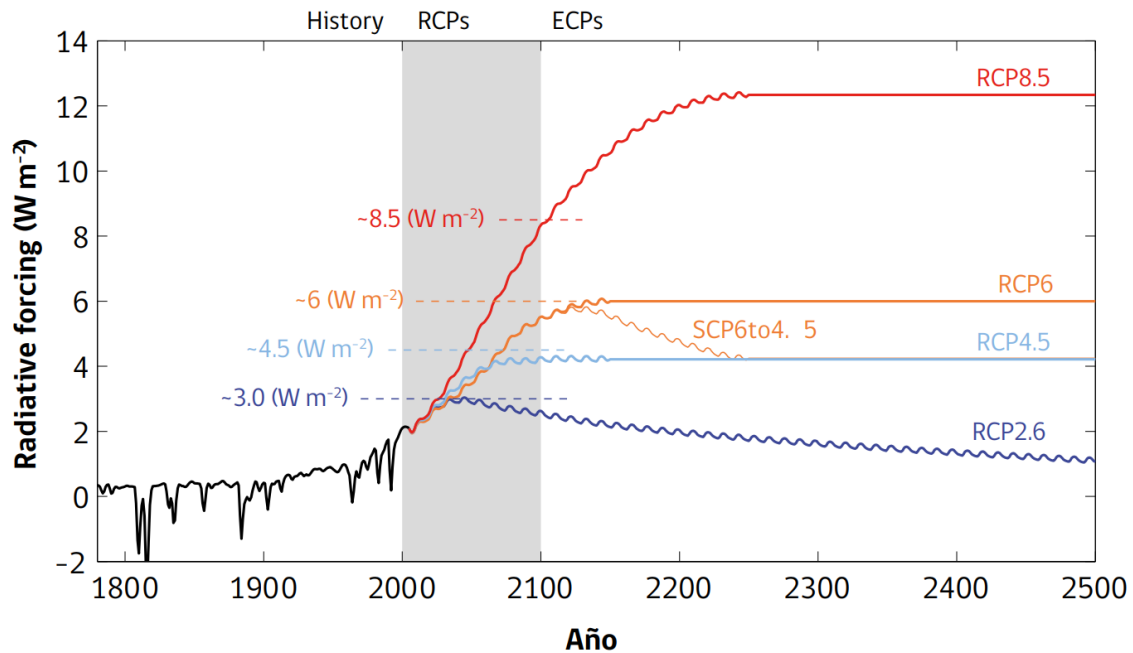


Figura 5 Escenarios de emisión Quinto Informe de Evaluación (AR5, 2014) del IPCC Hidrología e Hidrogeología. Fuente: Cubasch et al., 2013. ECPs: escenarios extendidos.

Para efecto de las consideraciones planteadas en torno a la simulación futura del presente estudio, se considera una reducción de las recargas (precipitaciones) y un aumento de las salidas naturales del sistema (evaporación) siguiendo el orden de un escenario RCP8.5. Por lo cual, el presente estudio se basa en las consideraciones del cambio climático según la REF.9, SEIA (2023). Guía metodológica para la consideración del cambio climático en el SEIA.

Para el área de estudio se proyecta un cambio según escenario RCP8.5 en las precipitaciones entre -11,6% según P25 y 15,8% para un P75, por lo que en el escenario más desfavorable se implementara la disminución de un 11,6% respecto a precipitaciones. En el caso de las temperaturas, y de acuerdo con lo planteado en la REF.9, se proyecta un incremento de 1,4°C en las temperaturas.

2.6 Hidrología e Hidrogeología

2.6.1 Sistema De Agua

El sistema de agua tiene un comportamiento similar al que se observa en cualquier cuenca de tipo endorreica: recibe precipitaciones en las zonas altas, parte de ellas se infiltra y otra parte escurre superficialmente; sin embargo, la mayor parte se infiltra o evapora antes de llegar al núcleo del Salar de Atacama.

2.6.2 Zona Norte

La zona norte de la cuenca del Salar de Atacama, que es donde se encuentra la mayor parte de la población humana del área, se caracteriza por ser la zona de descarga de los ríos Vilama y San Pedro; este último es el más importante, y es distinguible por el gran delta de más de 14 km de ancho que desarrolla en el borde noroeste del núcleo del Salar. La zona norte del Salar de Atacama es distinguible también por presentar una

amplia zona de depósitos evaporíticos y clásticos que conforman la zona marginal y zona de transición este. Ambas son el resultado de la dinámica de los flujos que descargan desde el norte y desde el borde oriental. Estos dos sistemas de flujo tienen su manifestación superficial en las Lagunas Puilar, Chaxa y Barros Negros, estas dos últimas comunicadas entre sí por el Canal del Burro Muerto. La Laguna Barros Negros, además, presenta dos zonas de desbordes (Cola de Pez y Desborde Sur), donde descarga el exceso de flujo que recibe desde el canal del Burro Muerto. Este sistema lagunar es conocido como Sistema Soncor, y corresponde a uno de los sistemas locales descritos en este informe.

2.6.3 Zona Este

Al este del núcleo del Salar, el agua que precipita en las zonas altas, escurre, se infiltra y luego fluye por sedimentos no consolidados (UH Aluvial), cuya alta conductividad hidráulica en las partes altas permite que el agua fluya con relativamente alta velocidad; sin embargo, al aproximarse a la zona marginal, el brusco cambio de pendiente de la topografía coincide con una disminución en el tamaño de grano de los depósitos no consolidados, rebajando abruptamente su conductividad hidráulica (se estima que disminuye desde más de 15-30 m/día a valores cercanos o menores a 1 m/día). Esto provoca que el agua que fluye por esta UH reduzca su velocidad y su gradiente hidráulico, disminuyendo así la profundidad del nivel freático.

Se estima que sólo durante eventos específicos de altas precipitaciones, parte de este flujo que viene desde la UH Aluvial puede atravesar la UH Zona Marginal y llegar hasta el núcleo, fluyendo por sobre la salmuera, donde finalmente termina evaporándose o mezclándose con ésta. Estos flujos subsuperficiales de una salinidad menor podrían eventualmente disolver evaporitas cercanas a la superficie, generando procesos de karstificación superficial en la Zona Marginal – Salmuera. Esto se ha comprobado visualmente (presencia de cavernas a muy poca profundidad), y además por pruebas hidráulicas en pozos cortos (menores a 5m de profundidad), los que arrojan transmisividades locales mayores a lo que sus características litológicas permitirían.

2.6.4 Zona Sur

La zona sureste de la cuenca en estudio es distinta a la zona este. Si bien el mecanismo de recarga y flujo de agua subterránea a través de la UH Aluvial es el mismo que en la zona este, al momento de llegar al borde del Salar, el agua subterránea, además de formar los sistemas lagunares de Peine y Tilopozo (tanto por el cambio de pendiente topográfica como por la presencia de la UH Zona Marginal e interfaz salina), posee un caudal suficiente para recargar el núcleo del Salar de Atacama. En ese sentido, se asemeja más a la zona norte, aunque la zona marginal de esta última tiene una superficie mucho mayor (y con mayor cantidad de vegetación) y por tanto genera mayor cantidad de evaporación.

2.6.5 Zona Oeste

Las zonas oeste y suroeste corresponden a las zonas donde se tiene la menor cantidad de información respecto a las recargas y descargas de flujo subterráneo. En este sector, además, la Cordillera de la Sal representa una barrera hidráulica natural para los flujos subterráneos que tienden a fluir hacia el núcleo del Salar.

En síntesis, según la conceptualización realizada, los ingresos de agua subterránea al núcleo del Salar de Atacama tienen su origen en los márgenes norte, sureste y oeste. En el borde este, en tanto, toda el agua que fluye hacia el centro del Salar es descargada antes de su ingreso al núcleo.

2.6.6 Sistema De Salmuera

El núcleo del Salar está conformado por las UH Núcleo Superior (principalmente halita, con K entre 0,01 y 40.000 m/día), Núcleo Intermedio (evaporitas con materia orgánica y en parte con sedimentos clásticos, K entre 6×10^{-4} y 2 m/día) y Núcleo Profundo (halitas poco fracturadas, con K entre 0,002 y 120 m/día). La UH Núcleo Intermedio se considera un acuitardo que separa las unidades superior e inferior, confinando parcialmente a esta última. Mientras la UH Núcleo Superior presenta espesores relativamente estables (30 m), las otras dos presentan un espesor mucho mayor en el bloque este que en el oeste. La UH Núcleo Profundo, por ejemplo, tiene un espesor de hasta 400 m en el bloque este, mientras que en el oeste presenta no más de 30 m. Tanto la UH Núcleo Intermedio como la UH Núcleo Profundo se encuentran completamente saturadas de salmuera.

Debido a que el contexto climático actual en la zona de estudio no permite el almacenamiento de agua subterránea (hiperaridez), se cree que la salmuera que se encuentra almacenada en el Salar de Atacama corresponde a precipitaciones ocurridas en un contexto climático de mayor humedad (Corenthal et al., 2016; Munk et al., 2018; Moran et al., 2019).

2.7 Geología

El sector caracterizado corresponde a un sistema de cuenca endorreica en cuyo centro se localiza el Salar de Atacama, en torno a esta unidad se levantan relieves montañosos y otras geomorfologías que han surgido como respuesta a la intensa actividad tectónica de la zona. Morfo estructuralmente, mostrando una orientación general N-S, se reconocen de oeste a este las siguientes unidades: Cordillera de Domeyko, Llano de la Paciencia, Cordillera de la Sal, Salar de Atacama, Cordón de Lila (al sur del salar), Planicie Aluvial (en ambos márgenes del salar), Cordillera Occidental y Arco Volcánico Actual.

La porción occidental del sector está caracterizada morfo estructuralmente por la Cordillera de Domeyko, Cordillera de la Sal, Llano de la Paciencia y Planicie Aluvial. En donde, el Llano de la Paciencia corresponde a una cuenca endorreica que se emplaza entre dos relieves montañosos (cordilleras de Domeyko y de la Sal), con un destacado control estructural que se evidencia por el Escarpe El Bordo y el Sistema de Fallas Cordillera de la Sal. Este sector está conformado en gran parte por formaciones del Cretácico, de origen ígneo-sedimentario de ambiente continental que subyacen a unidades del Cenozoico, cubiertas por depósitos aluviales del Cuaternario. Se observan, además, en el sector del Llano de la Paciencia evidencias de transgresión marina del Cretácico-Paleógeno.

Por su parte, en la Cordillera de la Sal, las formaciones Tambores y San Pedro representan en gran parte del sector de contexto general al periodo Oligoceno-Mioceno, además de evidenciar la progradación de un sistema fluvial (sedimentario-continental) sobre el ambiente de playa evaporítico. Mientras que las ignimbritas en el sector occidental, de edad Pliocena a Pleistocena Inferior, se disponen discordantemente sobre las formaciones más antiguas, y se encuentran cubiertas por depósitos aluviales recientes y fluvio-aluviales actuales.

Dentro del Salar de Atacama, las unidades geológicas presentes corresponden en su mayoría a una sucesión de depósitos evaporíticos del Cuaternario, como cloruros, sulfatos, carbonatos, entre otros, intercalados con depósitos aluviales, aportes fluviales y distintos depósitos salinos de humedales pertenecientes a vegas y lagunas. Estos depósitos son característicos de un ambiente continental, de clima árido con bajas precipitaciones, y con la presencia de eventos esporádicos de grandes precipitaciones capaces de transportar sedimentos hasta el núcleo del Salar. Esto, dado porque el núcleo del salar corresponde al centro de una cuenca rodeada de morfo estructuras de mayor altura como la Cordillera de la Sal, el Cordón de Lila, la Planicie aluvial y la Cordillera Occidental, por lo que recibe aportes de sedimentos característicos de estas unidades.

En planta, el actual núcleo del Salar tiene la zonación clásica de salares maduros, especialmente en el borde este y sureste: núcleo de halita rodeado por depósitos de sulfatos, que a su vez están rodeados de depósitos de carbonatos, antes de interdigitarse con los depósitos aluviales. Esta zona (sulfatos + carbonatos) se conoce como Zona Marginal. En el norte, las capas de halita del núcleo se depositan alternadamente con capas de sulfatos y depósitos clásticos de grano fino producto de inundaciones intermitentes tanto desde el delta del río San Pedro y del sistema lagunar de Soncor. A esta zona de inundaciones intermitentes se le denomina Zona de Transición Este. En el oeste del núcleo no se observan depósitos del tipo Zona Marginal.

El Salar de Atacama es cruzado por el Sistema de Falla Salar, de rumbo norte-sur, y que corresponde al rasgo estructural más relevante de esta cuenca dividiendo al salar en dos bloques: el bloque este y el bloque oeste. Este sistema de fallas es responsable, además, de alzar el Cordón de Lila en forma de una pequeña faja plegada y corrida.

Al sur del salar se encuentran los dominios morfoestructurales de Sierra Almeyda y Cordón de Lila, lo que están conformados por unidades de edad paleozoicas de origen ígneo-sedimentario, donde algunas formaciones indican un ambiente de depositación marino somero que va variando hacia un ambiente marino costero, y que finalmente subyace en discordancia angular a formaciones de origen continental. Estas unidades que conforman un relieve alzado por la acción de fallas y se encuentran cubiertas por depósitos aluviales y coluviales antiguos y recientes del Mioceno-Pleistoceno. La Ignimbrita Tucúcaro de edad Pliocena se ubica en gran extensión en el sector, donde las estructuras de Tilocalar y Tucúcaro juegan un importante rol en el alzamiento y disposición de las unidades geológicas identificadas.

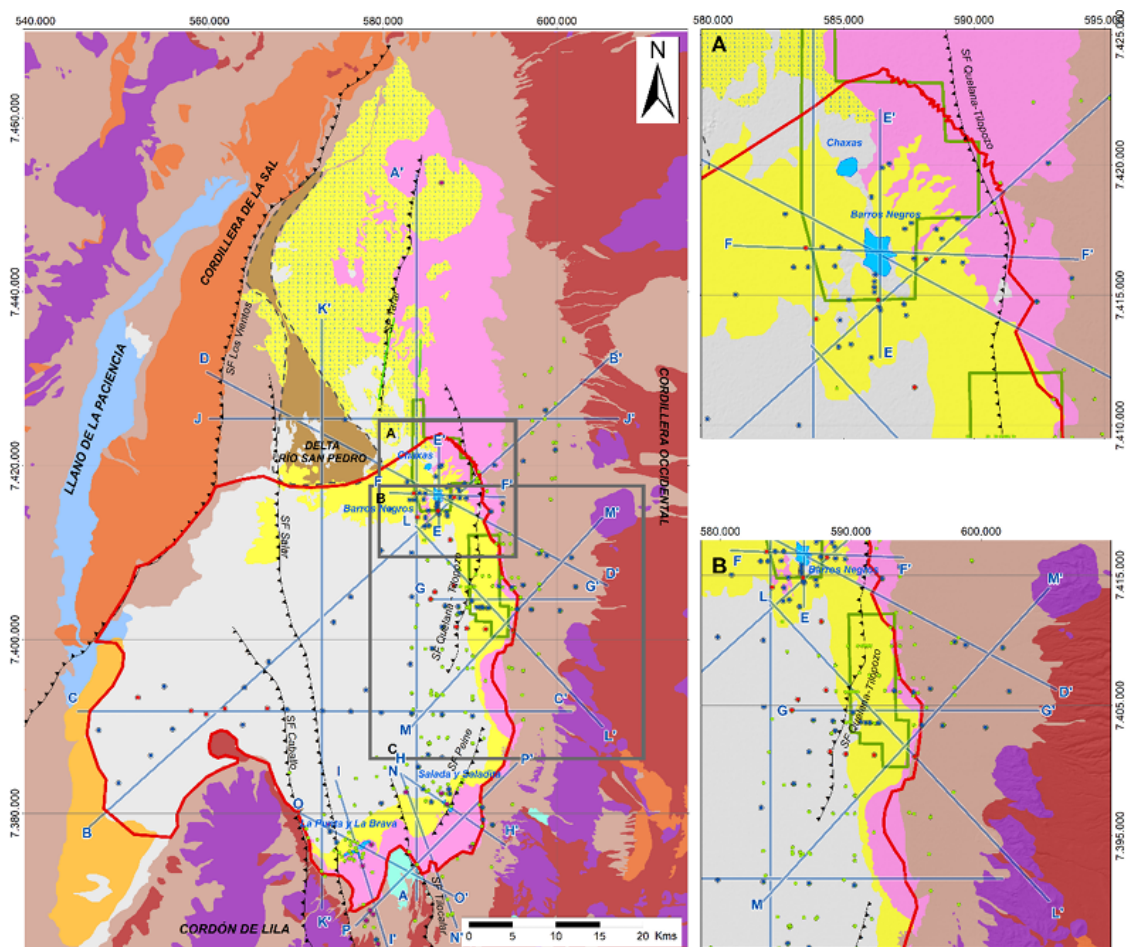
Hacia el este, la Cordillera Occidental se compone principalmente de distintos depósitos ignimbríticos con edades que van desde el Mioceno al Holoceno, junto con algunas unidades estratificadas del Triásico e intrusivos. El tipo de rocas existentes, indica un ambiente volcánico continental, interrumpido por depositación de facies sedimentarias de origen aluvial y breves episodios lacustres, similar al ambiente que existe en la actualidad. Su mayor elevación es producto del alzamiento tectónico que, posteriormente, ha sufrido incisión a causa de erosión fluvioaluvial. Sin embargo, no se caracteriza por altas pendientes, debido a que los depósitos volcánicos efusivos y explosivos (ignimbritas) suavizaron la topografía.

Finalmente, en el sector más oriental, se ubica la unidad morfoestructural del arco volcánico actual, conformada por formaciones y depósitos que se presentan con un relieve rugoso y con las mayores elevaciones dentro del área. Las unidades que caracterizan este sector tienen directa relación con el origen volcánico, donde los estratovolcanes del Mioceno Superior constituyen las unidades más antiguas dentro de

esta morfo estructura y exhiben una orientación general norte-sur. Distribuidos de forma dispersa a lo largo del arco actual y sus alrededores se reconocen: depósitos de ignimbritas de edad Miocena Superior al Pleistoceno Holoceno; coladas de lavas y edificios más recientes (Plioceno-Holoceno), cuya erosión por efecto glaciar se hace menor en los edificios más jóvenes; depósitos piroclásticos retrabajados, depósitos morrénicos en las cercanías de los centros eruptivos y depósitos laháricos. Los depósitos se superponen y se interdigitan con depósitos de orígenes aluviales y coluviales recientes.

En síntesis, la geología representa un amplio periodo geológico, que data del Paleozoico al Cuaternario, que refleja una evolución compleja que se ha caracterizado por diversos ambientes de depositación y procesos tectónicos. Hacia el este se observan las mayores elevaciones y pendientes que están relacionadas con los edificios volcánicos, y a la vez con la mayor cantidad de unidades y depósitos recientes asociados a procesos de volcanismo. En el sector central destaca la presencia del Salar de Atacama y su zonación salina que va variando de un núcleo de cloruros, a sulfatos, luego carbonatos y limos salinos. El sector oeste se caracteriza por presentar gran cantidad de deformación asociada a fallas y pliegues. Y hacia el sur el Cordón de Lila se destaca por estar conformado por las unidades geológicas más antiguas de la zona.

La geología subsuperficial de la Cuenca del Salar de Atacama se ha descrito con base en la información litológica observada en 125 perforaciones (Figura 6) complementada con información de sondajes y de métodos geofísicos que se han desarrollado por parte de CORFO, Hydrotechnica, SQM, y otros.



SIMBOLOGÍA

Modificado a partir de informes internos, Niemeyer (2013), Ramírez y Gardeweg (1982), Marinovic y Lahsen (1984), Bevacqua (1992).

Agrupación de Unidades Litológicas

- Depósitos no consolidados
- Secuencias estratificadas del Eoceno al Mioceno
- Secuencias estratificadas del Mioceno superior
- Delta del Río San Pedro
- Limos salinos del Llano de la Paciencia
- Depósitos ignimbriticos del Mioceno al presente

Núcleo y Zona Marginal del Salar de Atacama

- Cloruros
- Sulfatos
- Sulfatos con limos
- Carbonatos con limos

Estructuras

- Principales sistemas de fallas inversas de alto ángulo

Áreas de interés

- Áreas Silvestres Protegidas
- Sistemas lagunares sobrepuestos

Información para el levantamiento de secciones

- Trazas
- Piezómetros, pozos de salmuera, sondajes de aire reverso y circulación directa
- Sondaje Diamantino
- Terceros
- Sondajes con Estratigrafía

Figura 6 Mapa Geología Salar de Atacama. Fuente: Niemeyer (2013), Ramírez y Gardeweg (1982), Marinovic y Lahsen (1984), Bevacqua (1992).

A continuación, se muestran figuras representativas que identifican los distintos cortes geológicos identificados en la Figura 6.

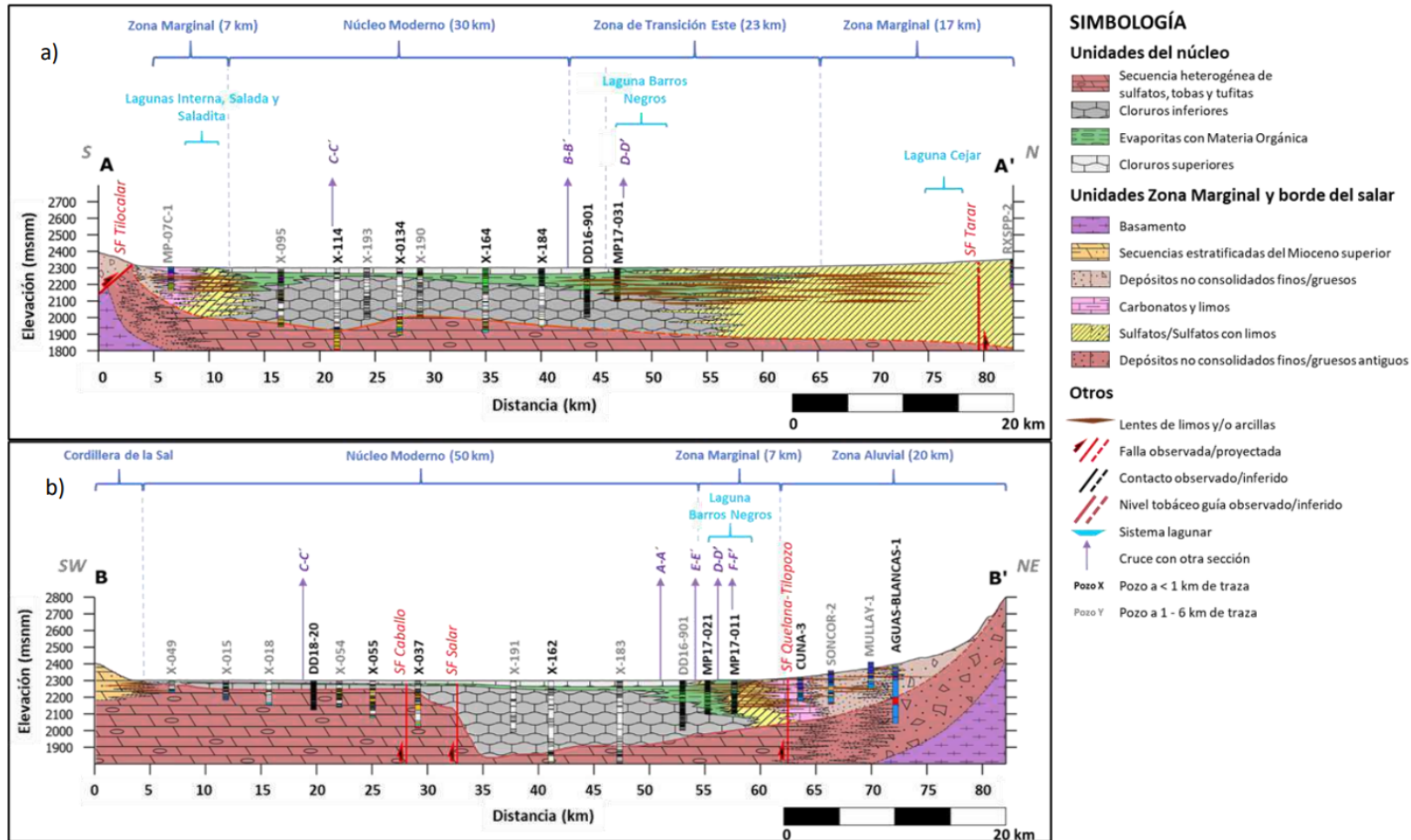


Figura 7 Secciones A-A' y B-B' (Figura 5) que conceptualizan la geología subsuperficial del Salar de Atacama en dirección sur-norte (a) y suroeste-noreste (b), respectivamente, hasta a 500 metros de profundidad desde la superficie del núcleo. Fuente: SQM con datos internos y de Rockwood (2016), Dalannais (1979) y Díaz Del Río (1972).

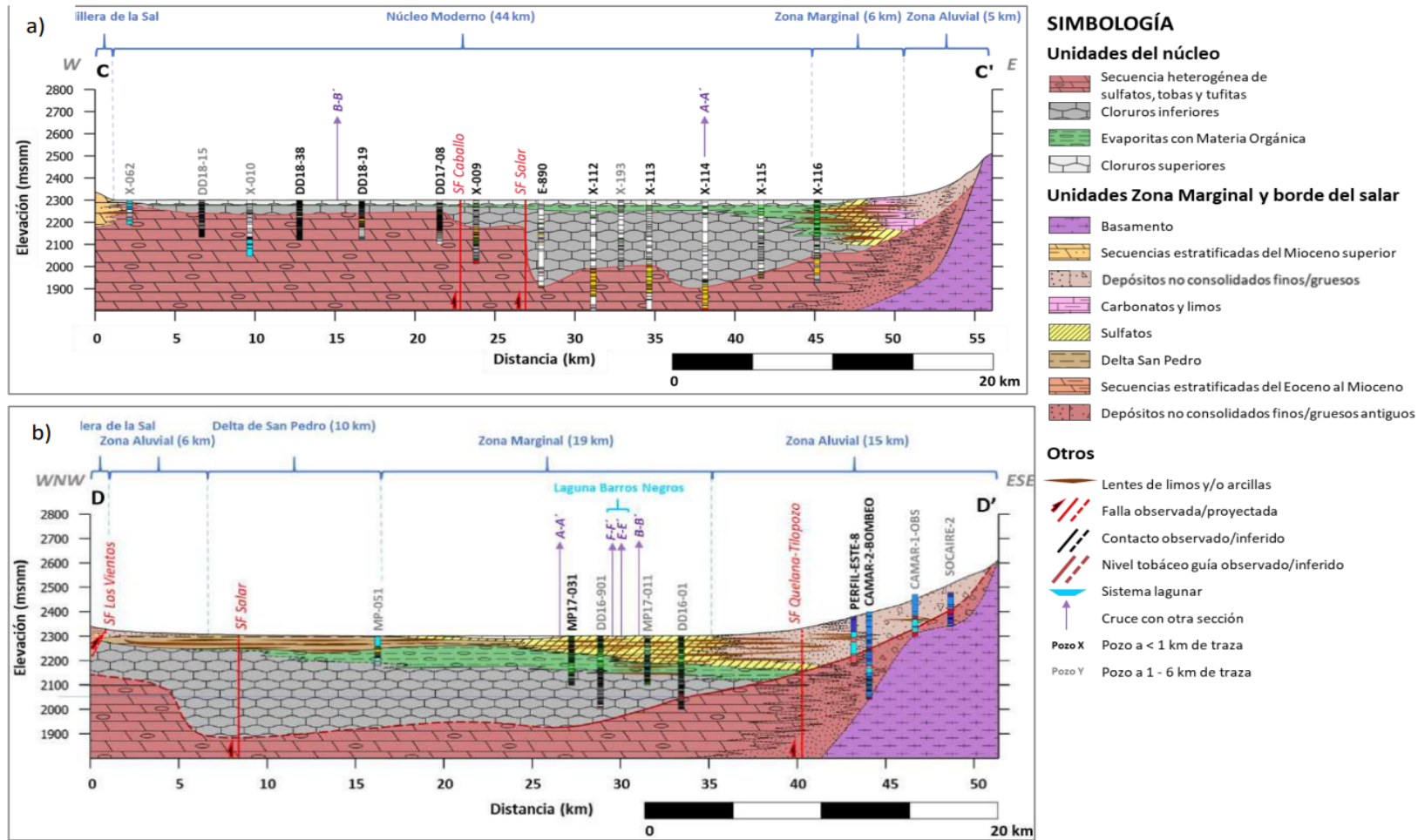


Figura 8 Secciones C-C' y D-D' (Figura 3-2) que conceptualizan la geología subsuperficial del Salar de Atacama en dirección este-oeste (a) y noroeste-sureste en el norte del salar (b), respectivamente, hasta a 500 metros de profundidad desde la superficie del núcleo. Fuente: SQM con datos internos y de Dalannais (1979) y Díaz Del Río (1972).

2.8 Usos De Agua

El sistema núcleo del Salar de Atacama está altamente comprometido por la presencia de extracciones de salmuera a través de captaciones subterráneas de actividad minera no metálica, las cuales son de uso consuntivo, permanente y continuo.

La extracción de las salmueras núcleo del Salar de Atacama ha sido realizada desde el año 1984 hasta la fecha de forma ascendente, esta evolución histórica ha provocado continuos descensos piezométricos en el núcleo sumado a la evaporación latente del núcleo mismo.

Además, fuera del núcleo en dirección este se capta agua dulce para uso industrial la cual se considera en el presente trabajo como condición de borde a la recarga lateral.

3 MODELO CONCEPTUAL

3.1 Unidades Hidrogeológicas

Complementando la definición de las unidades geológicas definidas con los parámetros hidráulicos obtenidos para cada unidad, se han definido las unidades hidrogeológicas (UH) regionales de la zona de estudio. Esto se realiza agrupando aquellas unidades geológicas que se encuentren en contacto y que tengan un comportamiento hidráulico similar. Así, para el Salar de Atacama se han definido 8 unidades hidrogeológicas (UH) regionales, de las cuales una de ellas se ha subdividido en dos (Unidad Hidrogeológica Aluvial Superior de Alto y de Medio potencial).

La distribución en planta de las UH que se observan en superficie se muestra en la Figura 8. Además, se muestra la disposición de estas unidades en profundidad en la Figura 9 y 10, mientras que la Figura 11 muestra los parámetros hidráulicos obtenidos a partir de la interpretación de pruebas hidráulicas. Finalmente, se incluye un resumen de cada UH con sus rangos estimados de K y S. En general, el funcionamiento hidrogeológico del núcleo del Salar de Atacama está condicionado por el efecto que tuvieron los sistemas de fallas Salar y Caballo sobre la distribución de las unidades geológicas. Estas estructuras alzan el bloque oeste respecto del bloque este, generando un gran depocentro en este último. Esto explica la gran potencia de evaporitas observada en el bloque este comparado con el oeste, que impacta directamente en el volumen de salmuera almacenada en el Salar de Atacama.

