

Estimación de la recarga en la cuenca del río **Maipo** a través del **Modelo WetSpass**

Julio 2021



ESCENARIOS
HÍDRICOS
2030
CHILE



ESCENARIOS
HÍDRICOS
2030
CHILE

ESTIMACIÓN DE LA RECARGA
EN LA CUENCA DEL RÍO MAULE
A TRAVÉS DEL MODELO WETSPASS

Autores:

WaterWays, Portugal

·João Palma Nascimento, Ingeniero de Recursos Hídricos

·Nuno Barreiras, Ingeniero Geólogo

Apoyo Técnico en Chile:

Equipo EH2030

·Ulrike Broschek

·Claudia Galleguillos

·Paola Matus

·Gerardo Díaz

·Valentina Cárdenas

·Paul Dourojeanni

·María José Gómez

Equipo Centro de Ecología Aplicada

·Manuel Contreras

·José María Peralta

Diseño y Diagramación:

Mauricio Becerra

Publicación

Julio 2021

Índice

4 Resumen ejecutivo

12 1. Introducción

13 2. Insumos

- 2.1 Introducción
- 2.2 Pendiente del terreno
- 2.3 Uso del suelo
- 2.4 Textura del suelo
- 2.5 Precipitación
 - 2.5.1 Información base
 - 2.5.2 Interpolación
 - 2.5.3 Tendencia de los valores de precipitación
- 2.6 Temperatura
- 2.7 Evapotranspiración potencial
- 2.8 Velocidad del viento
- 2.9 Profundidad del nivel piezométrico

38 3. Modelo WetSpass

- 3.1 Suposiciones del modelo
- 3.2 Calibración

39 4. Discusión de resultados

- 4.1 Impacto por cambios en el uso del suelo
 - 4.1.1 Recarga
 - 4.1.2 Evaluación del riesgo de contaminación
- 4.2 Brechas de información
- 4.3 Definición de medidas de protección y gestión de las aguas subterráneas
 - 4.3.1 Introducción
 - 4.3.2 Evolución de la piezometría y del riesgo de contaminación en la cuenca de Maipo
 - 4.3.3 Estrategias de gestión
 - 4.3.4 Propuestas para la cuenca MAIPO

56 5. Conclusiones

58 6. Referencias

Resumen Ejecutivo

El presente documento corresponde a una síntesis del informe general de la estimación de la recarga en la cuenca Maipo, a través del modelo WetSpass, en el cual se han determinado las áreas de mayor infiltración, se han delimitado las zonas principales de recarga y se ha evaluado el riesgo de contaminación del agua subterránea.

Este trabajo, se enmarca en la iniciativa Escenarios Hídricos 2030, desarrollada por Fundación Chile, Fundación Futuro Latinoamericano y Fundación Avina, que pretende alcanzar la seguridad y sustentabilidad de los recursos hídricos de Chile para el año 2050.

El área analizada tiene una superficie aproximada de 15.300 km² e integra

las regiones metropolitanas de Santiago y Valparaíso. La delimitación del área de estudio corresponde a la cuenca del río Maipo, la que tiene como tributarios principales los ríos Volcán, Colorado, Yeso, Mapocho y Puangue.

Para el estudio de la recarga y el riesgo de contaminación se consideraron varios enfoques metodológicos, en el caso de la fase exploratoria, de los datos existentes, se aplicaron diversos métodos estadísticos como la evaluación de tendencias temporales. Para el estudio de la recarga y del riesgo de contaminación, se aplicó el modelo Water and Energy Transfer between Soil, Plants and Atmosphere (WetSpass) y el Índice de Susceptibilidad (IS), ambos modelos generan resultados distribuidos en el espacio.

Para la aplicación de la metodología propuesta fue necesario un trabajo de compilación y tratamiento de variables geográficas, pedológicas, geológicas, geomorfológicas, climáticas, uso del suelo y de recursos hídricos para construir la base de datos con los insumos para los modelos mencionados.



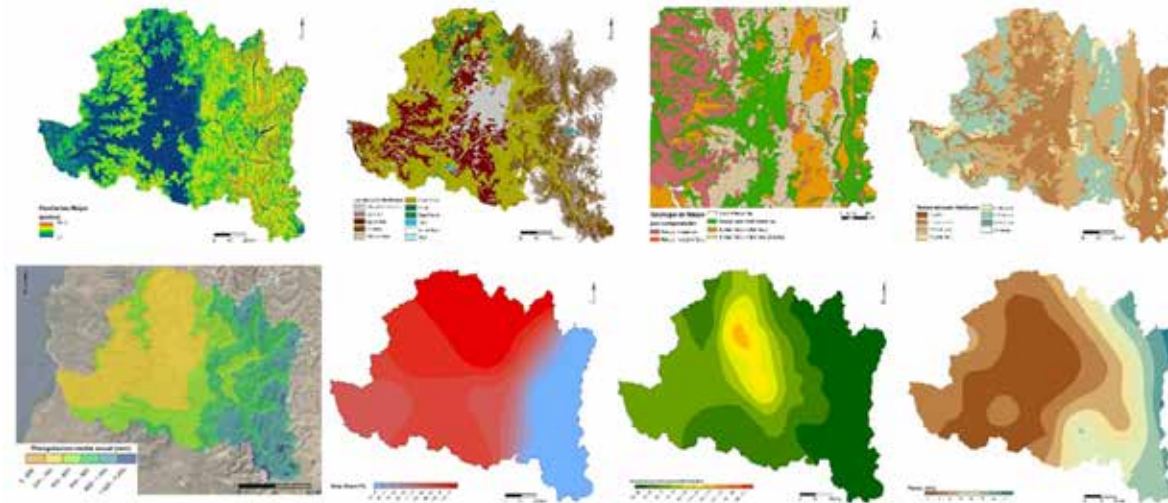


Figura 1: Variables de entrada de los modelos. De arriba de izquierda a derecha: pendientes, uso del suelo, geología, textura del suelo. Abajo de izquierda a derecha: precipitación, temperatura, evapotranspiración potencial, velocidad del viento

Respecto al procesamiento de la información base, se destaca lo siguiente:

- Las pendientes predominantes en el territorio presentan valores entre 0 y 5 grados, aunque existe una zona significativa con pendientes entre los 5 y los 30 grados, esencialmente en la zona de transición entre los Andes y el valle central, y en las zonas costeras.
- Las áreas asociadas a actividad agrícola son la clase más representativa en cuanto al uso del suelo. Sin embargo, también

destacan los matorrales y herbáceas, los bosques esclerófilos, los afloramientos rocosos y las áreas urbanas e industrializadas.

- La cuenca presenta, esencialmente, suelos arcillo-limosos de composición volcánica, así como suelos arcillo-arenosos y areno-arcillosos.
- El estudio de la precipitación se fundamentó en la compilación y tratamiento de 32 series de datos desde 1988 hasta 2020. Estos datos muestran que los valores de precipitación más elevados de la cuenca ocurren en la zona este, mientras que los valores más frecuentes

se sitúan entre los 200 y 400 mm, principalmente en la zona central y oeste.

- En cuanto a la temperatura, los valores promedio anuales son más elevados hacia el norte, alcanzando valores de 16 a 17°C, mientras que los valores promedio son menores en zonas más elevadas de la cuenca, con valores entre 9 y 10°C.

- El mapa de evapotranspiración potencial elaborado indica que el rango de valores que presenta mayor recurrencia corresponde al intervalo de 2.050-2.150 mm/año, representativo en la zona este.

La zona central y norte presentan valores de Evapotranspiración Potencial (ETP) mayores, alcanzando los 2.251 mm/año.

- Las clases más recurrentes de velocidad del viento son aquellas con valores más bajos (1.1-2.1 m/s), asociadas a las zonas centro y oeste de la cuenca.

- Para el cálculo de la piezometría se consideraron datos de 100 piezómetros de la Dirección General De Aguas. El tratamiento de estos valores mostró que en el área norte y centro de la cuenca existen conos de abatimiento asociados al bombeo de agua subterránea;

- Para un análisis de la tendencia temporal de los niveles piezométricos si consideraran solo 61 puntos

debido a la falta de datos continuos en los restantes. Se comprobó que los acuíferos se encuentran en un régimen de sobreexplotación. Únicamente en 12 de los 61 puntos analizados se observó una tendencia de aumento en los niveles, mientras que 49 de los puntos restantes mostraron un descenso significativo de los niveles (Figura 2).

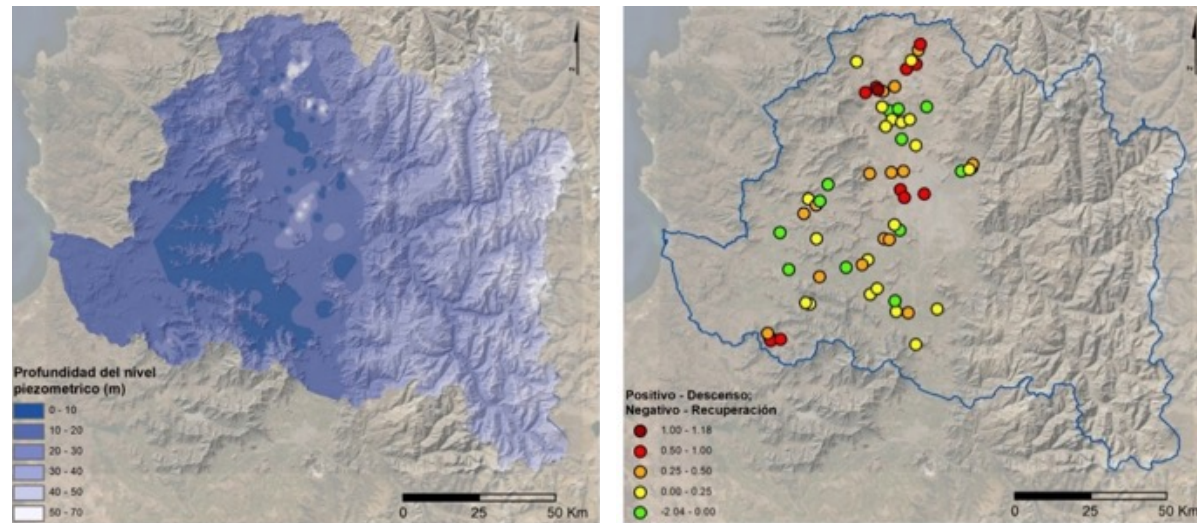


Figura 2: Profundidad del nivel piezométrico en la cuenca Maipo (izquierda) y variabilidad temporal de la profundidad del nivel piezométrico (derecha)

Después de la implementación y calibración del modelo WetSpass, se confirmó que la escorrentía superficial se genera mayoritariamente en el este de la zona metropolitana de Santiago y aguas abajo, en las corrientes de agua que se originan en dirección al mar. La zona norte de la cuenca es la que presenta menores valores de escorrentía.

Con respecto a la recarga, se verificó que los valores de recarga para toda la cuenca oscilan entre 0 y 292 mm/año, con un valor promedio cercano a los 93 mm/año (45 m³/s) para el año de 2016. (Figura 3).

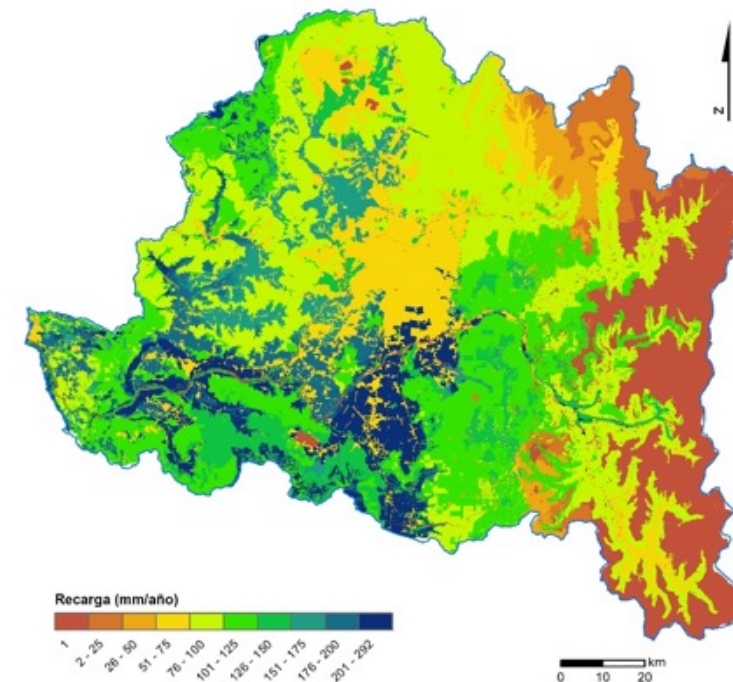


Figura 3: Valores de recarga en la cuenca Maipo.

El modelo WetSpass también permitió identificar las áreas principales de recarga en la cuenca. La delimitación de estas áreas se basó en la cartografía de uso del suelo de 2016 (Pliscoff, 2020), por ser ésta la más reciente. Se consideró que las áreas principales de recarga corresponden a los valores superiores al cuartil Q3 del total de celdas (>75%) y, por tanto, estas serían las zonas de conservación más importantes. Por eso, son áreas de especial interés para la gestión de la recarga de los acuíferos de la cuenca. Se verifica que la clase Q3<Max. (áreas preferenciales de recarga), contribuye con un 46% de la recarga total (valores promedios de 171 mm/año, o 1415 hm³/año), mientras ocupa solamente el 25% de la superficie de la cuenca (3781 km²) (Tabla 1).

Tabla 1: Estadísticas de la distribución espacial de la recarga.

Rango de recarga	Área (km ²)	Mínimo (mm)	Máximo (mm)	Volumen total (hm ³)	Recarga Promedio (mm)	Contribución para la recarga total
< Q1	4621	0	71	125	27	9%
Q1 < Q2	2929	71	93	246	84	17%
Q2 < Q3	3839	93	121	399	104	28%
Q3 < Max.	3781	121	292	647	171	46%

Como se muestra en la Figura 4, estas áreas estratégicas se encuentran en las planicies situadas al sur de la región metropolitana, así como a lo largo de los territorios contiguos a las principales corrientes de agua de la red hidrográfica del río Maipo. El área principal de recarga en las planicies situadas al sur de la región metropolitana ocupa el 25% del territorio de la cuenca y, sin embargo, genera el 46% de la recarga total de ella.

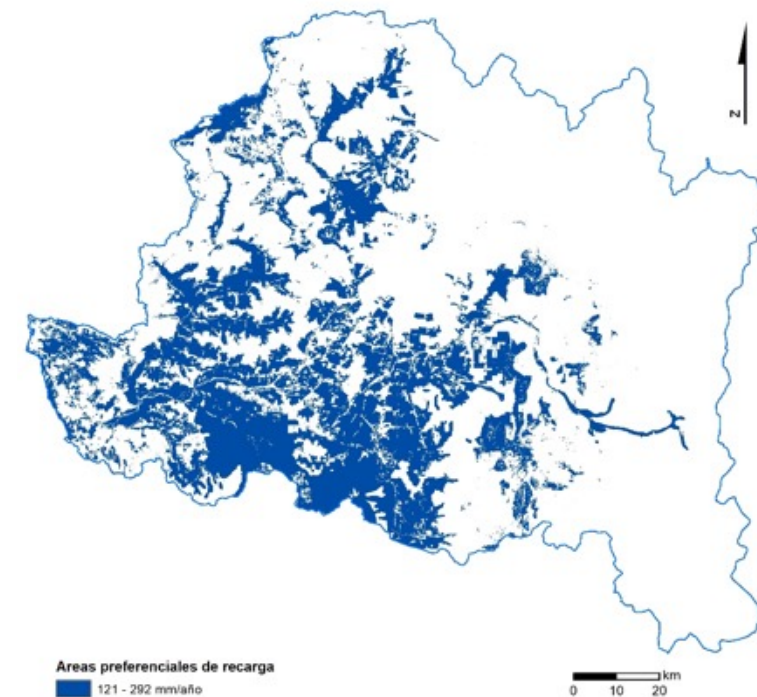


Figura 4: Identificación de las áreas principales de recarga.

La evaluación del riesgo de contaminación del agua subterránea, considerando el método del índice de susceptibilidad (IS), permitió identificar las zonas donde el riesgo de contaminación por infiltración del agua es mayor, teniendo en cuenta la relación entre las características naturales de la cuenca y la presión humana en el uso del suelo. El resultado de la aplicación de esta metodología para el uso de suelo del año 2016 (Plischoff, 2020) (Figura 5), desvela que la distribución del riesgo de contaminación es muy variable y está condicionada esencialmente por la existencia de prácticas agrícolas y por el tejido urbano existente en la cuenca. Las clases de riesgo más elevado están directamente asociadas a áreas agrícolas, en terrenos poco inclinados y con una composición arenosa significativa (zonas sur y suroeste de Santiago).

La zona metropolitana de Santiago presenta un riesgo de contaminación “Moderado a bajo” debido a unos valores de recarga relativamente bajos y a una mayor profundidad del nivel piezométrico (20 a 30 metros de profundidad).

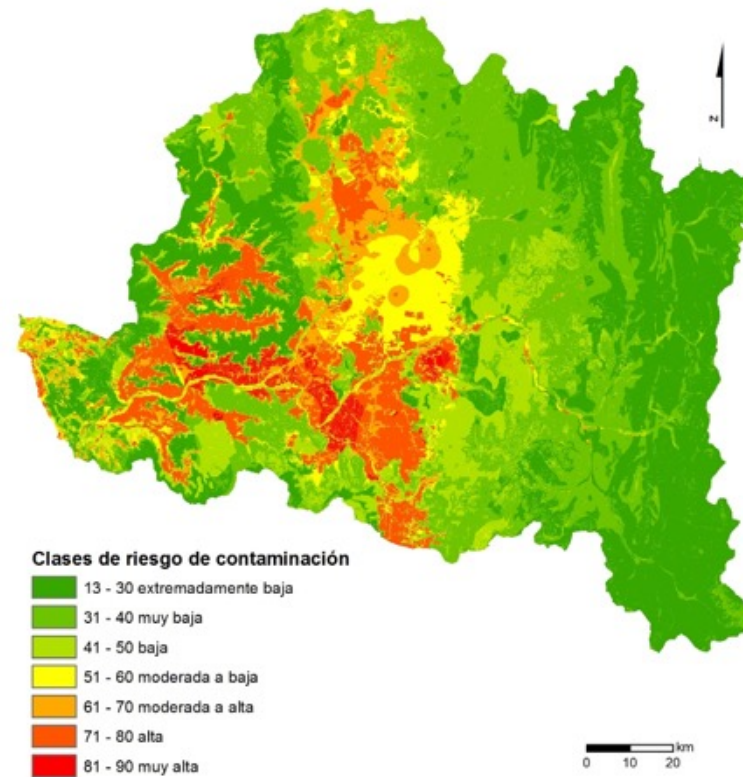


Figura 5: Impacto del uso del suelo en el riesgo de contaminación del agua subterránea.

Tanto la disponibilidad de agua subterránea como el riesgo de contaminación de ésta son factores intrínsecamente relacionados con el uso del suelo. Utilizando los resultados del modelo WetSpass y el método del índice de susceptibilidad basados en la cartografía de uso del suelo para los años 1995 y 2016, se pudo determinar cómo han afectado las actividades humanas y los cambios en el uso del suelo a la vulnerabilidad de los acuíferos de la cuenca. La cartografía de uso del suelo considerada fue obtenida del estudio “Análisis del estado actual de los ecosistemas terrestres, asociados a dos cuencas en Chile central: Maipo y Maule” (Plischoff, 2020).

En cuanto a la disponibilidad de agua (Figura 6), se determinó que entre 1995 y 2016 los cambios más significativos estuvieron relacionados con la reducción de la recarga en la zona sur. Esta reducción fue causada por la transformación de suelos agrícolas en zonas urbanas, es decir, la impermeabilización de suelos que presentaban tasas de infiltración significativas. La reducción de la recarga asociada a este proceso alcanza valores de -150 mm de recarga anual. Por otro lado, también se determinó un incremento de la recarga en algunas áreas asociada a cambios

en la cobertura vegetal, como transición de matorrales a bosques nativos o cambios del tipo de bosque. Sin embargo, este incremento es menor que la reducción de la recarga asociada a la urbanización del territorio.

Entre 1995 y 2016, se estimó una disminución general de la recarga, destacando como tipo de cambio predominante la disminución de la recarga entre -50 y -100 mm. Esta reducción ocurrió en un área de 727 km² destacada en colores rojo y naranjas en la figura 6

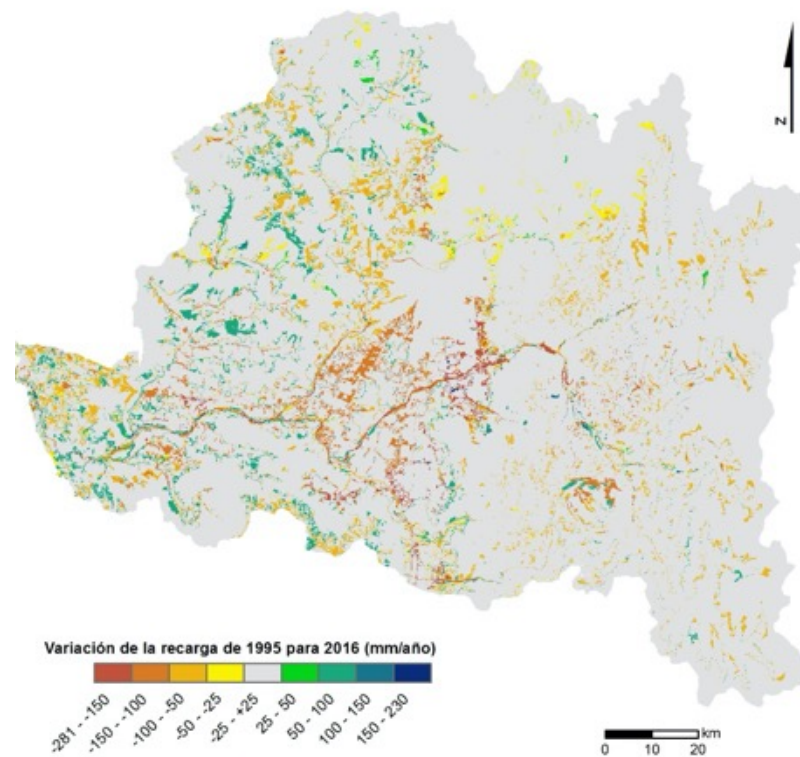


Figura 6: Impacto de los cambios del uso del suelo en la recarga entre 1995 y 2016.

En cuanto a los cambios en el riesgo de contaminación, entre 1995 y 2016 no se detectaron diferencias significativas.

Sin embargo, se observó un incremento considerable del riesgo en áreas puntuales distribuidas por toda la cuenca y, especialmente, en el centro-norte y oeste-suroeste. Por otro lado, debido a la impermeabilización de terrenos agrícolas al sur de Santiago, se observó que en estas pequeñas áreas específicas el riesgo de contaminación disminuyó moderadamente, a causa de la reducción de la recarga (Figura 38).