3.1.1 Unidad Hidrogeológica Núcleo Superior

Corresponde a la unidad más somera ubicada en el núcleo del Salar de Atacama, y está compuesta principalmente por la unidad geológica Cloruros (halita porosa, pura o con sedimentos) del núcleo. Se extiende lateralmente en todo el núcleo del Salar, con una potencia que fluctúa entre 15 y 45 m, siendo mayor al este de la Falla Salar. Por información de pruebas hidráulicas se le ha asignado un amplio rango de K entre 0,01 y 40.000 m/día, y un rango de almacenamiento (S) entre 0,1% y 15%. La presencia de cavernas en algunas zonas de esta unidad, especialmente en los primeros metros cercanos a la superficie, podría ser el origen de los valores máximos de conductividad hidráulica. Localmente, ensayos en sectores de tales características arrojan valores de almacenamiento (S) de hasta 40%. Esta unidad se comporta como un acuífero libre.

Su techo está en superficie, y su base está limitada por la UH Núcleo Intermedio. Lateralmente se encuentra en contacto con la UH Zona Marginal en su margen este, sureste y noreste, con la UH Zona de Transición Este en su margen norte, mientras que por el oeste y por el sur se encuentra en contacto tanto con el Basamento Hidrogeológico y en parte con la UH Aluvial Superior.

3.1.2 Unidad Hidrogeológica Núcleo Intermedio

Corresponde a una unidad intermedia del núcleo del Salar de Atacama, compuesta por la unidad geológica Evaporitas con materia orgánica (halitas y yesos con materia orgánica). Se extiende en todo el núcleo, y tiene una potencia estimada entre 1 y 5 m en el bloque oeste, aumentando hasta 100-150 m en el bloque este, especialmente en la zona cercana a la zona marginal de todo el Salar. Al igual que la UH Núcleo Superior, se extiende lateralmente en todo el núcleo. Con base en pruebas hidráulicas se le ha

asignado un rango de K entre 6×10^{-4} y 5 m/día. Para el S, con base en valores de literatura, se le ha asignado un rango entre 0,1% y 10%. Esta unidad se comporta como un acuitardo, confinando parcial a totalmente a la UH Núcleo Profundo.

Su techo corresponde a la UH Núcleo Superior y en parte a la UH Zona de Transición Este, mientras que su base corresponde a la UH Núcleo Profundo. Análogo a la UH Núcleo Superior, lateralmente se encuentra en contacto con la UH Zona Marginal (bordes N, E, SE y NE), y con el Basamento Hidrogeológico y UH Aluvial Superior (bordes oeste y sur).

3.1.3 Unidad Hidrogeológica Núcleo Profundo

Corresponde a la unidad hidrogeológica más profunda del núcleo del Salar de Atacama, compuesta por la unidad geológica de Cloruros inferiores (halitas muy poco porosas). Se extiende en todo el núcleo, y tiene una potencia estimada entre 20 y 50 m en el bloque oeste y 300 m en el bloque este del núcleo. Con base en pruebas hidráulicas, complementada con información de literatura, se le asignado un rango de K entre 2×10^{-3} y 120 m/día, y un rango de S entre 1×10^{-6} y 5×10^{-3} .

Su techo corresponde a la UH Núcleo intermedio (y pequeñas zonas a la UH Núcleo Superior), mientras que su base corresponde al Basamento Hidrogeológico; particularmente, en su base ha sido identificada una unidad de tobas y tufitas que son reconocibles prácticamente en todo el sector del núcleo, en la zona marginal, y en los depósitos aluviales, y que se correlaciona con la unidad geológica Depósitos ignimbríticos del Mioceno al presente.

Considerando el almacenamiento calculado, la relación geológica e hidrogeológica con el entorno y el análisis de los gráficos diagnóstico de las pruebas de bombeo realizadas en esta unidad, se infiere que esta unidad se comporta hidráulicamente como acuífero confinado.

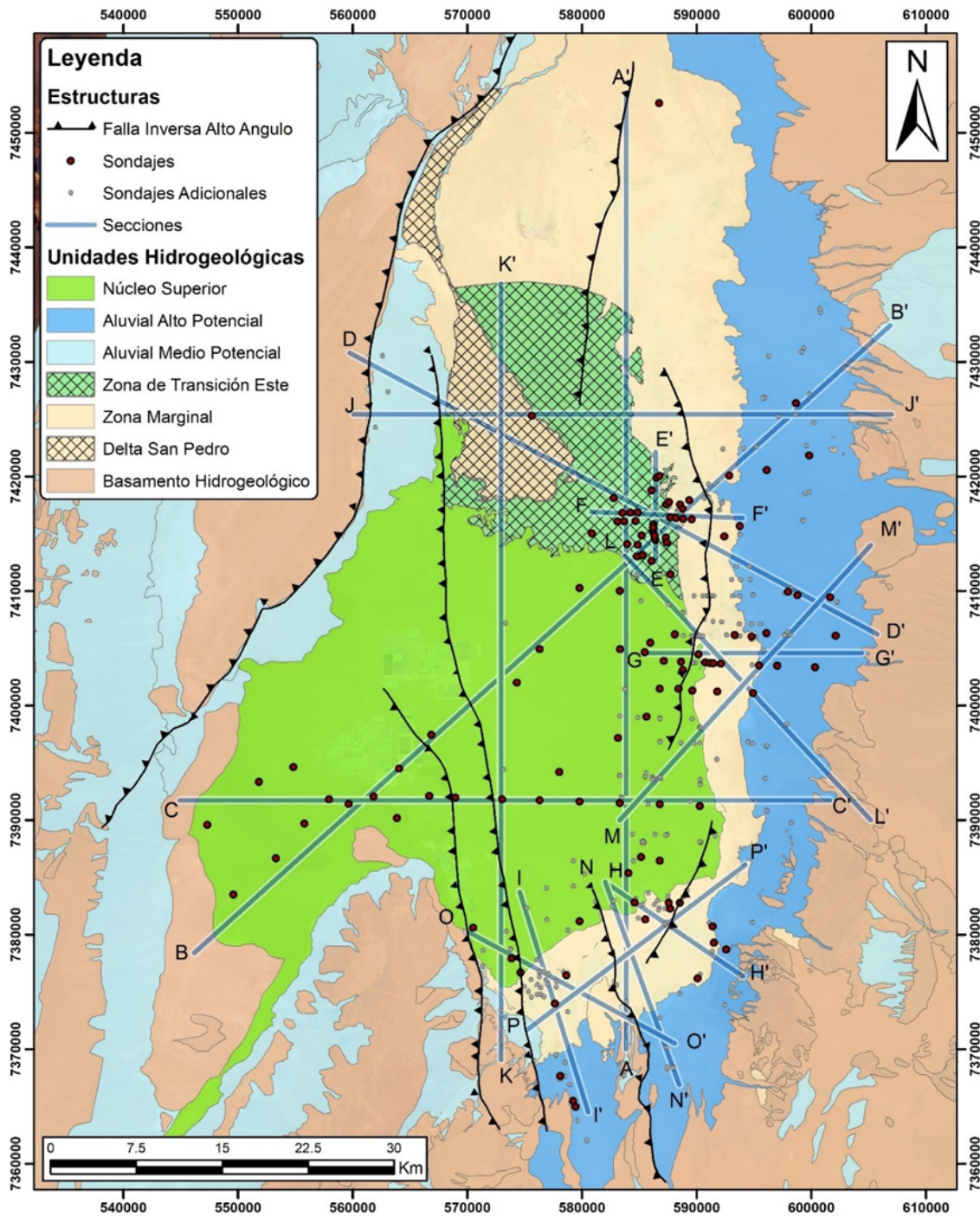


Figura 9 Mapa de unidades hidrogeológicas de la cuenca del Salar de Atacama. Se incluyen aquellos sondajes utilizados para la construcción de las secciones hidrogeológicas y las trazas en planta de dichas secciones

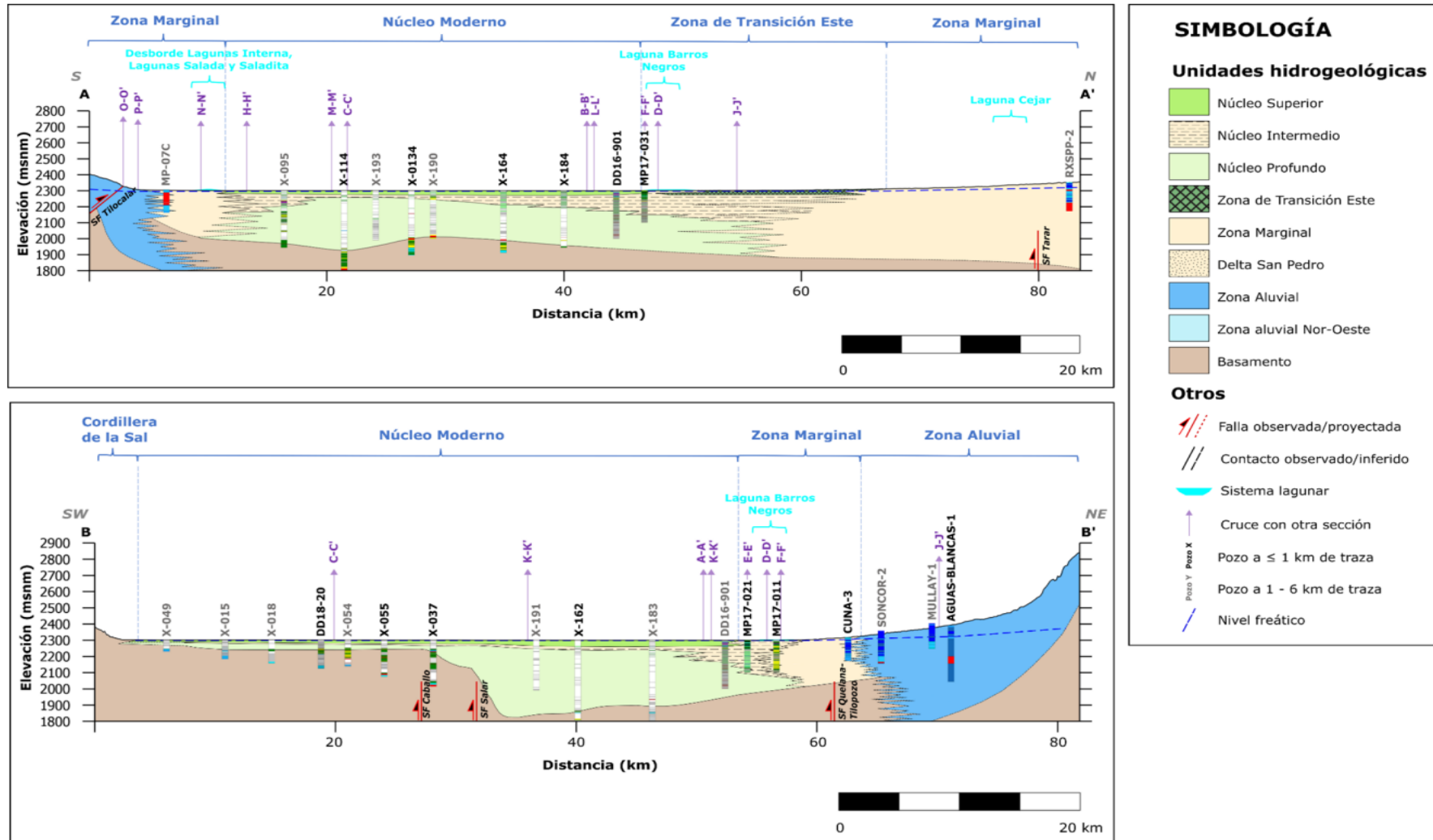


Figura 10 Secciones hidrogeológicas regionales A-A' y B-B'. Trazas de las secciones en Figura 9.

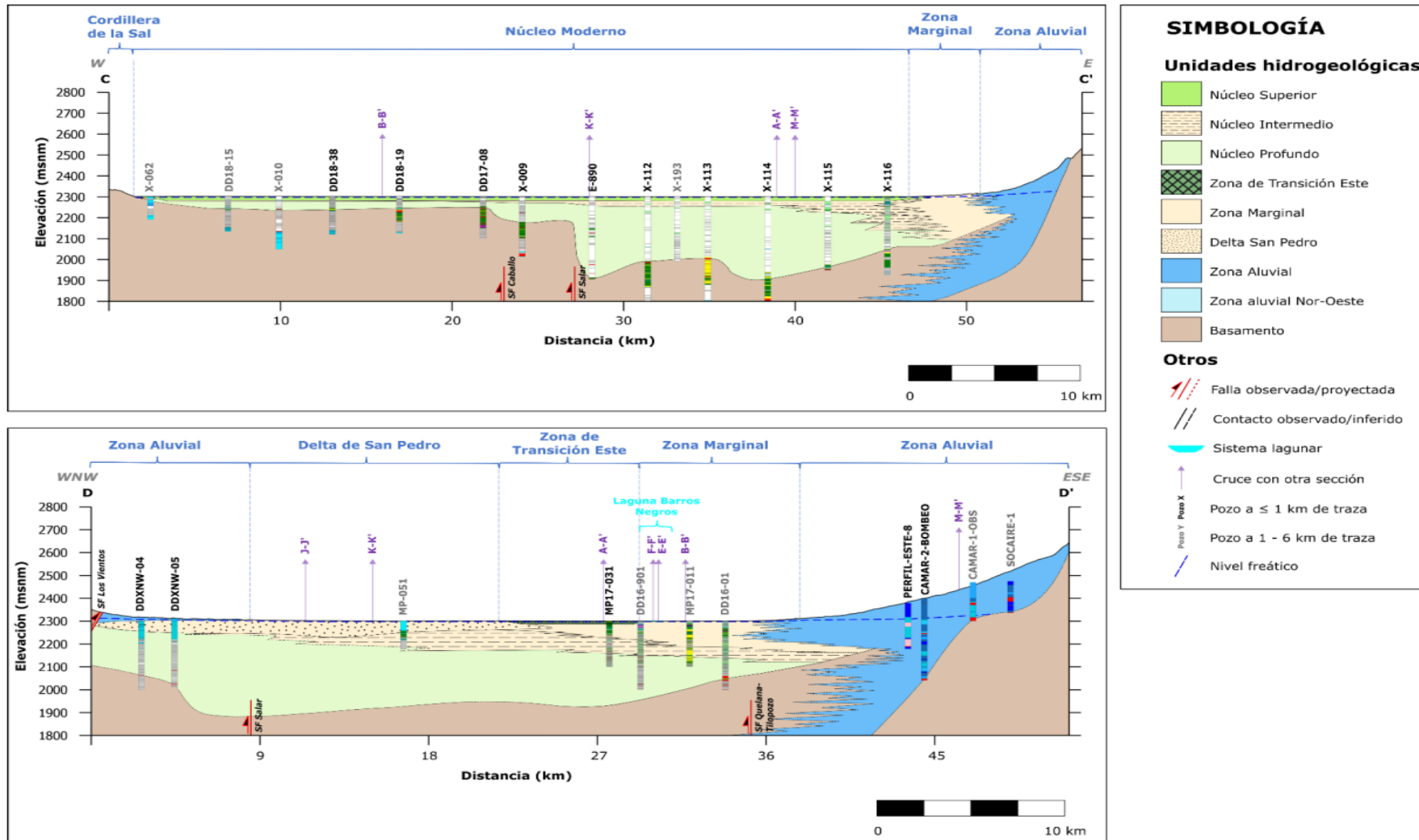


Figura 11 Secciones hidrogeológicas regionales C-C' y D-D'. Trazas de las secciones en Figura 9.

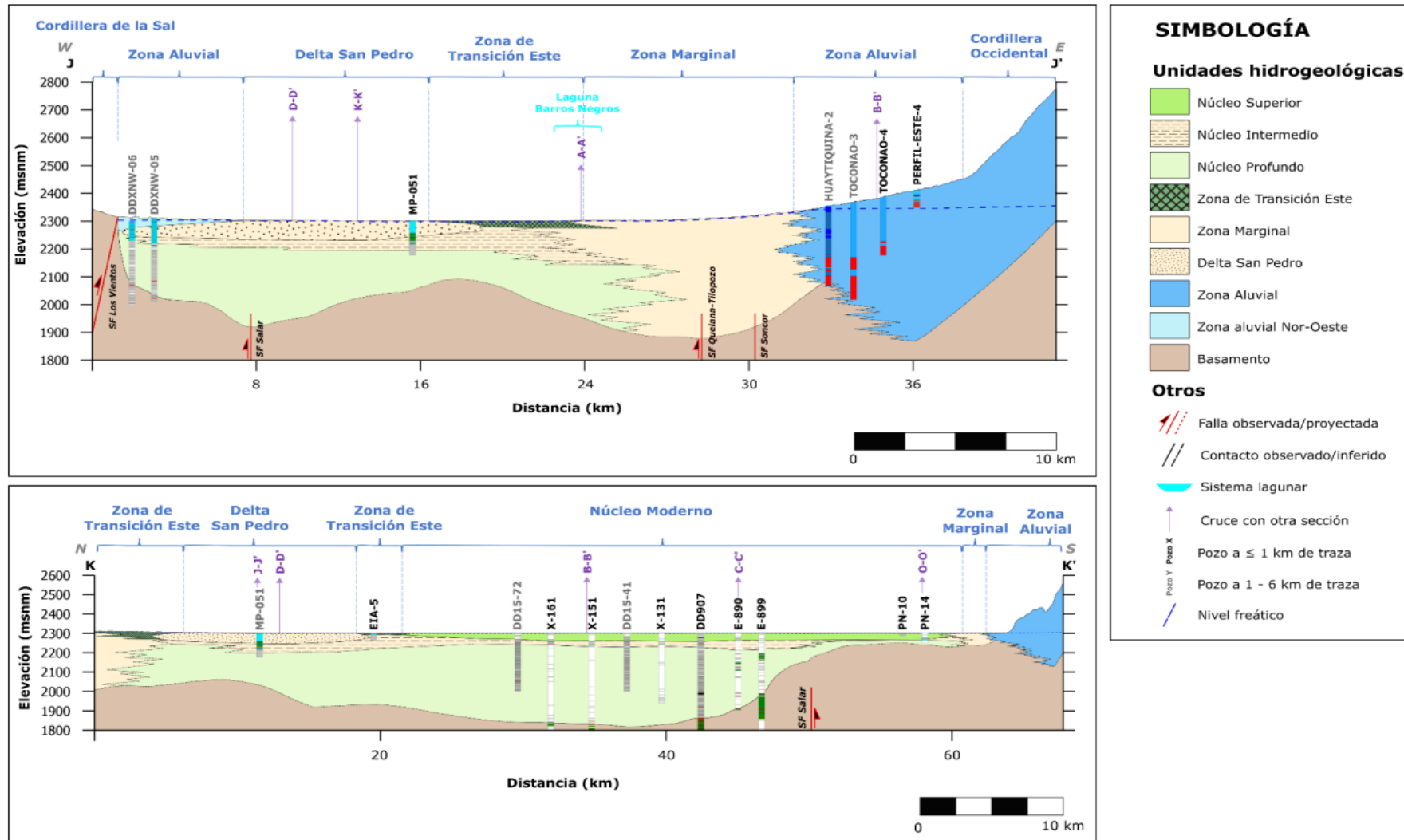


Figura 12 Secciones hidrogeológicas regionales J-J' y K-K'. Trazas de las secciones en Figura 9.

3.2 Funcionamiento y Dominio Hidrogeológico

El dominio del núcleo del Salar de Atacama ha sido determinado según la información disponible histórica, por lo que su definición esta descrita en base a las características de mayor resolución disponible.

En cuanto a la extensión vertical, el dominio queda acotado en superficie por la topografía del terreno, basada en el modelo digital de elevaciones del terreno a resoluciones de 12,5 metros identificado como ALOS PALSAR DEM producto del satélite ALOS de Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA), que adquirió imágenes rádar entre 2006 y 2011, y en profundidad por un nivel tobáceo, que se encuentra en una profundidad diferenciada por el efecto del movimiento de la Falla Salar.

Se utiliza como base los rangos de parámetros hidráulicos producto de históricos existente en el dominio del modelo.

La siguiente tabla muestra los rangos para la conductividad hidráulica y almacenamiento específicos en cada una de las unidades hidrogeológicas. Estos valores fueron obtenidos mediante ensayos in situ desde 1986 a la fecha, siendo los siguientes tipos de ensayo: Lefranc, Packer, Puntera PB, y Prueba de Bombeo.

Tabla 2 Conductividad hidráulica conceptual y almacenamiento modelo numérico

| UH | CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA TEORICA(m/d) | ALMACENAMIENTO ESPECÍFICO TEORICO (m/d) |
|-------------------|---------------------------------------|---|
| Núcleo superior | 1×10^{-2} a 40.000 | $1,5 \times 10^{-6}$ a $6,9 \times 10^{-5}$ |
| Núcleo intermedio | 6×10^{-4} a 2 | $1,6 \times 10^{-6}$ a $9,6 \times 10^{-5}$ |
| Núcleo profundo | 2×10^{-3} a 121 | $1,7 \times 10^{-8}$ a $5,5 \times 10^{-5}$ |

3.3 Recarga Directa

La recarga directa por precipitación al dominio del núcleo del Salar se implementa a través de las 20 zonas de recarga. La sectorización de la recarga se muestra en la Figura 13 y fue definida según isoyetas en el área de estudio según registro histórico de precipitaciones.

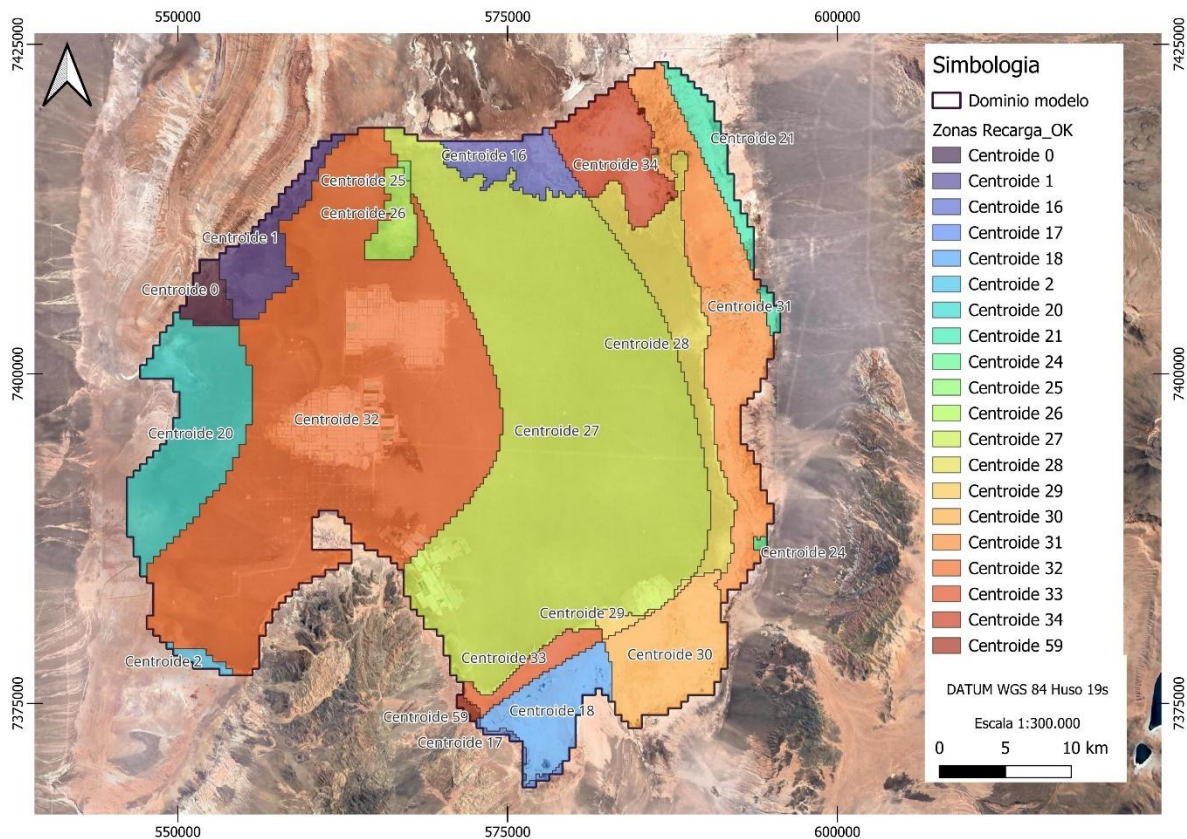


Figura 13 Zona de recarga superficial. Fuente: Elaboración propia en base a DGA Chile y SRK (2020).

En el estado estacionario se consideran los valores medios estimados por SRK Consulting (2020), equivalente a 282 l/s (periodo 1985-2019) considerando los límites del dominio del modelo, mientras que en la Figura 14 se presenta la serie de recarga directa total ingresada en el modelo.

Tabla 3. Recarga por centroide en estado estacionario, 0,282 m³/s para todo el dominio. Fuente: DGA y SQM.

| CENTROIDE | RECARGA (mm/año) | RECARGA (mm/d) |
|--------------|------------------|----------------|
| Centroide 0 | 4.72 | 0.013 |
| Centroide 1 | 4.72 | 0.013 |
| Centroide 16 | 5.77 | 0.016 |
| Centroide 17 | 9.83 | 0.027 |
| Centroide 18 | 4.92 | 0.013 |
| Centroide 2 | 3.24 | 0.009 |
| Centroide 20 | 3.84 | 0.011 |
| Centroide 21 | 6.67 | 0.018 |
| Centroide 24 | 11.98 | 0.033 |
| Centroide 25 | 5.53 | 0.015 |
| Centroide 26 | 2.94 | 0.008 |
| Centroide 27 | 5.53 | 0.015 |
| Centroide 28 | 7.76 | 0.021 |

| CENTROIDE | RECARGA (mm/año) | RECARGA (mm/d) |
|--------------|------------------|----------------|
| Centroide 29 | 4.15 | 0.011 |
| Centroide 30 | 5.94 | 0.016 |
| Centroide 31 | 5.94 | 0.016 |
| Centroide 32 | 3.85 | 0.011 |
| Centroide 33 | 4.23 | 0.012 |
| Centroide 34 | 6.61 | 0.018 |
| Centroide 59 | 4.23 | 0.012 |

Es importante destacar que las precipitaciones ocurren en diferentes magnitudes según elevaciones dentro de la cuenca lo cual fue considerado, además, la recarga directa se calcula según las precipitaciones junto a un coeficiente de infiltración el cual se muestra en la REF3 Actualización Modelo Conceptual Del Salar De Atacama, 2023.

A continuación, se demuestra la distribución temporal de las precipitaciones diarias en todas las estaciones meteorológicas identificadas en la Figura 2 dentro de la cuenca de estudio, entre enero de 1986 y diciembre del año 2020. Es relevante destacar que las distintas estaciones meteorológicas se ubican a diferentes alturas por lo que no representa directamente las precipitaciones en el núcleo del Salar, pero si representan las recargas al sistema, la recarga directa implementada en el presente estudio son las determinadas en base a las precipitaciones corregidas por altitud y considerando el coeficiente de infiltración para zona acuífera determinado en la REF 3.

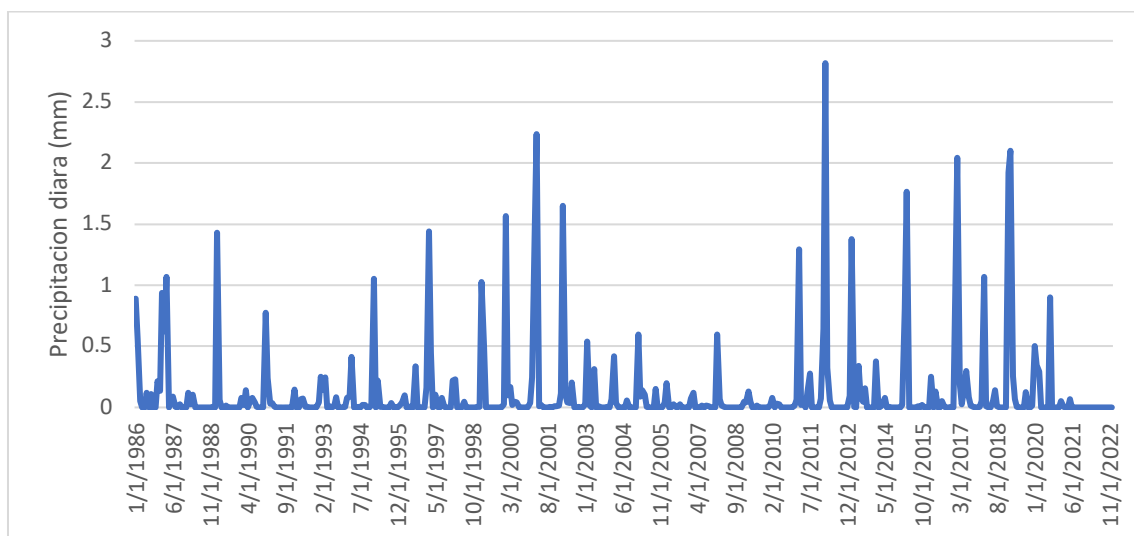


Figura 14 Distribución de la recarga directa. Fuente: Elaboración propia en base a DGA y SQM.

3.4 Flujo Lateral Subterráneo

Para reproducir la recarga lateral al área de estudio se ha implementado una condición de flujo lateral prescrito a través de las tres capas del modelo en base a diez (10) zonas preferenciales de entrada. Las zonas de recarga provienen del documento Actualización del Modelo Hidrogeológico Conceptual del Salar de Atacama REF 3.

A continuación, se representa la ubicación de las zonas preferenciales de entrada, las cuales actúan como condiciones de borde.