La relación entre las zonas preferenciales de recarga (122 a 292 mm/año) y las clases de mayor riesgo de contaminación está en la figura 7. Las clases de riesgo de contaminación más altas (moderada a alta, alta, muy alta) corresponden a 2113 km² (54 % de toda el área de zonas preferenciales de recarga). Las clases con menor riesgo de contaminación corresponden a 1800 km² (46 % de toda el área de zonas preferenciales de recarga). Eso es decir que más de la mitad de las zonas preferenciales de recarga están con riesgo de contaminación significativo.

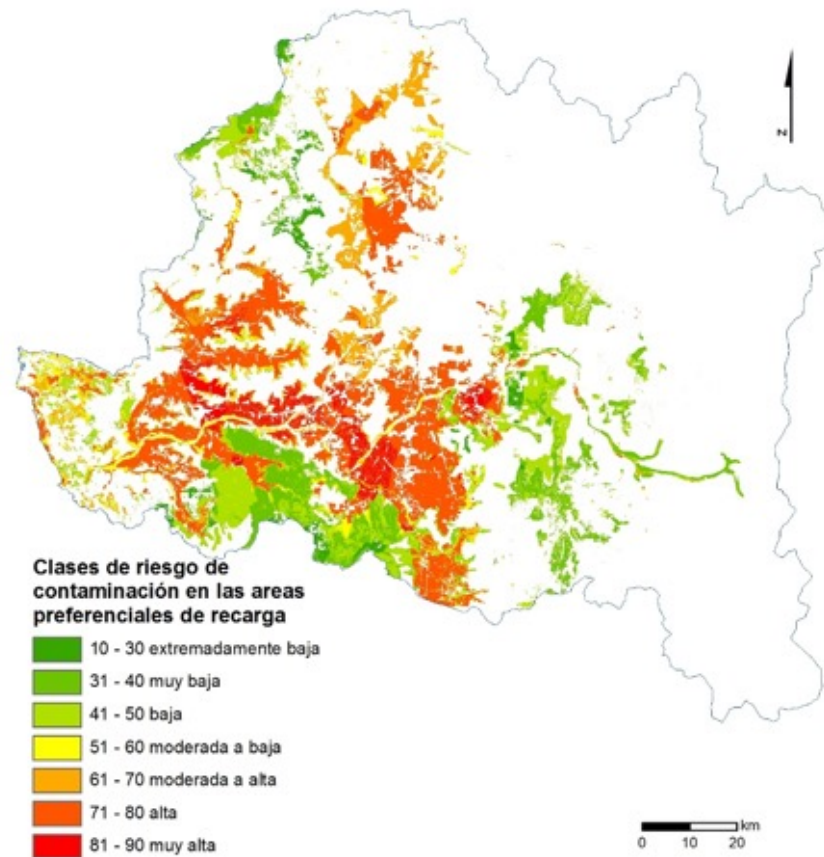


Figura 7: Riesgo de contaminación en las áreas preferenciales de recarga.

Para la definición de medidas de protección y gestión de las aguas subterráneas, así como para lograr un mejor control de la evolución de la piezometría (disminución en los niveles de pozos) y el riesgo de contaminación, la gestión del agua subterránea de la cuenca Maipo deberá tener en cuenta las siguientes conclusiones de este análisis:

- Se observó que la ubicación de las principales zonas de recarga, está asociada a las zonas con mayor extracción de agua subterránea.
- Existe una disminución de las áreas de recarga debido a la transformación de áreas agrícolas en zonas urbanas.
- Las principales zonas de recarga presentan un riesgo de contaminación elevado, debido esencialmente a la agricultura.
- Las series de datos piezométricos muestran un descenso de los niveles en la mayoría de los pozos de monitoreo. En alguno de estos puntos la caída del nivel es bastante pronunciada. Cabe señalar que el descenso continuo de los niveles piezométricos indica que el acuífero se encuentra en un régimen de sobreexplotación y, consecuentemente, la disponibilidad de agua subterránea disminuirá en el futuro y su calidad se verá afectada; Gracias al trabajo realizado se puede concluir que el mayor reto, para la gestión de los recursos hídricos subterráneos en la cuenca Maipo, se encuentra en la relación existente entre recarga y riesgo de contaminación (Tabla 2). Si no se consideran estos dos aspectos en la toma de decisiones sobre la gestión de los recursos, su sustentabilidad podría estar en juego.

Tabla 2 - Resumen de las estadísticas de la recarga.

Parámetro	Área (km ²)	Recarga (mm/año)
Potencial de infiltración en la Cuenca	4621	0-72
	2930	72-93
	3839	93-121
	3782	121-292
Infiltración con riesgo de contaminación	2113	121-292
Infiltración sin o bajo riesgo de contaminación	1800	121-292

El siguiente paso que se propone, para la elaboración de un modelo de gestión sustentable de los recursos hídricos subterráneos de la cuenca de Maipo, es apostar por el conocimiento detallado de los sistemas acuíferos y de sus usuarios.

En este sentido, se deberá realizar un esfuerzo para instalar redes de monitoreo de los niveles piezométricos y de la calidad de agua asociada, orientadas a la vigilancia e investigación. Por otro lado, se deberá contabilizar el volumen de agua requerida y extraída por los usuarios, compilando toda la información relacionada con las parcelas agrícolas y las expectativas

de los agricultores, industria y entidades gestoras del abastecimiento público para el futuro. Es importante que toda esta información esté disponible para su uso.

La compilación y disponibilidad de toda esta información permitirá, en una primera fase, definir el modelo conceptual de los acuíferos para, posteriormente, elaborar un modelo numérico de flujo que será fundamental en la toma de decisiones técnicas adecuadas. Estos modelos permiten visualizar escenarios de gestión de la recarga y de los usuarios, incluyendo los componentes de costo y beneficio asociados a cada decisión.

Introducción

El presente trabajo se enmarca en la iniciativa Escenarios Hídricos 2030 que es desarrollada por Fundación Chile, Fundación Futuro Latinoamericano y Fundación Avina.

La visión de esta iniciativa es alcanzar la seguridad y sustentabilidad del recurso hídrico en Chile para el año 2050, desarrollando un Plan Nacional de Seguridad Hídrica (NWSP, por sus siglas en inglés) y hojas de ruta en las cuencas piloto del río Maipo y Maule. Las metodologías, productos y resultados obtenidos, quedarán disponibles para quien desee replicar la experiencia en otras cuencas de Chile y LAC (América Latina y el Caribe).

El componente generado, a través de la presente consultoría, corresponde a la estimación de recarga de acuíferos en la cuenca Maipo. El desafío de este trabajo consiste en determinar la recarga existente en los acuíferos, de las distintas cuencas analizadas en la iniciativa, así como las zonas de recarga natural actuales mediante el uso del modelo WetSpass (Water and Energy Transfer between Soil, Plants and Atmosphere).

Este documento corresponde a las actividades de trabajo desarrolladas para el Informe General sobre la estimación de la recarga en la cuenca Maipo, a través del modelo Wetspass, que resume los resultados y análisis establecidos, en este caso para la cuenca hidrográfica del río mencionado anteriormente.

De acuerdo con lo dispuesto, en los términos de referencia, en este documento se presentan los resultados obtenidos para la cuenca del río Maipo, incluyendo los mapas con las zonas de recarga natural existentes en la actualidad y las que se han perdido con el paso del tiempo, así como el análisis de los resultados.

2.1 Introducción

Con la finalidad de aplicar el modelo WetSpass, se presentan los insumos necesarios para su aplicación, así como sus especificaciones y configuración. El tratamiento de los insumos dependió de sus especificidades, datos disponibles y representatividad espaciotemporal.

2.2 Pendiente del terreno

Para la creación de un mapa de pendiente del terreno, se utilizaron los modelos digitales del terreno (MDT) proporcionados, los diferentes MDT fueron compilados en un mapa posteriormente recortado con la forma de la cuenca del río Maipo. El mapa de entrada para el modelo WetSpass se muestra en la Figura 8. En este mapa se observa que el punto más alto alcanza los 6.560 metros de altitud, mientras que el punto más bajo se encuentra al nivel del mar (0 m). La zona oriental de la cuenca presenta un relieve accidentado, asociado a la cadena montañosa de los Andes, aquí se pueden identificar varios valles relacionados con el desarrollo de la región hidrológica del Maipo.

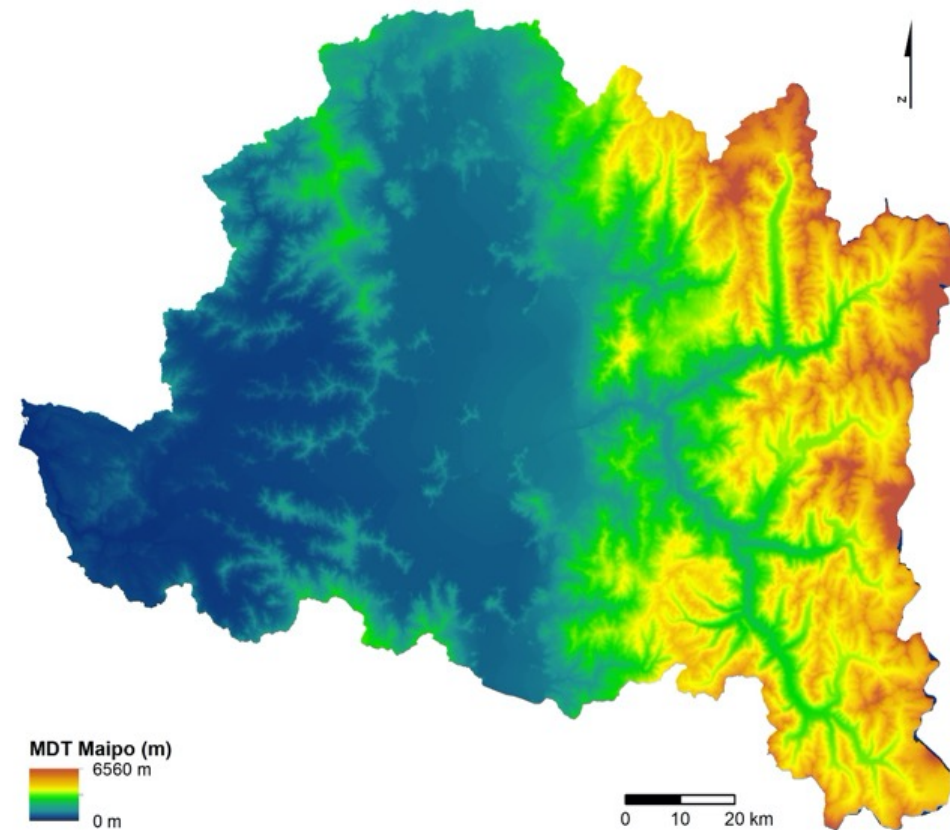


Figura 8 – Modelo digital del terreno.

En la Figura 9 se representa el mapa de pendiente de la cuenca Maipo, en grados. En este mapa se pueden identificar dos zonas bien delimitadas:

- 1) Una zona con mayor pendiente en la zona oriental, donde se observa con claridad la existencia de diversos valles de diferente extensión, que pueden estar relacionados a una red de escorrentía de aguas pluviales o a glaciares de mayor o menor dimensión.
- 2) Una zona central conformada por una planicie extensa, con eje norte-sur, donde se encuentra la región metropolitana de Santiago.

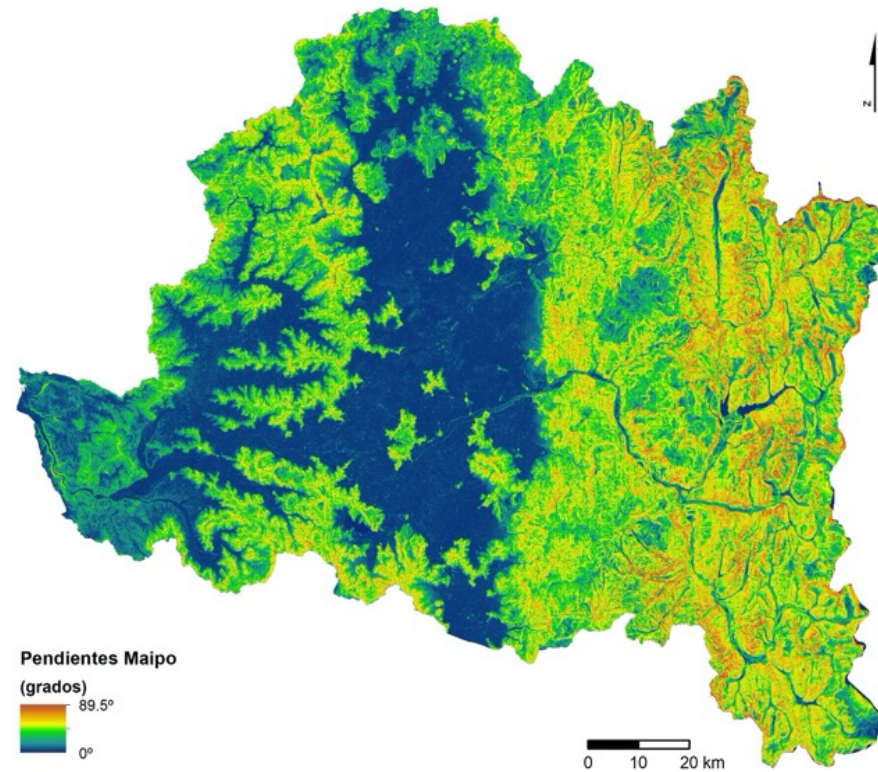


Figura 9 – Pendiente del terreno en la Cuenca Maipo

En la Figura 10 se muestra un histograma o gráfico de frecuencia de clases de la pendiente del terreno en la cuenca de Maipo, basado en el mapa de la Figura 9. En este gráfico se muestra claramente la predominancia de pendientes suaves entre 0 y 5 grados, a pesar de que también hay un área significativa con pendientes entre 6 y 30 grados.

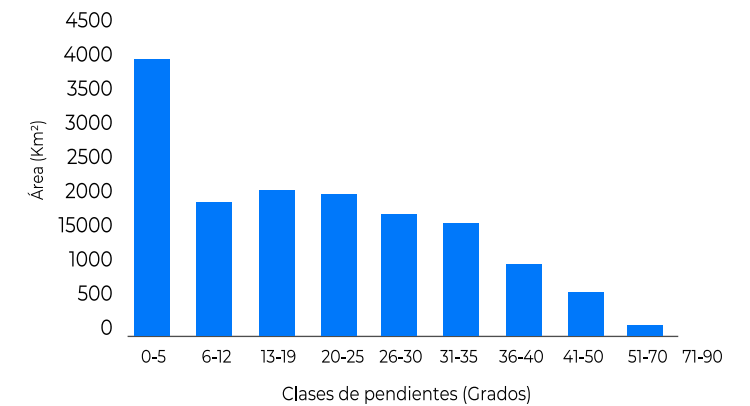


Figura 10 – Frecuencia de clases de pendientes del terreno.

2.3 Uso del suelo

El uso del suelo está directamente relacionado con la disponibilidad y calidad del agua subterránea. Por este motivo, en este estudio se presenta un análisis comparativo entre el uso del suelo en 1995 y 2016. Para eso se analizan las variables de recarga y riesgo de contaminación del agua subterránea por nutrientes para ambos años.

Este análisis está basado en información del estudio: “Análisis del estado actual de los ecosistemas terrestres asociados a dos cuencas en Chile central: Maipo y Maule” (Pliscoff, 2020), en el trabajo citado se delimitan espacialmente varios tipos de ecosistemas y se hace una categorización utilizando métodos de teledetección. Las categorías otorgadas al uso del suelo en la cuenca Maipo son las siguientes: Bosque espinoso interior, Bosque espinoso costero, Bosque esclerófilo, Bosque esclerófilo andino, Matorral esclerófilo, Matorral andino, Bosque caducifolio, Agricultura, Plantaciones forestales, Herbazal andino, Sin vegetación, Cuerpos de agua y Urbano.

Las categorías que ocupan mayor territorio son: “Sin vegetación” (17,9% en 1995; 19,6% en 2016), “Agricultura” (16,8% en 1995; 14,5% en 2016), “Bosque esclerófilo” (14,4% en 1995; 15,1% en 2016) y “Herbazal andino” (13,7% en 1995; 12,7% en 2016). La ocupación

correspondiente a las diferentes categorías en toda la cuenca, para los años 1995 y 2016, se presenta en el gráfico de la Figura 11.

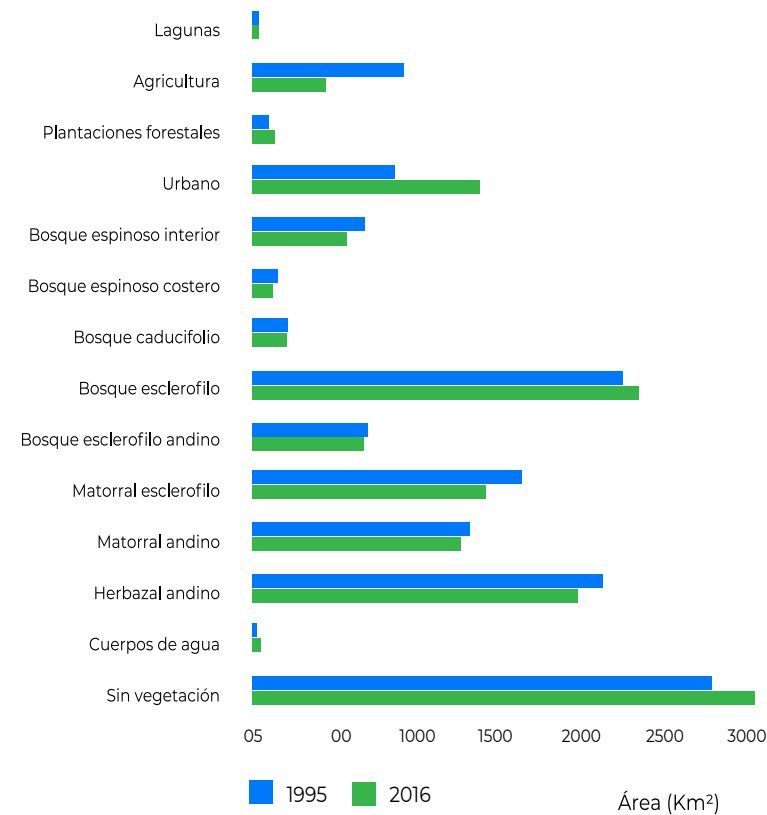


Figura 11 – Categorías de uso del suelo en la cuenca de Maipo, para 1995 y 2016.

El uso del suelo se presenta en la Figura 12 y Figura 13.

En las imágenes se observa que el uso del suelo en la región está fuertemente asociado a la geomorfología de la cuenca. Por este motivo hacia el este, en las zonas de montaña, se encuentran las áreas sin vegetación y herbazal. En la zona central, más plana, así como en la zona costera, el uso del suelo es dominado por la presencia de bosques, agricultura y zonas urbanas. Las áreas de matorral aparecen, normalmente, en zonas de transición. Entre 1995 y 2016 se registró un incremento significativo del área urbana, que pasó de ocupar un 5,5% en 1995 a un 8,9% en 2016. Esto representa un incremento próximo al 62%, especialmente perceptible en el área metropolitana de Santiago y zonas limítrofes. Otro fenómeno que se observa es la creciente fragmentación y discontinuidad espacial de las diferentes categorías, siendo un claro ejemplo las áreas de bosques nativos, matorral y herbazal.

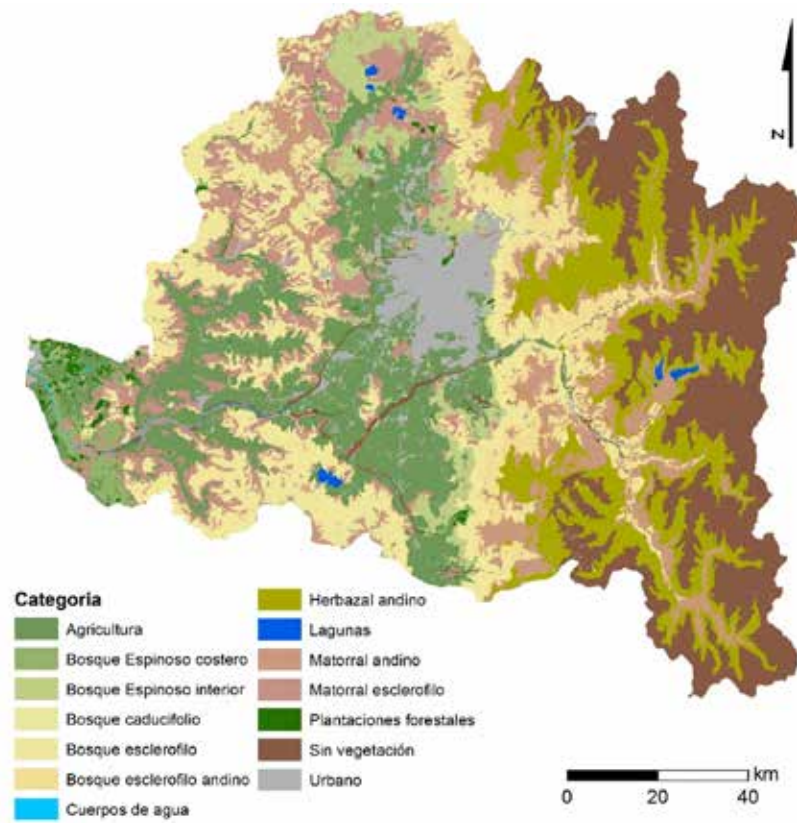


Figura 12 – Categorías de uso del suelo en 1995 (Pliscoff, 2020).

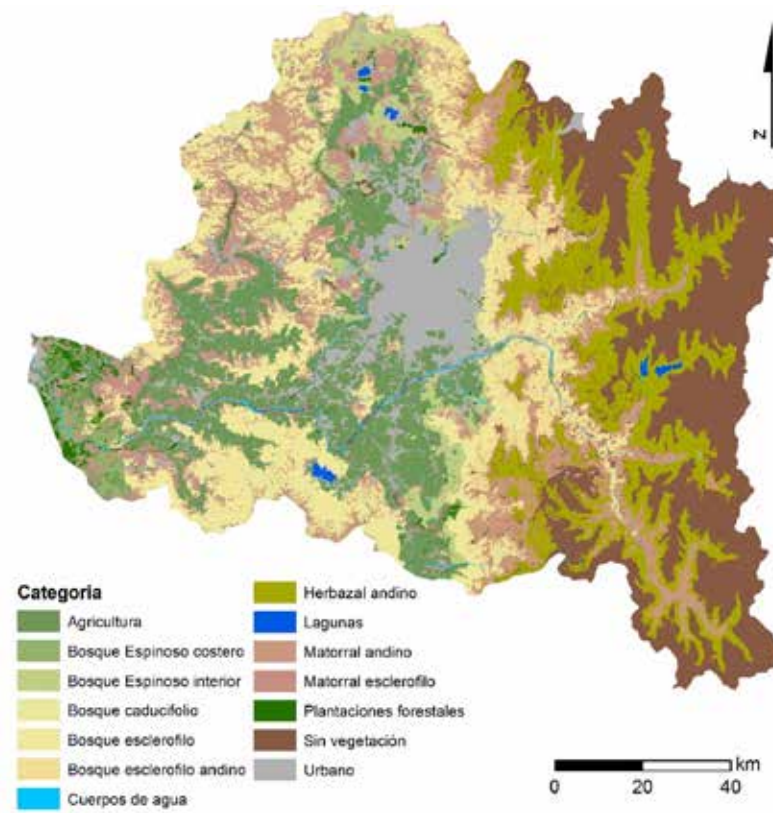


Figura 13 – Categorías de uso del suelo en 2016 (Pliscoff, 2020).