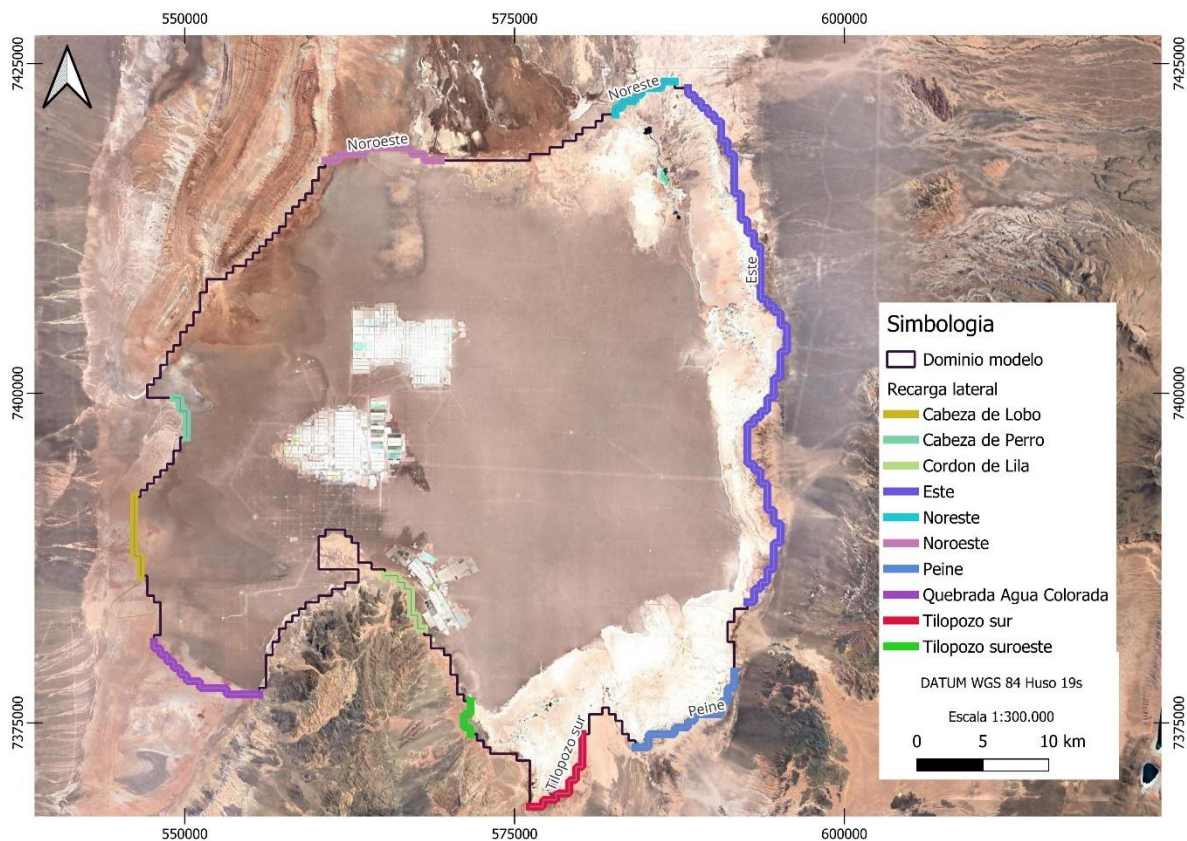


Figura 15 Ubicación Zonas de Recarga Lateral Subterránea. Fuente: Elaboración propia.

A modo de resumen, en la Tabla 4 se indican los valores considerados para el modelo numérico en estado estacionario y transitorio. Es importante destacar que para la zona Tilopozo Sur se considera una reducción del flujo de entrada producto de inicios de actividades de extracción de agua dulce fuera del núcleo partir de enero del año 1999.

Tabla 4 Recarga lateral. Fuente: DGA y SQM.

| ZONA | RECARGA (m ³ /s) |
|------------------------|-----------------------------|
| Cabeza de Lobo | 0.010 |
| Cabeza de Perro | 0.022 |
| Cordón de Lila | 0.225 |
| Este | 0.170 |
| Noreste | 0.051 |
| Noroeste | 0.060 |
| Peine | 0.117 |
| Quebrada Agua Colorada | 0.114 |
| Tilopozo sur | 0.331 – 0.3072 |
| Tilopozo suroeste | 0.069 |
| TOTAL | 1.1688 |

A modo de visualizar la cantidad total de entrada por flujo lateral subterráneo se representa a continuación un gráfico que demuestra el cambio de esta desde 1986 hasta el año 2022.

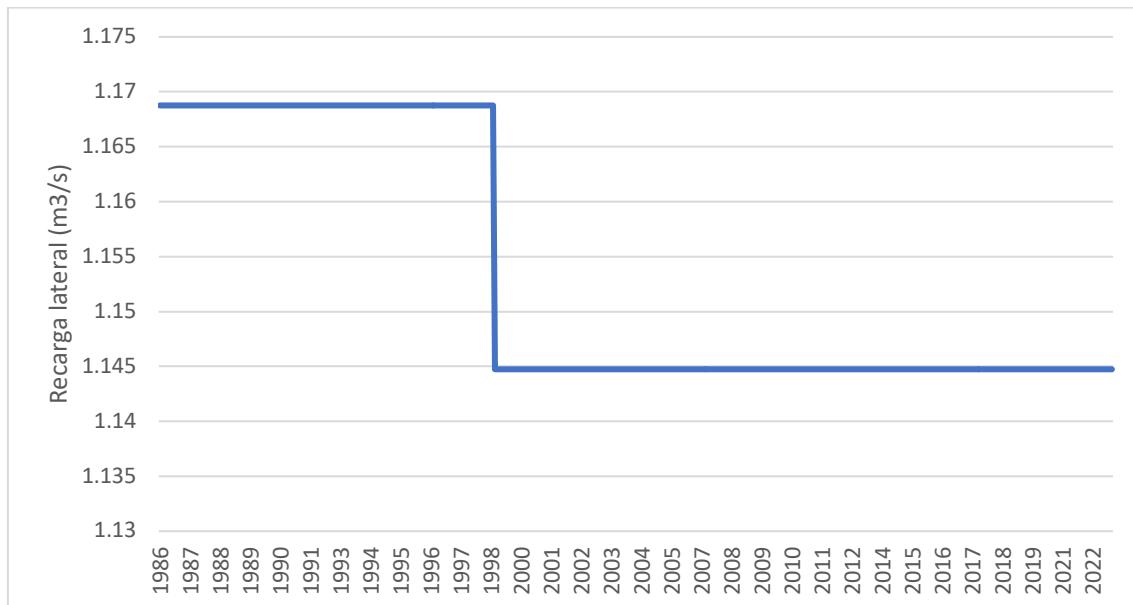


Figura 16 Gráfico de Recarga Lateral Subterránea. Fuente: Actualización del Modelo Hidrogeológico Conceptual del Salar de Atacama, 2023, REF 3.SQM.

3.5 Evaporación

La descarga por evaporación desde el agua subterránea se proyecta en toda la superficie del núcleo del Salar de Atacama. Las zonas de evaporación y tasa de evaporación ingresadas se definen según los datos medidos por ensayos históricos en el dominio según indican los apéndices del documento Actualización del Modelo Hidrogeológico Conceptual del Salar de Atacama REF 3.

El dominio del modelo abarca 10 zonas de evaporación desde el suelo (Figura 22). La tasa de evaporación potencial corresponde a 300 mm/año, correspondiente a la evaporación de agua dulce. En cambio, para agua tipo salmuera se corrige por la densidad y de esta forma refleja el efecto en la evaporación de la concentración de sales en el agua, definiendo una tasa de evaporación potencial de 100 mm/año en este tipo de agua según indica la REF 3.

Se define que la profundidad de extinción para todas las zonas de evaporación es de 2 metros. Mientras que la estacionalidad de la evaporación se implementa a partir de los promedios mensuales de la evaporación de bandeja indicados en el modelo conceptual REF 3, los valores mensuales se normalizan con respecto al promedio anual y se aplica para todos los años del modelo. La tasa de evaporación potencial normalizada en estado estacionario a considerar se presenta en la Tabla siguiente y la distribución de las zonas de evaporación se muestran en la siguiente figura.

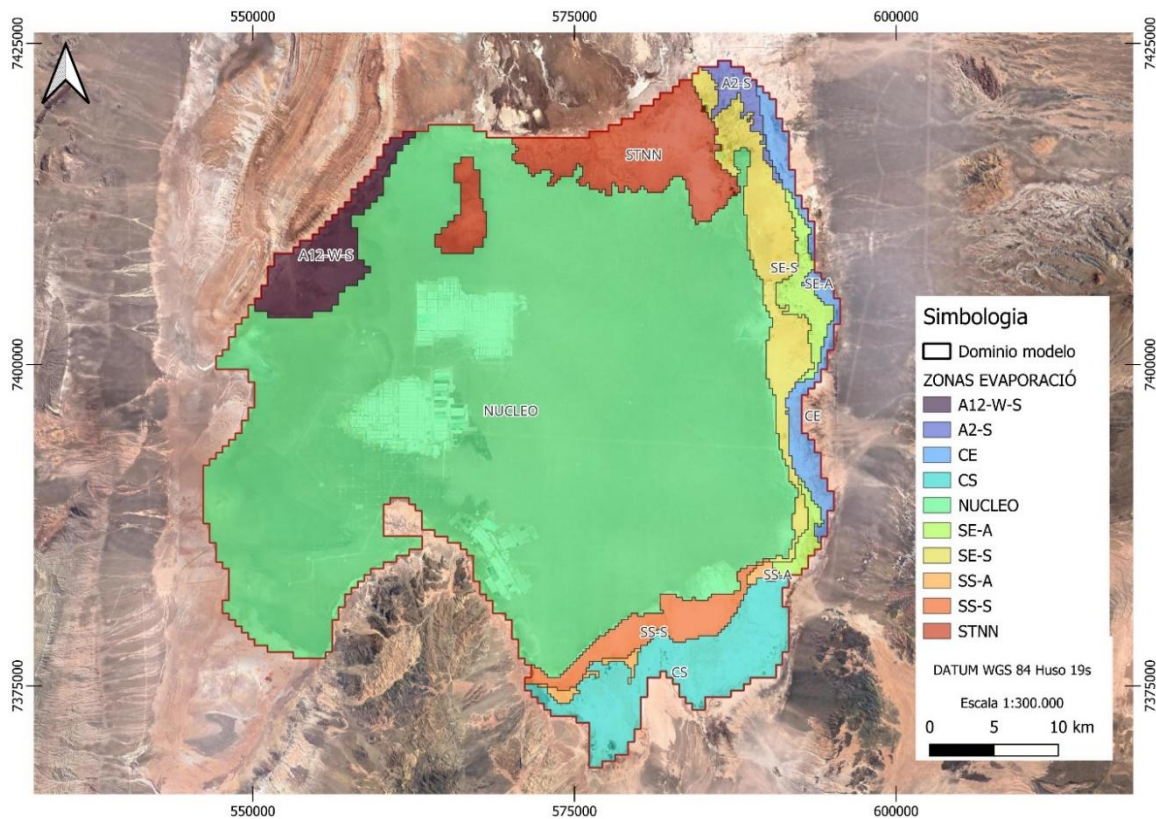


Figura 17 Zona de evaporación. Fuente: Actualización del Modelo Hidrogeológico Conceptual del Salar de Atacama, 2023, REF 3.

Tabla 5 Parámetros de evaporación estado estacionario. Fuente: Datos de ensayos medidos en el dominio, REF 3.

| ZONA EVAPORACIÓ | ETP (mm/año) | ETP (mm/d) | ETP (m3/s) |
|-----------------|--------------|------------|-----------------|
| A12-W-S | 75.3 | 0.21 | 2.39E-09 |
| A2-S | 114.04 | 0.31 | 3.62E-09 |
| CE | 321.84 | 0.88 | 1.02E-08 |
| CS | 344.94 | 0.95 | 1.09E-08 |
| NUCLEO | 75.3 | 0.21 | 2.39E-09 |
| SE-A | 304.21 | 0.83 | 9.65E-09 |
| SE-S | 140.57 | 0.39 | 4.46E-09 |
| SS-A | 304.21 | 0.83 | 9.65E-09 |
| SS-S | 102.24 | 0.28 | 3.24E-09 |
| STNN | 48.75 | 0.13 | 1.55E-09 |
| PROMEDIO | 183 | 0.5 | 5.81E-09 |

A modo de comprender y visualizar la variación de la evaporación en torno a estaciones meteorológicas representadas en la Figura 2 las cuales cuentan con tanques evaporímetros, a continuación, se representa los valores de evaporación mensual promedio de las estaciones meteorológicas entre 1986 y 2020.

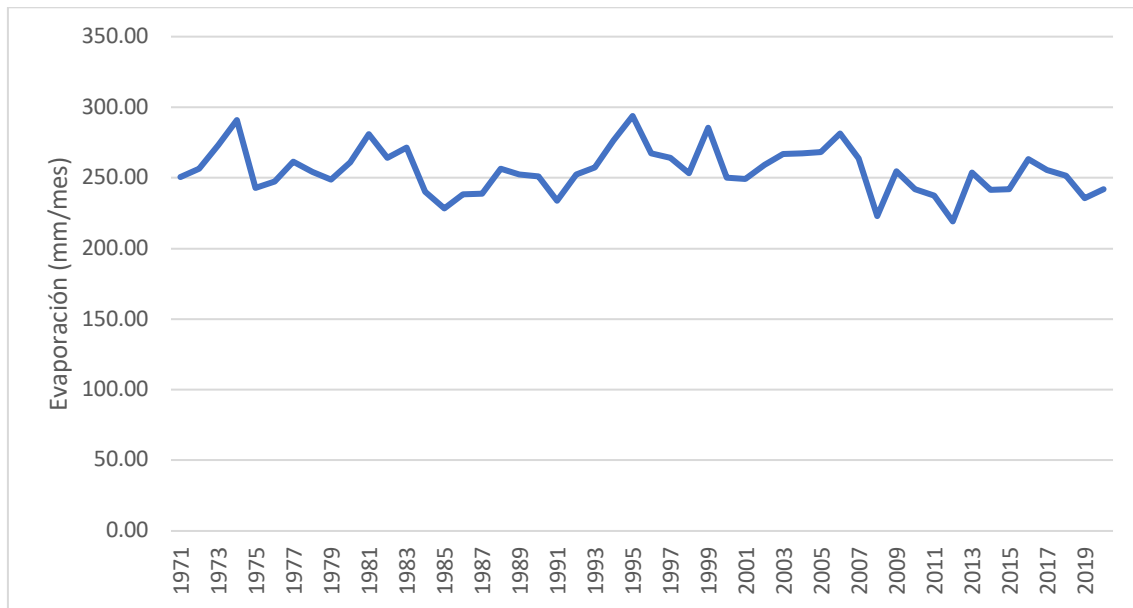


Figura 18 Evaporación mensual promedio histórico en Estaciones Meteorológicas.
Fuente: Estaciones meteorológicas DGA y SQM.

3.6 Extracciones

Las extracciones se implementan considerando los registros oficiales mensuales de SQM y Albemarle (ALB), empresas con actividades extractivas en el dominio del estudio reportados a la autoridad competente.

3.6.1 SQM

La operación de SQM se realiza en el bloque oeste a través de pozos distribuidos en el área autorizada de extracción. Para el modelo numérico, estos pozos deben de ser agrupados en 270 Puntos Equivalentes de Extracción (PEEx).

Los PEEx se han implementado en el núcleo superior (Capa 1) y en el núcleo profundo (capa 3), según corresponda, por la habilitación media que presenten los pozos de extracción correspondientes. De este modo, en las Figura 19 y Figura 20 se presenta la distribución en planta de los PEEx activos a lo largo de la operación hasta la actualidad por unidad. Adicionalmente, en la Figura 21 se muestra el caudal total implementado en el modelo. Los pozos de extracción se identifican por sector MOP y SOP.

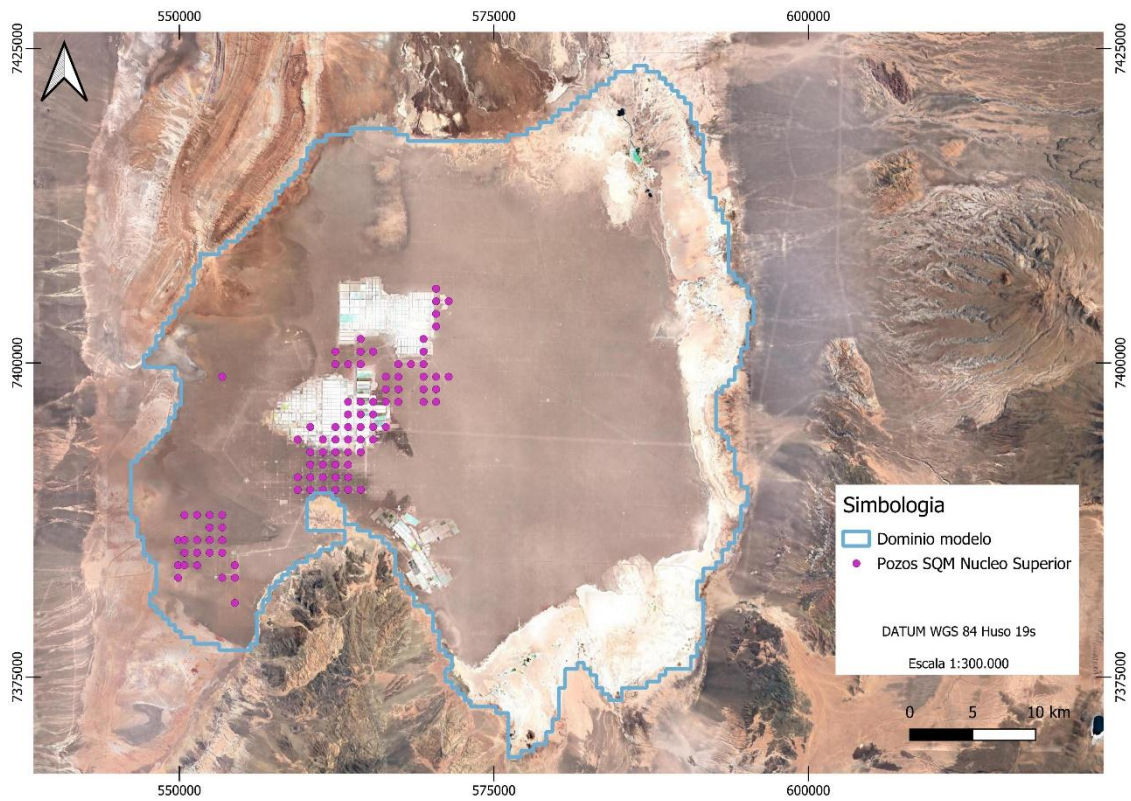


Figura 19 Pozos de extracción de SQM implementado – Núcleo superior. Fuente: SQM.

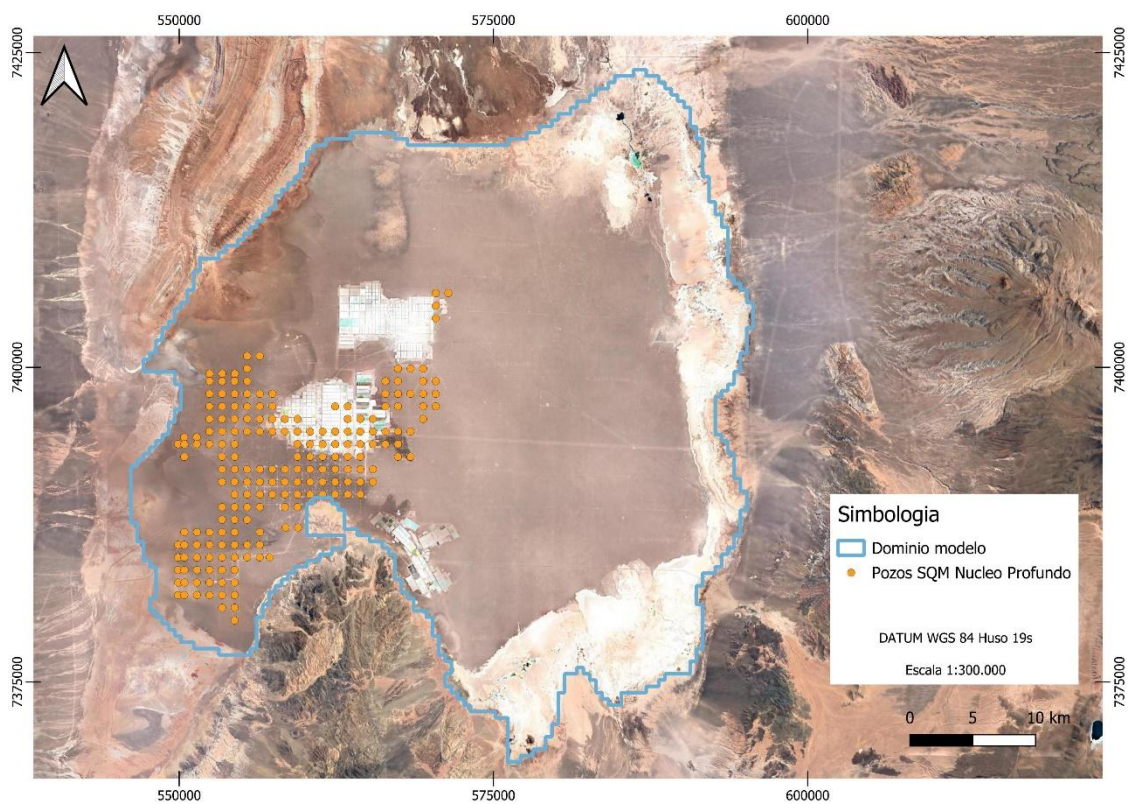


Figura 20 Pozos de extracción de SQM implementado – Núcleo profundo. Fuente: SQM.

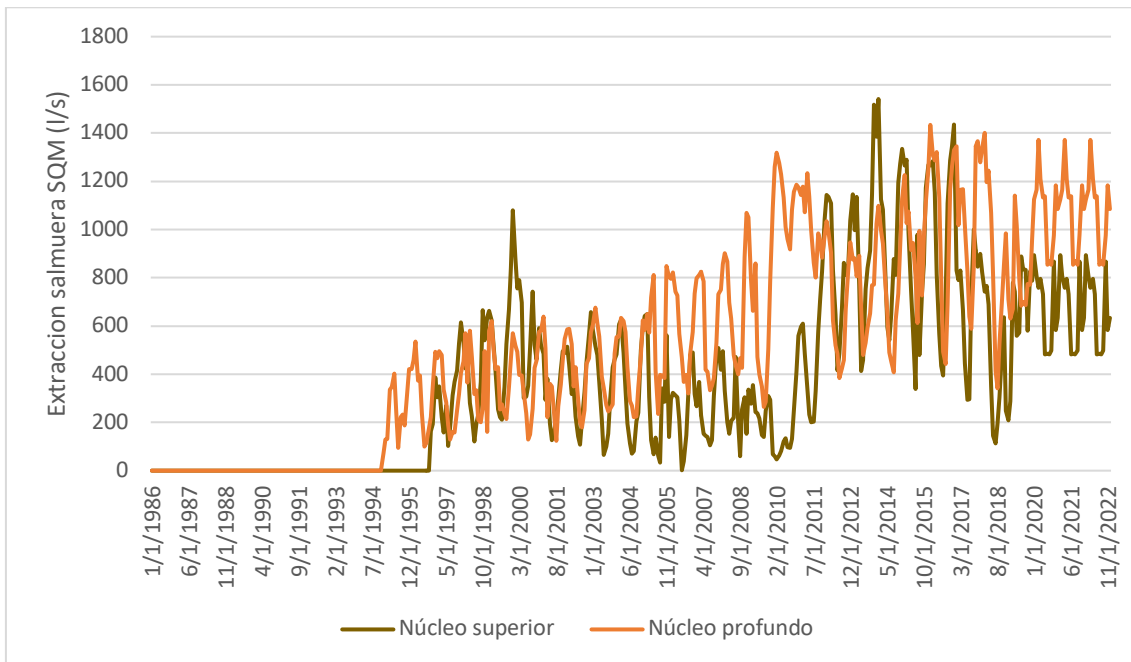


Figura 21 Extracción total de salmuera por depósito MOP/SOP. Fuente: SQM.

3.6.2 ALBEMARLE

La extracción de salmuera de Albemarle se implementa en el modelo en su totalidad mediante 119 pozos realizando la reubicación de aquellos pozos que se reportan fuera del dominio, con el fin de no subestimar el caudal extraído por la empresa. Se ha considerado también la extracción correspondiente a dos pozos de agua: Tilopozo y Tucúcaro. Los pozos de extracción de Albemarle son ingresados en el modelo con su habilitación registrada.

En la Figura 22 se puede ver en detalle la ubicación de estos y en la Figura 23 y Figura 24 el caudal total para salmuera y agua industrial, respectivamente. La ubicación de los pozos y la extracción de Albemarle se ha obtenido de los informes trimestrales reportados oficialmente hasta la fecha.

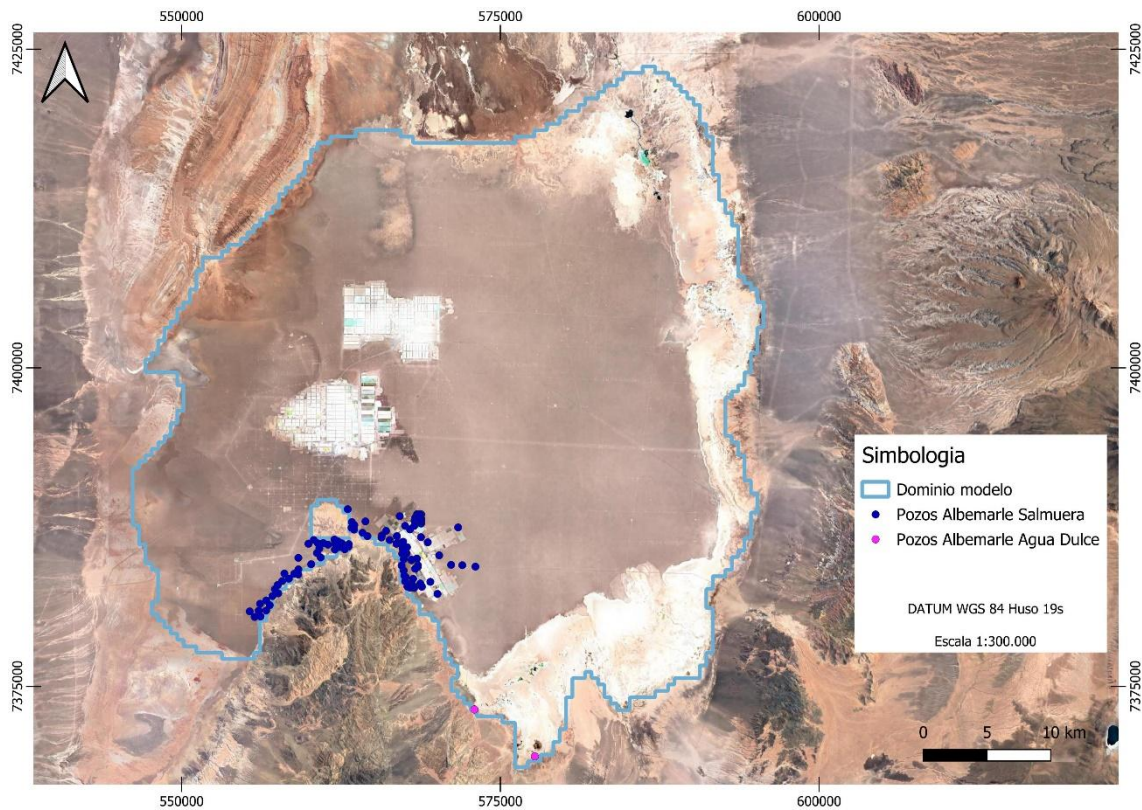


Figura 22 Pozos de extracción de Albamarle implementados. Fuente: Albamarle.

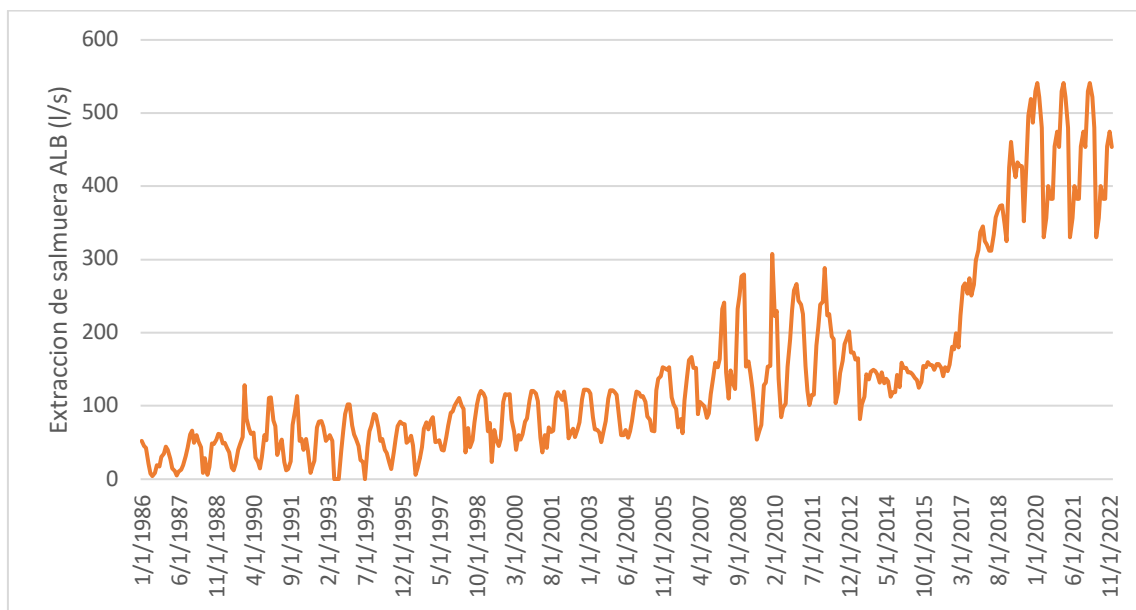


Figura 23 Extracción total de salmuera Albamarle. Fuente: Albamarle.

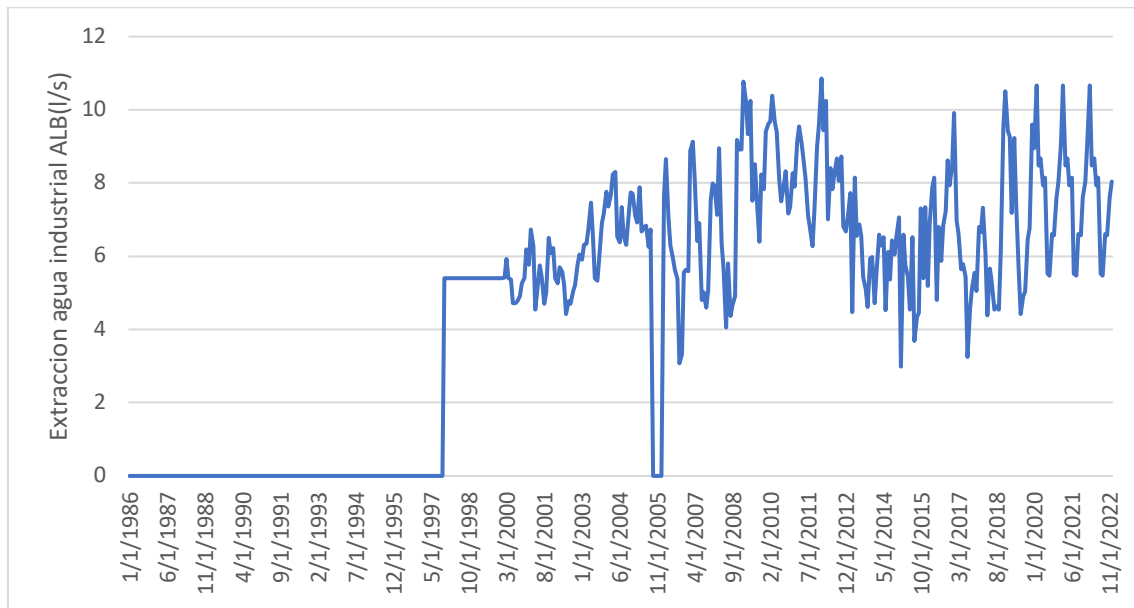


Figura 24 Extracción total de agua industrial Albemarle. Fuente: Albemarle.

3.7 Reinyección

Las reinyecciones directas son implementadas de forma puntual en el Núcleo Superior del Salar de Atacama, mientras que las reinyecciones indirectas son implementadas considerando las superficies de reinyección en la misma capa. El flujo reinyectado indirectamente es distribuido uniformemente mediante una tasa determinada. En la Figura 25 se muestra la distribución en planta de las reinyecciones por sector y en la Figura 26 se muestra el caudal implementado.

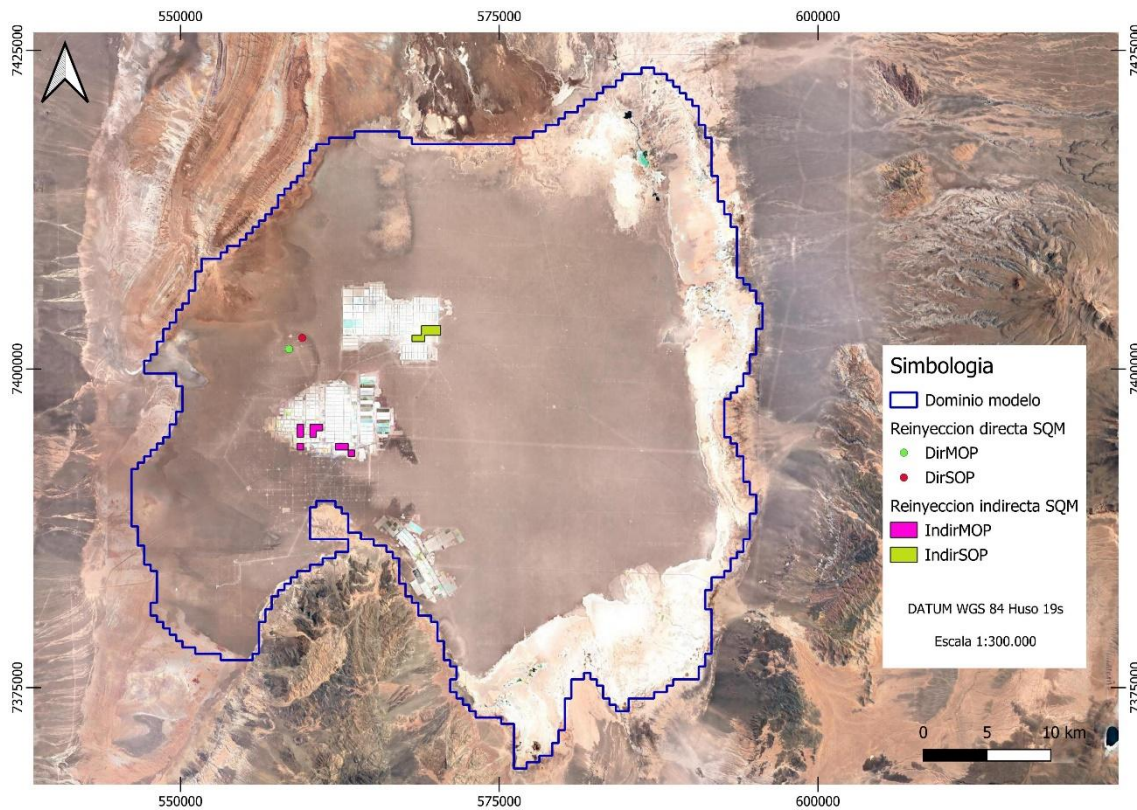


Figura 25 Ubicación de los puntos de reinyección. Fuente: SQM.

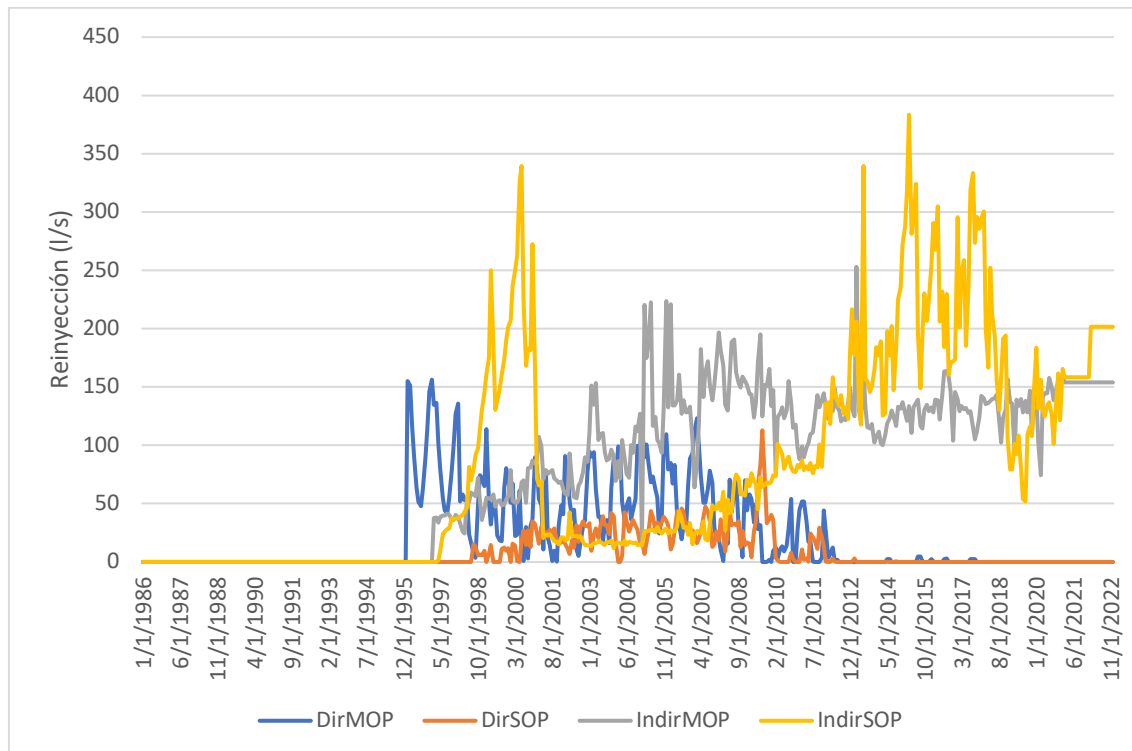


Figura 26 Caudal reinyectado. Fuente: SQM.

4 CÓDIGO UTILIZADO

Para la implementación del modelo hidrogeológico numérico se seleccionó el código de flujo basado en volúmenes finitos MODFLOW 6 (Panday et al., 2017), desarrollado por el USGS (Servicio Geológico de Estados Unidos) y utilizando la interfaz gráfica MODEL MUSE 5 para el pre y post procesamiento de los datos de entrada y salida.

La familia de código MODFLOW es el código estándar de la industria y ha sido rigurosamente sometido a pruebas y evaluación. MODFLOW 6 permite el uso de los paquetes nativos de Modflow, pero posibilita la generación de una grilla no estructurada obteniendo resoluciones espaciales diferenciadas dependiendo del grado de interés de cada zona.

También se considera implementar el lenguaje de programación Python junto a sus librerías Numpy, Matplotlib y Pandas, para la comprensión de resultados, comparativas y análisis de bondad de ajuste del modelo.

Las unidades de medida a utilizar son en sistema internacional, siendo longitud en metro y tiempo en día.

5 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

5.1 Geometría y Límites

En primer lugar, se define un límite de dominio en torno al núcleo del Salar de Atacama, el cual se ubica entre latitud $-23,29^\circ$ y $-23,79^\circ$, y longitud $-68,55$ y $-68,06$. Siendo de 55 kms de norte a sur y 50 kms de este a oeste, con un área total de 1765 km².

5.2 Discretización Horizontal

La discretización espacial horizontal considera, en primer lugar, una grilla rectangular homogénea de 250 x 250 m en todo el dominio para mejorar el detalle de la propagación del descenso.

Esta configuración genera un dominio 3D que engloba las unidades hidrogeológicas de interés y no interfieren con la dinámica de los flujos. Por tanto, el área del dominio del modelo queda delimitada de la siguiente forma:

- Al oeste, por el contacto con la Cordillera de la Sal.
- Al norte, por el contacto deposicional del delta de San Pedro.
- Al este, por el contacto con la zona aluvial.
- Al sur, por el cordón de Lila y el contacto con la zona aluvial.
- En superficie por la topografía.
- En profundidad por un nivel tobáceo.

A continuación, se visualiza la Figura 27 que representa las capas horizontales del núcleo de Salar de Atacama a considerar en el modelo numérico.

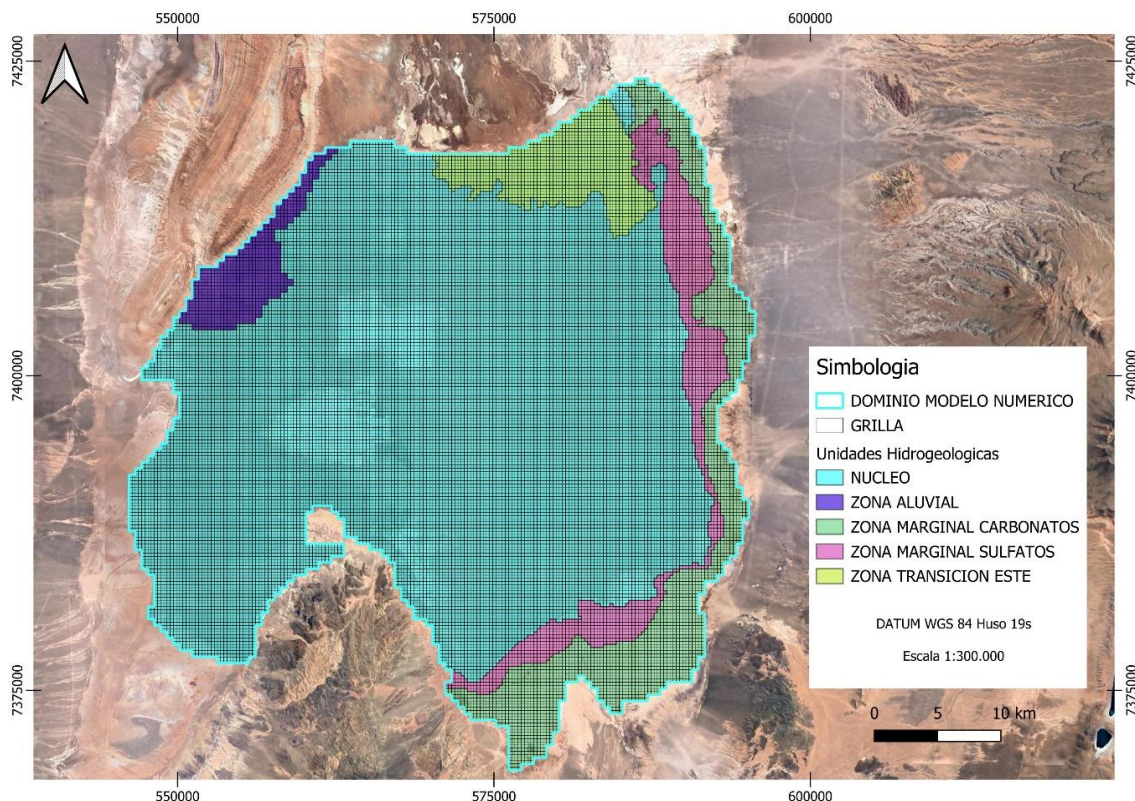


Figura 27 Discretización horizontal. Fuente: Elaboración propia.

5.3 Discretización Vertical

La superficie del dominio fue extraída desde un Modelo de Elevación Digital proveniente del satélite ALOS PALASAR, de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA) con una resolución nativa de 12,5 m. En la cual varían las elevaciones para el dominio de la superficie del modelo entre 2299.3 y 2398.89 m.s.n.m.

Verticalmente, el modelo está compuesto por tres capas de espesores variables las cuales representan los contactos entre las unidades hidrogeológicas. La Capa 1 varía entre 2 y 55 metros compuesto principalmente por la unidad hidrogeológica Núcleo Superior, la Capa 2 varía entre 2 y 126 metros representando la extensión de la unidad hidrogeológica Núcleo Intermedio y la Capa 3 varía entre 2 y 424 metros representando la unidad hidrogeológica Núcleo Profundo. La presente discretización espacial fue obtenida e implementada según características geológicas del área de estudio desarrollada por SERNAGEOMIN Chile, DGA Chile y la empresa SQM.

A continuación, se representa una figura con los cortes de elevaciones para dos perfiles en dirección norte-sur y oeste-este.

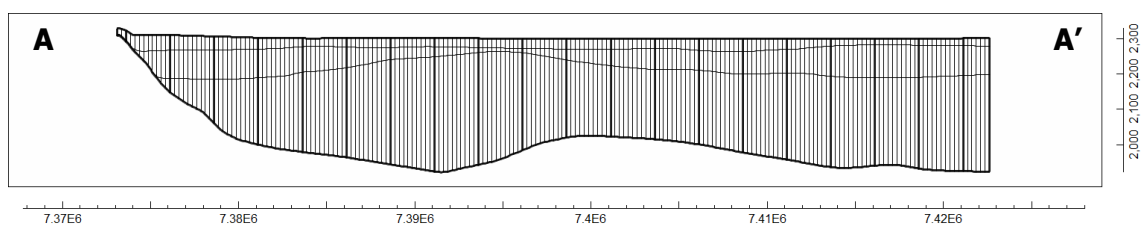
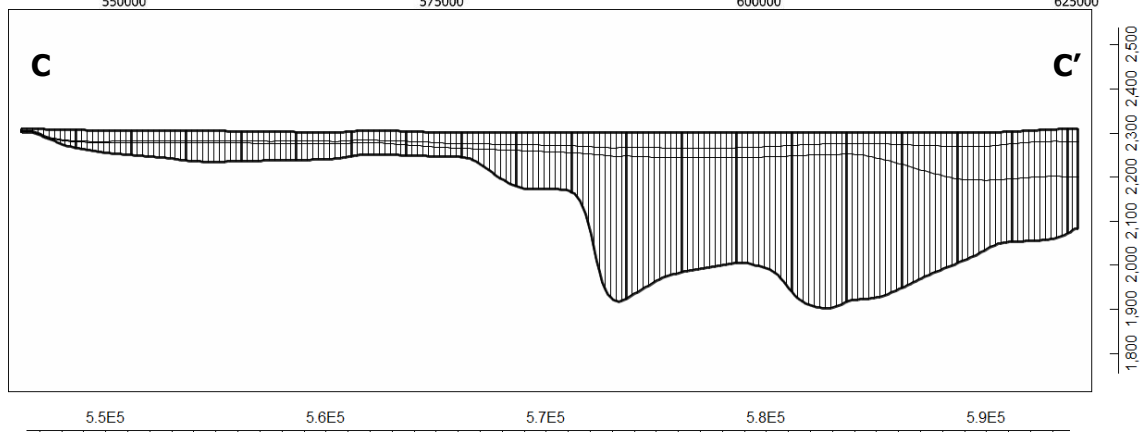
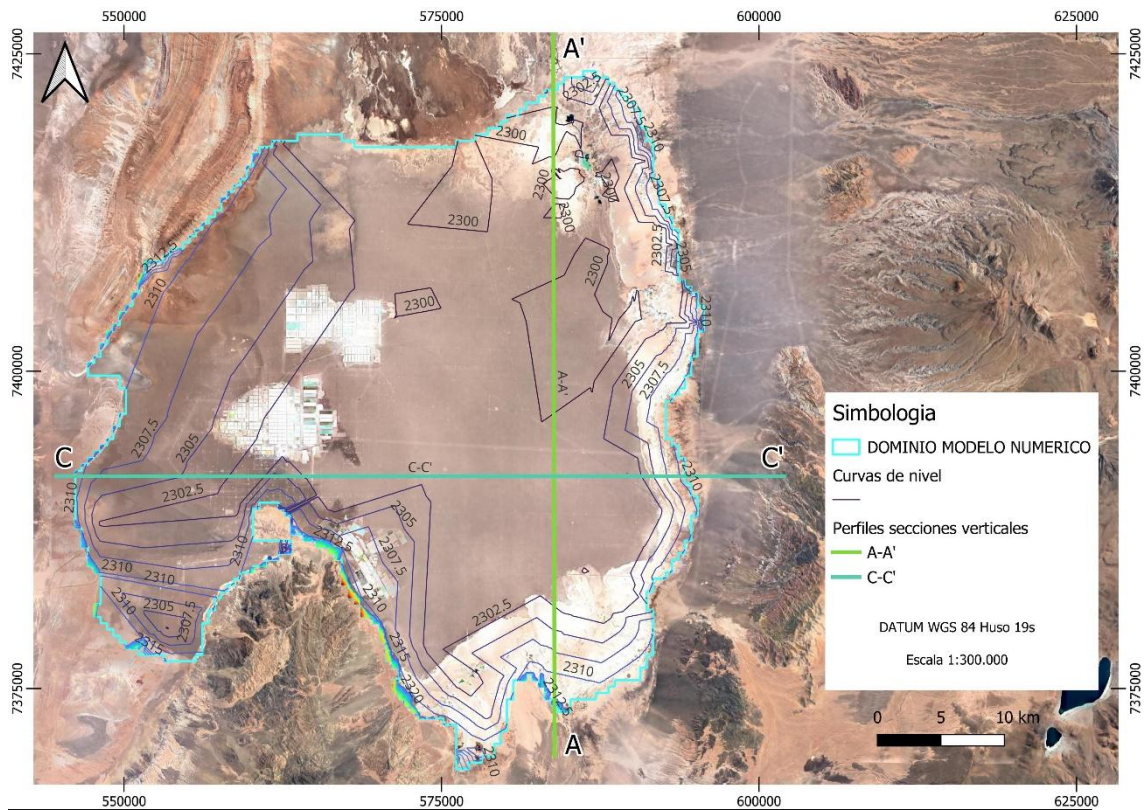


Figura 28 Perfil secciones verticales Modelo Numérico, Fuente: Elaboración Propia.

5.4 Discretización Temporal

La discretización temporal planteada en el modelo respecto a los datos de entrada es a nivel diaria, no obstante, para términos de ejecución del modelo se realizan los pasos de tiempo a nivel mensual.

Para determinar la Discretización Temporal del Modelo se considera inicialmente un paso de tiempo en estado estacionario el cual se identifica como tiempo 0 o "EST", a su vez para el modelo transitorio y calibración, se considera desde el año de inicio de las actividades que fue en enero de 1986 hasta diciembre del año 2022. Finalmente, para el modelo de simulación se considera desde enero del año 2023 hasta diciembre del año 2100, lo cual representaría un escenario presente y futuro.

5.5 Condición Inicial

Como condición inicial y de partida se permite disponer que el flujo en el dominio se encuentra a nivel de terreno del Núcleo, esto entendiendo que el sistema se encuentra en equilibrio por lo que las entradas al mismos son iguales a las salidas del propio sistema.

5.6 Asignación De Parámetros Hidráulicos

Los parámetros hidráulicos para la resolución del modelo numérico son las propiedades de cada capa, las cuales son:

- Conductividades hidráulicas (K_x , K_y y K_z)
- Rendimiento específico (S_y)
- Coeficiente de almacenamiento (S_s)

En vista y consideración que el área de estudio ha sido estudiada desde el comienzo de las actividades mineras no metálicas en el núcleo del salar en el año 1986, es por esto por lo que se tienen gran cantidad de datos y registros históricos de ensayos hidráulicos de los cuales se destacan Ensayos Lefranc, Ensayos Packer, Pruebas de Bombeo y Punteras PB.

La base para la asignación de los parámetros hidráulicos ha sido realizada producto de archivos de textos los cuales contenían información de las celdas implementadas en el modelo numérico de la REF4. Es con esta información que inicialmente se generan mediante sistema de información capas ráster con la distribución de las conductividades, rendimiento específico y coeficiente de almacenamiento.

No obstante, el presente modelo considera diferencias importantes con respecto al modelo incluido en la REF 4 por parte de discretización espacial uniforme y coeficientes de evaporación lineales. Es por estos que para efectos del presente trabajo se considera calibrar los parámetros hidráulicos según zonas homogéneas clasificadas en base al ráster base de parámetros para las tres capas del modelo.

A continuación, se demuestran figuras que representan las capas ráster base de los parámetros hidráulicos a considerar en el desarrollo del modelo.

5.6.1 Conductividades Hidráulicas

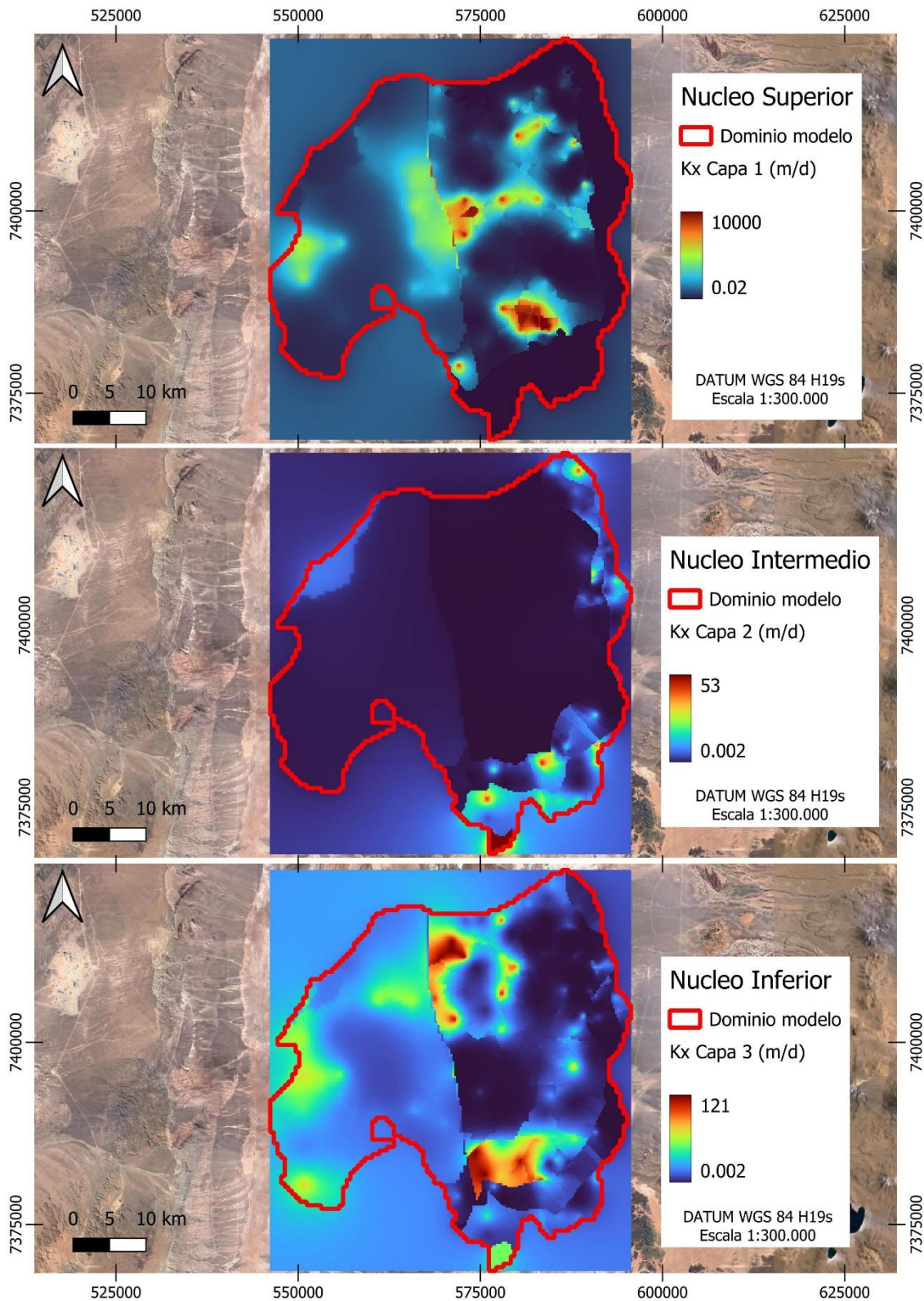


Figura 29 Conductividad hidráulica base, Fuente: Elaboración Propia en base a REF4.

5.6.2 Rendimiento Específico (S_y)

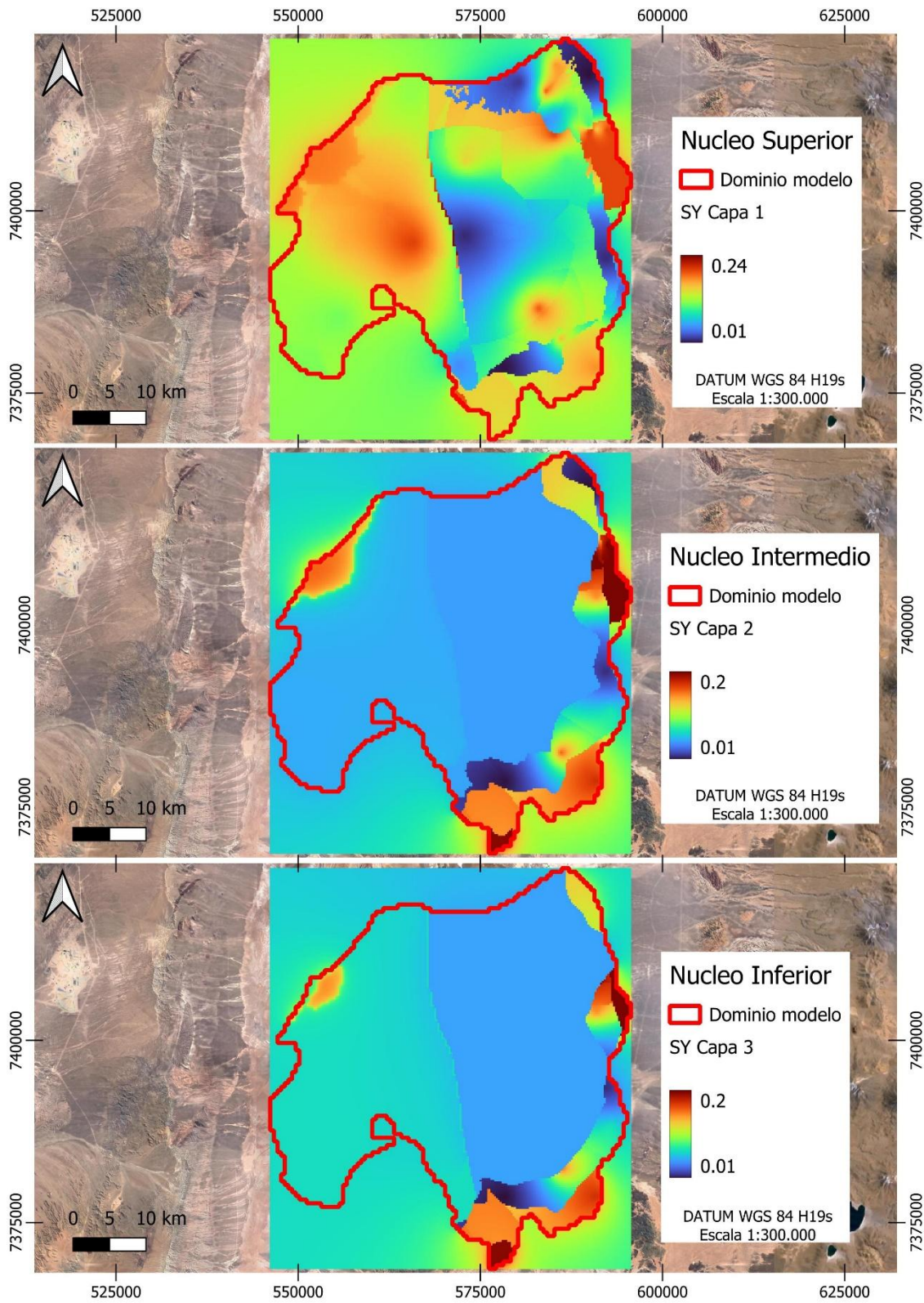


Figura 30 Rendimiento específico base, Fuente: Elaboración Propia en base a REF4.