Aunque no fue significativo, algunas áreas en la zona este de la cuenca sufrieron una transformación de herbazal y matorral andino hacia áreas sin vegetación, sobre todo en zonas altas. Por otro lado, ocurrió una reducción en la superficie utilizada por las áreas agrícolas, que pierden conectividad debido a la expansión de las zonas urbanas.

Para cuantificar el impacto que los cambios en el uso del suelo provocaron en la recarga, ésta se recalculó para ambos años en el modelo WetSpass previamente generado. En este proceso, se llevó a cabo una reclasificación de las categorías originales de los mapas según las clases de WetSpass. Dicha reclasificación se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3 – Reclasificación de las categorías de uso del suelo de los años 1995 y 2016 a las clases de WetSpass.

Categorías de uso del suelo	Código Wetpass	Descripción WetSpass ¹
Bosque Espinoso interior	36	shrub
Bosque Espinoso costero	36	shrub
Matorral esclerófilo	33	mixed forest
Bosque esclerófilo	33	mixed forest
Bosque esclerófilo andino	33	mixed forest
Matorral andino	33	mixed forest
Herbazal andino	23	meadow
Sin vegetación	7	excavation
Cuerpos de agua/Lagunas	55	unnavigable river/open water
Bosque caducifolio	305	oak
Agricultura	21	agriculture
Plantaciones forestales	302	pine
Urbano	1	city center build up

1 – Se presentan los nombres en inglés para mantener la terminología original y poder identificarlos fácilmente en caso de realizar un análisis posterior en WetSpass.

La reclasificación se llevó a cabo utilizando la mejor correspondencia con las clases de WetSpass, ya que este modelo cuenta, por defecto, con 34 clases de uso del suelo con todos los parámetros necesarios. A cada uso del suelo original se le asignó un valor de código WetSpass con la finalidad de construir un mapa ráster con ellos.

Dichos códigos, además, corresponden con la tabla de referencia que tiene los atributos Landuse, a la que WetSpass recurre para obtener los parámetros y realizar los cálculos de balance hídrico celda a celda.

Los mapas de uso del suelo reclasificados para el estudio comparativo entre 1995 y 2016 se presentan en la Figura 14 y Figura 15, respectivamente.

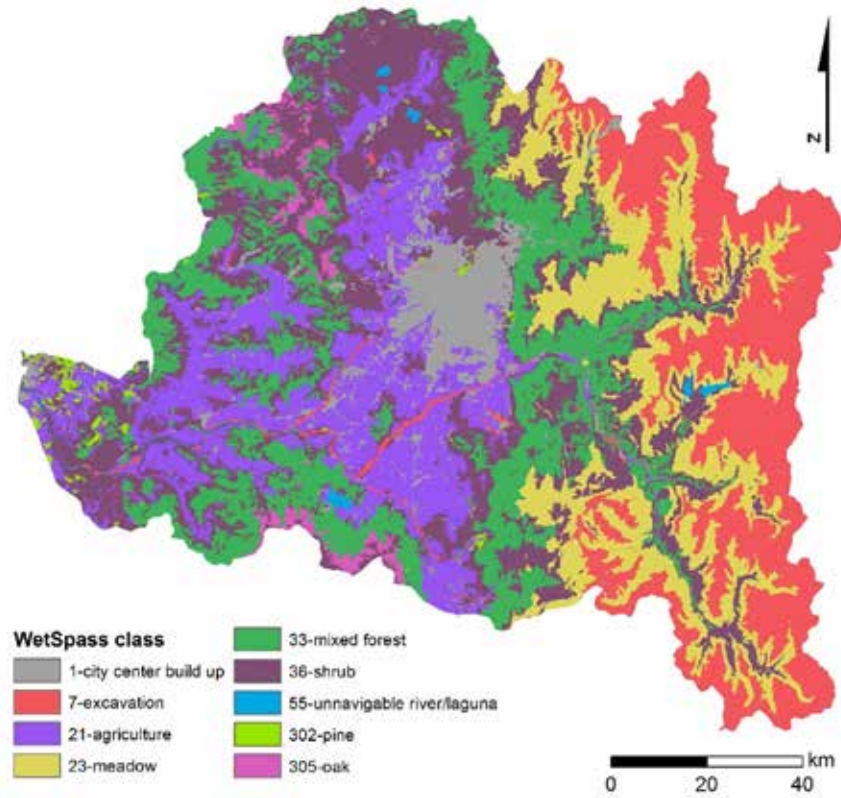


Figura 14 – Clases de WetSpass para el uso del suelo en 1995.

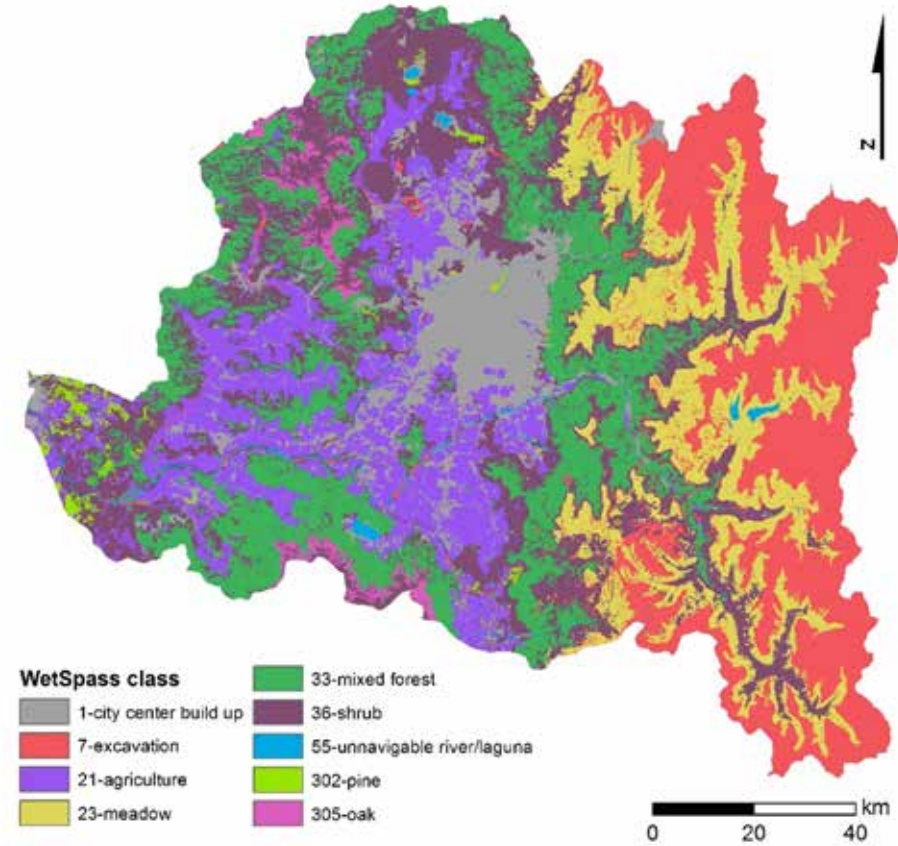


Figura 15 - Clases de WetSpass para el uso del suelo en 2016.

Para una mejor comprensión del significado de estos usos del suelo y sus parámetros, se recomienda la lectura del informe de avance: metodología del modelo y su aplicación para las cuencas seleccionadas, o los trabajos publicados por los siguientes autores: Batelaan & Smdet (2007) y Abdollahi et al. (2017).

Los atributos Vegetation, Bare Soil, Impervious y Open Water Area indican a qué componente corresponde el área de cada celda, la suma de estos componentes debe resultar en un valor igual a 1.

Tabla 4 - Parámetros considerados para cada clase¹.

CODE Código	LUSE_TYPE Tipo de uso del suelo	VEG. AREA % de área con vegetación	BARE AREA % de área sin vegetación	IMP. AREA % de área impermeable	OPENW. AREA % de área con agua	ROOT DEPTH (m) Profundidad de la raíz	LAI (-) Índice de área foliar	VEG. HEIGHT (m) Altura de la vegetación
3	Centro de ciudad	0.4	0	0.6	0	0.3	2	0.12
7	Sin vegetación	0	1	0	0	0.05	0	0.001
21	Agricultura	0.8	0.2	0	0	0.4	4	0.6
23	Herbazal	1	0	0	0	0.3	2	0.2
28	Pradera húmeda	1	0	0	0	0.3	2	0.3
33	Matorral	1	0	0	0	2	5	4
36	Bosques	1	0	0	0	0.6	6	2
37	Dunas/playas	0.3	0.7	0	0	0.5	2	1
52	Lagos	0	0	0	1	0.05	0	0
53	Glaciares	0	0	0	1	0.05	0	0
54	Mar	0	0	0	1	0.05	0	0
55	Ríos poco profundos	0	0	0	1	0.05	0	0
302	Pinos	1	0	0	0	2	6	15
305	Robles	1	0	0	0	2	4	17

1. Se presentan los nombres en inglés y español para mantener la terminología original y poder identificarlos fácilmente en caso de realizar un análisis posterior en WetSpass.

2.4 Textura del suelo

La información sobre la textura del suelo fue extraída del libro “The Soils of Chile” (Casanova et al., 2013) y compilada junto a la información del mapa geológico digital de Chile (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2003). El trabajo de Casanova et al. (2013) es extenso e incluye secciones de investigación sobre los tipos de suelo y su reconstrucción histórica, geomorfología, tipos de texturas principales, mapas, propiedades, clasificación y fertilidad de los suelos, así como su interacción con otros componentes y factores como el uso del suelo, la vegetación, la gestión de suelos y las acciones humanas.

A pesar de contener una considerable cantidad de información, el libro presenta mapas de baja resolución, con escalas grandes y un nivel de detalle insuficiente para los requisitos del presente trabajo. Este problema se intentó resolver relacionando la información geológica disponible y la información contenida en Casanova et al.

(2013). Así, las formaciones geológicas fueron reclasificadas en texturas de suelo, en base a los datos disponibles y los siguientes criterios: edad geológica del terreno (Era y Periodo) y tipo de composición litológica. Según los criterios definidos, durante la clasificación de las áreas correspondientes a las formaciones geológicas se respetó, en la medida de lo posible y con el mayor rigor, la información de Casanova et al. (2013). De esta manera, para cada formación geológica se asignó un tipo de suelo conforme con los tipos de textura de suelo. Los suelos están clasificados según las 12 clases del USDA (Departamento de Agricultura de EE.UU.) (Liu & De Smedt, 2004), en función del porcentaje de arena, limo y arcilla en su composición.

Los suelos de textura fina tienen un alto porcentaje de arcilla, son muy viscosos cuando están húmedos y muy duros cuando se secan, mientras que los suelos de textura más gruesa presentan altos porcentajes de arena y son suelos generalmente sueltos. La relación establecida entre la información geológica y los suelos se describe en la Tabla 5.

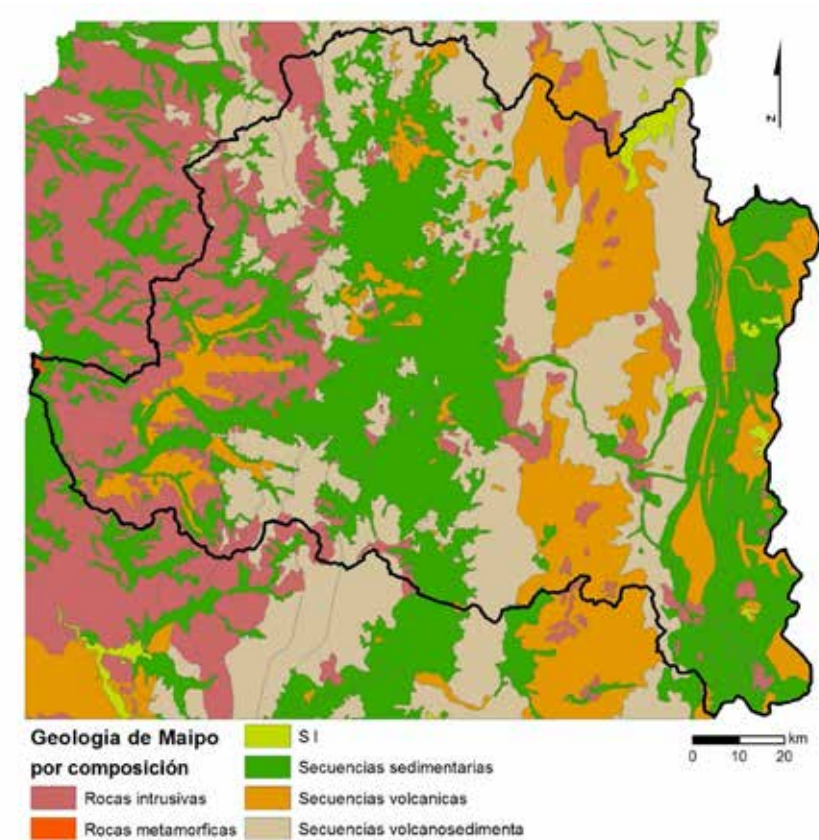


Figura 16 – Geología agrupada por tipo de composición litológica.

Tabla 5 – Relación entre la geología y la textura del suelo.

ERA	PERIODO	GEOLOGIA	COMPOSICIÓN	SUELO ¹	COD. WETSPASS
Sin Información	Sin Información	Sin Información	Glaciares	clay (glaciar)	12
Cenozoico	Cuaternario	Q1	Secuencias sedimentarias	loamy sand	2
Cenozoico	Cuaternario	Q1g	Secuencias sedimentarias	loamy sand	2
Cenozoico	Cuaternario	Q3i	Secuencias volcánicas	sandy loam	3
Cenozoico	Cuaternario	Q3av	Secuencias volcánicas	sandy loam	3
Cenozoico	Cuaternario	Qe	Secuencias sedimentarias	sand	1
Cenozoico	Cuaternario	Qf	Secuencias sedimentarias	sandy loam	3
Cenozoico	Neógeno	M3i	Secuencias volcánicas	clay loam	9
Cenozoico	Neógeno	Mh	Rocas intrusivas	sandy clayl	7
Cenozoico	Neógeno	PP1r	Secuencias sedimentarias	loamy sand	2
Cenozoico	Neógeno	Msg	Rocas intrusivas	sandy clayl	7
Cenozoico	Neógeno	Msh	Rocas intrusivas	sandy clayl	7
Cenozoico	Neógeno	M1c	Secuencias sedimentarias	loamy sand	2
Cenozoico	Neógeno	PI3	Secuencias volcánicas	sandy loam	3
Cenozoico	Neógeno	PI3t	Secuencias volcánicas	clay loam	9
Cenozoico	Neógeno	Mimg	Rocas intrusivas	sandy clayl	7
Cenozoico	Neógeno	MP1m	Secuencias sedimentarias	loamy sand	2
Cenozoico	Neógeno	PPI1c	Secuencias sedimentarias	loamy sand	2
Cenozoico	Neógeno	PPI1m	Secuencias sedimentarias	loamy sand	2
Cenozoico	Neógeno	PPI3	Secuencias volcánicas	sandy loam	3
Cenozoico	Neógeno	M3b	Secuencias volcánicas	clay loam	9
Cenozoico	Paleógeno	OM2c	Secuencias vulcano-sedimentarias	sandy loam	3
Cenozoico	Paleógeno	OM3b	Secuencias volcánicas	silty clayl	8
Mesozoico	Cretácico	Kia2	Secuencias vulcano-sedimentarias	sandy loam	3
Mesozoico	Cretácico	Ks2c	Secuencias vulcano-sedimentarias	sandy loam	3
Mesozoico	Cretácico	Kiag	Rocas intrusivas	clay loam	9
Mesozoico	Cretácico	Ki2c	Secuencias vulcano-sedimentarias	sandy loam	3
Mesozoico	Cretácico	Ks3a	Secuencias volcánicas	sandy loam	3
Mesozoico	Cretácico	Ki2m	Secuencias vulcano-sedimentarias	sandy loam	3
Mesozoico	Cretácico	Kia1c	Secuencias sedimentarias	loamy sand	2
Mesozoico	Cretácico	Ksh	Rocas intrusivas	clay loam	9
Mesozoico	Cretácico	Kia3	Secuencias volcánicas	sandy loam	3
Mesozoico	Cretácico	Ksg	Rocas intrusivas	clay loam	9
Mesozoico	Cretácico	KT2	Secuencias vulcano-sedimentarias	sandy loam	3
Mesozoico	Jurásico	Jsg	Rocas intrusivas	clay loam	9
Mesozoico	Jurásico	Js2c	Secuencias vulcano-sedimentarias	sandy loam	3
Mesozoico	Jurásico	J2m	Secuencias vulcano-sedimentarias	sandy loam	3
Mesozoico	Jurásico	JK1m	Secuencias sedimentarias	loamy sand	2
Mesozoico	Jurásico	Js1c	Secuencias sedimentarias	loamy sand	2
Mesozoico	Jurásico	J3i	Secuencias volcánicas	sandy loam	3
Mesozoico	Jurásico	Js1m	Secuencias sedimentarias	loamy sand	2
Mesozoico	Jurásico	Ji1m	Secuencias sedimentarias	loamy sand	2
Mesozoico	Triásico	TrJg	Rocas intrusivas	clay loam	9
Paleozoico	Paleozoico	CPg	Rocas intrusivas	sandy clayl	7
Paleozoico	Paleozoico	PzTr4	Rocas metamórficas	silty clay	11
Paleozoico	Paleozoico	DC4	Rocas metamórficas	silty clay	11

1 – Se presentan los suelos en inglés para mantener la terminología original y poder identificarlos fácilmente en caso de realizar un análisis posterior en WetSpass.

Un análisis rápido, de los diferentes tipos de textura en la cuenca del río Maipo, muestra que los suelos más comunes son arcillo-limosos de composición volcánica (silty clayl), así como suelos arcillo-arenosos y suelos areno-arcillosos. Por otro lado, la presencia de suelos arcillo-limosos asociados a rocas metamórficas (silty clay) y arcillas asociadas a zonas de glaciares (clay) es bastante residual en toda la región. El área ocupada por cada tipo de textura de suelo se muestra en la Figura 17.

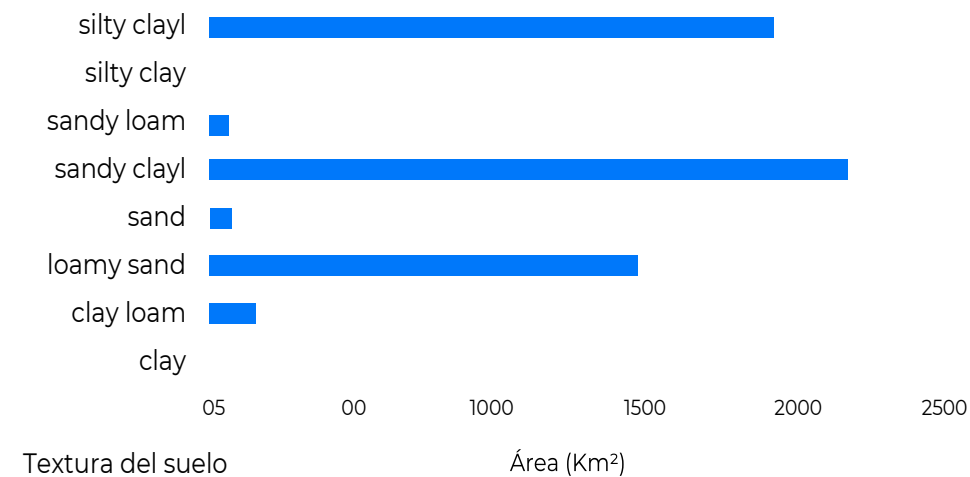


Figura 17 – Área ocupada por los diferentes tipos de suelo, con los nombres de las clases originales de WetSpass

Los parámetros utilizados en las simulaciones del modelo WetSpass, para cada tipo de suelo en la cuenca del Maipo, se describen en la Tabla 6. La descripción de cada parámetro para el cálculo de la recarga está detallada en Batelaan & De Smedt (2007) y Abdollahi et al. (2017).

Tabla 6 - Parámetros considerados¹.

CODE	SOIL	FIELD CAPAC	WILTING PNT PAW	RESIDUAL WC AI	EVAP DEPTH
1	Sand	0.12	0.05	0.07 0.02	0.51 0.05
2	loamy sand	0.15	0.07	0.08 0.035	0.47 0.05
3	sandy loam	0.21	0.09	0.12 0.041	0.44 0.05
7	sandy clayl	0.26	0.16	0.1 0.068	0.32 0.05
8	silty clayl	0.36	0.19	0.17 0.04	0.29 0.05
9	clay loam	0.33	0.19	0.14 0.075	0.27 0.05
11	silty clay	0.43	0.27	0.16 0.056	0.23 0.05
12	Clay (glaciar)	0.46	0.33	0.13 0.09	0.21 0.05

1. Se presentan los nombres de los parámetros en inglés para mantener la terminología original y poder identificarlos fácilmente en caso de realizar un análisis posterior en WetSpass.

Se consideraron los datos comprendidos en el periodo de abril de 1988 a marzo de 2018, para disponer de un registro de 30 años de datos. En la Tabla 7 se resumen las características de las estaciones.

En dicha tabla, además, se muestran las estaciones consideradas para rellenar las series de datos incompletos. En algunos casos se tuvieron que considerar varias estaciones simultáneamente

para rellenar los datos faltantes. Durante el año 2017, se generó un vacío de cinco meses de información común en todas las estaciones, de manera que se utilizó el promedio mensual correspondiente para rellenar los datos faltantes en este periodo.

El valor de precipitación, media anual, de cada estación se muestra en la última columna de la tabla.