5.6.3 Coeficiente De Almacenamiento (Ss)

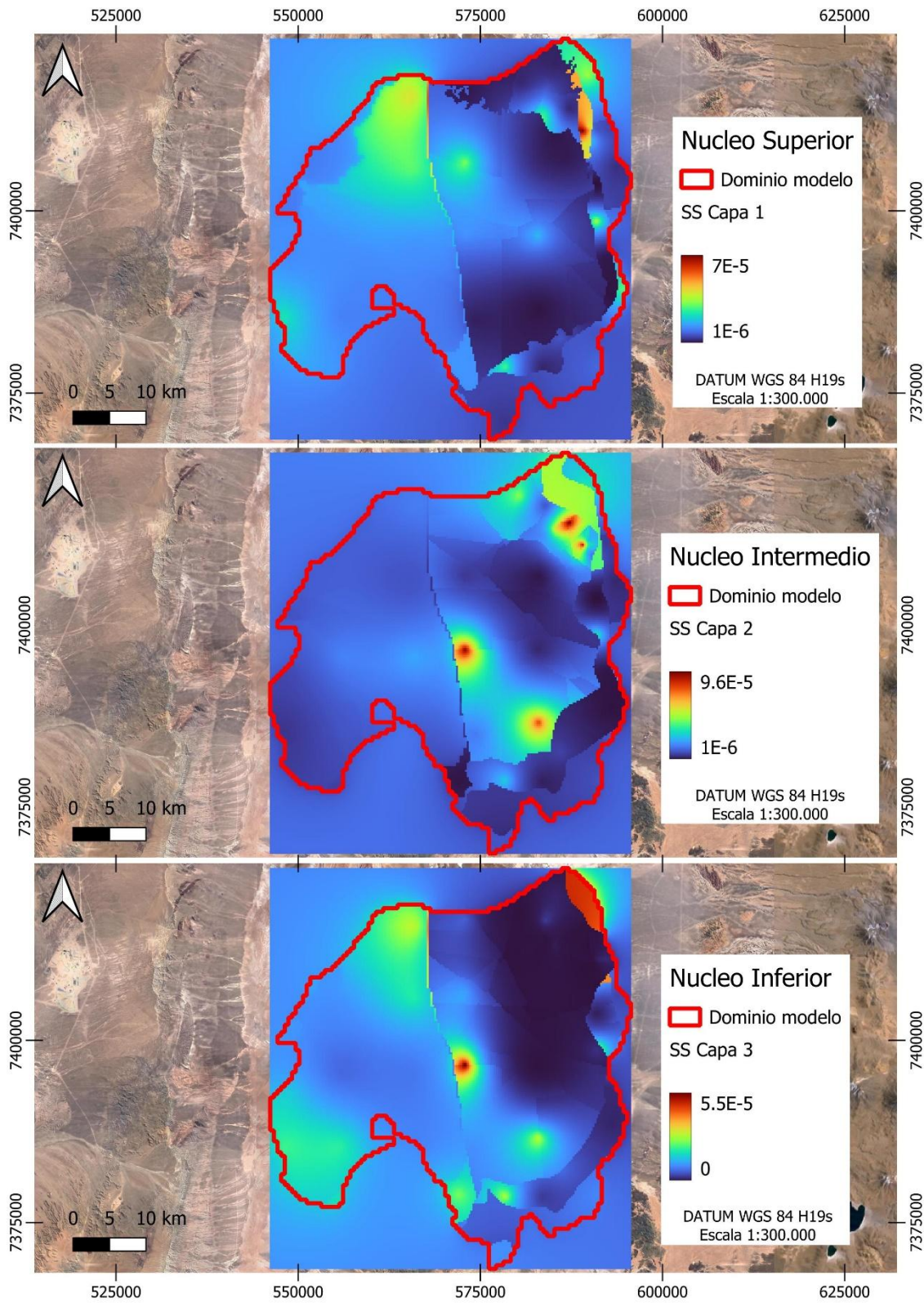


Figura 31 Coeficiente de almacenamiento base Fuente: Elaboración Propia en base a REF4.

5.7 Condiciones De Borde

Las condiciones de contorno reflejan los flujos que entran y/o salen del modelo debido a factores externos al propio comportamiento hidráulico, como la recarga, las extracciones de bombeo, y las interacciones entre ríos-acuífero y lago-acuífero (Harbaugh, 2005). Estos factores se integran en el modelo a través de los paquetes específicos de MODFLOW 6, que informan al modelo matemático sobre la interacción entre el sistema analizado y su entorno. En un modelo de flujo, existen tres tipos de condiciones de contorno:

- Condición de Dirichlet: La altura es prescrita y conocida en el tiempo. El flujo en estas celdas se simula para mantener esa altura constante. En este modelo, no se presenta ninguna condición de este tipo.
- Condición de Neumann: Se prescribe el flujo o el gradiente de la altura, por lo que las alturas varían en función de este. Esta condición permite representar en el modelo acciones como bordes impermeables, recarga por precipitación o retornos de riego, y efectos de los bombeos.
- Condición de Cauchy: Es una condición de borde donde el flujo depende del nivel piezométrico, variando en respuesta a los cambios de altura en la celda del límite. Es una combinación de las condiciones de Dirichlet y Neumann.

Las condiciones de contorno definidas en el sistema de Núcleo del Salar de Atacama consideran la recarga directa, recarga lateral subterránea, evaporación, las extracciones de agua y reinyecciones.

5.7.1 Paquete Recarga (RCH)

La recarga es el flujo neto de agua que atraviesa la zona no saturada y llega al acuífero produciendo variaciones en el nivel freático.

El paquete RCH de MODFLOW permite introducir la recarga producida por la infiltración de precipitación y/o por reinyección de flujo en unidades de m/d. Ambas condiciones son entradas de flujo que se distribuyen constantemente en las celdas que intersecan con las áreas de recarga expuestas en la Sección 3.3 y 3.7. En MODFLOW 6, estas tasas son multiplicadas por el área horizontal de las celdas asignadas para calcular el flujo volumétrico de entrada al sistema.

5.7.2 Paquete Pozos (WELL)

El paquete WELL de MODFLOW 6 permite incluir en el modelo tanto extracciones como inyecciones de flujo, por lo cual es óptimo para incluir las recargas laterales en el sistema las cuales se orientan desde la capa Núcleo Superior, pasando por Núcleo intermedio y terminando en el Núcleo Profundo.

Respecto a las extracciones de flujo subsuperficial en el dominio, estas fueron consideradas según la capa en la que se encuentra cada pozo de extracción, los cuales se orientan solo en la Capa 1 Núcleo Superior y la Capa 4 Núcleo Profundo. Para conocer mayores antecedentes de dicha información se recomienda consultar el Anexo 1 - Coordenadas Pozos De Extracción Y Reinyección y Anexo 2 – Registros de Caudales en Pozos De Extracción Y Reinyección

Respecto a reinyecciones, estas solo se orientan en torno a la Capa 1 Núcleo Superior, debido a que se encuentran solo en dicha capa.

Finalmente es relevante mencionar que para efectos de extracciones se consideran los valores en signo negativo y para aportaciones como Recarga Lateral y Reinyecciones con signo positivo. Junto a ello, para no generar errores en la posibilidad de encontrarse geometrías en dos o más celdas, se opta por considerar el paquete WELL según la opción *Total per layer* o total por capa.

5.7.3 Paquete Evapotranspiración (ETS)

Para el paquete evapotranspiración o ETS de MODFLOW 6, si bien este paquete considera la evapotranspiración en el sistema, para efectos del área de estudio al no encontrarse en una zona con presencia de vegetación este valor fue determinado como evaporación.

Según lo planteado en la sección 3.5, la profundidad de extinción se definió en torno a los 2 metros de profundidad, siendo el *Model Top* o superficie del dominio en donde se aplican la tasa de evaporación.

5.8 Puntos De Observación

Respecto a los puntos de observaciones existen ochenta y dos (82) puntos de observación históricos en el dominio, los cuales van desde octubre del año 1994 hasta diciembre de 2022 y se miden de forma manual. Por lo cual se consideran la totalidad de estos puntos de observación con el fin de calibrar el modelo, para más información de la coordenadas y ubicación de dichos puntos de observación se adjuntan en el Anexo 3 – Coordenadas Puntos de Observación y Anexo 4 – Registro de Puntos de Observación.

Para comprender espacialmente la ubicación de los puntos de observación, a continuación, se demuestra una figura con los 82 puntos de observación. Dichos puntos de observación abarcan de manera uniforme gran parte del dominio del modelo.

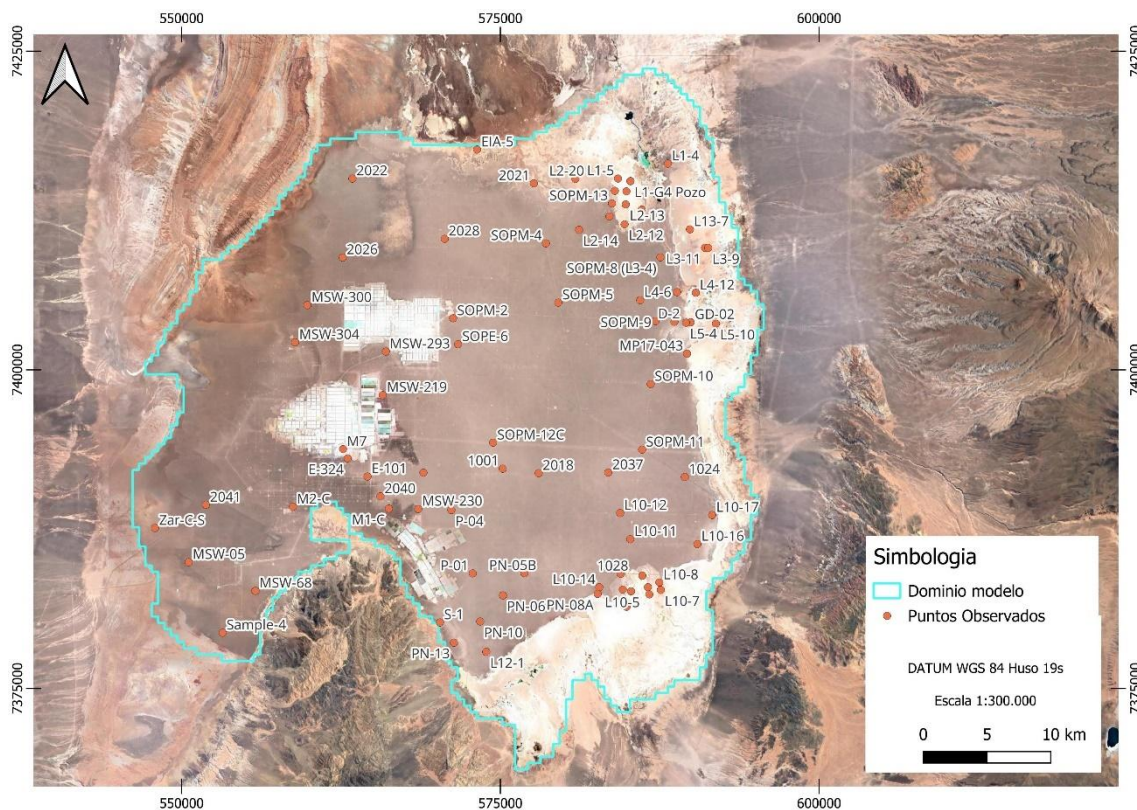


Figura 32 Puntos de observación. Fuente: Elaboración Propia en base a SQM y Albemarle.

5.9 Solver

Para la solución del problema matemático en el cálculo de las ecuaciones diferenciales del código MODFLOW 6 se implementa de manera iterativa según el paquete *Iterative Model Solution (IMS)* del propio código, y la opción de la formulación de Newton-Raphson; esto para la resolución de problemas de secado y humectación de celdas.

6 CALIBRACIÓN

6.1 Parametrización

El modelo numérico implementado de la masa de agua presente en el núcleo del Salar de Atacama requiere de calibrar los parámetros de conductividad hidráulica, el coeficiente de almacenamiento y el rendimiento específico para cada capa considerada. Para efectos de enlazar lo planteado en el capítulo 3.1 respecto a las unidades hidrogeológicas y las capas del propio modelo como se mencionó anteriormente, se establecen los parámetros por zonas en cada capa del modelo.

Luego de testear e iterar distintas magnitudes de parámetros se opta por utilizar el coeficiente de almacenamiento y rendimiento específico promedio de la capa ráster base indicado en la sección 5.6 obtenidos desde la REF4, por lo que se genera una sectorización para cada capa de los parámetros. La sectorización fue clasificada siguiendo el orden de la cantidad de celdas en torno a magnitud de los valores según histograma de cada ráster base.

Para el caso de las conductividades hidráulicas, se considera implementar la misma metodología de sectorización de valores para cada celda según su magnitud basado en el histograma de cada ráster base, no obstante, se procede a modificar cada sector según valores medios como inicio hasta alcanzar un ajuste de niveles piezométricos acorde a las series históricas de ochenta y dos (82) puntos de observación desde 1986 hasta 2023.

Es importante destacar que se considera que el acuífero es isotrópico por lo que en el modelo se implementa la conductividad en dirección X igual a la dirección Y, siendo $K_x = K_y$. A su vez, respecto a la conductividad vertical (K_z) se relaciona directamente con la conductividad horizontal, en donde inicialmente se determina en $K_x/10$ pero finalmente se opta por disminuir esta hasta $K_x * 0.07$ tal cual lo considera la REF 4.

A continuación, se demuestran figuras que representan los parámetros hidráulicos utilizados en el presente modelo tanto para estado estacionario, transitorio y de simulación.

6.1.1 Conductividades Hidráulicas Calibradas

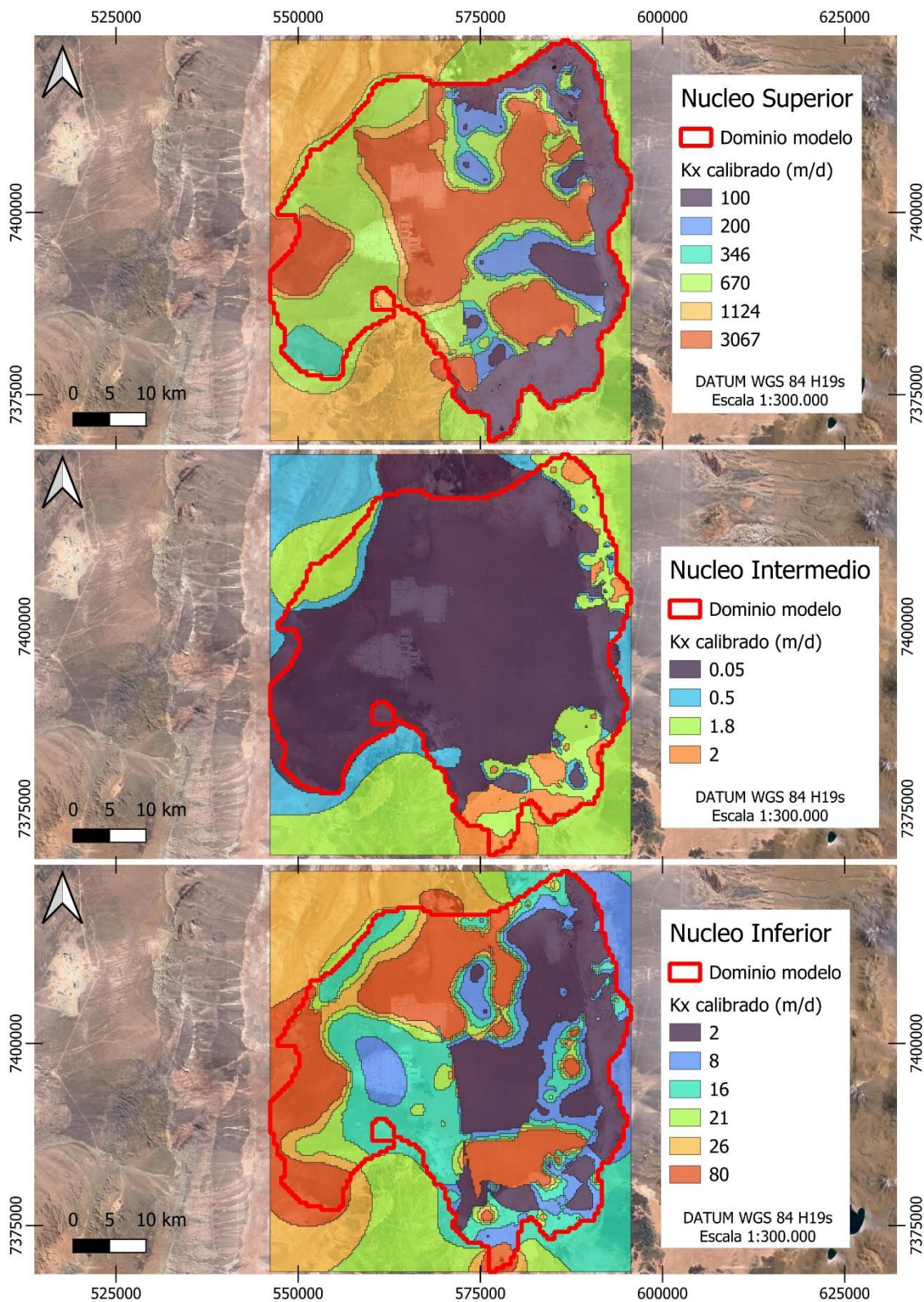


Figura 33 Conductividad hidráulica horizontal calibrada, Fuente: Elaboración Propia.

6.1.2 Rendimiento Específico Calibrado (S_y)

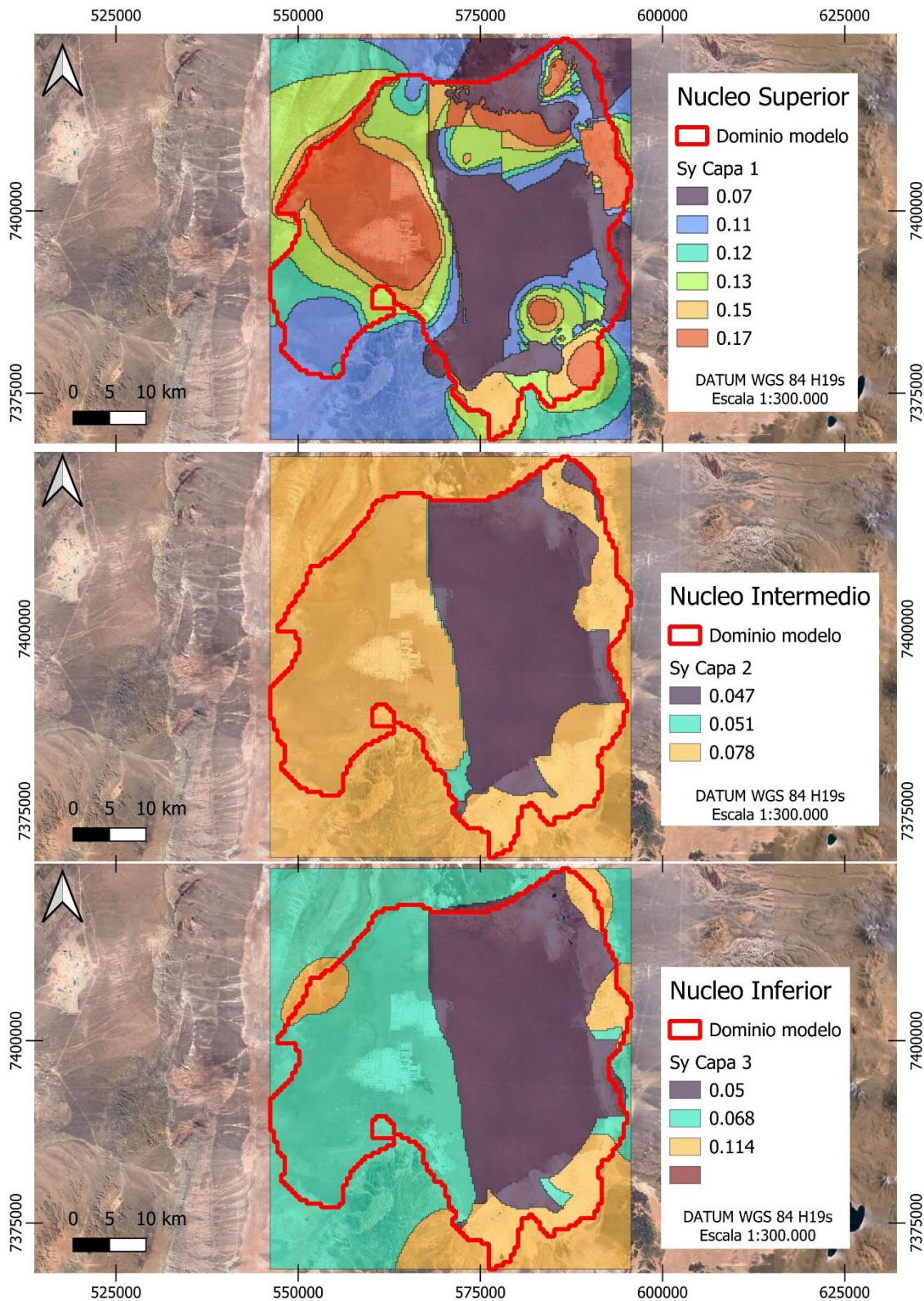


Figura 34 Rendimiento específico calibrado, Fuente: Elaboración Propia.

6.1.3 Coeficiente De Almacenamiento Calibrado (Ss)

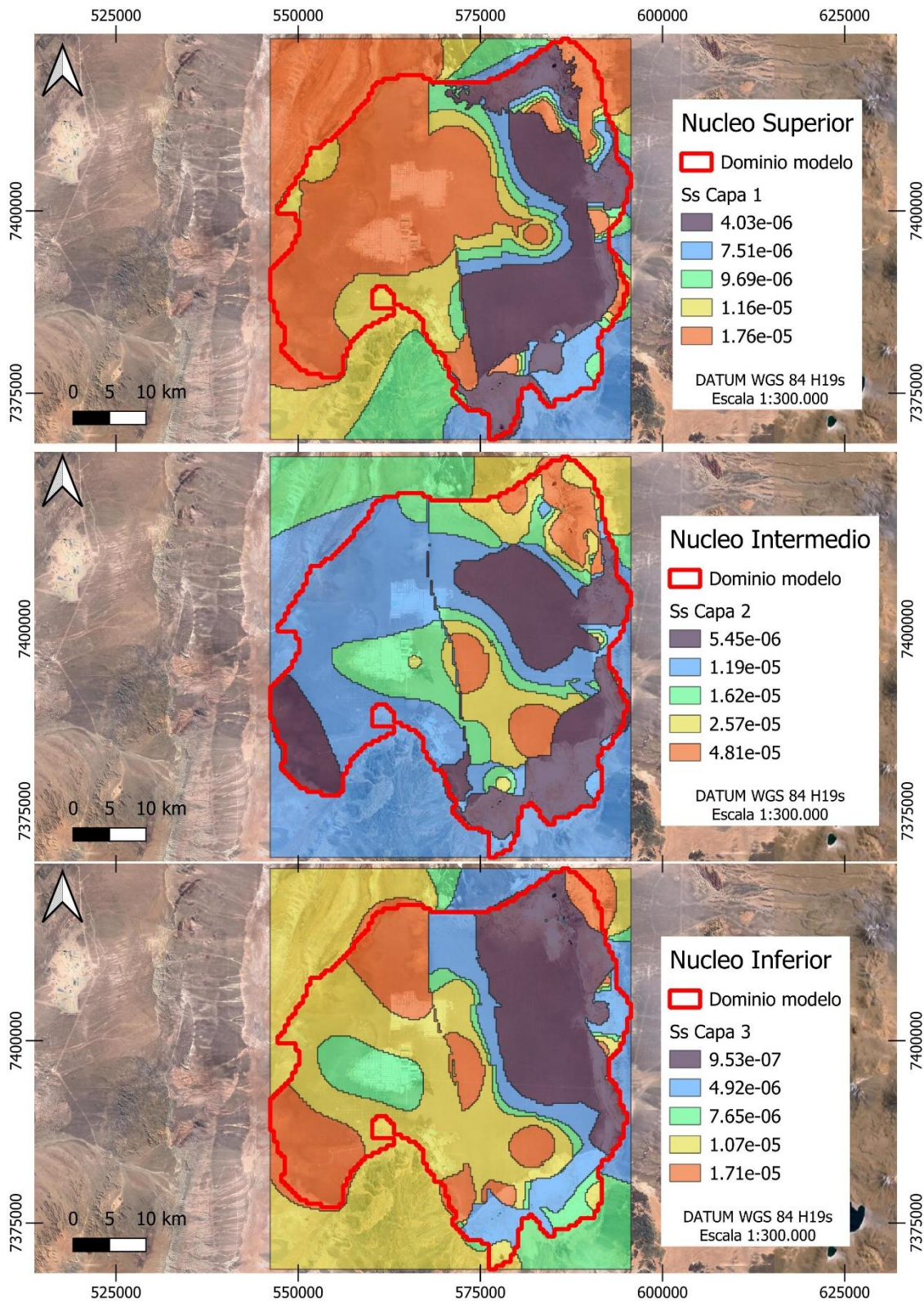


Figura 35 Coeficiente de almacenamiento calibrado Fuente: Elaboración Propia.

6.2 Ajuste De Series Piezométricas

El análisis de la eficacia de ajuste de los valores piezométricos se ha realizado mediante la comparación entre los niveles reales observados desde 1986 hasta el año 2022 y los simulados por el modelo en régimen transitorio posterior al proceso de calibración manual. El proceso de calibración manual ha tenido en cuenta los registros de los 82 puntos introducidos en MODFLOW 6, y se han comparado con la misma ubicación en los archivos de salida del paquete OBS con las piezometrías resultantes a lo largo del periodo de desarrollo de modelo.

Es relevante destacar que el código MODFLOW 6 a diferencia de su par MODFLOW 2005 no permite incluir dentro del propio código la comparación entre puntos de observación y simulación. Por lo tanto, para el presente modelo se implementa el paquete OBS de MODFLOW 6 el cual entrega como resultado las piezometrías resultantes de los puntos de observación simulados en archivo .csv, posterior a ello y mediante un script de Python junto a los paquetes Numpy, Matplotlib y Pandas se permite graficar la comparación entre puntos observados y simulados, calcular el valor residual entre puntos y determinar pruebas de bondad de ajuste del modelo.

A continuación, se demuestra una figura que grafica el valor residual entre la comparación de piezometrías observadas en el eje de las abscisas y piezometrías simulada en el eje de ordenadas para los 82 puntos de observación.

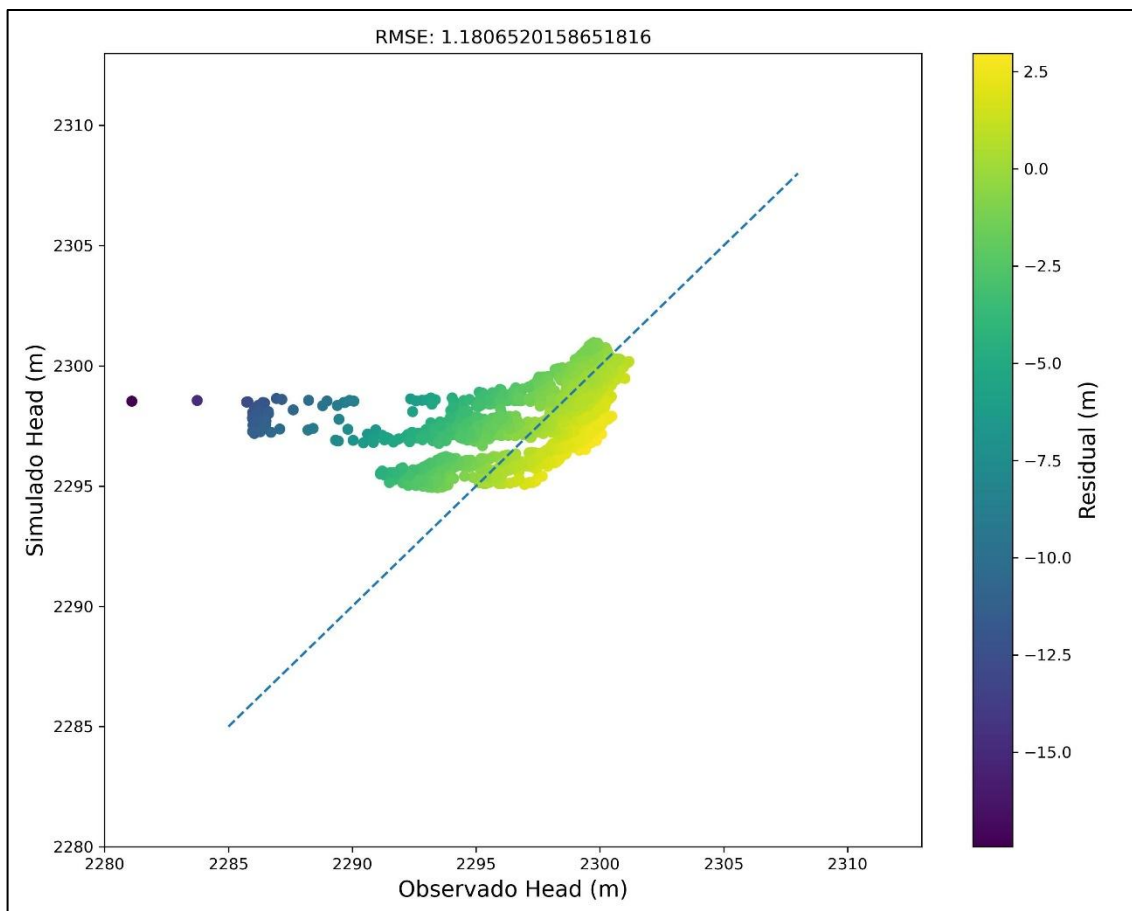


Figura 36 Valor residual para 82 piezometrías de puntos observados v/s simulados.
Fuente: Elaboración Propia.

Del cual se logra visualizar que el residual para los 82 puntos de observación varía entre -17,26 m y 3,15m con un error cuadrático medio raíz cercana a 1.18 m. A continuación, se demuestra una figura que representa los histogramas de la distribución de los valores residuales obtenidos en el análisis.

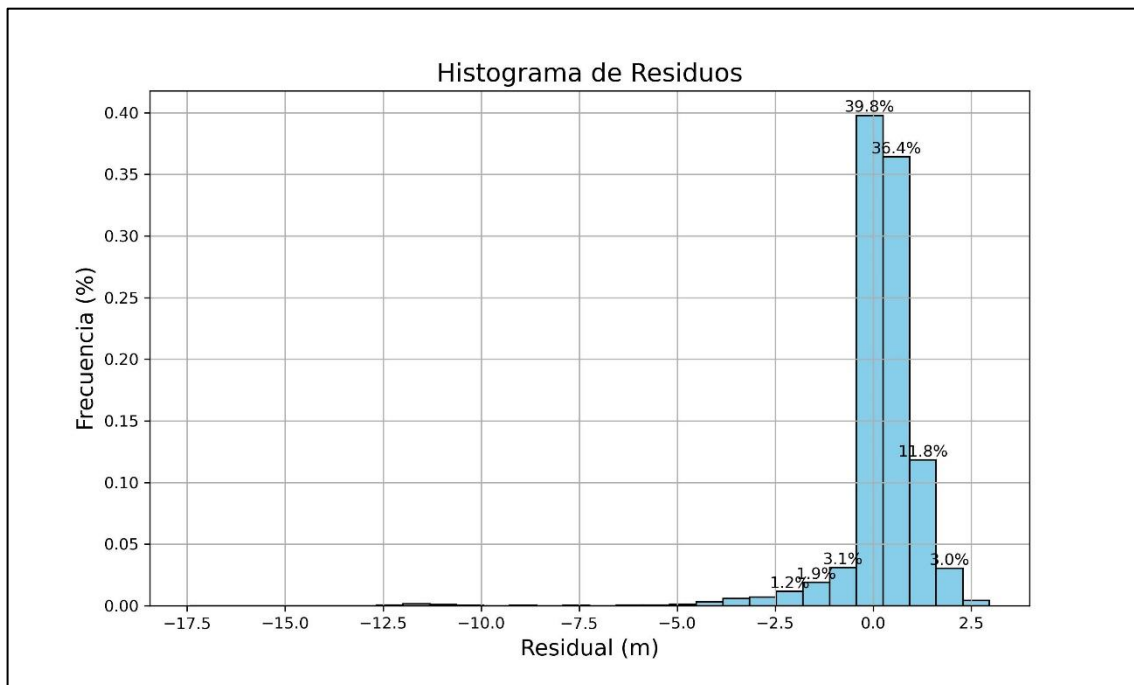


Figura 37 Histogramas de residuos para 82 Puntos observados v/s simulados. Fuente: Elaboración Propia.