Estaciones consideradas	N.º de valores medidos	Fecha inicial	Fecha final	Valores faltantes	Estaciones consideradas para rellenar datos faltantes	Precipitación promedio anual (mm)
ANGOSTURA EN VALDIVIA DE PAINE	315	Ene-88	Dic-15	57	CARMEN DE LAS ROSAS	355
ANTUPIREN	360	Ene-88	Dic-18	4	CERRO CALAN	403
CALEU	342	Ene-88	Dic-18	32	RINCON DE LOS VALLES	492
CARMEN DE LAS ROSAS	350	Ene-88	Dic-18	14	MELIPILLA	371
CERRO CALAN	361	Ene-88	Dic-18	3	RIO MAPOCHO EN LOS ALMENDROS	391
EL VERGEL	355	Ene-88	Dic-18	9	LOS PANGUILES	372
EL YESO EMBALSE	363	Ene-88	Dic-18	1	ANTUPIREN	597
ESTERO PUANGUE EN RUTA 78	342	Ene-89	Dic-18	20	LA ERMITA CENTRAL EN BOCATOMA;	304
ESTERO YERBA LOCA ANTES JUNTA SAN FRANCISCO	105	Ene-09	Dic-18	259	MELIPILLA ²	413
FUNDO LAS BATEAS	359	Ene-88	Dic-18	4	CERRO CALAN	294
FUNDO MARRUECOS	320	Ene-89	Dic-18	42	HUECHUN ANDINA	281
HUECHUN ANDINA	264	Ene-94	Dic-18	99	TERRAZA OFICINAS CENTRALES DGA	212
HUECHUN EMBALSE	352	Ene-88	Dic-18	11	HUECHUN EMBALSE, FUNDO LAS BATEAS	221
IBACACHE ALTO	358	Ene-88	Dic-18	5	RINCON DE LOS VALLES	368
LA DEHESA	165	Ene-91	Dic-07	199	CARMEN DE LAS ROSAS	392
LA ERMITA CENTRAL EN BOCATOMA	252	Ene-88	Dic-11	112	CERRO CALAN	400
LA OBRA RECINTO EMOS	274	Ene-95	Dic-18	90	ANTUPIREN, CERRO CALAN	611
LAGUNA ACULEO	314	Ene-88	Dic-18	49	CERRO CALAN	524
LAS MELOSAS	194	Ene-88	Dic-04	166	LOS PANGUILES	639
LOS GUINDOS	342	Ene-89	Dic-18	20	SAN JOSE DE MAIPO RETEN	473
LOS PANGUILES	360	Ene-88	Dic-18	4	CARMEN DE LAS ROSAS	302
MAITENES BOCATOMA	311	Ene-88	Dic-18	50	EL VERGEL	406
MALLARAUCO	307	Ene-92	Dic-18	56	SAN JOSE DE MAIPO RETEN	310
MELIPILLA	358	Ene-88	Dic-18	6	LOS PANGUILES	362
PIRQUE	363	Ene-88	Dic-18	-	CARMEN DE LAS ROSAS	410
RINCON DE LOS VALLES	355	Ene-88	Dic-18	17	-	261
RIO COLORADO ANTES JUNTA RIO OLIVARES	51	Ene-13	Dic-18	-	HUECHUN EMBALSE	423
RIO MAPOCHO EN LOS ALMENDROS	217	Ene-99	Dic-18	147	EL YESO EMBALSE, SAN GABRIEL ²	355
RUNGUE EMBALSE	315	Ene-88	Dic-16	47	CERRO CALAN	322
SAN GABRIEL	356	Ene-88	Dic-18	7	RINCON DE LOS VALLES	543
SAN JOSE DE MAIPO RETEN	357	Ene-88	Dic-18	7	MAITENES BOCATOMA	467
TERRAZA OFICINAS CENTRALES DGA	356	Ene-88	Dic-18	8	PIRQUE	303
					ANTUPIREN	

Tabla 7 – Estaciones consideradas para el estudio de la precipitación, estaciones utilizadas para completar las series de datos y promedio anual de lluvia.

2. relación multilineal.

2.5.2 Interpolación

Para la elección del método de interpolación, de los valores de precipitación, se tuvo en cuenta la distribución espacial de las estaciones y la relación entre los valores de precipitación y las características fisiográficas de la cuenca hidrográfica.

Debido a la presencia de áreas sin registros de precipitación, se optó por un método de interpolación denominado kriging con derivación externa (kriging with external drift) que considera la relación entre la precipitación y otras variables que afectan su distribución espacial. Si se observa una relación entre los valores de lluvia y las variables fisiográficas, se estima la precipitación para cada una de las estaciones utilizando esta relación y se cuantifican los residuos (valor observado – valor estimado). Los valores de los residuos en cada estación se interpolaron y fueron integrados en la metodología, la cual está basada en la relación multivariada entre precipitación y variables independientes. En los siguientes párrafos se explica la aplicación de este método a la cuenca de Maipo.

Utilizando como base las series completas de abril de 1988 a marzo de 2018 (30 años) en las estaciones mostradas en la Figura 19, se evaluó la relación de la precipitación con tres variables fisiográficas: altitud, coordenada X y coordenada Y.

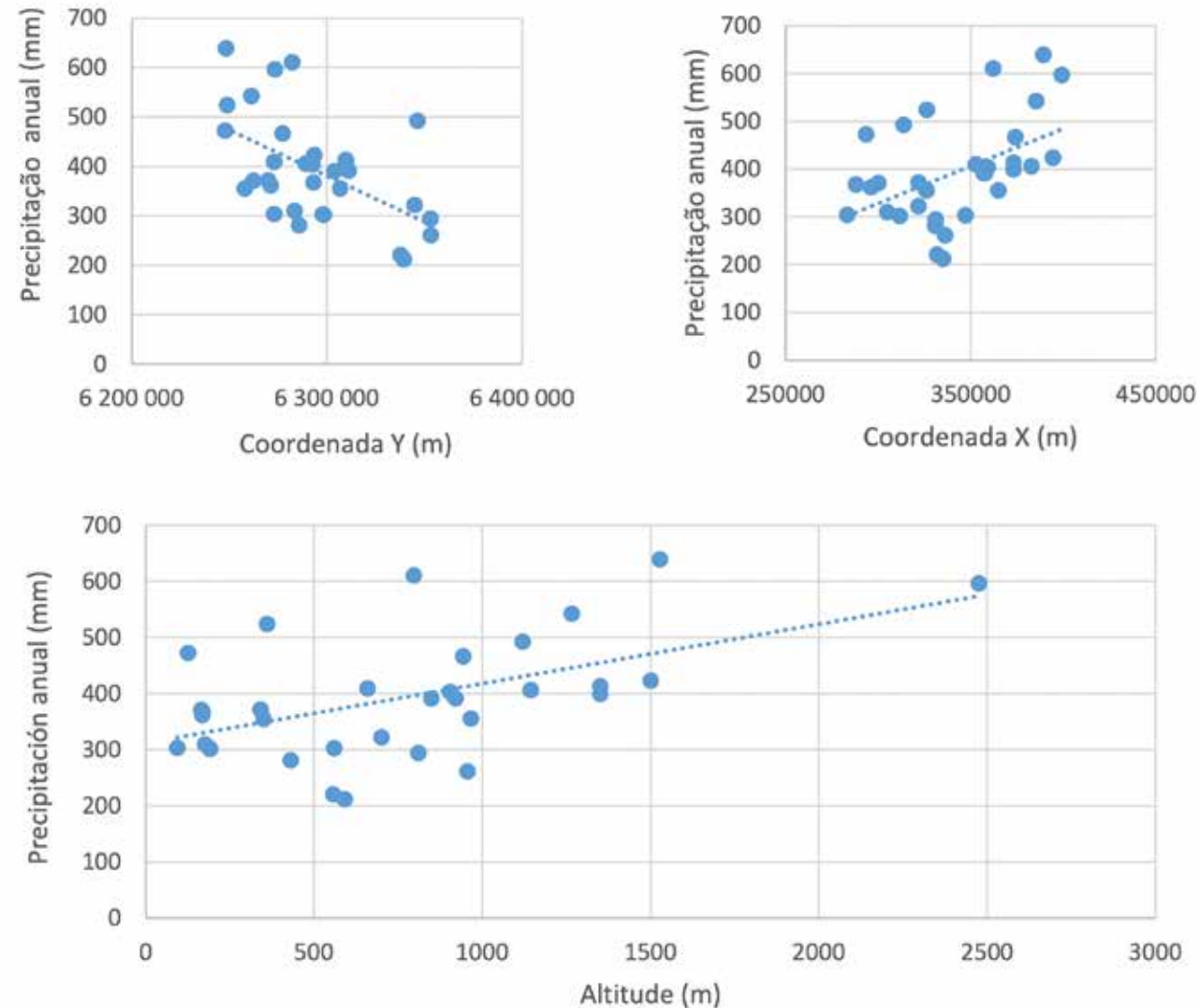


Figura 20 – Relación entre la precipitación anual y las variables fisiográficas evaluadas.

A pesar de tratarse de relaciones poco significativas, con un coeficiente de correlación de Pearson de -0,54 para la coordenada Y, 0,48 para la coordenada X y 0,53 para la altitud, se evaluó la relación lineal multivariada entre estas variables y la precipitación. A partir de este análisis se obtuvo la siguiente fórmula multilínea:

Precipitación promedio anual = $14905,49 - 2,28E-03*Y - 8,34E-04*X + 0,17*Altitud$
 Con la aplicación de esta fórmula, se obtuvo un coeficiente de correlación de Pearson entre los valores de precipitación observados y estimados del orden de 0,82, por lo que se considera una correlación significativa.

En la Figura 20, se muestra una gráfica con la diferencia entre los valores observados y estimados para cada una de las estaciones.

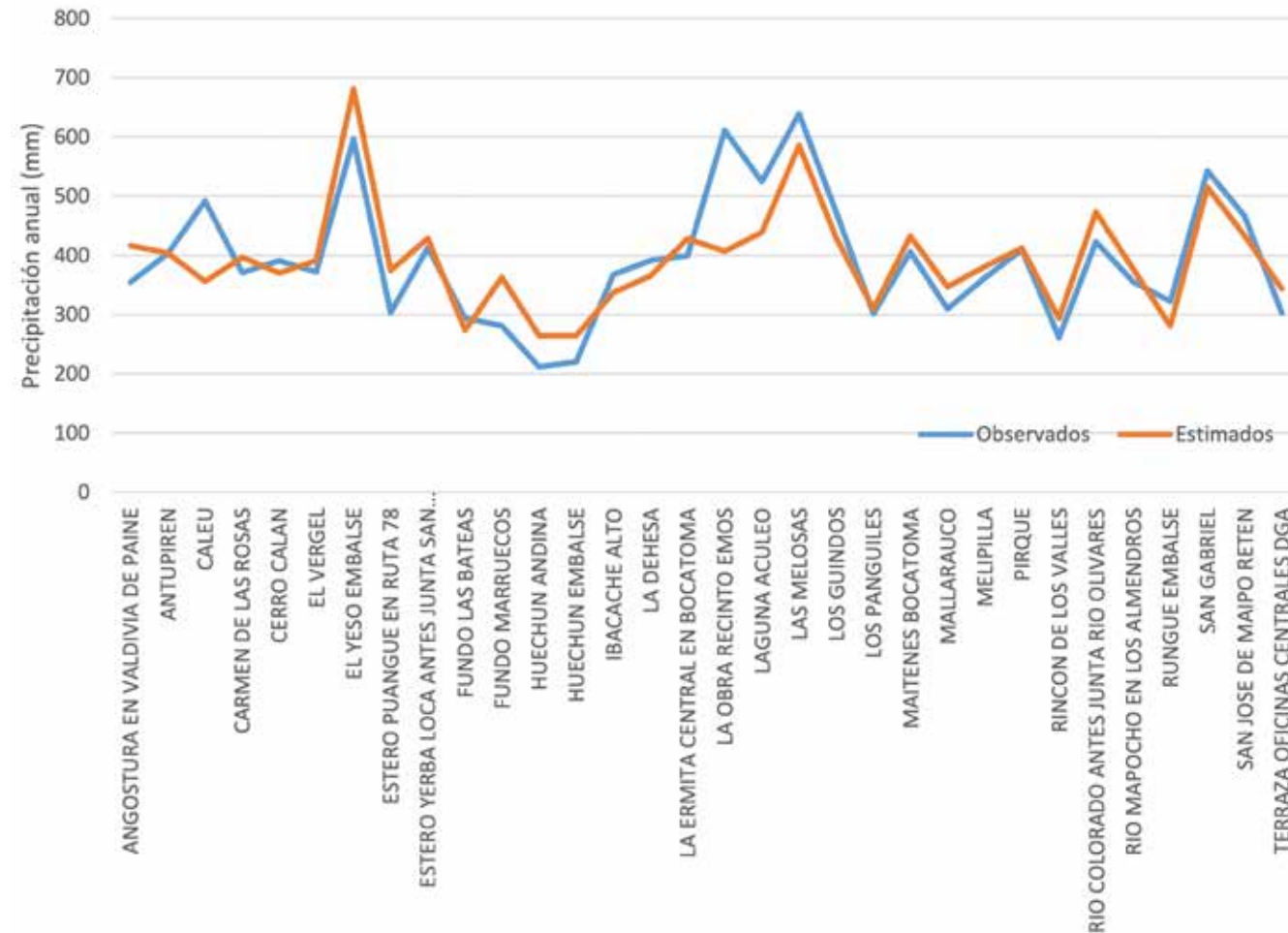


Figura 21 - Valores observados y estimados en las estaciones de monitoreo.

Como se observa en la gráfica, existe cierta diferencia entre los valores estimados y los observados, especialmente en la estación “La obra recinto Emos”. Sin embargo, se aprecia una buena aproximación entre las series en general, demostrando que la variabilidad de la precipitación promedio anual está relacionada con la localización y la altitud.

Debido a esta relación, significativa, se optó por considerar la fórmula multilínea para estimar la precipitación en áreas donde la información disponible era escasa. Además, para poder considerar el error asociado a esta estimación, se compararon los resultados con los residuos de kriging que resultan de la diferencia entre la serie observada y estimada en cada estación.

En la Figura 22 se muestra la interpolación de estos valores.

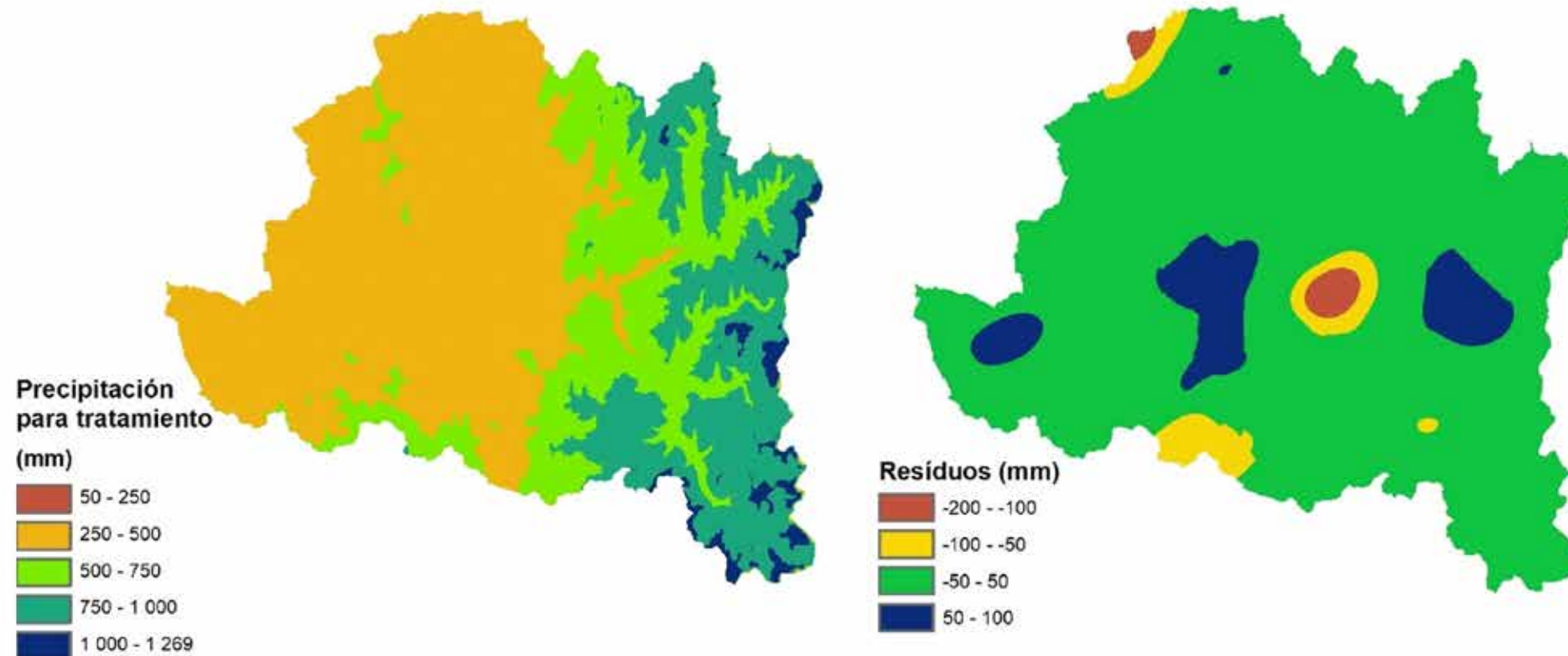


Figura 22 – Interpolación de la relación multilínea(izquierda) y de los residuos (derecha).

Para el cálculo final de los valores de precipitación promedio anual, se consideró la suma de los mapas anteriores. El resultado se muestra en la Figura 23.

En el mapa resultante (Figura 22) se observa un incremento del volumen de precipitación promedio anual hacia el este, debido a la altitud asociada a la orografía. En esta área, la lluvia presenta los valores más elevados en la cuenca alcanzando, la clase más representativa, valores superiores a 800 mm.

A pesar de haber extrapolado los valores de precipitación, en algunas áreas sin datos disponibles, la mayor parte de la cuenca está cubierta por estaciones. Esto reduce la incertidumbre del valor de precipitación considerado para WetSpass.

En la Figura 24 se muestra el histograma de los valores estimados donde se verifica que la clase más frecuente se sitúa en el rango de 200 a 400 mm.

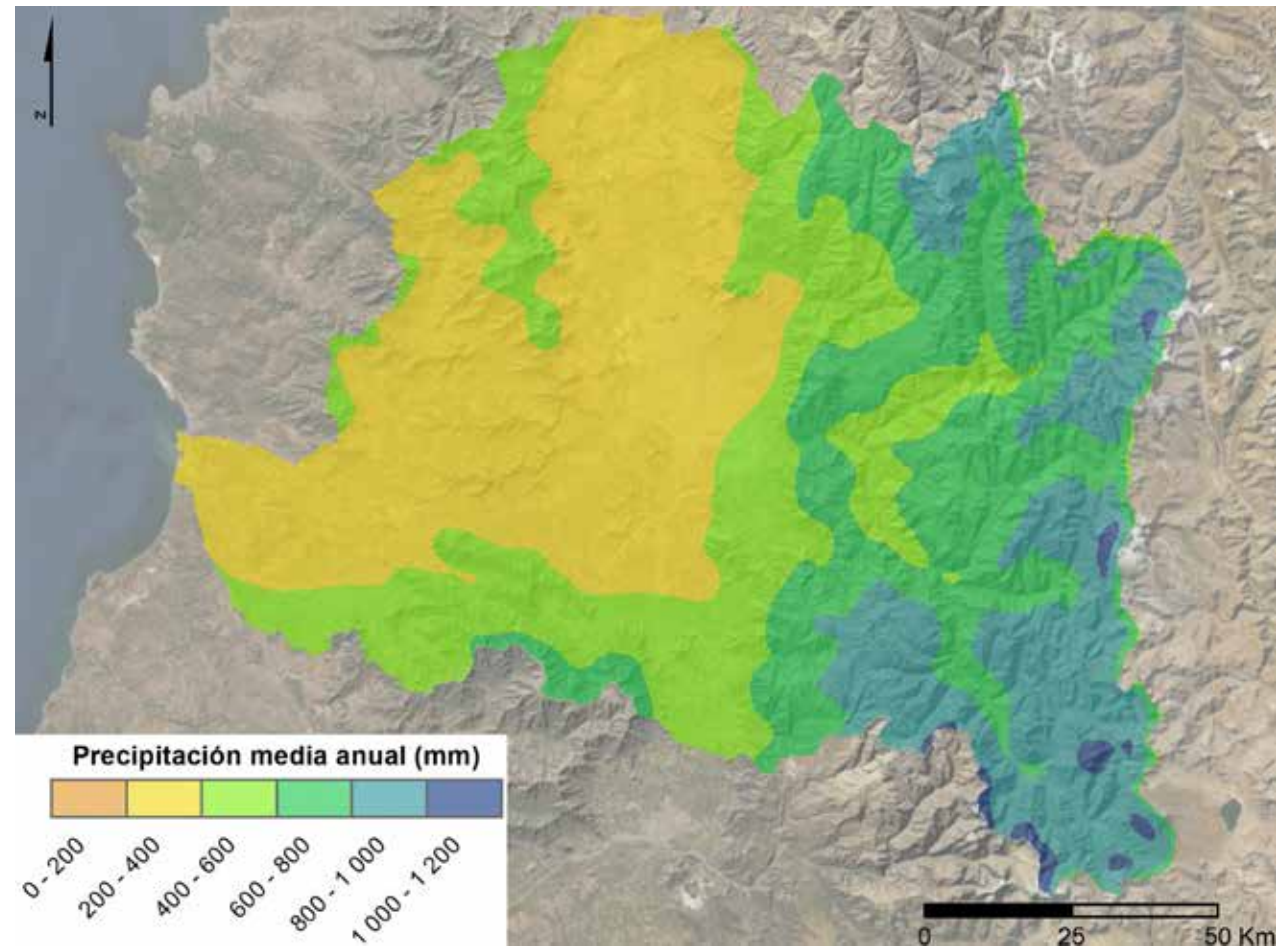


Figura 23 – Valores finales de precipitación promedio anual para el periodo 1988 – 2018.

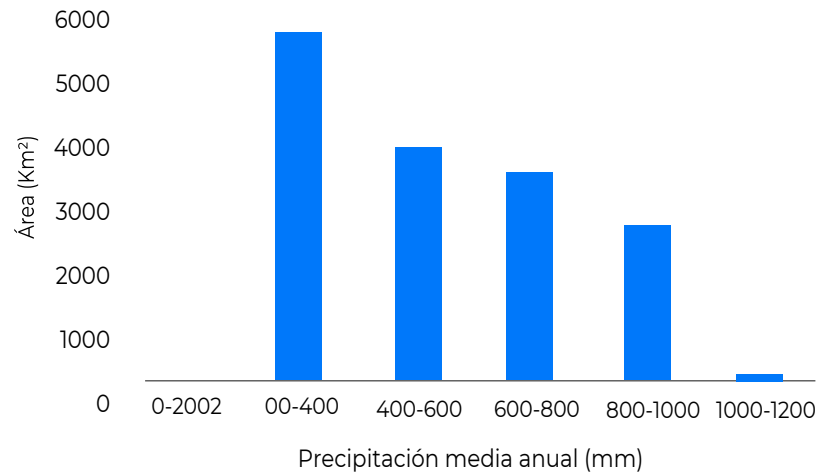


Figura 24 – Histograma de los valores de precipitación media anual estimados.

2.5.3 Tendencia de los valores de precipitación

Para estudiar si existe una tendencia temporal de descenso o incremento en las series de precipitación, se aplicó el método de Mann-Kendall con correlación estacional así como el método Thiel Sun para la determinación de la amplitud del cambio de las series de precipitación. En este tratamiento estadístico no se consideraron los valores faltantes del año 2017.

Con esta metodología se demostró que existe una tendencia estadísticamente significativa de descenso de los valores de precipitación. De las 32 estaciones analizadas, una presenta tendencia a incrementar, 15 presentan tendencia a disminuir y 16 no presentan ninguna tendencia. Sin embargo, estos descensos, a pesar de ser estadísticamente significativos, no se pueden discernir cuando se considera la amplitud de variación, estando ese valor muy próximo a 0.

2.6 Temperatura

La información de temperatura utilizada en la cuenca hidrográfica de Maipo, se basa en series de temperatura promedio en las 7 estaciones con registros más completos o aquellas ubicadas en zonas con información escasa.

En la Figura 25 se muestran las estaciones meteorológicas (temperatura) seleccionadas. Se puede observar que la cuenca está relativamente bien cubierta por ellas a excepción del área noreste y el límite sur entre las estaciones Laguna Aculeo y Controle.



Figura 25 – Localización de las estaciones meteorológicas (temperatura) utilizadas en el estudio.

Para calcular la temperatura promedio anual, de cada estación, se consideraron valores en el periodo comprendido entre abril de 1988 y marzo de 2018. En la Tabla 8 se resumen las características de las estaciones.

Tabla 8 – Valores de temperatura promedio anual.

Estación	Temperatura promedio anual (°C)
MELIPILLA	13.84
LAGUNA ACULEO	14.89
EL YESO EMBALSE	9.13
CERRO CALAN	16.84
PIRQUE	14.08
HUECHUN ANDINA	16.1
LOS PANGUILES	15.56

Para interpolar espacialmente los valores de temperatura promedio anual, se aplicó el método geoestadístico kriging, con el objetivo de generar un mapa de temperatura para el modelo WetSpass, representado en la Figura 26.

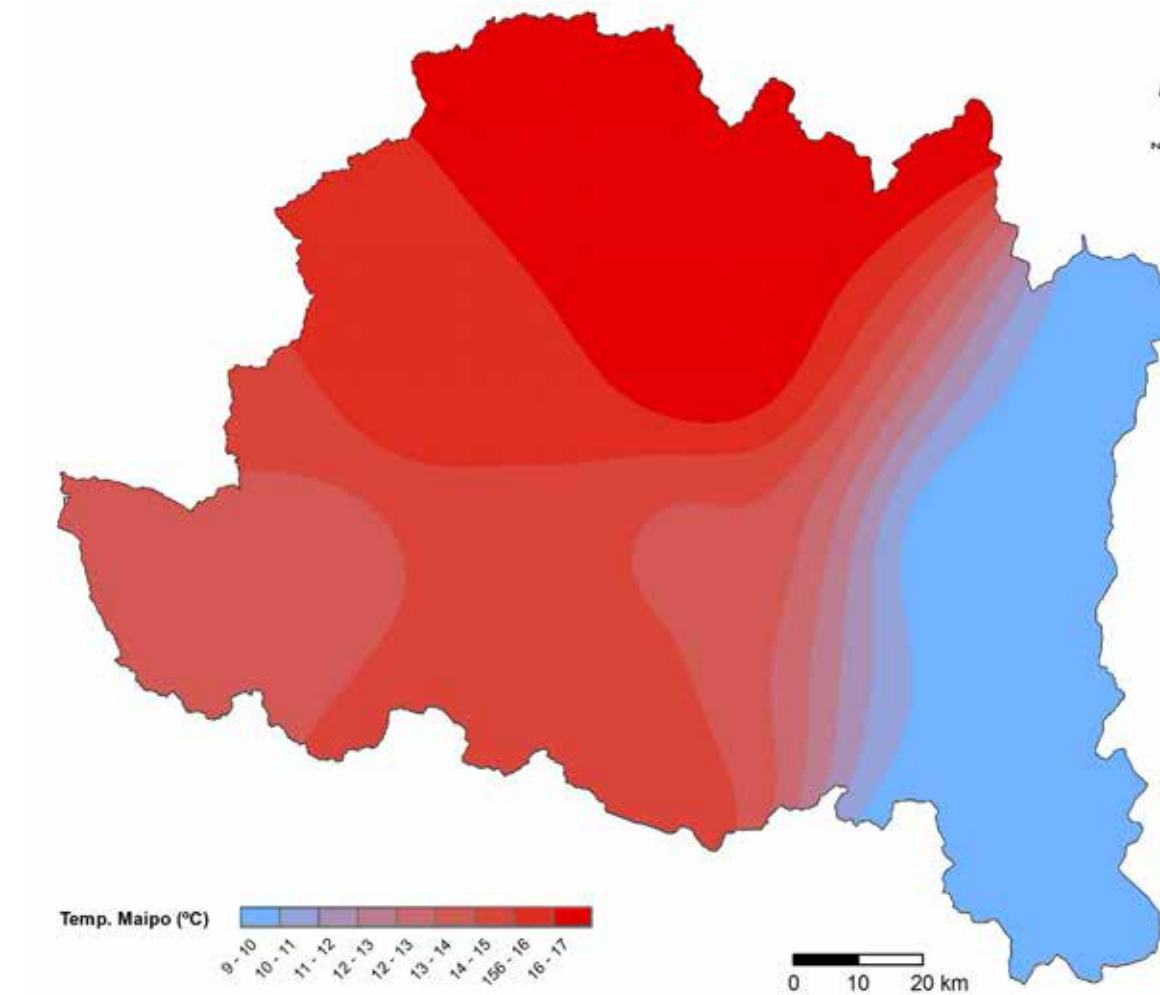


Figura 26 – Temperatura promedio anual en la cuenca hidrográfica del río Maipo.

El mapa de temperaturas muestra que los promedios anuales son más elevados en la zona norte de la cuenca, con valores entre 16-17°C, mientras que los valores más bajos se encuentran en las zonas más altas al este de la cuenca, con valores entre 9-10°C.

Según el análisis de frecuencia de clases, representado en la Figura 27, el rango de valores que presenta mayor recurrencia son los 15°C, que se dan, principalmente, en la zona central y occidental. Otro rango con recurrencia elevada es el intervalo más bajo, de 9-10°C debido a la elevación orográfica de la cuenca en la parte oriental. Finalmente, el intervalo más elevado entre 16-17°C, también es frecuente y abarca la zona central y septentrional.

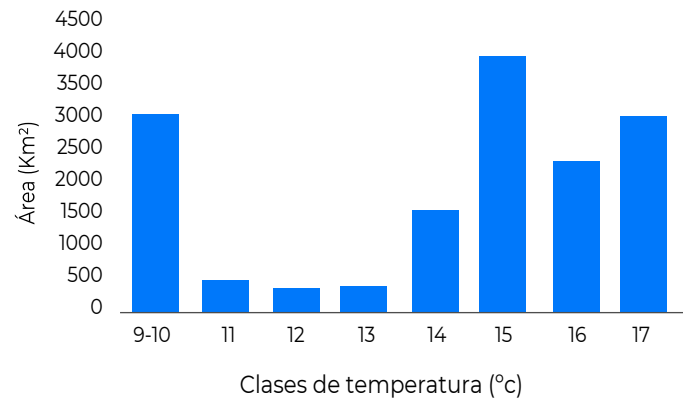


Figura 27 - Histograma de valores promedio de temperatura.

2.7 Evapotranspiración potencial

El mapa de evapotranspiración potencial para la cuenca de Maipo, fue obtenido a partir de la aplicación del Índice de Evapotranspiración de Precipitación Estandarizada (SPEI, por sus siglas en inglés), el cual fue calculado para el periodo 2000-2014 a partir de los productos satelitales CHIRPS V2 y MOD16 para la precipitación (Pp) y evapotranspiración (ET) respectivamente (Galleguillos et al., 2019). De acuerdo con los mismos autores, los resultados del déficit analizado desde la perspectiva del consumo hídrico evaluado a través de la ET real, nos indican que la cuenca de Maipo manifiesta un déficit hídrico real. El mapa para la evapotranspiración potencial para el quinquenio 2000-2014 está representado en la Figura 28.

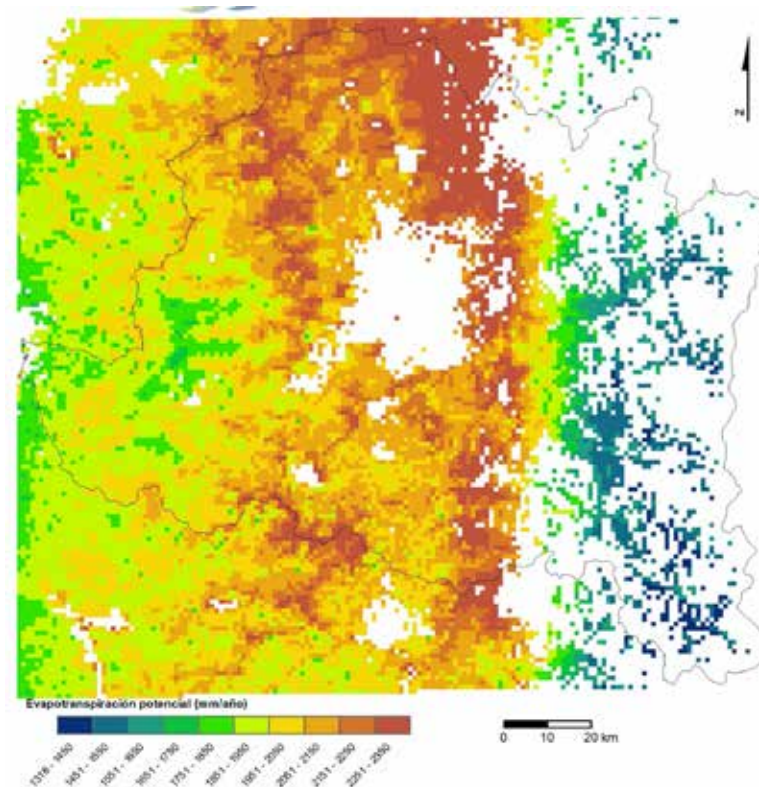


Figura 28 - Evapotranspiración potencial promedio anual para la región (fuente: Galleguillos et al., 2019).

Como se puede apreciar en este mapa, hay varias áreas que no tienen valores asignados. En este caso, se realizó un tratamiento estadístico de la imagen para llenar los vacíos del espacio, utilizando métodos geoestadísticos, es decir, el modelado geoestadístico por la inversa de los cuadrados. El mapa completo de la evapotranspiración potencial promedio anual para la cuenca del Maipo se muestra en la Figura 29.

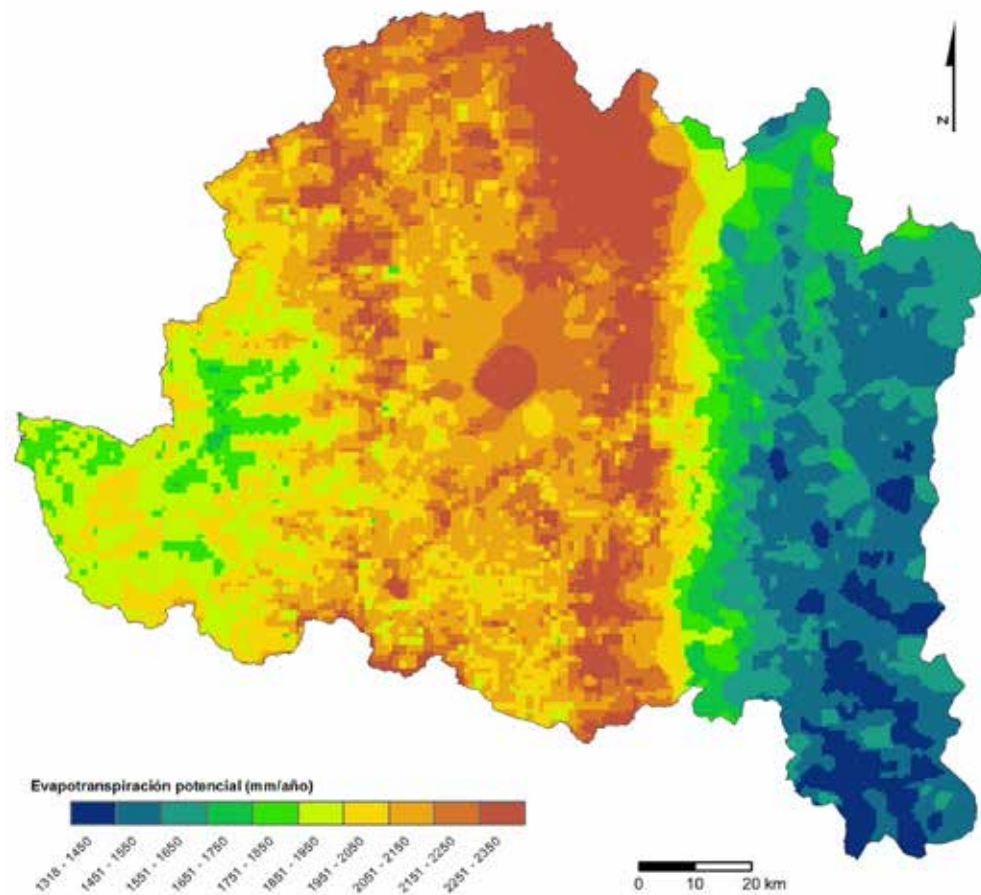


Figura 29 - Mapa completo de evapotranspiración potencial promedio anual para la cuenca de Maipo.

La zona central y centro norte manifiestan condiciones locales que generan mayores tasas de evapotranspiración, asociadas a exposiciones norte, de alta ventilación y con alta incidencia de días despejados al año. El efecto marino, atenúa estos regímenes al aportar mayor humedad y nubosidad constante que minimiza el calor sensible, regulando las tasas de mayor ETP.

Se optó por utilizar un mapa con valores promedio, donde las tasas de radiación solar son representativas de los valores anuales, para correr el modelo para el cálculo de la recarga en el escenario con el promedio anual de las condiciones hidrológicas.

Según el análisis de frecuencia de clases mostrado en la Figura 30, el rango de valores que presenta mayor recurrencia corresponde al intervalo de 2050-2150 mm/año, con mayor presencia en la zona centro. Sin embargo, cabe señalar que, en general, los valores de evapotranspiración potencial son muy elevados y con gran representatividad en toda la cuenca. Este aspecto se observa en la misma figura, donde se aprecia que existen grandes áreas con valores por encima de 1850 mm/año.

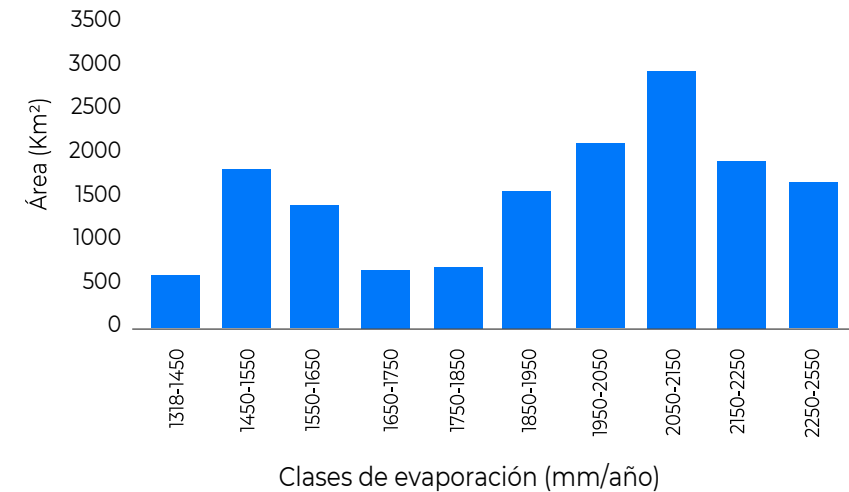


Figura 30 - Clases de frecuencia de evapotranspiración potencial promedio anual

2.8 Velocidad del viento

Los mapas de velocidad del viento se generaron a partir de información del Explorador de Energía Eólica (<http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Eolico2/>). Esta herramienta, muestra información sobre el recurso eólico basada en el uso de modelación numérica. Los modelos desarrollados proporcionan datos simulados con un modelo atmosférico de mesoescala, de manera independiente de las estaciones meteorológicas locales. El modelo empleado es el Weather Research and Forecasting (WRF) versión 3.2, que ha sido desarrollado por el NCAR (National Center for Atmospheric Research) en Estados Unidos y es ampliamente utilizado para la evaluación del recurso eólico a nivel mundial. Este modelo fue aplicado con una resolución espacial de 1 kilómetro y contiene 12 niveles verticales entre 0 y 200 metros de altura. Los valores se basan en simulaciones realizadas para el año 2010.

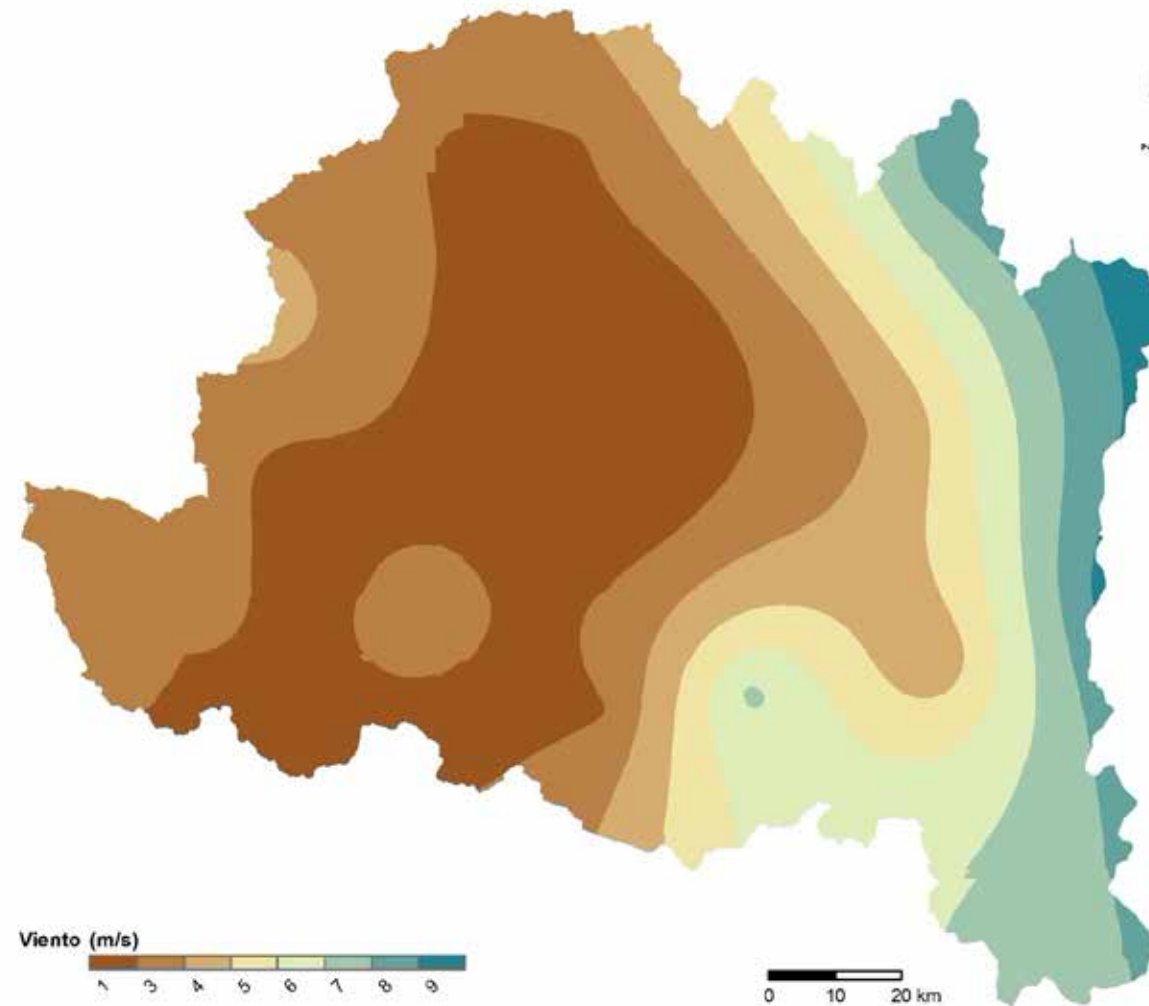


Figura 31 - Mapa de velocidad del viento.

2.9 Profundidad del nivel piezométrico

Para el cálculo de la piezometría¹ se partió de la información registrada por 121 piezómetros, de los cuales se seleccionaron 100, usando como criterio de selección que presentasen al menos 2 mediciones en 4 de los 5 años de análisis (mínimo de 8 mediciones entre 2015 a 2019 distribuidos por 4 años).

La concentración de piezómetros en el área central, asociada a pendientes del suelo más suaves, hizo necesario dividir la cuenca hidrográfica de Maipo en dos secciones para la generación de la piezometría:

- Área con información del nivel piezométrico – el nivel piezométrico fue interpolado directamente utilizando la información de los puntos;
 - Área sin información del nivel piezométrico – el nivel piezométrico fue interpolado a partir de la topografía.
- En la Figura 33 se muestran las dos áreas de cálculo y los valores promedio de la profundidad del nivel piezométrico registrado en el periodo 2015-2019.