Se logra apreciar una distribución de los valores residuales entre magnitudes de -1 y 1 en torno al 90% por lo cual se aprecia que hay ciertos puntos de observación que representan un residuo alto. Por lo cual se procede a verificar todas las gráficas de piezometrías entre puntos observados y simulados además visualizar en que puntos de observación se presentan las mayores diferencias. Se identifican dos puntos de observación con alto residuo, los cuales se identifican como "E-324" y "M7".

A continuación, se representan los gráficos de hidrogramas para los puntos de observación con gran residuo comparando piezometrías observadas y piezometrías simuladas.

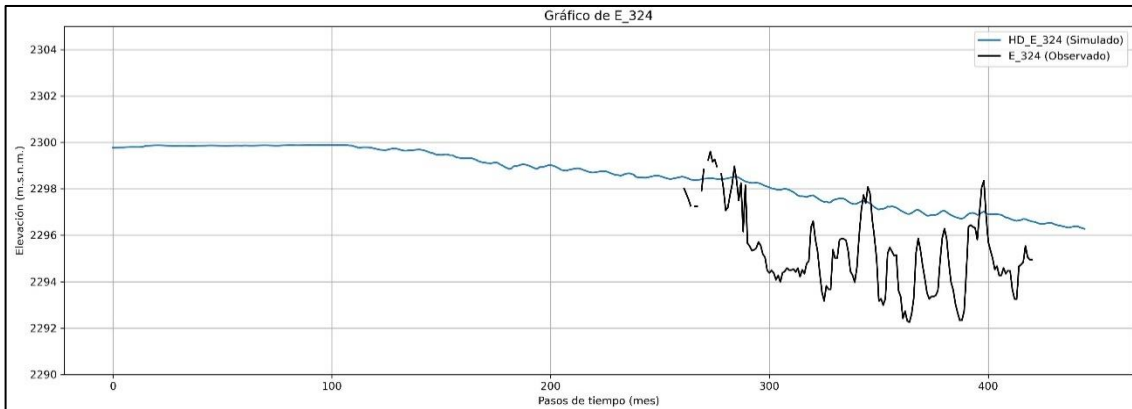


Figura 38 Hidrograma punto E-324 piezometrías observadas v/s simuladas. Fuente: Elaboración Propia en base a MODFLOW y Python.

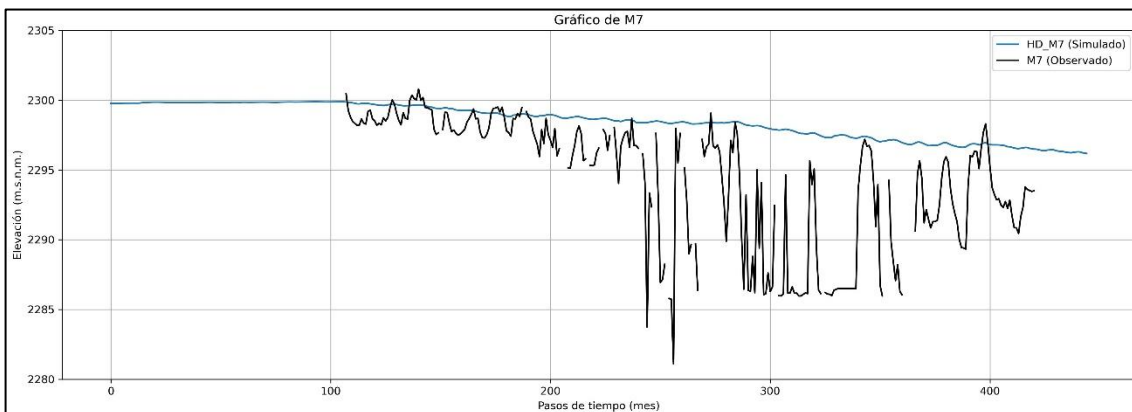


Figura 39 Hidrograma punto M-7 piezometrías observadas v/s simuladas. Fuente: Elaboración Propia en base a MODFLOW y Python.

Se logra apreciar que el ruido en los hidrogramas de los dos puntos de observación hace referencia a su cercanía con pozos de extracción de los proyectos que se encuentran dentro del dominio del modelo, por lo que dicha diferencia en piezometrías se debe a periodos de extracciones orientadas a pozos cercanos a estos puntos de observación. También es correcto generar la hipótesis de errores humanos o de instrumentos en las mediciones, ya que estas son ejecutadas de forma manual a lo largo del tiempo.

Finalmente, y con el finde conocer como es el comportamiento del modelo en estado estacionario en comparación a los puntos observados sin los dos puntos citados anteriormente, a continuación, se representan dos figuras que indican los valores residuales de los puntos de observación y simulación junto al histograma resultante.

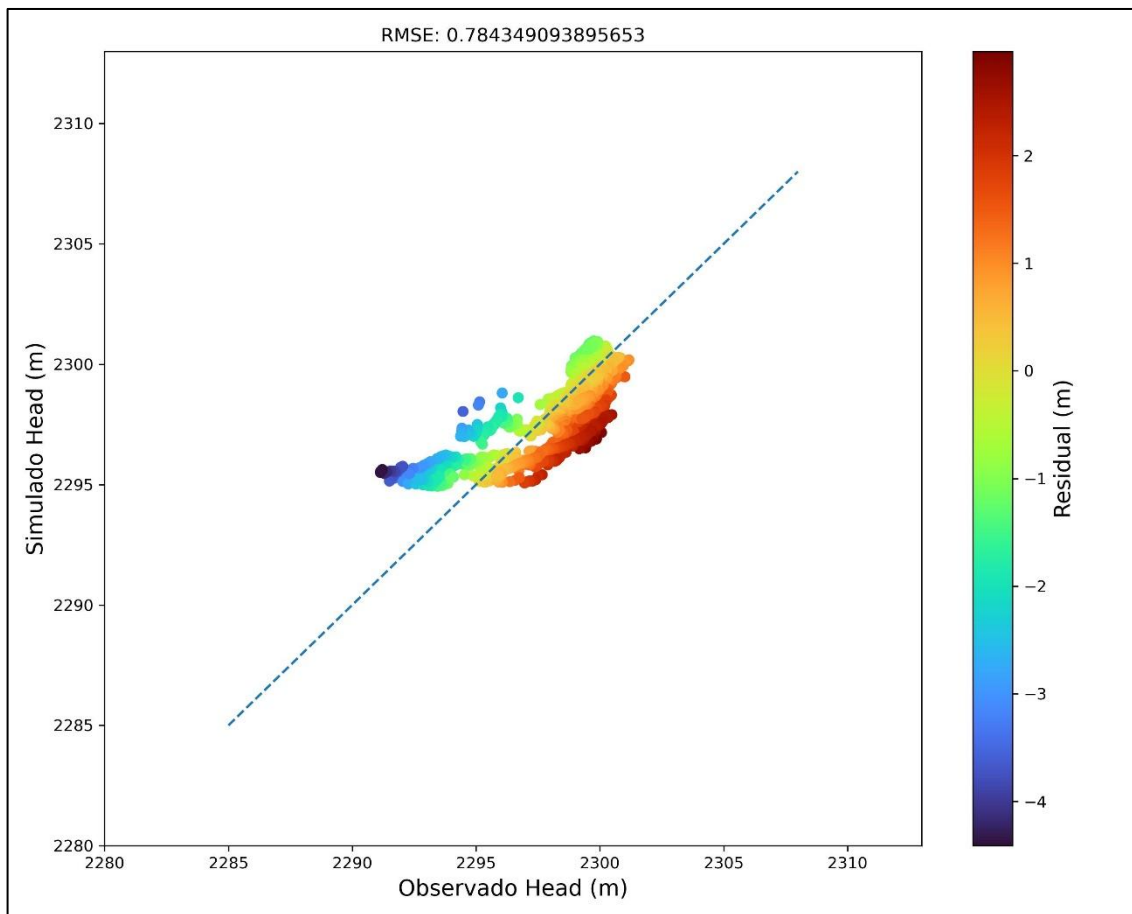


Figura 40 Valor residual para 80 piezometrías de puntos observados v/s simulados.
Fuente: Elaboración Propia.

En el gráfico mostrado el cual compara las piezometrías de puntos observados y puntos simulados, se logra identificar una acumulación de los datos entre las elevaciones 2295 y 2303 m.s.n.m., y es que se entiende que, al ser un acuífero situado en una planicie con elevaciones mayormente homogénea, las alturas piezométricas tienden a variar bajo los mismos rangos de elevaciones.

Además, se logra apreciar que, al quitar los dos puntos de observación "E-324" y "M7", de la comparativa de piezometrías puntos observados y puntos simulados se obtienen valores residuales entre -4 y 2 m, con un error cuadrático medio raíz del orden de 0.78 m, por consiguiente, a continuación, se demuestra la gráfica de los histogramas para las distribuciones de los valores residuales obtenidos.

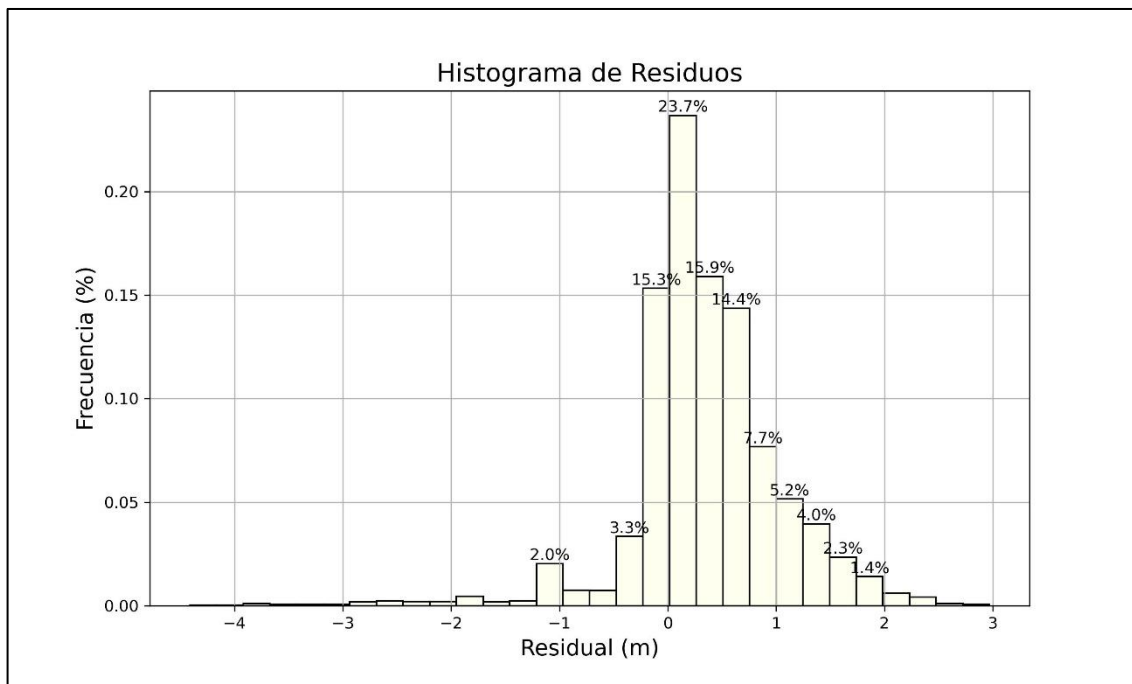


Figura 41 Histogramas de residuos para 80 Puntos observados v/s simulados. Fuente: Elaboración Propia.

Del gráfico anterior se logra apreciar la misma distribución de los datos entre valores de -1 y 1m para los valores residuales con una frecuencia que se asimila a la de considerar los 82 puntos de observación, no obstante, ya no se presentan datos residuales superiores a los -4 y 3 m.

Finalmente, y como conclusión a la sección de ajuste de series piezométricas se incluyen a continuación los siguientes resultados de hidrogramas para 4 de los 82 puntos observados, el resto de los resultados pueden ser estudiados en el Anexo 5 – Resultados Puntos Observados de Piezometrías Modelo Estacionario Calibración. Estos puntos de observación fueron orientados en cinco zonas del modelo para el estado transitorio, donde se puede ver en la Figura 32-

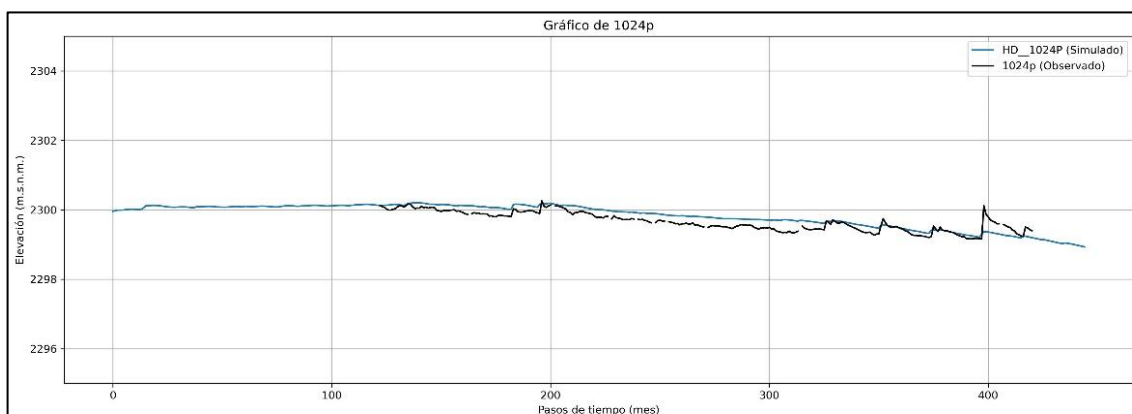


Figura 42 Hidrograma punto 1024P piezometrías observadas v/s simuladas. Fuente: Elaboración Propia en base a MODFLOW y Python.

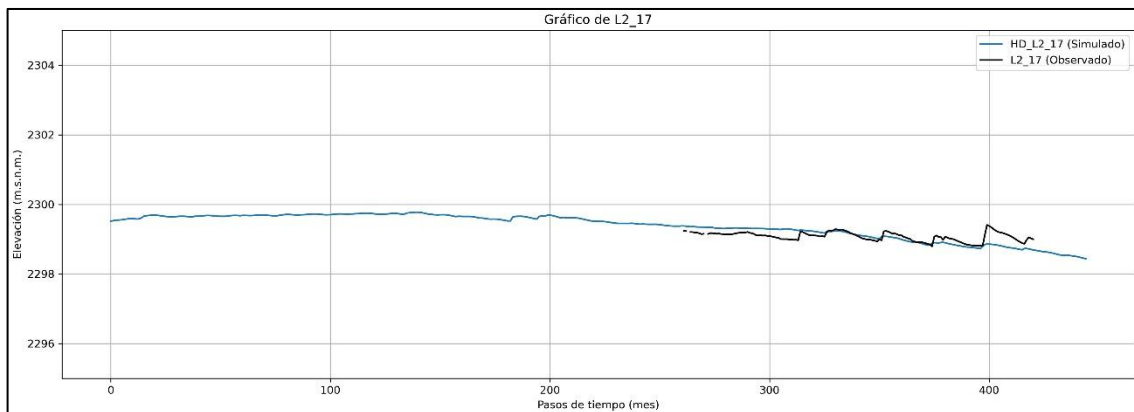


Figura 43 Hidrograma punto L2-17 piezometrías observadas v/s simuladas. Fuente: Elaboración Propia en base a MODFLOW y Python.

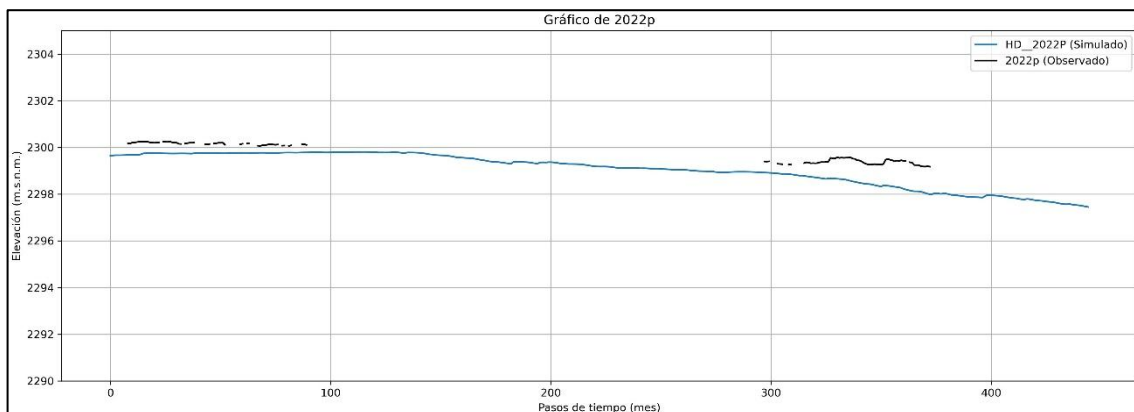


Figura 44 Hidrograma punto 2022P piezometrías observadas v/s simuladas. Fuente: Elaboración Propia en base a MODFLOW y Python.

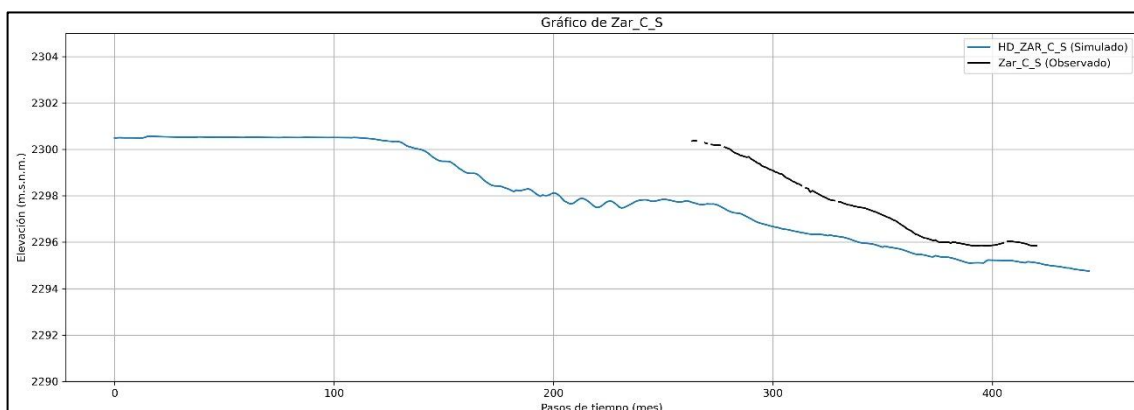


Figura 45 Hidrograma punto Zar-C-S piezometrías observadas v/s simuladas. Fuente: Elaboración Propia en base a MODFLOW y Python.

De los resultados obtenidos y mostrado en las últimas cuatro figuras acerca de los puntos de observación se logra desprender que el modelo numérico hidrogeológico se logra ajustar en gran parte tanto a las piezometrías observadas como a la forma de comportamiento que ocurre entre los años 1986 y el año 2022.

A modo de verificar las diferencias entre considerar los 82 puntos observados y los 80 puntos sin considerar los puntos "E-324" y "M7", a continuación, se presentan tres

indicadores estadísticos de pruebas de bondad y ajuste que confirman la calidad de los resultados del modelo:

- **Raíz del error cuadrático medio (RMSE):** Este índice estima la desviación de los valores simulados en comparación con los observados. Un valor de 0 indica un ajuste perfecto, ya que no puede ser negativo. Un RMSE más bajo indica un mejor ajuste a los valores observados.
- **Raíz del error cuadrático medio normalizado (NRMSE):** Es el RMSE normalizado.
- **Eficiencia de Nash-Sutcliffe:** Es uno de los estadísticos más utilizados; un valor de 1 indica una simulación perfecta.

En la tabla siguiente se detallan los indicadores de eficiencia del modelo, las fórmulas, valores de referencia y los resultados obtenidos de la calibración del modelo siendo el análisis para los 82 puntos observados lo que indica "P82", y el análisis para los 80 puntos observados la columna que indica "P80".

Tabla 6 Pruebas de bondad de ajuste del modelo

| INDICADOR DE AJUSTE | FORMULACIÓN | VALORES DE REFERENCIA | | RESULTADOS | |
|--------------------------------|---|--|---|------------|-------|
| | | | | P82 | P80 |
| RMSE | $RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_{sim,i} - h_{obs,i})^2}{n}}$ | Perfecto | 0 | 1.18 | 0.78 |
| NRMSE | $NRMS = 100 \times \frac{1}{h_{obs}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_{sim,i} - h_{obs,i})^2}{n}}$ | Excelente Bueno Aceptable Pobre | < 10% 10 - 20% 20 - 30% > 30% | 5.88% | 7.81% |
| Coficiente de Nash – Sutcliffe | $NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (h_{sim,i} - h_{obs,i})^2}{\sum_{i=1}^n (h_{obs,i} - \bar{h}_{obs})^2}$ | Excelente Muy Bueno Bueno Satisfactorio Insuficiente | > 0.8 0.6 – 0.8 0.4 – 0.6 0.2 – 0.4 < 0.2 | 0.38 | 0.45 |

Pese a la diferencia entre considerar 82 u 80 puntos observados respectivamente, los resultados del análisis de bondad de ajuste en el modelo permiten confirmar que los indicadores para las dos situaciones permiten dar validez a la calibración del modelo.

Es relevante destacar que la calibración de los resultados simulados es producto de una calibración de tipo manual en la cual se varía las conductividades hidráulicas por zonas bajo distintas iteraciones, para el estado transitorio del modelo, hasta alcanzar los ajustes óptimos de resultados en base a los indicadores mostrados en la Tabla 6.

6.3 Balance Hídrico En Régimen Estacionario

El modelo en régimen estacionario busca representar una situación del sistema sin influencias humanas, es decir, sin extracciones ni reinyecciones causadas por actividades antrópicas. En este estado, las entradas y salidas son equivalentes, por lo que no hay variaciones en el almacenamiento del sistema. Este modelo se ha construido basado en las hipótesis descritas en la sección 3 Modelo Conceptual, donde se indicaba que las entradas corresponden a la recarga por infiltración de lluvia, recarga por flujo lateral y las salidas por evaporación en la superficie del núcleo de Salar de Atacama.

Se desprende a continuación la cantidad de volumen de entrada y salida para el dominio del modelo en estado estacionario.

Tabla 7 Balance hídrico régimen estacionario. Fuente: Elaboración propia.

| | | |
|-------------------------|--------|--------|
| ENTRADAS TOTALES | m3 | hm3 |
| RECARGA LATERAL | 100981 | 0.101 |
| RECARGA DIRECTA | 24372 | 0.024 |
| SUMA DE ENTRADAS | 125352 | 0.125 |
| | | |
| SALIDAS | m3 | hm3 |
| EVAPORACIÓN | 125157 | 0.125 |
| | | |
| DISCREPANCIA EN VOLUMEN | 195 | 0.0002 |
| DISCREPANCIA % | 0.16% | |

Se logra visualizar que, según el balance hídrico para el estado estacionario implementado en el modelo numérico, existe una cantidad determinada de entradas por recarga directa y lateral al sistema que se equilibran con las salidas planteadas por evaporación en la superficie del dominio. Por lo cual se aprecia una discrepancia en volumen de 195 m³ lo que conlleva a un porcentaje de 0,16% producido por una diferencia en dicho porcentaje en las salidas del sistema.

Si bien se intenta llegar a un porcentaje cercano al 0% de discrepancia, para efectos de la calibración de entradas en el estado estacionario, esta se ajustó para la recarga lateral ya que se encuentra mayor incertidumbre según calibración manual.

Respecto a mapas de piezometrías para el estado estacionario, a continuación se representan los resultados para el modelo estacionario siguiendo el orden de las tres capas del modelo, respectivamente desde Núcleo Superior, Núcleo Intermedio y Núcleo Profundo en dirección vertical.

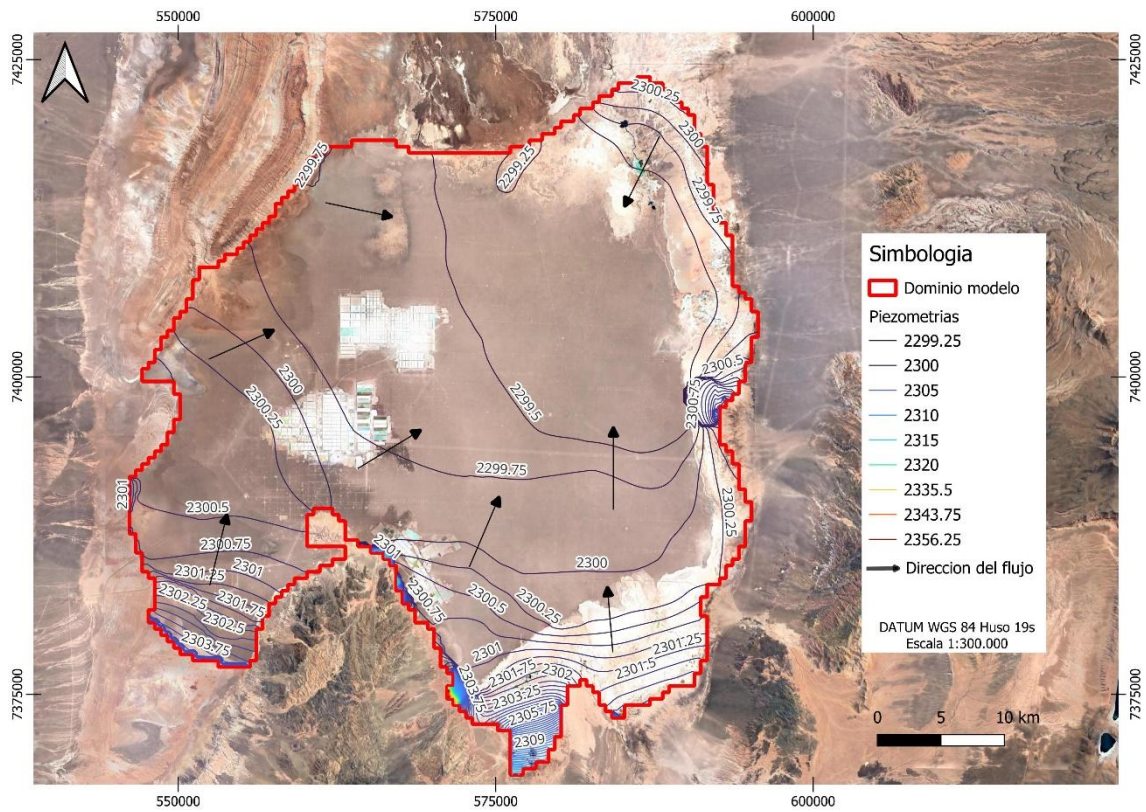


Figura 46 Mapa de Isopiezias en régimen estacionario Núcleo Superior. Fuente: Elaboración propia.

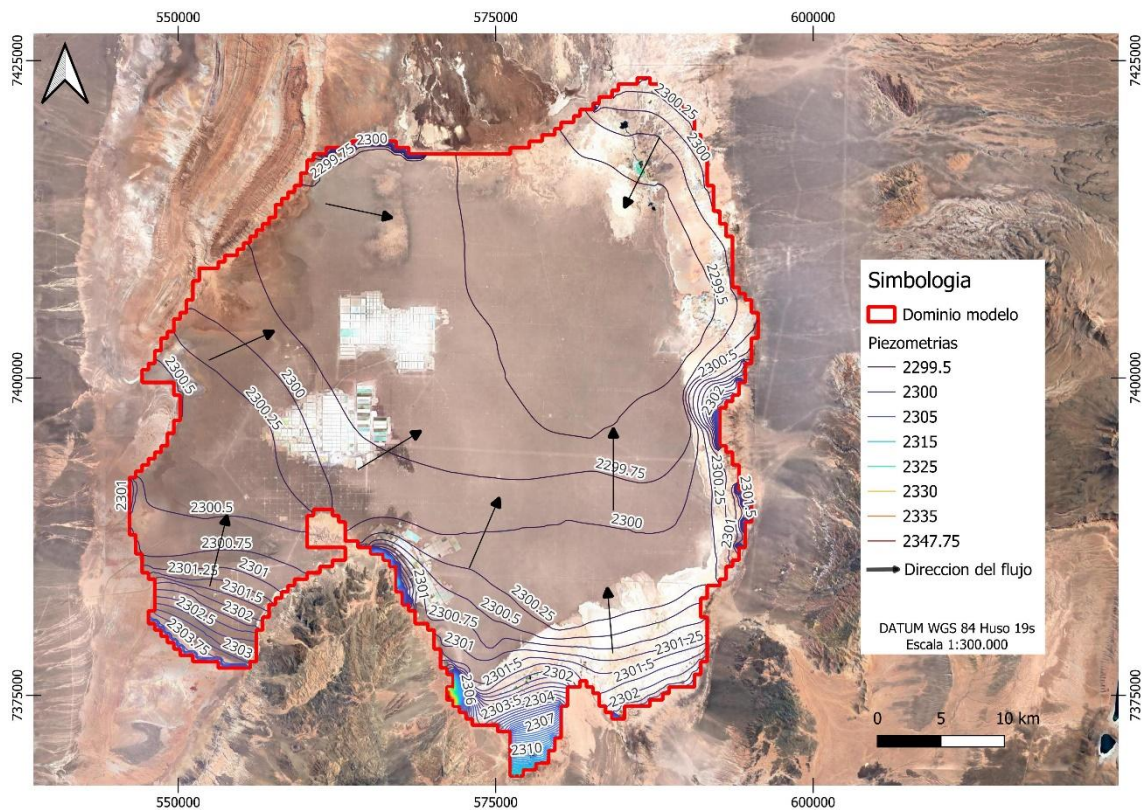


Figura 47 Mapa de Isopiezias en régimen estacionario Núcleo Intermedio. Fuente: Elaboración propia.