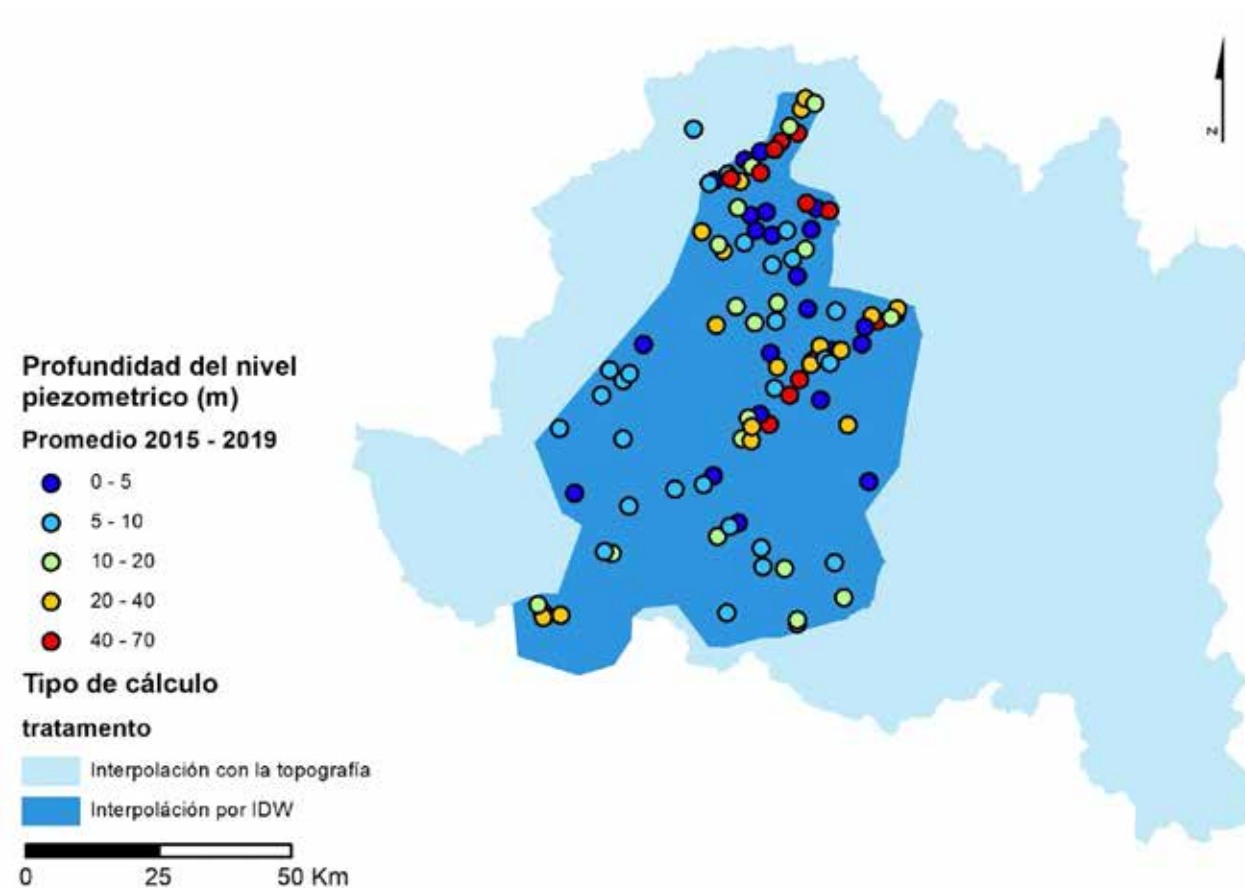


Figura 33 - Áreas de la cuenca según el tipo de cálculo realizado y valores promedio de la profundidad del nivel piezométrico periodo 2015-2019.

1. Piezometría o nivel piezométrico es la elevación del agua en un pozo en relación con una superficie horizontal especificada (datum de elevación) como el nivel del mar.

El promedio de los valores registrados muestra un nivel piezométrico más profundo en la zona norte y central. En el área restante, el nivel piezométrico se encuentra muy cerca de la superficie.

En el área con información piezométrica, se evaluó la posibilidad de interpolar los valores mediante el uso de kriging. Sin embargo, esto no fue posible debido a la ausencia de una estructura espacial en la red de puntos monitoreados. Esto se debe, al hecho de que el nivel está muy relacionado a acciones antrópicas y a su heterogeneidad asociada. De esta manera, se optó por interpolar los datos a través del método de la distancia inversa ponderada (IDW). En el caso del área sin información piezométrica, utilizando como base la información de los piezómetros del área anterior, fue posible establecer la relación entre elevación del nivel piezométrico y la altitud a través de la recta representada en la Figura 34.

La buena relación entre estas variables permitió determinar la ecuación a través de la recta de correlación: $y = 0,99x - 14,02$, que permitió estimar el nivel piezométrico para el área sin registro de niveles. Posteriormente, se calculó la diferencia entre el nivel piezométrico y la altitud para calcular la profundidad del nivel.

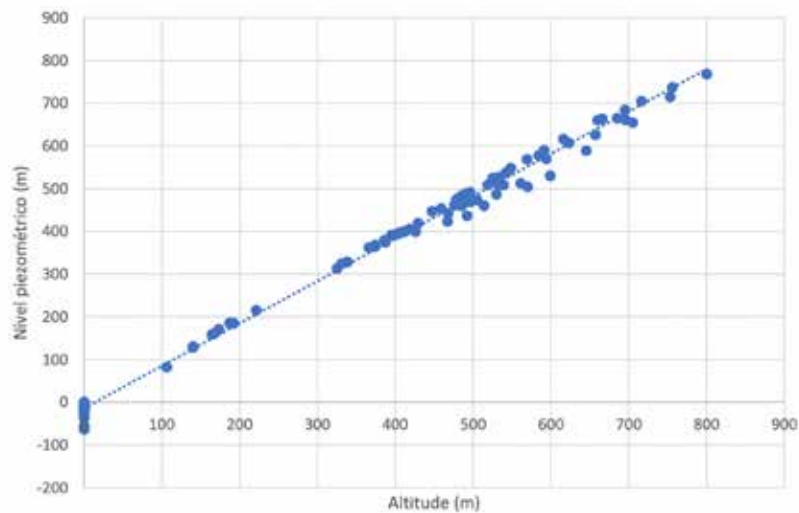


Figura 34 - Relación entre la altitud y el nivel piezométrico.

En la Figura 35 se muestra la profundidad del nivel piezométrico utilizada como insumo inicial para el modelo WetSpass.

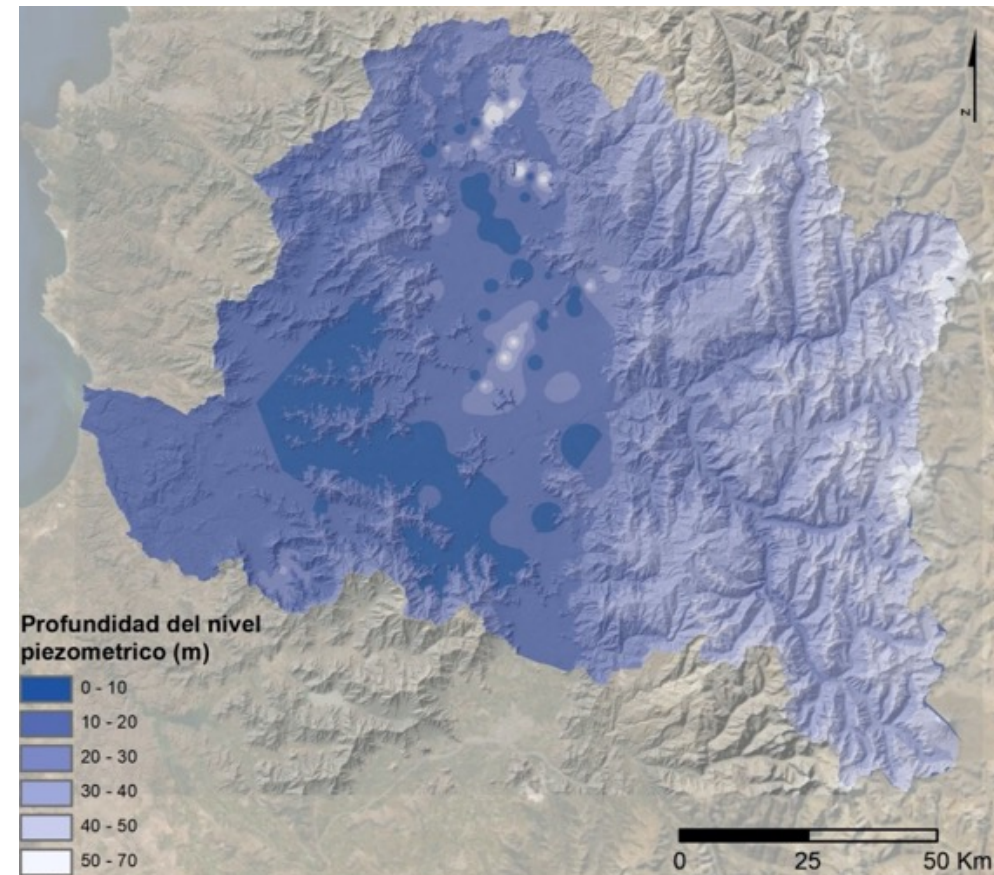


Figura 35 – Profundidad del nivel piezométrico en la cuenca Maipo

Con el objetivo de entender si el descenso del nivel piezométrico en la parte central y norte de la cuenca tiene causas naturales o antrópicas, se realizó un análisis de la tendencia temporal del nivel piezométrico.

En este caso no fue posible la aplicación de la metodología de Mann-Kendall debido a la falta de datos mensuales, de modo que se analizó la evolución de las medidas anuales. En la Figura 36 se muestra el análisis espacial de los resultados.

Los resultados muestran una clara sobreexplotación del agua subterránea en la región, lo que explica las mayores profundidades de la figura anterior en esta zona. Únicamente en 12 de los 61 puntos analizados se observa una tendencia de subida, mientras que los 49 puntos restantes muestran descenso de los niveles.

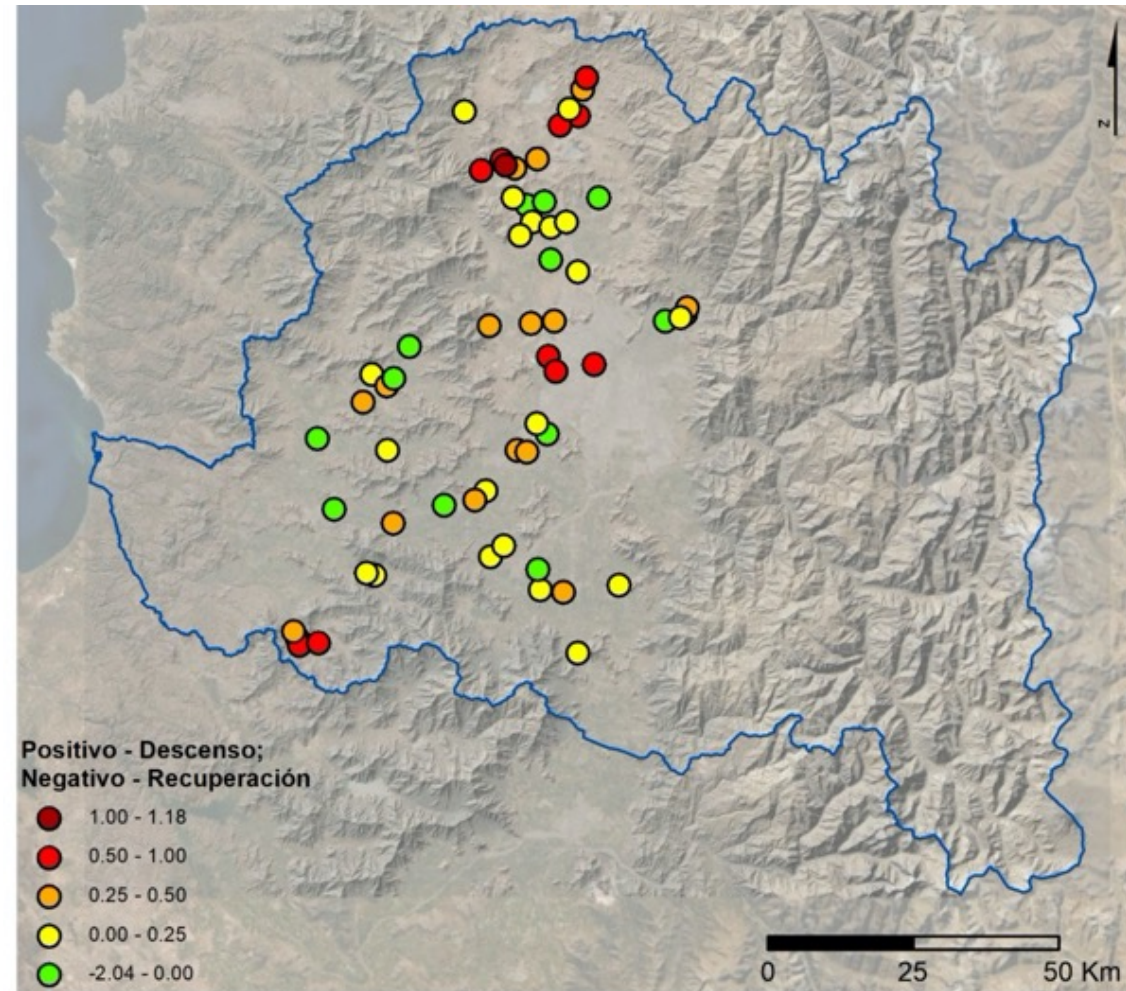


Figura 36 – Descenso de la profundidad del nivel piezométrico.

En la Figura 37 se muestra el ejemplo de la evolución del nivel piezométrico en 10 puntos de monitoreo donde se observa un claro descenso en los últimos 31 años (1988 – 2019).

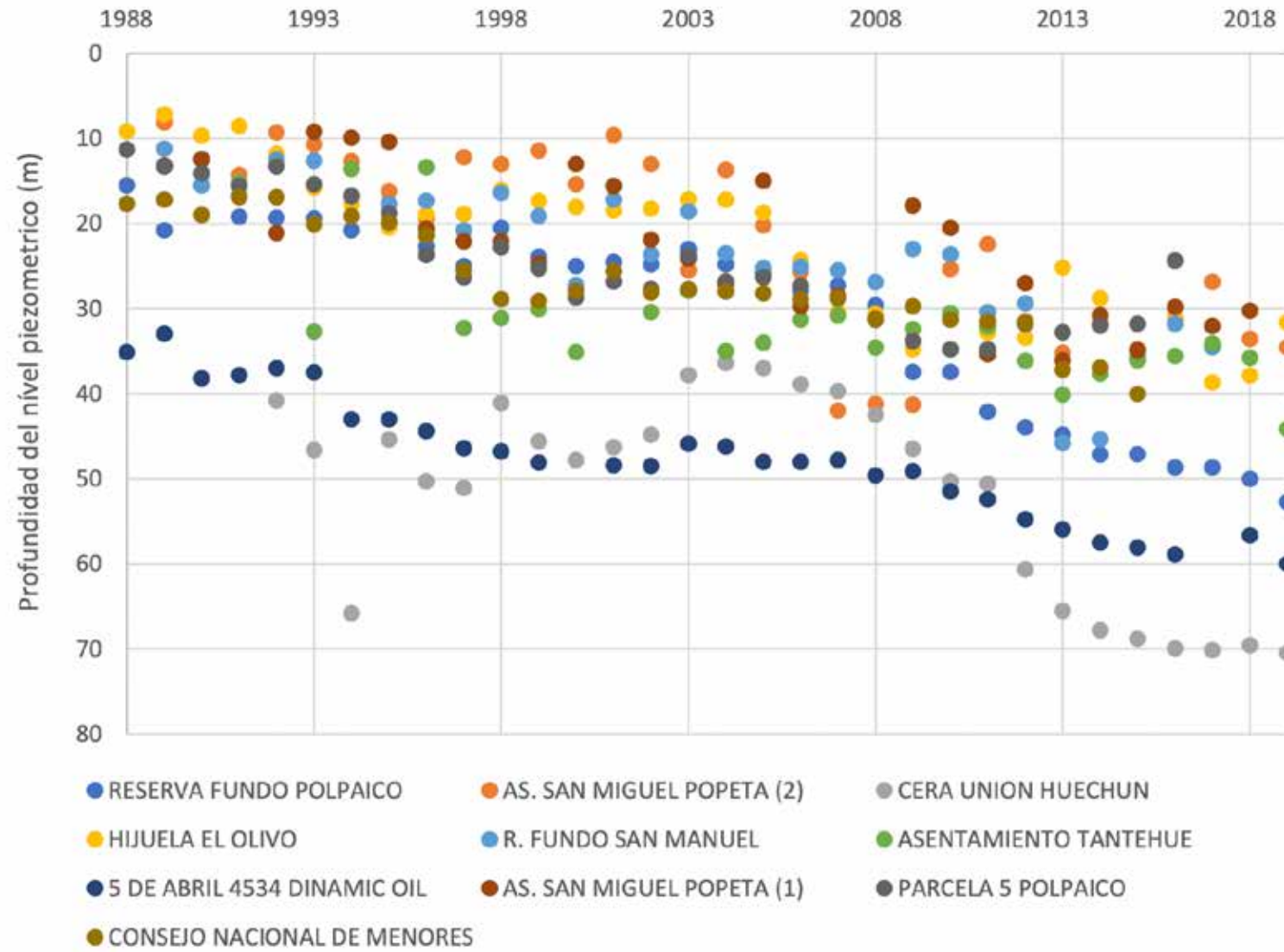


Figura 37 – Series de nivel piezométrico con tendencia descendente.

3.1 Suposiciones del modelo

Según los objetivos de este trabajo, el modelo WetSpass de la región hidrográfica del río Maipo se calcula para obtener un mapa de la distribución espacial de la recarga promedio anual.

Para ello, se tuvo en cuenta que el modelo sería resultado de la simulación a partir de mapas con valores promedio anuales de las variables de entrada. Por tanto, el modelo se realizó para un periodo anual y los mapas de entrada con valores mensuales no fueron necesarios.

Después de analizar la información base disponible, se fijó una resolución de 30x30 m para el modelo del presente trabajo. Todos los mapas fueron convertidos a esta resolución. Como se utilizaron varios modelos digitales del terreno para cubrir toda la superficie de la cuenca, se prestó especial atención al proceso de unión de éstos para evitar la pérdida de datos, así como errores en la compilación de esta información. Con este objetivo se definió un área rectangular con la siguiente extensión (en coordenadas WGS_1984_UTM_Zona_19S):

- Arriba: 6357255 m
- Izquierda: 254646 m
- Derecha: 431046 m
- Abajo: 6204705 m

Utilizando esta referencia espacial y la misma resolución en todos los mapas, se garantizó la homogeneidad de la información, generando archivos ráster con el mismo número de filas y columnas para todos los insumos. En este caso, todos los mapas incorporados al modelo WetSpass tenían 5880 filas y 5085 columnas.

3.2 Calibración

El proceso de calibración tuvo en cuenta información relativa a la recarga de aguas subterráneas disponible en el Diagnóstico Plan Maestro de Recursos Hídricos Región Metropolitana de Santiago, Informe Final Volumen 1 (2015). En este informe se calculó un promedio ponderado del volumen sustentable por la superficie de cada acuífero al interior de cada subcuenca.

Uno de los resultados de WetSpass es el cálculo de la evapotranspiración real en cada celda. Al comparar el mapa resultante del modelo con el mapa regional de evapotranspiración real proporcionado, se pudo comprobar la calidad de los resultados.

Otro resultado de WetSpass es la escorrentía superficial, la cual también fue considerada para efectos de calibración, principalmente para zonas urbanas y forestales, tal como la evapotranspiración real. Los parámetros relativos al uso del suelo fueron ajustados para obtener mejores resultados, así como los parámetros de calibración: el coeficiente de rugosidad de Manning (coeficiente de rugosidad de la superficie relacionado con el uso del suelo), o α (para el cálculo de Ch – un coeficiente que presenta las condiciones de humedad del suelo) y el coeficiente LP (un parámetro de calibración adimensional que reduce la evapotranspiración potencial en función de la humedad del suelo).

Discusión de resultados

4.1 Impacto por cambios en el uso del suelo

4.1.1 Recarga

La aplicación del modelo WetSpass para los usos del suelo en los años 1995 y 2016 permite conocer los impactos que los cambios en el uso del suelo provocaron en la recarga. Las simulaciones se llevaron a cabo teniendo en cuenta toda la información, previamente utilizada, para la calibración del modelo.

La Figura 38 muestra la recarga para el año 1995. En esta figura, se observa que las principales zonas de recarga en la cuenca ocurren hacia el sur de la región metropolitana debido a presencia de condiciones favorables de relieve suave y tipo de suelo arenoso.

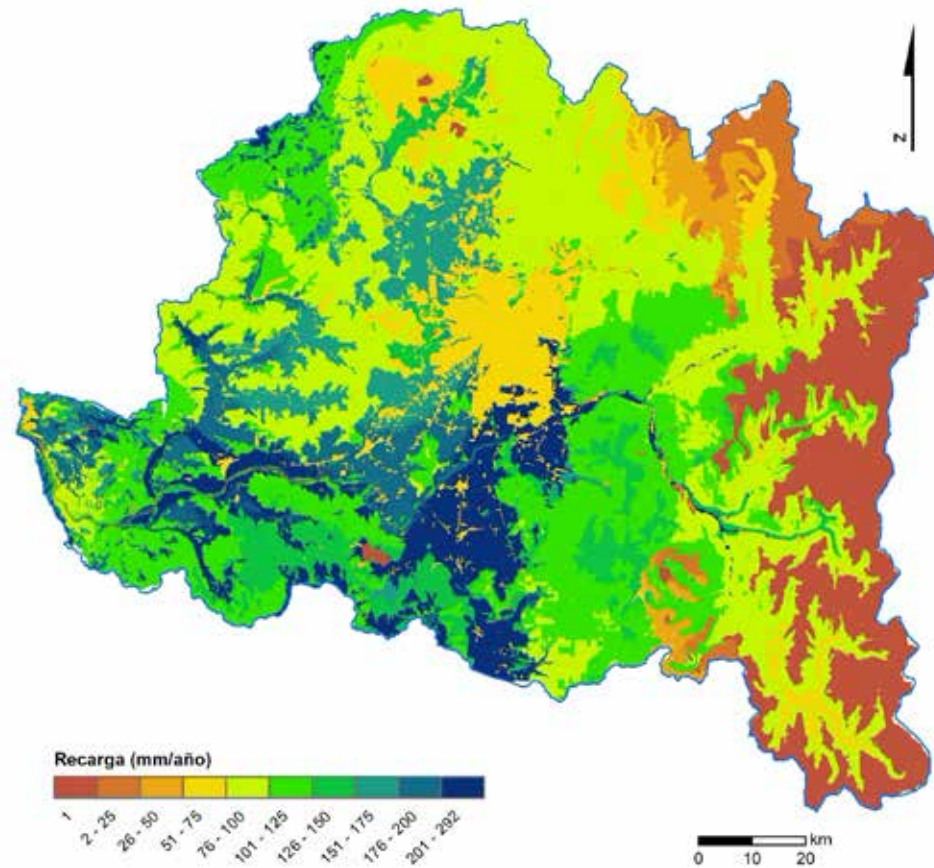


Figura 38 – Distribución de la recarga promedio anual en 1995.