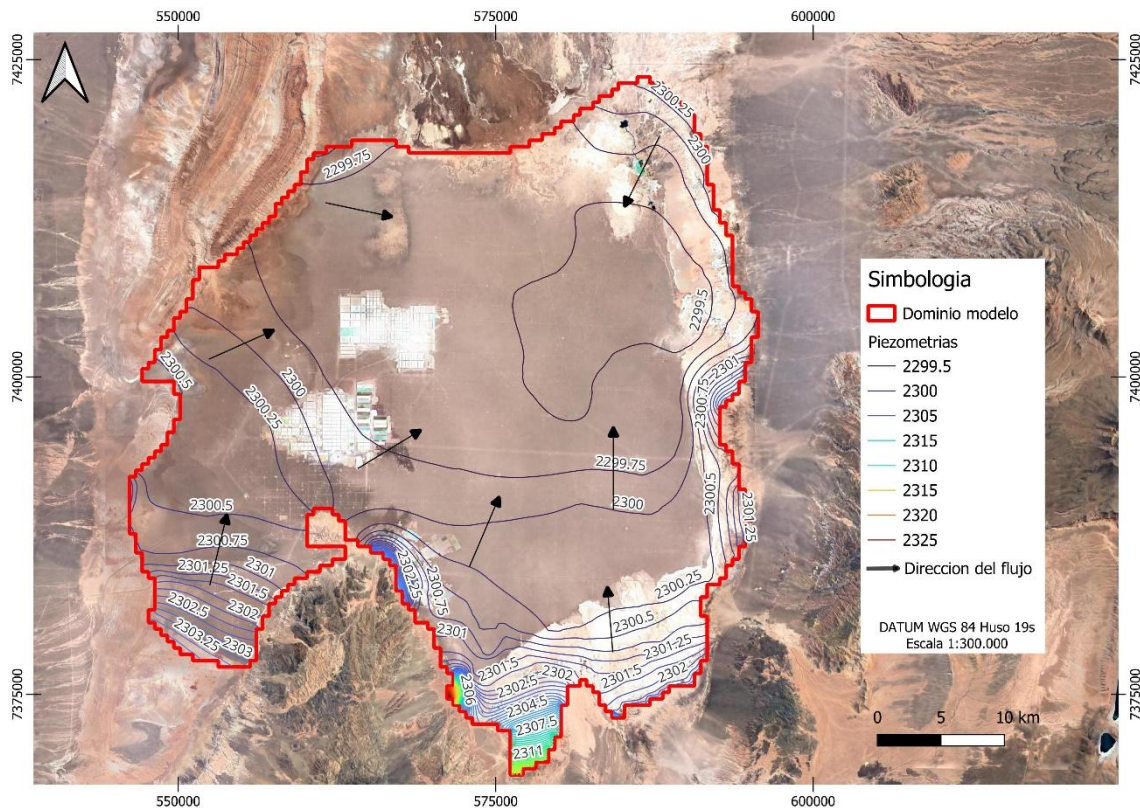


Figura 48 Mapa de Isopiezías en régimen estacionario Núcleo Profundo. Fuente: Elaboración propia.

Se logra apreciar en primer lugar una variación de las piezometrías desde la elevación 2356 hasta 2299.25 m.s.n.m. en sentido desde el borde del dominio o núcleo del salar en dirección al noreste de este.

6.4 Balance Hídrico En Régimen Transitorio

El modelo en régimen transitorio busca representar una situación del sistema con toda actividad de tipo antrópica registrada a nivel histórico, por lo cual se incluyen además de la variación en la recarga y evaporación se considera incluir los hidrogramas de pozos de extracción existentes en el dominio del modelo. Este modelo se ha construido basado en las hipótesis descritas en la sección 3 Modelo Conceptual, donde se indicaba que las entradas corresponden a la recarga por infiltración de lluvia, recarga por flujo lateral, las salidas por evaporación en la superficie del núcleo de Salar de Atacama y por extracciones de dos Proyectos identificados como SQM y Albemarle.

A modo de visualizar y comprender la magnitud del balance para el estado transitorio en estado de calibración, a continuación, se representa un gráfico que considera el balance acumulado a lo largo del periodo del modelo siendo desde enero de 1986 y diciembre del año 2022.

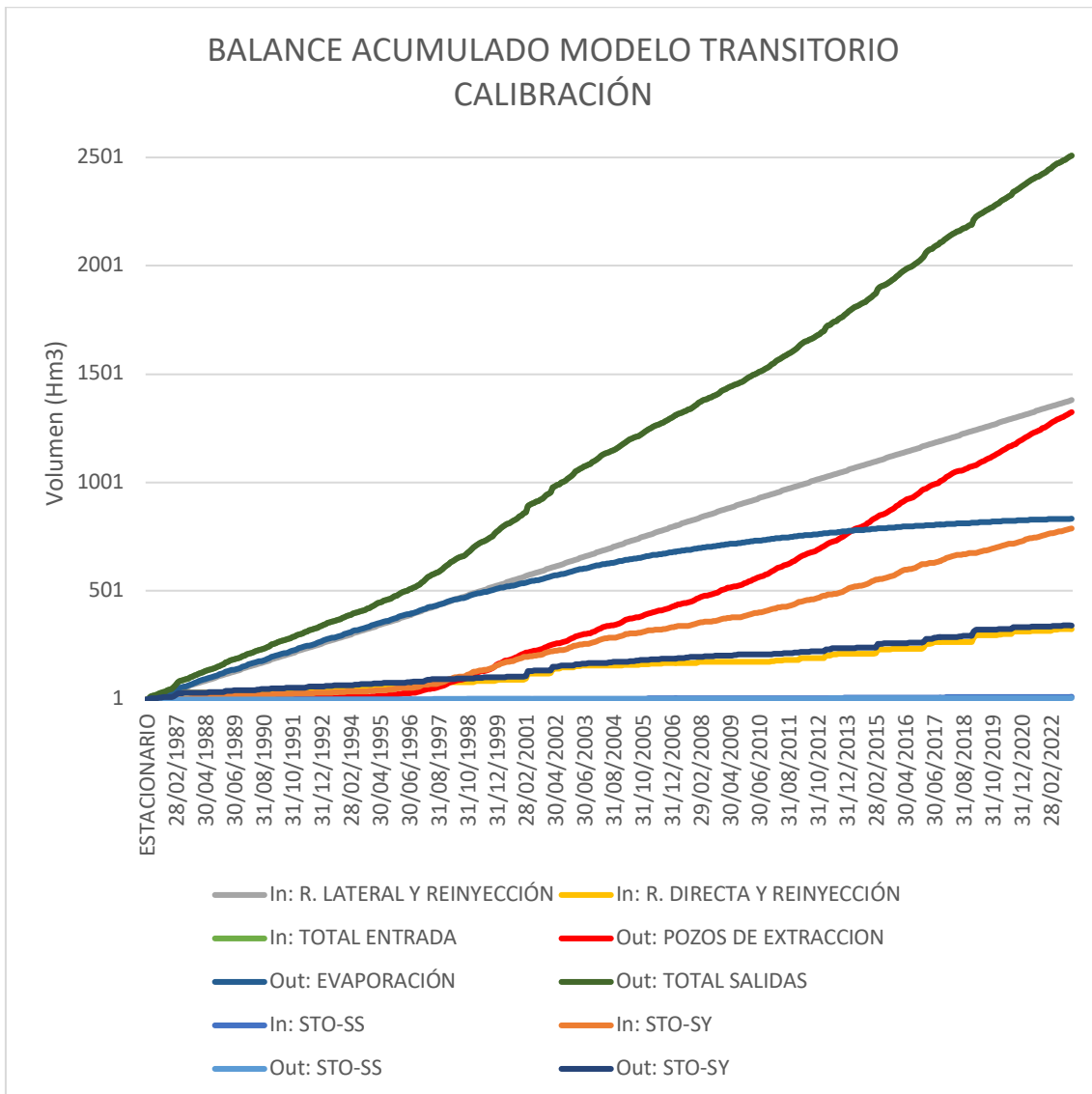


Figura 49 Balance hídrico modelo transitorio calibración. Fuente: Elaboración propia.

Del balance hídrico para el modelo en estado transitorio situación de calibración se aprecia en primer lugar una diferencia en las entradas del modelo, siendo de mayor magnitud las recargas laterales subterráneas en comparación a la recarga directa. A su vez, se aprecia que las salidas del sistema se mantienen linealmente constantes para el caso de la evaporación a diferencia de las salidas por pozos de extracción, las cuales se ven aumentadas por el tiempo desde el año 1997 al 2022.

A modo de visualizar el comportamiento de las piezometrías para el estado transitorio, a continuación, se representa los resultados de los niveles para el final del periodo de calibración, diciembre de 2022. Por lo tanto, se identifican los mapas de piezometrías siguiendo el orden de ubicación en vertical entre Núcleo Superior, Núcleo Intermedio y Núcleo Profundo.

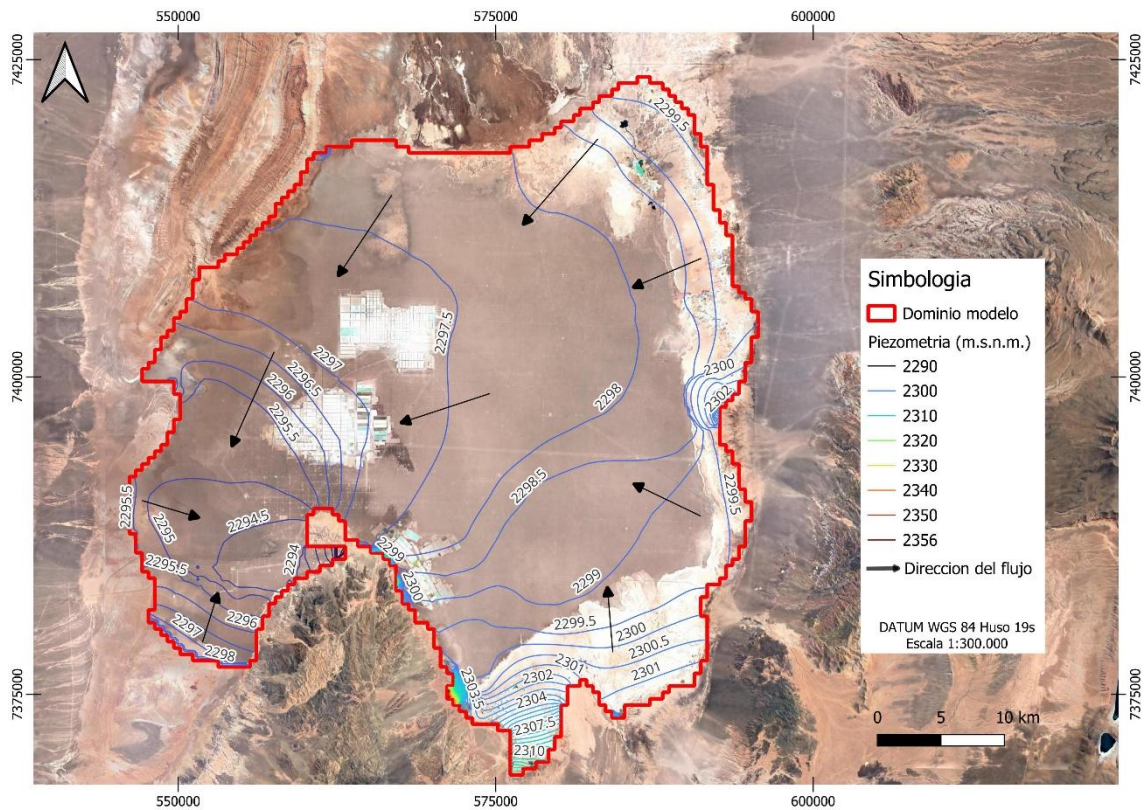


Figura 50 Mapa de Isopiezas en régimen Transitorio Núcleo Superior. Fuente: Elaboración propia.

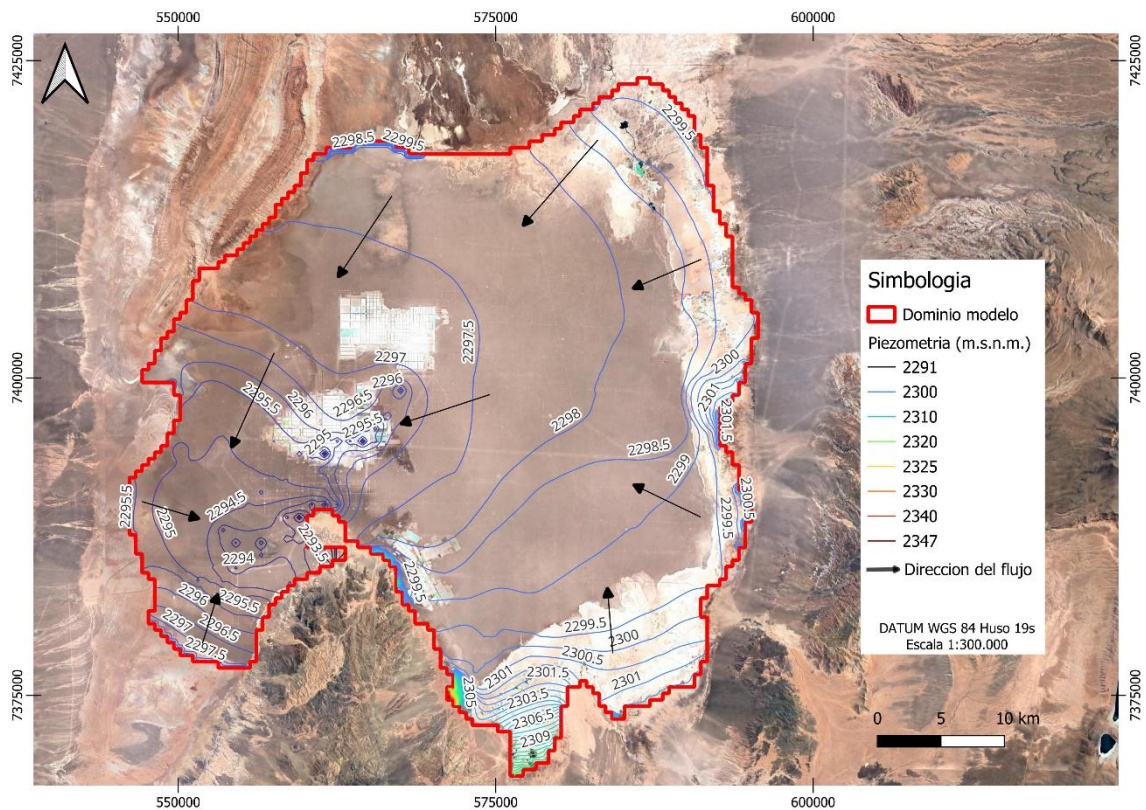


Figura 51 Mapa de Isopiezas en régimen Transitorio Núcleo Intermedio. Fuente: Elaboración propia.

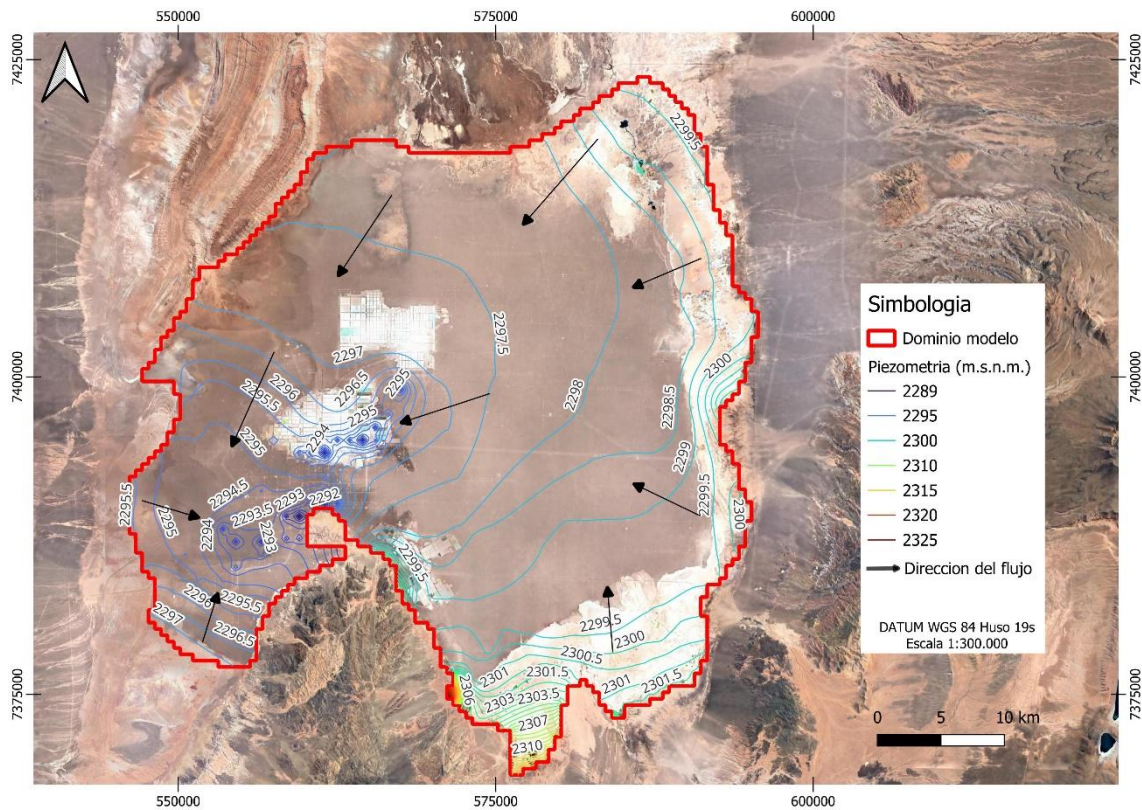


Figura 52 Mapa de Isopiezias en régimen Transitorio Núcleo Profundo. Fuente: Elaboración propia.

Inicialmente se de las figuras mostradas respecto a las piezometrías para el régimen transitorio a fecha de diciembre del año 2022 se logra apreciar un fuerte cambio de dirección del flujo en el sentido suroeste del dominio del modelo. Por lo tanto, hay una fuerte influencia de las actividades de minería no metálica en torno a los pozos de extracción para los dos Proyectos existentes, las cuales permiten cambiar el sentido del flujo en comparación al estado estacionario del modelo.

Es relevante también comentar el cambio en las elevaciones de las piezometrías entre el estado estacionario y el estado transitorio calibración, donde se aprecian una disminución en las alturas piezométricas de la mayor parte del dominio producida por la actividad de extracción en los pozos existentes.

7 SIMULACIÓN

Para el planteamiento del modelo en estado transitorio en simulación se utiliza un periodo de tiempo desde enero de 1986 hasta el año diciembre de 2100, considerando así el periodo de calibración.

A su vez, la proyección del modelo respecto a la simulación en el dominio compromete establecer dentro de las condiciones de borde los efectos del cambio climático ante un escenario RCP 8.5. Por lo cual, se especifica a continuación los cambios en las recargas directa y lateral, evaporación, reinyecciones y extracciones.

Respecto a las extracciones se consideran dos escenarios de simulación, el Escenario 1 considera implementar la simulación del sistema ante una constante extracción de salmuera por los proyectos existentes bajo la cuota actual hasta el año 2100. En el Escenario 2, se considera efectuar un término de las actividades según lo declarado en los Estudio de Impacto Ambiental de los Proyectos para la extracción de salmuera en el núcleo del Salar de Atacama, las cuales para la empresa SQM comprometen términos de bombeos a diciembre de 2030 y para la empresa Albemarle se consideran términos de extracciones para octubre del 2041.

Es importante destacar que respecto a las cuotas de extracción futura para cada punto de bombeo se compromete proyectar una cantidad de extracción sin cambios en su ubicación y cantidad, valido a lo existente hasta el año 2023 y lo que es esperado para los años 2030 y 2041. Por lo cual para el escenario futuro se considera la misma cuota de extracción bajo los mismos puntos de extracción hasta diciembre del año 2100 para el caso del Escenario 1.

7.1 Recarga Directa

En base a datos obtenidos en la REF 4 se demuestra a continuación la proyección de la recarga directa total para el dominio del modelo, la cual se presenta discretizada a nivel medio mensual.

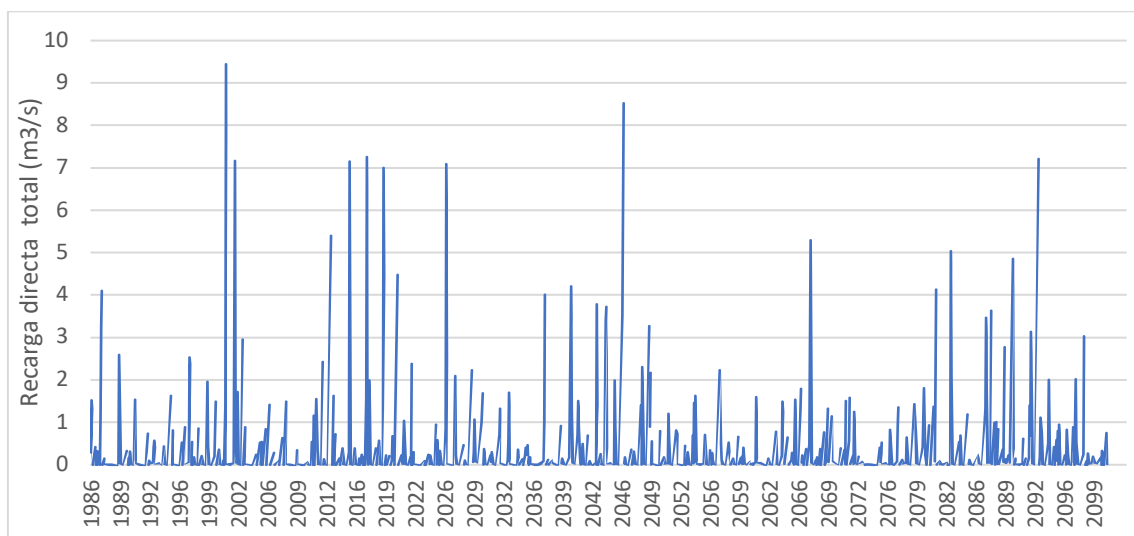


Figura 53 Recarga directa total para simulación en el dominio. Fuente: Elaboración propia.

7.2 Recarga Lateral Subterránea

Se presenta a continuación los escalones proyectados de recarga lateral subterránea proyectados en la simulación del modelo.

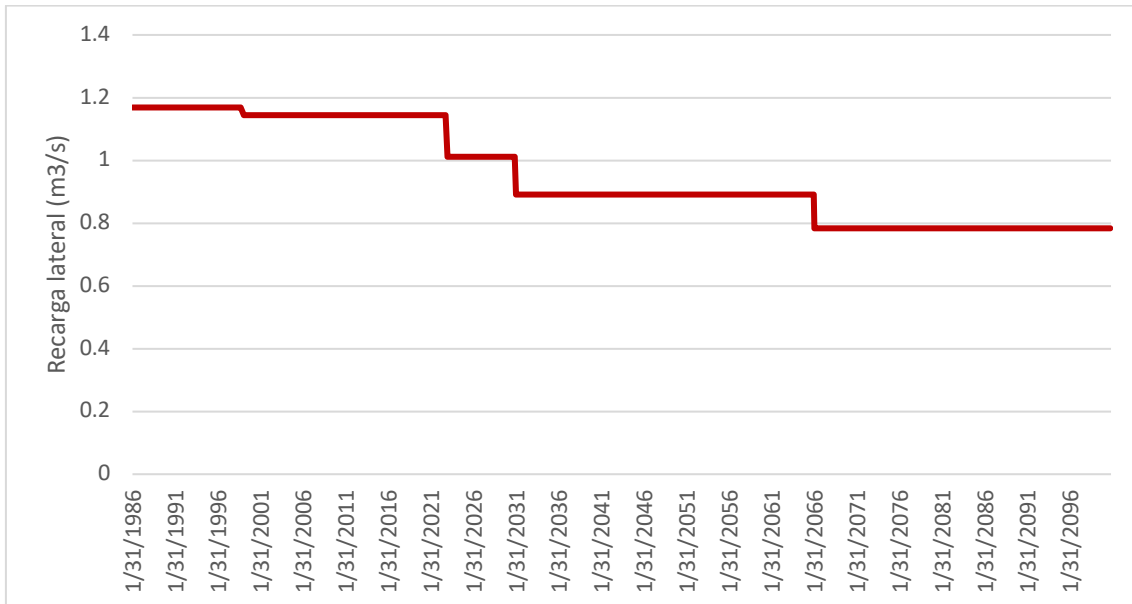


Figura 54 Recarga lateral subterránea para simulación en el dominio. Fuente: Elaboración propia.

7.3 Evaporación

En base a datos obtenidos en la REF 4 se demuestra a continuación la proyección de la Evaporación total para el dominio del modelo, la cual se presenta discretizada a nivel medio mensual.

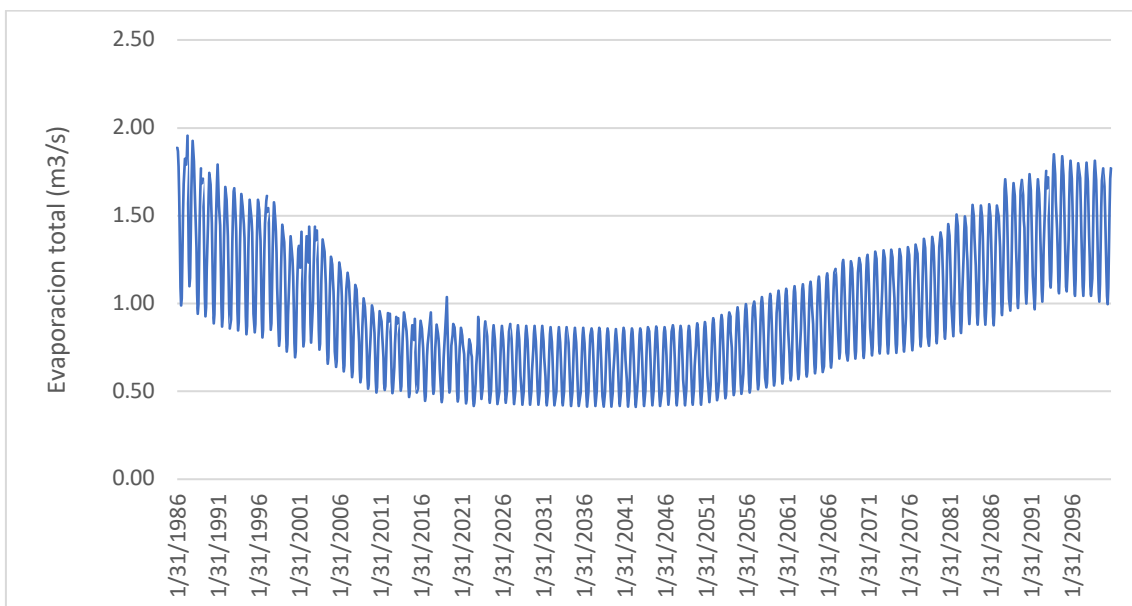


Figura 55 Evaporación total para simulación en el dominio. Fuente: Elaboración propia.

7.4 Reinyecciones

Respecto a reinyecciones se considera para los dos escenarios la misma proyección tal cual solo efectúa la empresa SQM, esta es presentada a continuación en la siguiente figura.

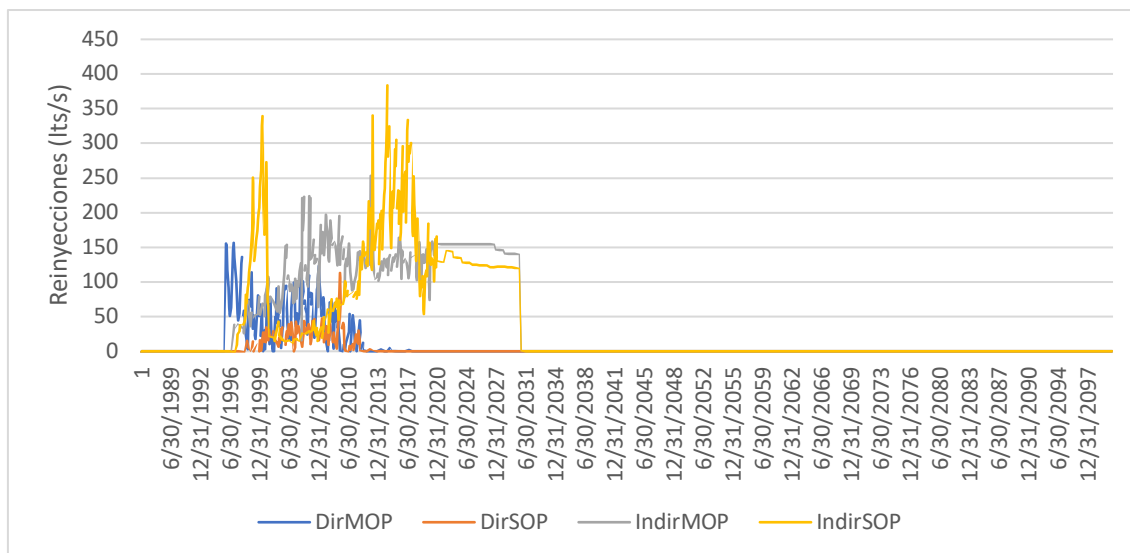


Figura 56 Reinyecciones totales para simulación en el dominio. Fuente: Elaboración propia.

7.5 Extracciones

7.5.1 Escenario 1

Para el Escenario 1 como se indica anteriormente se consideran las extracciones de manera ininterrumpidas hasta diciembre del año 2100, a continuación, se grafican las magnitudes de extracciones considerada en torno a los dos proyectos existentes en el núcleo del Salar de Atacama para el Escenario 1.

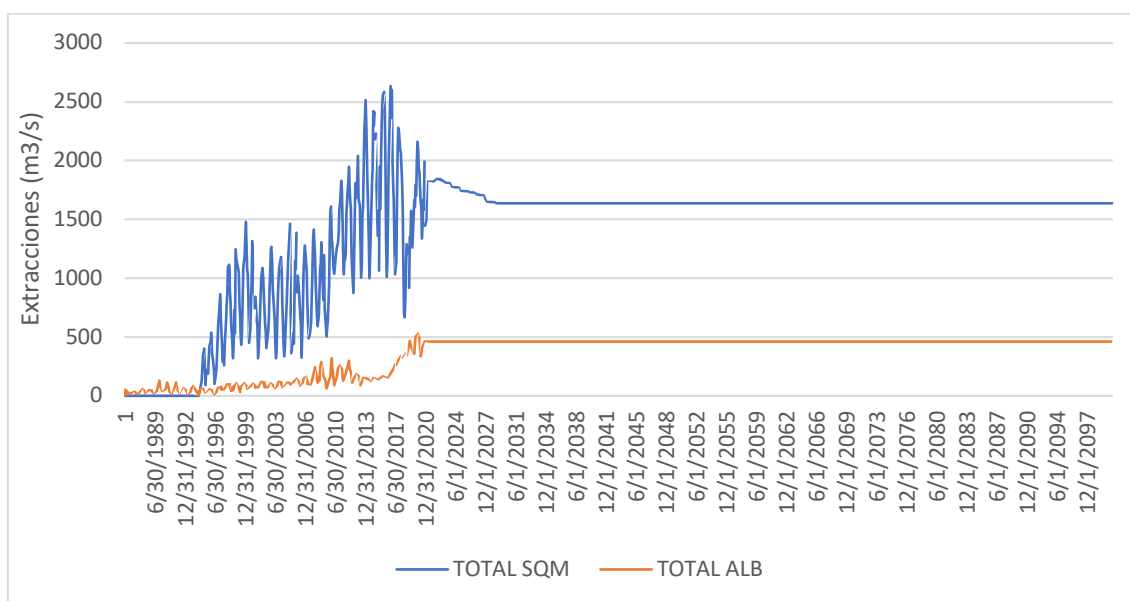


Figura 57 Extracciones de SQM Escenario 1 en el dominio. Fuente: Elaboración propia.

7.5.2 Escenario 2

Para el Escenario 2 como se indica anteriormente se consideran el termino de las extracciones en diciembre del año 2030 para SQM y en octubre del 2041 para la empresa Albemarle. Por lo demás, se considera la misma distribución de las extracciones que en el Escenario 1 previo a las fechas indicadas.

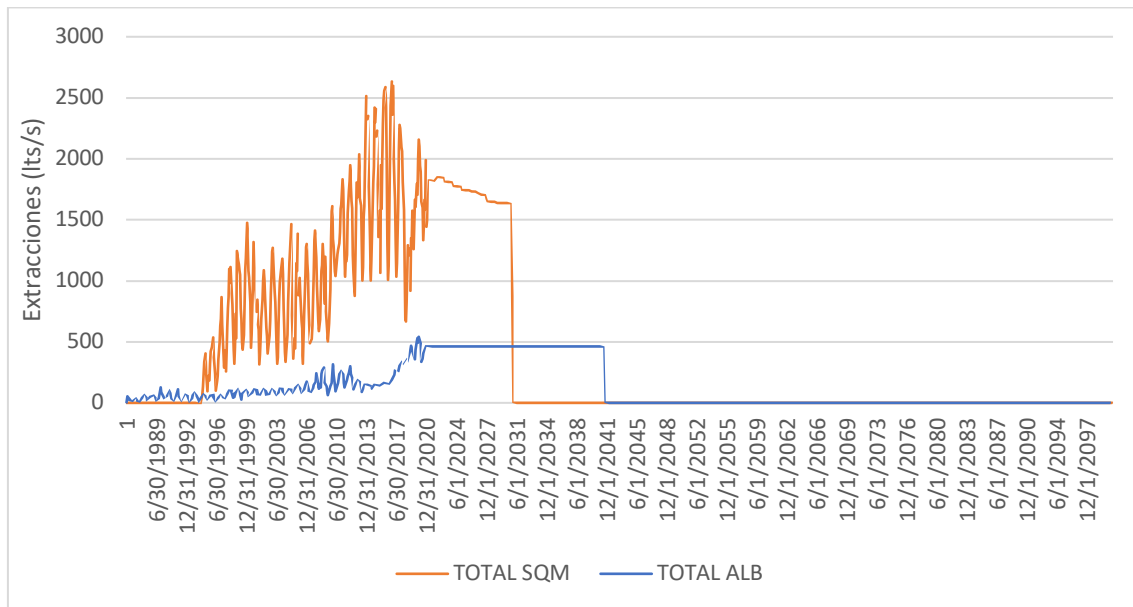


Figura 58 Extracciones de SQM y Albemarle Escenario 2 en el dominio. Fuente: Elaboración propia.

7.6 Resultados

7.6.1 Hidrogramas De Niveles

Para la comparación de piezometrías se implementa el pozo de observación con ubicación céntrica al núcleo del Salar de Atacama, el cual se identifica como "SOPE-6".

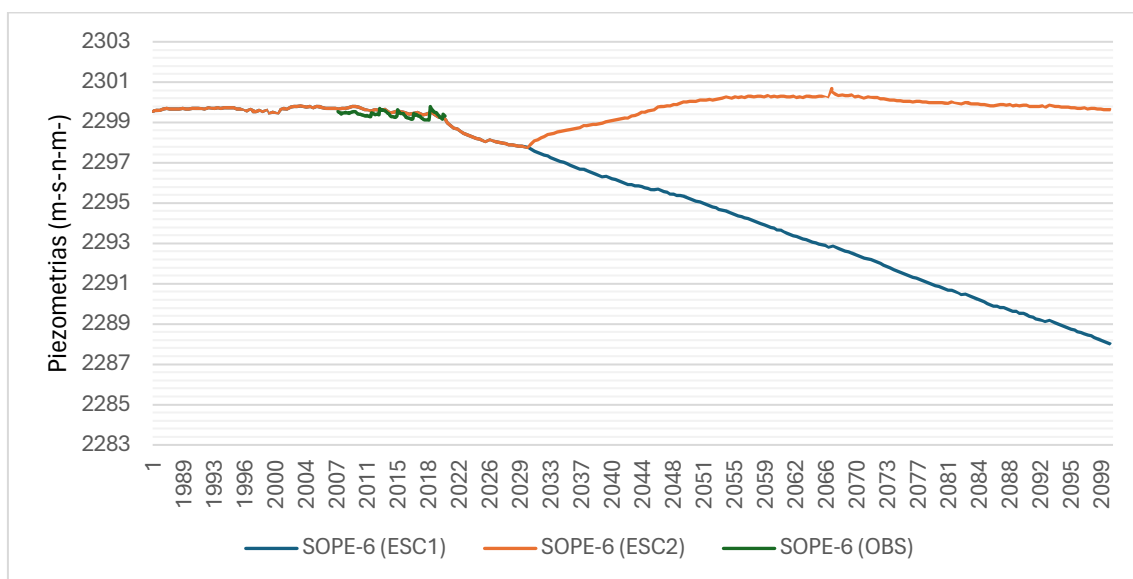


Figura 59 Hidrograma simulación punto SOPE-6. Fuente: Elaboración propia.

Se logra visualizar evidentemente una notable diferencia bajo los dos escenarios propuestos, en donde para el Escenario 1 con una extracción permanente el acuífero pierde sobre 10 metros de piezometría por los cambios en las disminuciones de las aportaciones, aumento de la evaporación y el mantenimiento de las extracciones. Respecto al Escenario 2 se aprecia una recuperación importante del nivel freático hasta alcanzar niveles similares al estado estacionario, incluso considerando los efectos del cambio climático en el sistema.

7.6.2 Balance Hídrico Para Simulación

A continuación, se presenta el balance hídrico acumulado para el modelo según simulación del Escenario 1 antes los efectos del cambio climático.

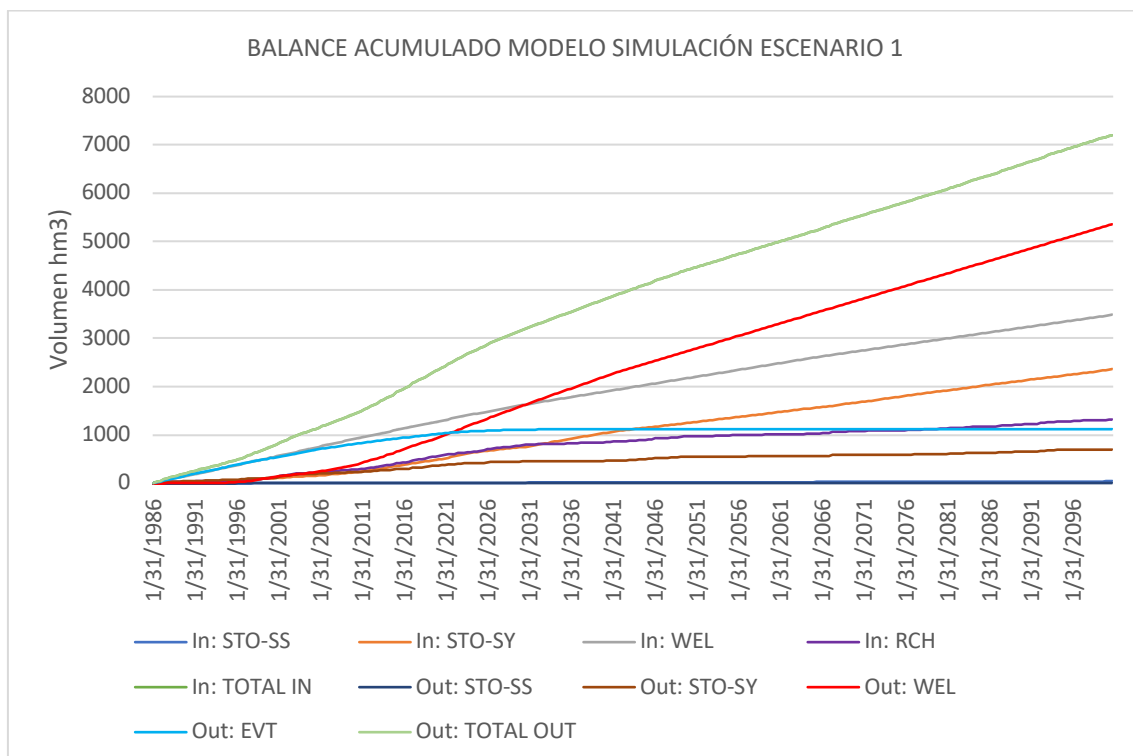


Figura 60 Balance hídrico simulación Escenario 1. Fuente: Elaboración propia.

En el balance se nota un aumento de las salidas del sistema generadas principalmente por las salidas de los pozos de extracción dentro del dominio del modelo, y respecto a entradas condicionado con evidencia en las recargas laterales subterráneas en el sistema.

Respecto a la recarga directa esta presenta una tendencia baja al aumento, más bien se mantiene el volumen acumulado a lo largo del tiempo influenciado por los efectos del cambio climático. Es también relevante visualizar un comportamiento similar respecto a la cantidad de evaporación en el sistema, no obstante, se explica que al aumentar los descensos del nivel freático sobre la profundidad de extinción de la evaporación esta tiende a desaparecer.

Finalmente se logra apreciar un mayor volumen de salida y entrada comparando el rendimiento específico respecto al coeficiente de almacenamiento producto de mantener gran parte del nivel freático sobre los niveles del Núcleo Profundo (acuífero confinado)

A continuación, se demuestra el balance acumulado del modelo simulación ante el Escenario 2.

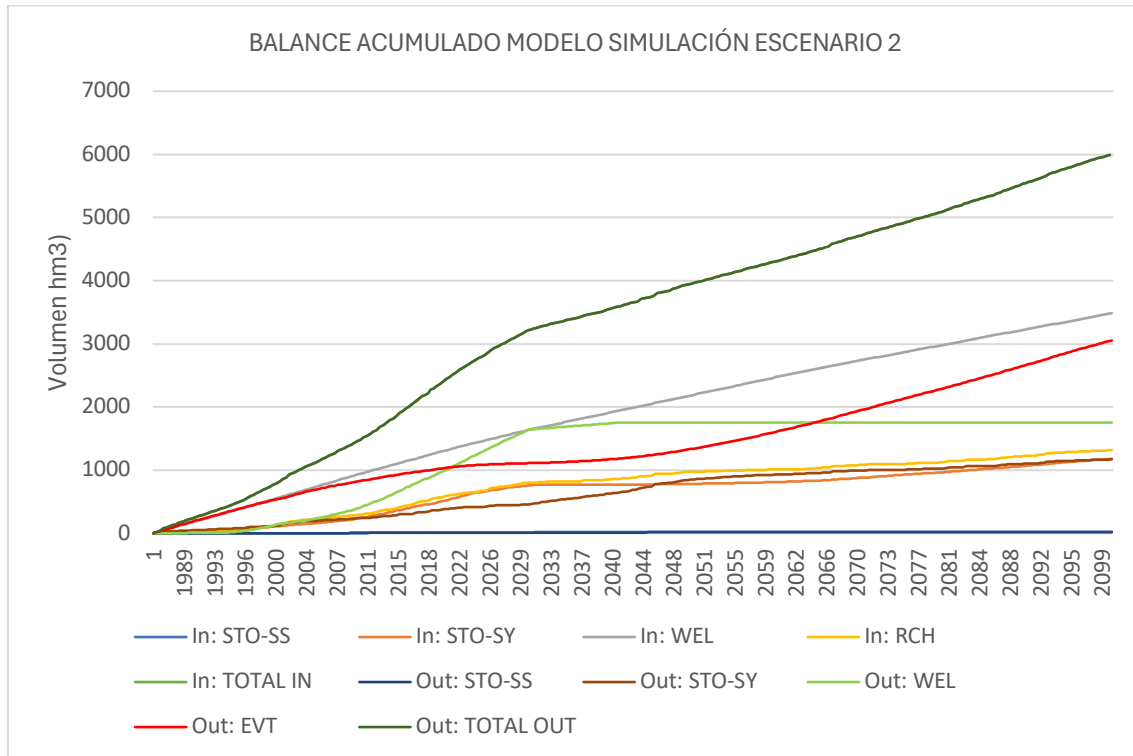


Figura 61 Balance hídrico simulación Escenario 2. Fuente: Elaboración propia.

Se logra visualizar en primer lugar la disminución de las salidas por pozos de extracción, evidenciando su comportamiento por el término de las actividades de bombeo según los plazos descritos en la sección 7.5.2. A su vez, se logra visualizar un incremento de la evaporación producto del aumento del nivel freático lo cual potencia la presencia de flujo hacia la superficie permitiendo la evaporación.

Respecto a las recargas laterales subterráneas estas son quienes aportan mayormente al sistema a diferencia de la recarga directa, la cual se ve disminuida según demuestra los efectos del cambio climático a partir del año 2023.

Finalmente, no hay mayor diferencia entre lo que ocurre con respecto al rendimiento específico en comparación al coeficiente de almacenamiento, ya que ocurre la situación similar a lo planteado en el Escenario 1 donde el nivel freático se encuentra sobre el Núcleo Profundo (acuífero confinado).

7.6.3 Mapa De Piezometrías

A continuación, se presenta el mapa de piezometrías que compara los dos escenarios de simulación con respecto al estado estacionario del modelo, previo al año 1986.

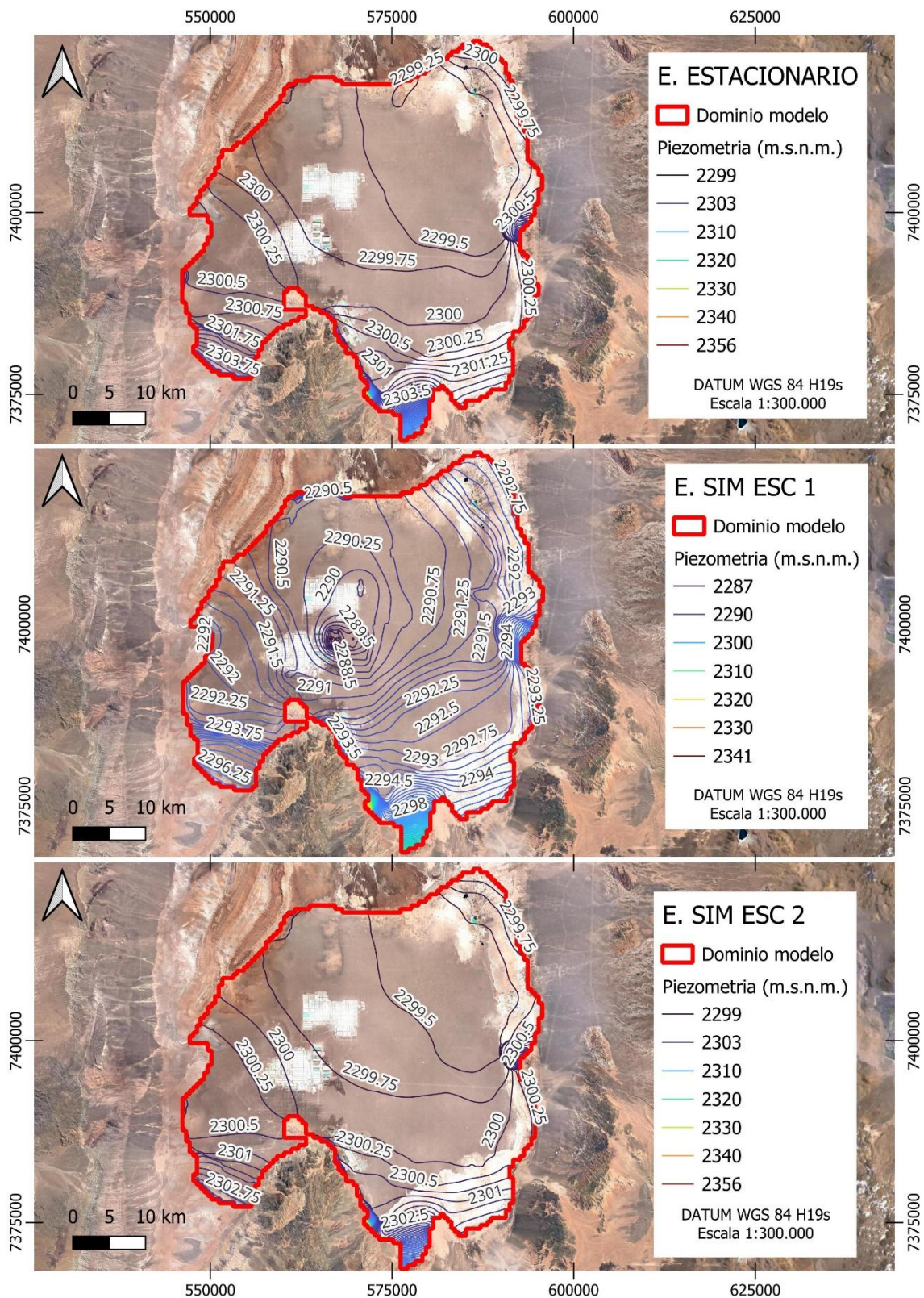


Figura 62 Comparación de piezometrías Estado Estacionario, Simulación Escenario 1 y Simulación Escenario 2. Fuente: Elaboración propia.

De lo cual se logra desprender que hay una fuerte diferencia entre el modelo Estado Estacionario y el resultado del modelo Simulación Escenario 1 a diciembre del año 2100,

lo que se justifica con los resultados mostrados en las secciones anteriores producto de la extracción permanente de flujo subterráneo.

También es importante destacar los resultados del modelo Simulación Escenario 2 a diciembre del año 2100, en donde se logra visualizar una gran similitud con los resultados del modelo en Estado Estacionario ya que al terminar con las extracciones en el dominio del modelo se permite volver a un estado estacionario (escenario previo al año 1986), no obstante, mostrando diferencias menores de piezometrías. Estas diferencias se desarrollan según lo comprendido, a los cambios en las recargas y evaporación producto de los efectos del cambio climático ante un escenario RCP 8.5.

7.6.4 Mapa De Descensos

Finalmente, como un importante grafico de visualización, a continuación, se incluye una figura que determina el descenso entre los resultados del modelo en Estado Estacionario y los resultados del modelo en estado de Simulación Escenario 1 para diciembre del año 2100.

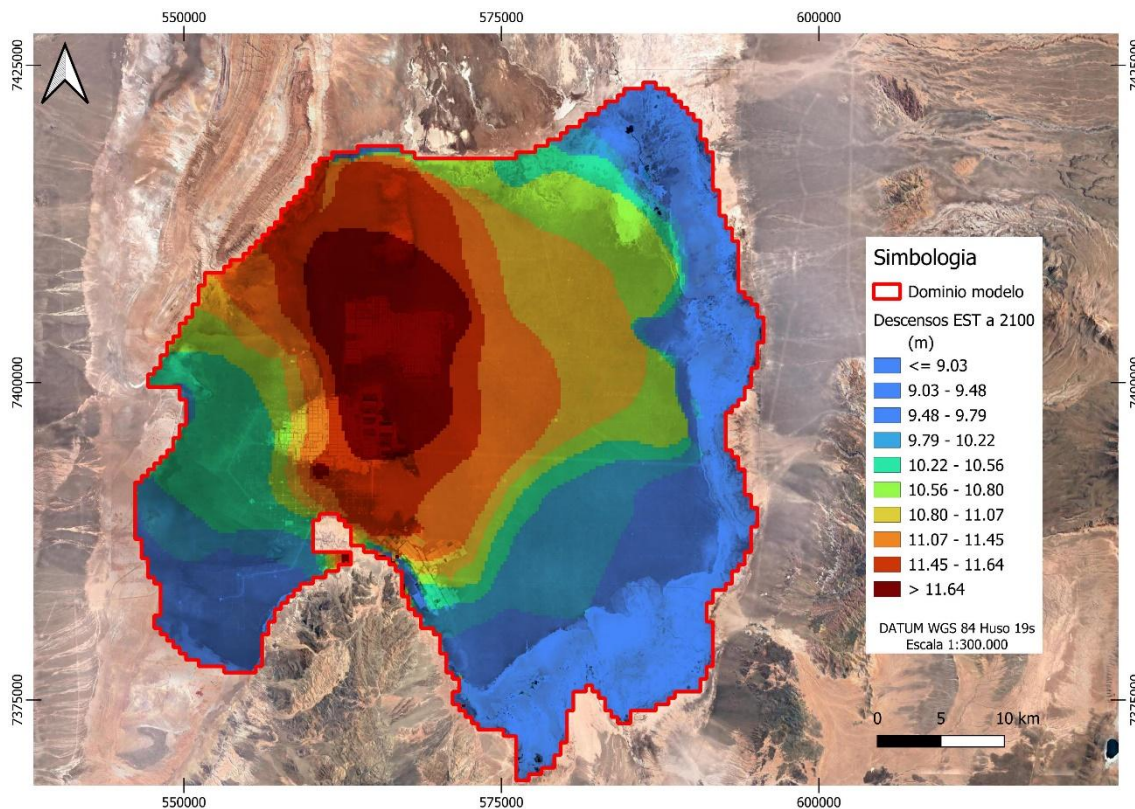


Figura 63 Descensos entre Estado Estacionario y Simulación Escenario 1. Fuente: Elaboración propia.

Por lo cual, se logran apreciar descensos que oscilan entre 9 y 11.64 metros ante un escenario de cambio climático RCP 8.6 con permanencia en las cuotas de extracciones. La orientación de los descensos se orienta de manera clara en torno a los pozos de extracción de los proyectos existentes en el Núcleo del Salar de Atacama.

8 CONCLUSIONES

El modelo elaborado en el presente estudio sostuvo diferencias a los modelos ya existentes, debido a que se permite discretizar el dominio del modelo de forma homogénea en torno al núcleo de Salar de Atacama. A su vez, también se presentan un cambio en el código a utilizar ya que se implementa el uso de MODFLOW 6 a diferencia de modelos anterior que implementan MOFLOW 2005 y FEFLOW. Además, dentro del modelo se permite el uso de la tasa de evaporación de manera lineal respecto a la profundidad según Harbaugh (2000), la cual difiere del ajuste utilizado en el modelo más actualizado de la REF 4, el cual utiliza una tasa de evaporación exponencial respecto a la profundidad tipo Philip (1957).

Respecto a las dificultades encontradas a la hora de realizar la calibración del modelo, es importante destacar las diferentes zonas existentes dentro del dominio, siendo estas zonas de salmuera y zonas de agua dulce, lo cual compromete diferenciar el comportamiento del flujo dentro del dominio reflejado en la parametrización de propiedades hidráulica en el medio, como también en las consideraciones de los coeficientes de evaporación para cada zona. También es relevante mencionar lo que respecta a las recargas laterales subterráneas, aportaciones que fueron implementadas de manera lineal y constantes en el modelo, lo cual puede ser materia de discusión ante una evaluación del recurso hídrico más detallada.

Según la validación del modelo se implementan iteraciones manuales en torno a los parámetros hidráulicos dentro de los rangos permitidos según los ensayos existentes a nivel histórico en el dominio del modelo, por lo cual se logra un correcto resultado según análisis de bondad de ajuste RMSE, NRMSE e Índice de Nash – Sutcliffe comparando los resultados de piezometrías para el Modelo Transitorio Calibración y el registro histórico de piezometrías para 82 puntos de observación.

Respecto a los resultados principales, es relevante destacar el Modelo Numérico Hidrogeológico en estado transitorio 1986 - 2022, el cual si bien fue calibrado de forma manual permite comprender el funcionamiento de una masa de agua que mantiene bajas aportaciones y con alta presencia de actividades de extracción. Dicho modelo permite proyectar escenarios presentes y futuros ante cambios en las entradas y salidas de mismo, con el fin de comprender la disponibilidad del recurso según los márgenes que comprometen los ecosistemas interconectados al Núcleo del Salar de Atacama.

Se sabe que el núcleo del salar se encuentra conectado a diferentes sistemas lagunares con presencia de especies endémicas en categoría vulnerable y hasta en peligro de extinción, las cuales dependen directamente del nivel de las lagunas y nivel freático del acuífero por su existencia, debido a que la zona en la que se encuentran es un desierto.

Finalmente, respecto a los escenarios futuros presentados en el modelo de simulación, se logra evaluar y comprender que si bien el sistema está sometido al aumento de evaporación y pérdidas en sus aportaciones ante los efectos del cambio climático según un escenario RCP 8.5, este sistema logra un comportamiento similar al del estadio estacionario según el Escenario 2 del modelo de simulación a diciembre de 2100. No obstante, según los resultados entregados por el Escenario 1 a diciembre de 2100, el sistema es propenso a presentar descensos considerables en las piezometrías por el mantenimiento de las extracciones de salmuera bajo los proyectos existentes y/o futuros en el dominio del Núcleo del Salar de Atacama.

9 LINEAS DE FUTURA INVESTIGACION

Respecto a líneas futuras de investigación se proponen las siguientes ideas acorde a los resultados y el contexto global para el Salar de Atacama:

- Implementar calibración automática de parámetros hidráulicos basado en el modelo numérico hidrogeológico en estado transitorio y los ensayos existentes a la fecha dentro del dominio.
- Implementar distintos escenarios de cambio climático, si bien en el presente trabajo se ha considerado el escenario RCP 8.5 es relevante considerara el resto de los escenarios descritos por el IPCC, RCP 2.6, RCP 4.5 y RCP 6.
- Ampliar el dominio del modelo a zonas fuera del Núcleo del Salar de Atacama, debido a que existen sistemas lagunares interconectados con el núcleo es importante ampliar la zona de estudio incluyendo dichas zonas para comprender su funcionamiento.
- Reconsiderar datos históricos de las recargas y evaporación con datos obtenidos de registros de precipitación y temperatura según insumos satelitales, lo cual permita considerar una distribución temporal de las variaciones de recargas laterales subterráneas en el sistema junto con las evaporaciones y recargas directas.

10 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1.] DGA Chile - Ingeniería Y Consultoría En Aguas Ltda. (2014). Análisis De Los Mecanismos De Evaporación Y Evaluación De Los Recursos Hídricos Del Salar De Atacama
- [2.] SQM (2021). Modelo Hidrogeológico Conceptual Del Salar De Atacama, EIA Proyecto Plan De Reducción De Extracciones En El Salar De Atacama.
- [3.] SQM (2023). Actualización Modelo Hidrogeológico Conceptual Del Salar De Atacama, EIA Proyecto Plan De Reducción De Extracciones En El Salar De Atacama.
- [4.] Hidroestudios (2023). Actualización Modelo Numérico Hidrogeológico Del Núcleo del Salar de Atacama, EIA Proyecto Plan De Reducción De Extracciones En El Salar De Atacama.
- [5.] SQM (2021). Modelo Hidrogeológico Numérico Del Núcleo Del Salar De Atacama, EIA Proyecto Plan De Reducción De Extracciones En El Salar De Atacama.
- [6.] Hidroestudios – SQM (2023). Geometría Actualizada del Modelo Geológico Leapfrog del Salar de Atacama, EIA Proyecto Plan De Reducción De Extracciones En El Salar De Atacama.
- [7.] Sociedad Chilena de Litio Ltda. GCF INGENIEROS CONSULTORES (2005). Modelo de Simulación Flujo Sistema Salar de Atacama
- [8.] Servicio de Evaluación Ambiental (2023). Guía metodológica para la consideración del cambio climático en el SEIA. Primera edición, Santiago, Chile.
- [9.] Servicio de Evaluación Ambiental (2023). Criterio de evaluación en el SEIA: Cambio climático en la evaluación ambiental del recurso hídrico. Primera edición, Santiago, Chile.
- [10.] Pica-Téllez, A.; Garreaud, R.; Meza, F.; Bustos, S.; Falvey, M.; Ibarra, M.; Duarte, K.; Ormazábal, R.; Dittborn, R. & Silva, I. (2020). Informe Proyecto ARCLim: Atlas de Riesgos Climáticos para Chile. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, Centro de Cambio Global UC y Meteodata para el Ministerio del Medio Ambiente a través de La Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). Santiago, Chile.
- [11.] Sainz de Murieta Zugadi, E., Neumann, M. B., & Markandya, A. (2014). Quinto informe de evaluación (AR5) del GT-II del IPPC: aumentando el espacio de las soluciones para la adaptación.
- [12.] Langevin, C. D., Hughes, J. D., Banta, E. R., Niswonger, R. G., Panday, S., & Provost, A. M. (2017). Documentation for the MODFLOW 6 groundwater flow model (No. 6-A55). US Geological Survey. <https://pubs.usgs.gov/tm/06/a55/tm6a55.pdf>
- [13.] Richard B. Winston, Groundwater Project (2023) Getting Started with MODFLOW. <https://gw-project.org/books/getting-started-with-modflow/>
- [14.] Corales Chauca, A. J. (2022). Modelación matemática del flujo de agua subterránea de los acuíferos de Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara. Desarrollo de scripts con el uso de Python y Flopy. UPV.
- [15.] Winston, R. B. (2024). ModelMuse (versión 5) [Software]. U.S. Geological Survey. <https://www.usgs.gov/software/modelmuse>
- [16.] Python Software Foundation. (2024). Python (versión 3.10) [Lenguaje de programación]. <https://www.python.org/>
- [17.] OpenAI. (2024). Scripts elaborados con ChatGPT (GPT-4) [Modelo de lenguaje grande]. <https://www.openai.com/>



11 ANEXOS

- ANEXO 1 - Coordenadas Pozos De Extracción Y Reinyección
- ANEXO 2 – Registros de Caudales en Pozos De Extracción Y Reinyección
- ANEXO 3 - Coordenadas Puntos De Observación
- ANEXO 4 - Registro Puntos De Observación
- ANEXO 5 – Resultados Puntos Observados de Piezometrías Modelo Estacionario Calibración