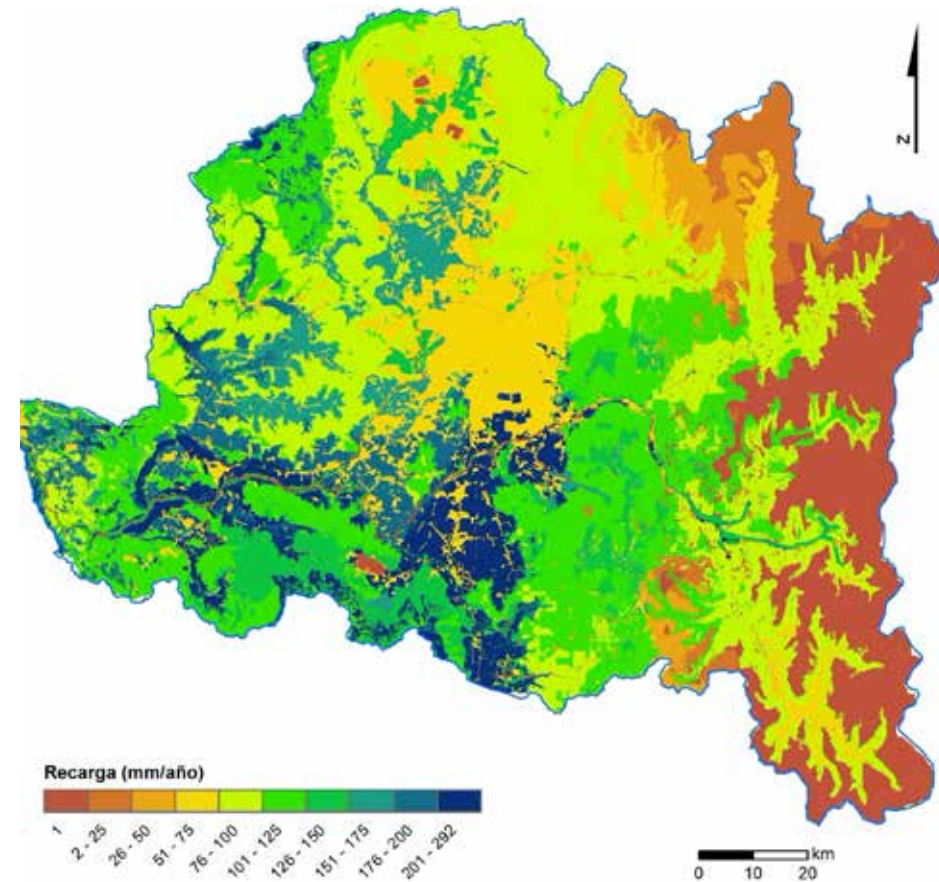


Figura 39 – Distribución de la recarga promedio anual el año 2016.

En la simulación utilizando el uso del suelo de 2016, la situación cambia ligeramente tanto a nivel cuantitativo como en términos de distribución de la recarga (Figura 39). Como se puede observar en la Figura 13, alrededor de 35000 has de terrenos agrícolas fueron convertidos a áreas urbanas durante el periodo analizado (1995 a 2016), provocando que la continuidad de éstas haya disminuido. Este hecho afecta la dinámica de los acuíferos locales, ya que las zonas agrícolas se localizan en áreas importantes para la recarga de los acuíferos regionales.

La recarga en 1995 es 47.9 m³/s (99 mm/año). Debido a este incremento del área impermeable (incremento de casi 53000 ha entre 1995 y 2016, total de 136200 ha en 2016), el promedio anual de recarga en 2016 disminuye a 45,0 m³/s (93 mm/año), lo que supone una disminución de 2,9 m³/s (6 mm/año) o del 6,1% respecto al 1995.

Los errores promedios de los balances hídricos para las simulaciones de los años 1995 y 2016 son muy próximos de cero. Sin embargo, las zonas con mayor incertidumbre se siguen concentrando en las zonas urbanas y en algunas áreas correspondientes a cuerpos de agua superficial, como lagos y ríos.

No obstante, las zonas identificadas con mayores valores de recarga se encuentran en áreas donde los errores de simulación son mínimos o muy próximos a cero, lo que permite considerar los resultados con un buen nivel de confianza.

La comparación entre los valores de recarga de 1995 y de 2016 se presenta en la Figura 40. Las clases con variaciones de valor (ya sean positivas o negativas) cuantifican si ha ocurrido un incremento o una disminución de la recarga (mm/año) entre los años analizados.

A nivel de interpretación, se considera que una variación inferior a 25 mm/año (ya sea positiva o negativa) no es significativa.

Si se observan las variaciones más importantes, se verifica una reducción de la recarga en la zona sur, causada por la conversión de terrenos agrícolas en áreas urbanas. Es decir, la urbanización e impermeabilización de suelos con tasas de infiltración considerables provoca cambios negativos de hasta -150 mm en los valores de recarga (Figura 40).

El incremento de la recarga en algunas áreas, asociada a modificaciones en la cobertura vegetal como cambios entre bosques, matorrales y zonas boscosas, no constituye un incremento tan significativo que pueda equipararse al impacto de las áreas donde tiene lugar una disminución.

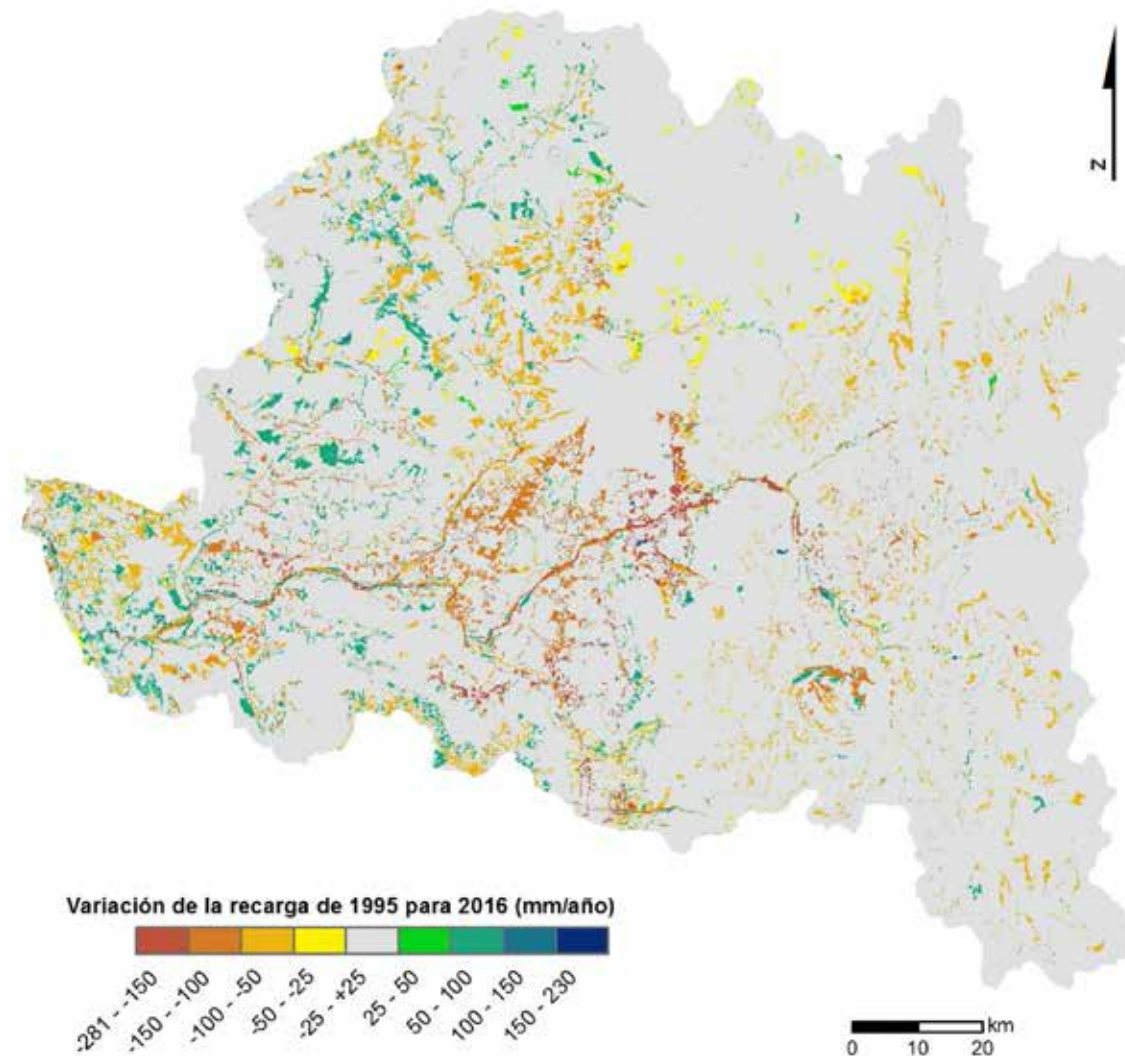


Figura 40 – Distribución y cuantificación de los cambios en los valores de recarga entre 1995 y 2016.

En general, entre los dos años analizados se observa una disminución de la recarga. Este cambio, visible en la Figura 41 presenta, como variación más significativa, la disminución entre 50 y 150 mm en un área de 1024 km².

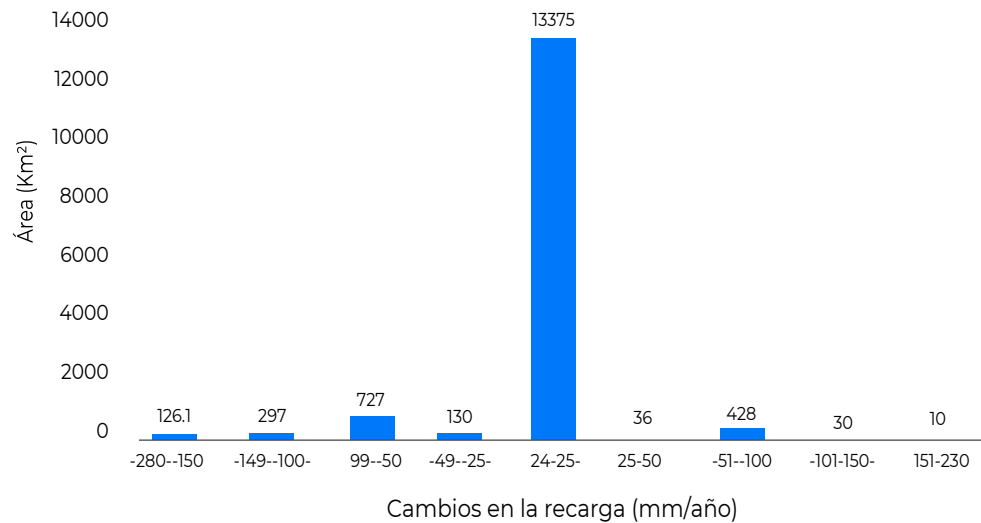


Figura 41 – Frecuencia de clases de cambios en los valores de recarga.

Con el objetivo de identificar las zonas preferenciales de recarga, se realizó una reclasificación de los valores de recarga para representarlos por cuartiles.

Se consideró que las áreas principales de recarga corresponden a los valores superiores al cuartil Q3 del total de celdas (>75%) y, por tanto, estas serían las zonas de conservación más importantes. Por eso, son áreas de especial interés para la gestión de la recarga de los acuíferos de la cuenca. Estos valores se basan en los resultados del uso del suelo de 2016, ya que se trata de los datos más recientes (Figura 42). En la siguiente tabla se muestran las estadísticas de estos rangos, así como su importancia para la recarga total de la cuenca. Se verifica que la clase Q3<Max., contribuye con un 46% de la recarga total (1415 hm³/año), mientras ocupa solamente el 25% de la superficie de la cuenca.

Tabla 9: Estadísticas de la distribución espacial de la recarga.

Rango de recarga	Área (km ²)	Mínimo (mm)	Máximo (mm)	Volumen total (hm ³)	Recarga Promedio (mm)	Contribución para la recarga total
< Q1	4621	0	71	125	27	9%
Q1 < Q2	2929	71	93	246	84	17%
Q2 < Q3	3839	93	121	399	104	28%
Q3 < Max.	3781	121	292	647	171	46%

En la Figura 42, se puede comprobar que las áreas de recarga preferenciales (entre Q3 y Max.) se sitúan en el área suroeste de la cuenca, coincidiendo con el área de mayores extracciones. Por otro lado, estas áreas están perdiendo continuidad espacial a medida que incrementa la impermeabilización del terreno.

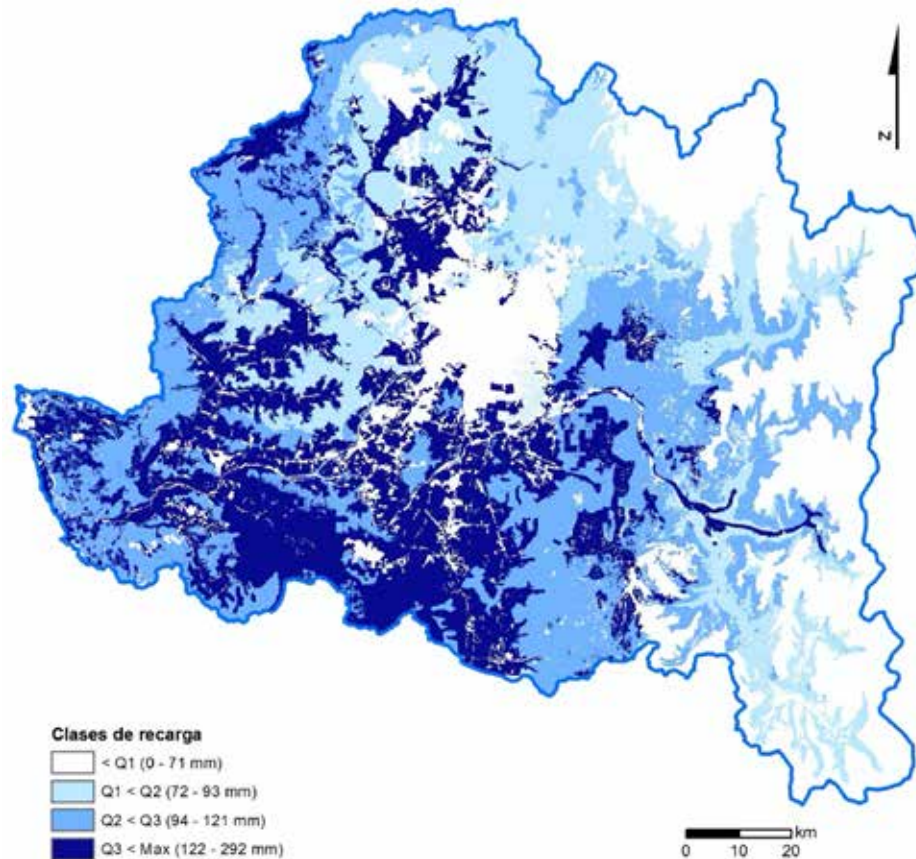


Figura 42 – Frecuencias de clase de la recarga en 2016.

4.1.2 Evaluación del riesgo de contaminación

Índice de susceptibilidad a contaminación

El análisis del riesgo de contaminación por nutrientes fue basado en el Índice de Susceptibilidad (IS). Este método es una adaptación del índice de vulnerabilidad DRASTIC (Aller et al., 1987) y fue propuesto por Ribeiro (2005), con aplicaciones a diferentes ambientes y casos de estudio a nivel mundial (por ej. Stigter et al., 2005; Ribeiro et al., 2017, Zhang et al., 2018). La novedad principal de este método fue el uso del parámetro LU (Landuse), que corresponde al uso del suelo, dejando atrás el concepto de un índice puramente intrínseco, basado únicamente en las condiciones naturales. En otras palabras, el IS fue desarrollado con el objetivo de evaluar la vulnerabilidad específica, que considera los impactos potenciales del uso del suelo y posibles contaminantes asociados a ese uso.

El IS se calcula a partir de la suma ponderada de valores otorgados a los siguientes parámetros: profundidad del nivel (D), recarga (R), material del acuífero (A), inclinación del terreno (T) y uso del suelo (LU). Los valores otorgados se representan en un rango de 1 a 100 para facilitar la lectura de los resultados.

La profundidad del nivel freático (D) indica el espesor de la zona no saturada. Esta es la distancia que atraviesa el agua infiltrada (que potencialmente contiene el contaminante) hasta alcanzar el acuífero. Cuanto menor sea la profundidad del nivel freático, mayor será la probabilidad del contaminante de alcanzar el acuífero.

La Recarga (R) es la cantidad de agua por unidad de superficie que alimenta el acuífero. Este proceso es el principal vehículo de entrada de contaminante, cuanto mayor sea la recarga, mayor será la probabilidad del contaminante de llegar al nivel freático.

El material del Acuífero (A) determina la movilidad del contaminante que lo atraviesa. Cuanto mayor sea el tiempo de movilización del contaminante en el acuífero, más mitigados serán sus efectos.

La Topografía (T) contribuye para el cálculo del índice en función de la pendiente. Cuanto mayor sea la pendiente, menor será el potencial de contaminación, debido al incremento de la escorrentía superficial.

El parámetro LU define el tipo de uso del suelo. Para ello, el uso del suelo se divide en clases, aplicando la clasificación que se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10 – Puntuación del tipo de uso del suelo.

Ocupación del suelo	Puntuación
Áreas agrícolas	
·Regadíos (cultivos anuales, ...)	90
·Cultivos permanentes (viñas, huertos, oliveras, ...)	70
·Áreas agrícolas heterogéneas	50
·Pastos y áreas agroforestales	50
Áreas artificiales	
·Descargas de residuos industriales y vertederos	100
·Canteras, astilleros, minas a cielo abierto	80
·Áreas urbanas continuas, aeropuertos, puertos, vías férreas, áreas con actividades industriales y comerciales, ...	75
·Áreas urbanas discontinuas	70
Áreas naturales	
·Ambientes acuáticos (marismas, salinas, etc.)	50
·Bosques y zonas seminaturales	0
·Cuerpos de agua	0

Los pesos otorgados a cada parámetro para la ponderación se basaron en un panel DELPHI elaborado por especialistas en hidrogeología (Tabla 11).

Después de calcular el índice para cada celda, los resultados se clasifican en 8 grupos, donde los valores más elevados indican un mayor riesgo de contaminación.

Tabla 11- Parámetros y factores de ponderación de IS.

Parámetro	D	R	A	T	LU
Ponderación	0.186	0.212	0.259	0.121	0.222

Aplicación de IS a la cuenca Maipo

Los resultados de la aplicación de IS a la cuenca Maipo se muestran en la Figura 43 y Figura 44, para los usos del suelo de 1995 y 2016, respectivamente. Se observa que el área de estudio presenta una distribución muy variable del riesgo de contaminación, especialmente condicionada por la presencia de terrenos agrícolas y por el tejido urbano existente en la cuenca.

Las clases de riesgo más elevadas están claramente vinculadas a áreas agrícolas (hacia el sur y suroeste de Santiago). Este resultado está asociado a las prácticas agrícolas y a la presencia de terrenos poco inclinados con una composición arenosa significativa.

La zona metropolitana de Santiago presenta un riesgo “Moderado a bajo”. Este resultado viene determinado por los bajos valores de recarga calculados por el modelo WetSpas, así como por la mayor profundidad del nivel piezométrico (20 a 30 m de profundidad).

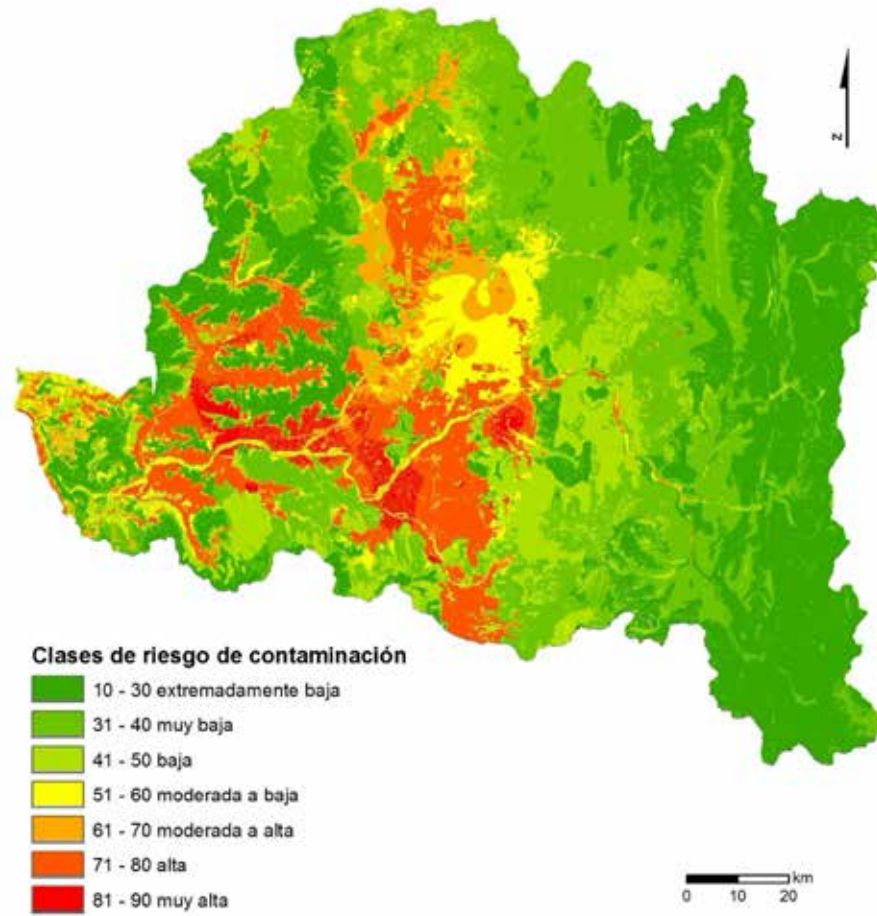


Figura 43 – Mapa de riesgo de contaminación para el año 1995.

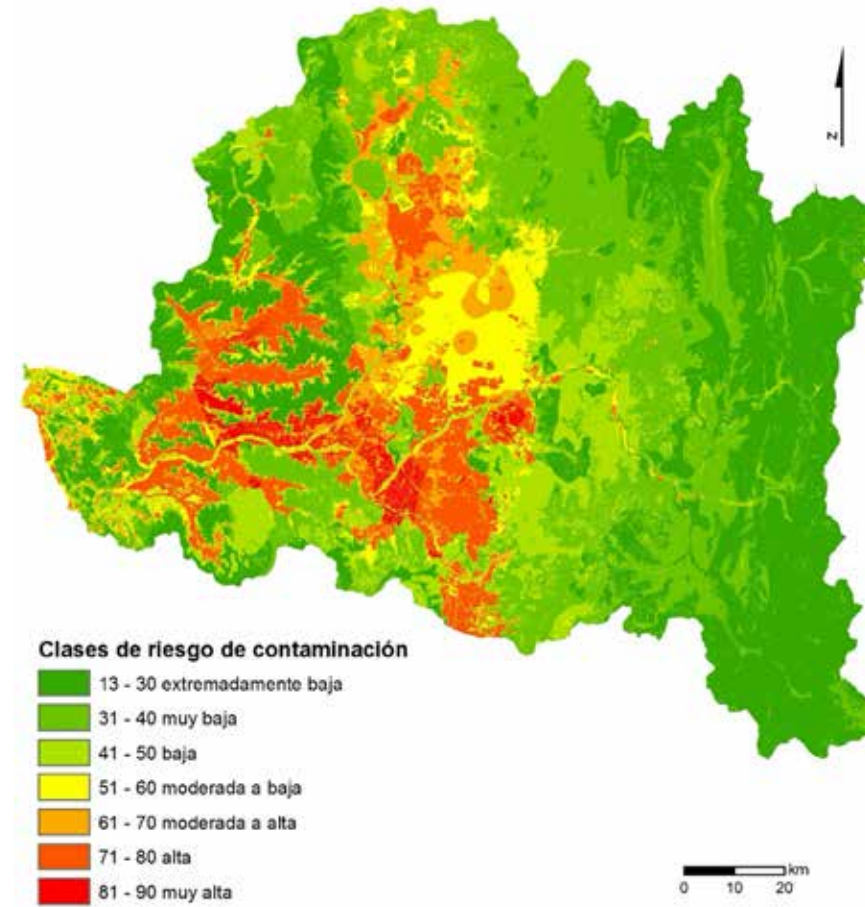


Figura 44 – Mapa de riesgo de contaminación para el año 2016.

Para cuantificar los cambios en el riesgo de contaminación entre 1995 y 2016 en base a los cambios en el uso del suelo, se elaboró un mapa con la diferencia de valor entre ambos años (Figura 45).

De manera general, se puede concluir que el riesgo de contaminación es similar en los años 1995 y 2016. Existen algunas zonas puntuales distribuidas por toda la cuenca donde el riesgo incrementa, esencialmente asociado con el cambio de matorrales y bosques esclerófilos a tierras agrícolas, aunque su presencia es mayor en pequeñas áreas del centro-norte y oeste-suroeste. A pesar de ser zonas reducidas, estos cambios provocan un incremento significativo de la vulnerabilidad de entre 11 y 30 valores, suficiente para incrementar dos clases de riesgo (por ejemplo, de “Moderada a baja” en 1995, pasar a “Alta” en el 2016).

Por otro lado, debido a la urbanización e impermeabilización de áreas agrícolas hacia el sur de Santiago, se observó que algunas de esas zonas evolucionaron positivamente, es decir, el riesgo de contaminación se redujo como consecuencia de la disminución de la recarga.

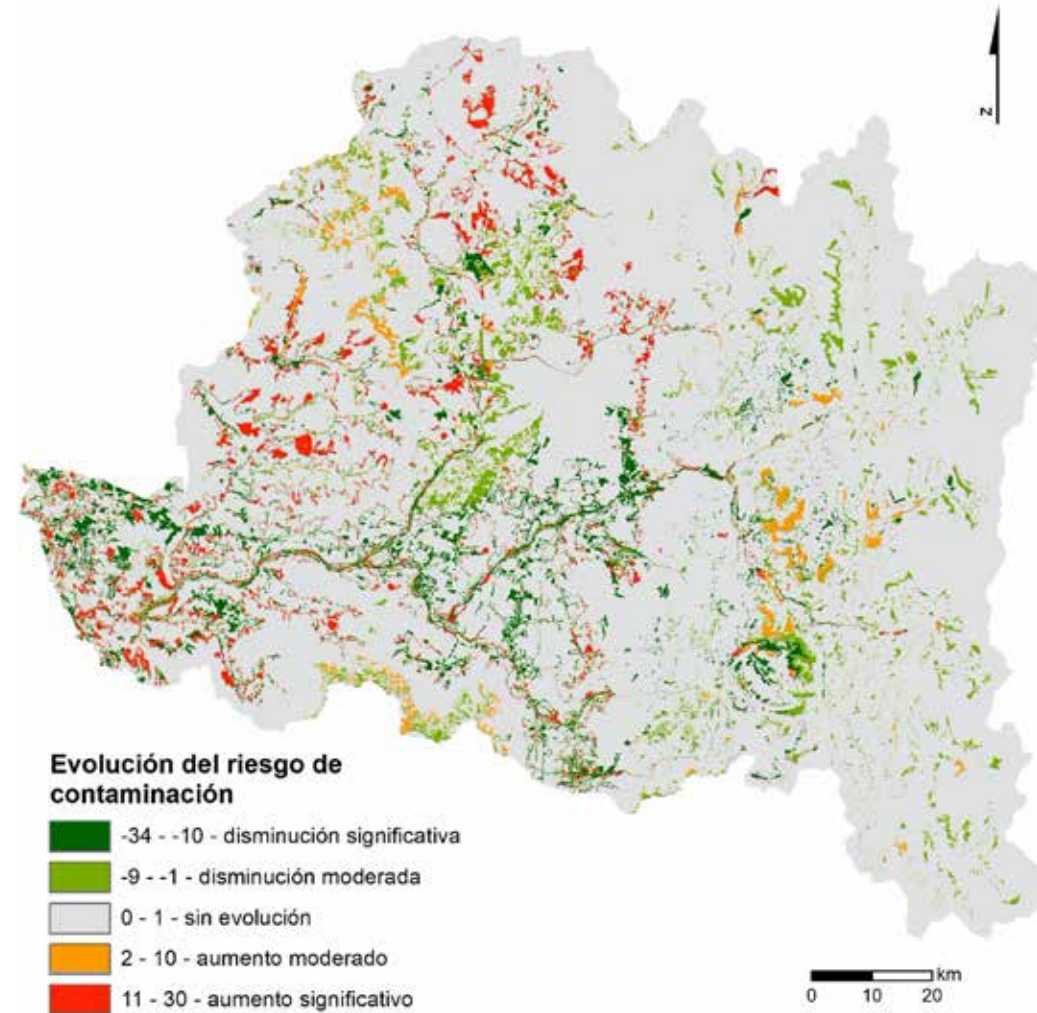


Figura 45 – Mapa de cambios en la vulnerabilidad entre 1995 y 2016.

En el gráfico de la Figura 46 se presenta la variación en área de las clases de frecuencia para los cambios en el riesgo de contaminación entre los dos años. En dicho gráfico se puede observar que cerca del 5% del área presenta un incremento del riesgo de contaminación, mientras que un 8% presenta una reducción del riesgo. La clase más representativa es la que no presenta variación en el riesgo de contaminación (cerca del 86% del área), confirmando que los cambios se encuentran espacialmente reducidos en la cuenca estudiada.

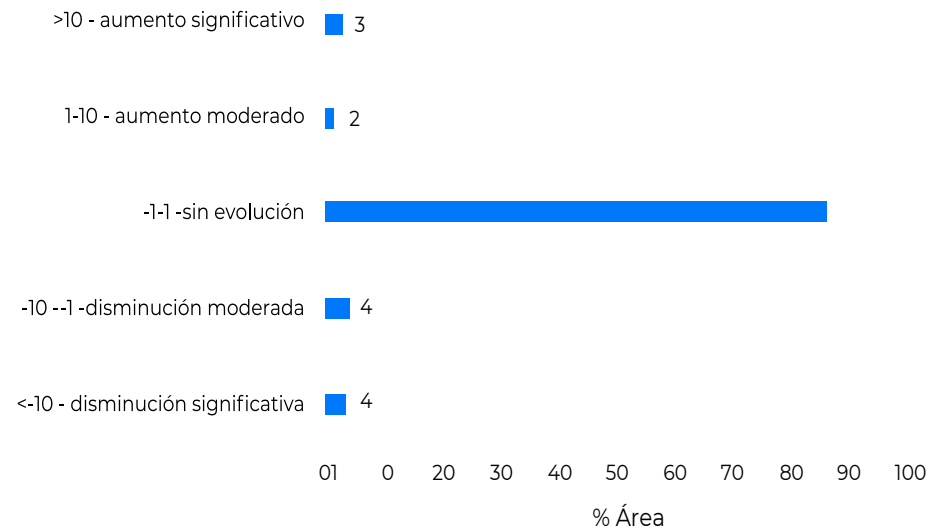


Figura 46 – Evolución del riesgo de contaminación entre 1995 y 2016.

4.2 Brechas de información

La gestión de los recursos naturales se debe fundamentar en información fidedigna que permita una buena caracterización con la menor incertidumbre posible. A pesar de la existencia de herramientas que ayudan a manejar la incertidumbre, la adecuada resolución temporal y espacial de la información facilita la toma de decisiones robustas.

Debido al costo que representan las redes de monitoreo, la selección de puntos deberá realizarse con criterio, el que tiene que ser estudiado de acuerdo con las necesidades identificadas y objetivos del monitoreo. Otro aspecto a tener en cuenta es la selección del equipo, ya que actualmente existen algunos automáticos que transmiten la información por vía telemática con gran fiabilidad y que minimizan el desplazamiento habitual de personal operativo a los lugares monitoreados.

En el caso del presente estudio, la información considerada se basó en tres tipos de variable:

1. Variables intrínsecas características de la cuenca: geología, suelos y topografía;
2. Variables antropogénicas: uso del suelo;
3. Redes de monitoreo: datos del clima y de los recursos hídricos. La calidad de cada una de estas variables tendrá una influencia directa en la calidad de los resultados.

Debido al carácter regional del trabajo, se optó por evitar considerar variables intrínsecas muy detalladas, ya que se considera que no aportarían mejoras notables a los resultados generales. En lugar de eso, se priorizó la generación de una relación robusta entre las variables intrínsecas y los datos de entrada del modelo WetSpass. La información referente al uso del suelo fue adecuada para los objetivos del trabajo, tanto a nivel de resolución espacial como a nivel de caracterización de los usos.

La representatividad temporal y espacial de las redes de monitoreo de clima y recursos hídricos fue diferente según el tipo de variable monitoreada. En el caso de la precipitación, se verificó que la información era adecuada para el estudio, con una representatividad espacial bastante significativa prácticamente en la totalidad de la cuenca. La resolución temporal o periodicidad también fue adecuada.

Respecto a la temperatura, a pesar de que las estaciones se distribuyen por toda la cuenca, se tuvo la necesidad de trabajar los errores de interpolación mediante Kriging. Esto se debe a la gran distancia existente entre las estaciones. Ya que se trata de una variable que se mide con relativa facilidad, se recomienda realizar un esfuerzo para que en algunas estaciones de precipitación también se pueda medir la temperatura.

De todas las variables climáticas compiladas, el viento fue la más complicada. No se encontraron series de datos de velocidad del viento accesibles, de manera que se tuvo que recurrir al modelo disponible on-line en el Explorador de Energía Eólica (<http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Eolico2/>).

Aunque este modelo tiene un gran valor porque permitió obtener datos para toda la cuenca, los resultados provienen de un modelo generado con datos del año 2010.

Con relación al monitoreo de los recursos hídricos, es común que los datos de piezometría se encuentren en zonas con mayor captación. Este hecho es idóneo para poder detectar, a través de la evolución de los niveles, si estamos ante un régimen de sobreexplotación y así tomar medidas de licenciamiento e identificación los conos de descenso que ponen en peligro la calidad del agua, debido a los cambios que se puedan provocar en la dirección del flujo regional.

Sin embargo, se tendría que realizar un esfuerzo para expandir la representatividad espacial al resto de la cuenca hidrográfica, lejos de las zonas de extracción.

Esto permitiría evaluar la evolución de la piezometría en áreas sin interferencia antropogénica y así observar cómo afecta la climatología en la recarga de los acuíferos, bien por la alteración de los regímenes de lluvia o por la variación de la evapotranspiración real. En este caso, y dado que algunas áreas de la cuenca se encuentran en ubicaciones remotas, se aconseja el uso de sondas de registro continuo con telemetría.

La periodicidad temporal de las mediciones deberá ser, al menos, bianual para obtener un valor en la época húmeda y otro en la época seca. De este modo se podrían relacionar las variaciones de nivel con los regímenes de captación de agua.

Debido a la falta de datos de piezometría distribuidos por toda la cuenca, se optó por extrapolar la relación entre la piezometría y la topografía en las áreas no monitoreadas, lo que conlleva un incremento de la incertidumbre.

Otra variable que considerar, en futuras redes de monitoreo, es el control del caudal en los nacimientos. Esta variable permite obtener información importante de la recarga y descarga de los acuíferos a partir del cálculo de la curva de recesión. Esta curva proporciona una información muy relevante para la gestión de los sistemas acuíferos y ecosistemas dependientes del agua subterránea.

4.3 Definición de medidas de protección y gestión de las aguas subterráneas

4.3.1 Introducción

El presente capítulo pretende relacionar los problemas de aguas subterráneas de la cuenca Maipo con el conocimiento actual sobre estrategias de gestión de los sistemas acuíferos, con el objetivo de evitar y revertir la sobreexplotación. La gestión de las aguas subterráneas, es un proceso complejo debido a la incertidumbre

asociada a este recurso invisible que forma parte de la dinámica del ciclo del agua.

Por este motivo, el agua subterránea no se puede gestionar del mismo modo que una laguna ya que sus aguas no se encuentran estancadas, pero tampoco como un río ya que es un recurso acumulativo con una elevada resiliencia. Este hecho provoca que numerosos gobernantes y entidades prefieran utilizar las aguas superficiales, por tratarse de un recurso en el que la disponibilidad presenta una gestión relativamente fácil, reservando el agua subterránea para cuando no existe otra alternativa. Sin embargo, este recurso cuenta con un gran potencial para el abastecimiento público, la economía y los ecosistemas dependientes, siendo los tres ejes de desarrollo de los planes de gestión de aguas subterráneas.

La gestión de la demanda, recarga y fuentes de agua alternativas, son las herramientas base para garantizar la sustentabilidad de las aguas subterráneas. En cada lugar, el equilibrio entre estas herramientas es un garante para el refuerzo de la economía agrícola, la cohesión social y la calidad del agua y de los ecosistemas. Cabe señalar que, en muchos casos, la sensibilización de las entidades locales, individuales o colectivas anticipa la toma de decisiones a la implementación de las políticas

nacionales. Estos procesos locales suelen ser bastante eficaces en la gestión de los acuíferos, incluyendo el aumento de los rendimientos agrícolas y la protección de los ecosistemas. Sin embargo, como es natural, cuando existen políticas de apoyo adecuadas, la aplicación de medidas locales resulta más sencilla.

4.3.2 Evolución de la piezometría y del riesgo de contaminación en la cuenca de Maipo

Como se ha mostrado en los capítulos anteriores, la gestión del agua subterránea en la cuenca Maipo deberá tener en cuenta las siguientes conclusiones:

- Según los resultados del estudio, la localización de las principales zonas de recarga está asociadas a las áreas con mayor extracción;
- Existe una disminución de las áreas de recarga debido a la transformación de áreas agrícolas en áreas urbanas;
- Las principales zonas de recarga presentan un riesgo de contaminación elevado, debido esencialmente a la agricultura;
- Las series piezométricas evidencian un descenso de los niveles en la mayoría de los puntos de monitoreo demostrando, en algunas áreas, que los acuíferos se encuentran en un estado de sobreexplotación. En algunos

de los puntos monitoreados el descenso del nivel es bastante pronunciado. La toma de decisiones en la gestión de los recursos hídricos de esta cuenca deberá considerar la compleja relación entre recarga y riesgo de contaminación, ya que la sustentabilidad de este recurso podría estar en juego.

Cabe señalar que el descenso continuado de los niveles piezométricos demuestra que el acuífero se encuentra en régimen de sobreexplotación y, consecuentemente, se espera una disminución de la disponibilidad hídrica en el futuro.

Burke and Moench (2000, adaptado) enumeran los siguientes efectos de la disminución del nivel piezométrico:

- Deterioro de los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas y reducción de los recursos hídricos superficiales.
- Necesidad de pozos más profundos, limitando la ejecución de nuevos pozos a entidades o personas con menor capacidad económica.
- Mayor costo de la energía necesaria para el bombeo.
- Deterioro de la calidad de las aguas subterráneas.

- Potencial subsidencia del terreno en lugares con acuíferos porosos.
- Tensión social y política entre sectores de la economía por el acceso al agua.
- Reducción de los rendimientos agrícolas e industriales.
- Migración poblacional hacia las ciudades y cierre de servicios en las zonas rurales como consecuencia de la disminución de los rendimientos.
- Incertidumbre en las comunidades con relación a su viabilidad futura y pérdida de cohesión.

En la mayoría de los casos, la implementación de modelos de gestión de las aguas subterráneas no tiene el efecto deseado en la reducción de los regímenes de sobreexplotación. Esto se debe, frecuentemente, a la falta de información para una evaluación científica adecuada ya que la compilación y tratamiento de esta información suele iniciar después de corroborar que existe un problema con la disminución de los niveles. Por esa razón, en una fase inicial, la evaluación de la disponibilidad y calidad de los recursos hídricos, así como la divulgación de estos resultados es un paso importante como medida preventiva de potenciales conflictos.

4.3.3 Estrategias de gestión

Los métodos actuales de gestión de aguas subterráneas consideran un enfoque flexible de la gestión de la demanda, evaluando escenarios para maximizar la recarga y la gestión integrada con otras fuentes de agua.

Cabe señalar que en los casos donde los acuíferos se encuentran en equilibrio, existe un mayor número de opciones de gestión respecto a los acuíferos sobreexplotados, además las tensiones sociales suelen ser prácticamente nulas en este aspecto. En el caso de los acuíferos sobreexplotados, siempre existe resistencia a los cambios en la gestión a nivel local, especialmente en cuanto a la demanda.

En los casos de **gestión colectiva**, como por ejemplo un grupo de usuarios, tiende a haber mayor anuencia para la resolución de problemas, por ejemplo, cambiando los cultivos o los mecanismos de riego sin que se produzca una pérdida de productividad, y con el objetivo de que esta incremente. Sin embargo, en este tipo de gestión, es importante disponer de un apoyo técnico y capacitación por parte de las entidades públicas. También es importante involucrar a estos grupos locales en el monitoreo, de las aguas subterráneas, para que puedan percibir los efectos de sus prácticas en los recursos hídricos.

Otra herramienta de gestión, se basa en el intercambio de licencias supervisadas por las entidades gestoras de los recursos hídricos. En este caso se crean mecanismos de negociación para permitir la transferencia del uso de agua hacia aquellos que sean más valorizados dependiendo siempre, por supuesto, a las condiciones ambientales. En la práctica, un usuario compra el derecho de uso de un volumen de agua a otro usuario por un precio menor a los beneficios que le genera su uso. De esta forma, ambas partes se benefician con la redistribución del recurso.

Si bien el fundamento de esta herramienta es el incremento del valor económico del acuífero, es posible imponer restricciones ambientales, como no permitir el aumento de la extracción en áreas sobreexplotadas, o con el objetivo de evitar impactos en los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas.

También se pueden utilizar incentivos para promover el intercambio de licencias de agua subterránea de buena calidad por agua de menor atributo, lo que produciría un incremento de la calidad promedio del agua del acuífero. La existencia de esta "bolsa" de volúmenes de captación también permite al Estado la compra de derechos de captación, por ejemplo, para mejorar el estado ambiental.

Los ejemplos anteriores, están orientados a la gestión de la demanda pero también existen medidas para manejar la oferta de agua. La adopción de estas medidas puede estar motivada por la dificultad de modificar un sistema de licencias ya asignado. Sin embargo, este tipo de medidas siempre resultará más costoso que las medidas enfocadas a la gestión de la demanda.

La herramienta principal que permite incrementar la oferta de agua subterránea es el manejo de la recarga de acuíferos. Actualmente, existen varias metodologías para maximizar la recarga, incrementando la disponibilidad de agua y contribuyendo a la reducción de problemas de sobreexplotación. Existen varios métodos para fomentar la recarga de acuíferos (Dillon et al., 2009).

La elección de estos métodos dependerá de las condiciones hidrogeológicas locales, así como la disponibilidad y calidad de agua para infiltración.

Un ejemplo de método de gestión de la recarga es la construcción de estructuras que potencien la infiltración de agua superficial.

En este caso, el exceso estacional de agua superficial se infiltra en el acuífero a través de estructuras construidas, aprovechando la capacidad de almacenamiento subterráneo para los periodos de sequía.

Entre las diferentes características del acuífero a recargar, que es necesario caracterizar, destaca el tipo de confinamiento. La gestión de la recarga en un acuífero libre es mucho más sencilla y económicamente viable que en un acuífero confinado, y por este motivo, antes de definir el método de recarga a utilizar, es necesario disponer de un estudio detallado de la hidrogeología local.

Otra opción de gestión de acuíferos sobreexplotados es el uso de fuentes alternativas. En este caso, se intenta producir una disminución en la presión sobre un acuífero sin que se produzcan cambios en la demanda. La facilidad de implementación de fuentes alternativas depende, esencialmente, del costo de acceso al agua y de la posibilidad tecnológica de su implementación.

Antes de elegir alguna de estas soluciones, además de la caracterización hidrogeológica de la cuenca y sus usuarios, es necesario realizar un estudio socioeconómico que incluya los aspectos ambientales. En este estudio se deberá realizar un análisis costo-beneficio de las soluciones previamente consideradas. Esta será la única manera de saber si los beneficios de invertir en sistemas de gestión de la recarga o el uso de fuentes alternativas serán superiores a la inversión en la mejora de los sistemas de riego, o los costos que supondría un cambio en los cultivos.

Aunque puede variar substancialmente entre diferentes cuencas, el costo monetario unitario relativo por m³ de agua por la reducción de la demanda o por la aplicación de herramientas de gestión de la recarga o uso de fuentes alternativas sigue, generalmente, el siguiente orden de menor a mayor costo (adaptado de Escalante et al., 2012):

1. Optimización de los sistemas de riego (menor costo unitario por m³ de agua ahorrada)
2. Construcción de zanjas de infiltración para incrementar la recarga
3. Construcción de tanques de percolación para incrementar la recarga
4. Cambio de los cultivos agrícolas a cultivos con menor requerimiento hídrico
5. Implementación de sistemas de reutilización de agua para agricultura
6. Transformación de los campos de regadío en pastos u otro uso que no requiera riego (mayor costo unitario por m³ de agua ahorrada).

Siguiendo el mismo esquema, y de manera general, y para ahorrar el volumen de captura y mejorar sus usos, hay que tener en cuenta las herramientas siguientes:

1. Implementación de sistemas de

reutilización de agua para agricultura (mayor volumen de agua ahorrado)

2. Transformación de los campos de regadío en pastos u otro uso que no requiera riego;

3. Optimización de los sistemas de riego

4. Construcción de balsas de infiltración para incrementar la recarga

5. Construcción de tanques de percolación para incrementar la recarga

6. Cambio de los cultivos agrícolas a cultivos con menor requerimiento hídrico (menor volumen de agua ahorrado).

La relación entre estas dos variables:

1) costo unitario por volumen de agua ahorrado o proporcionado y 2) volumen total ahorrado o proporcionado por las diferentes opciones, permitirá tener una idea de las herramientas de gestión que deberán ser aplicadas para la mejora de la disponibilidad de agua subterránea.

Escalante et al. (2012, adaptado) identificó las siguientes medidas como las más eficaces para la gestión de las aguas subterráneas:

Caracterización de los recursos hídricos

- Las empresas de sondeos deberán solicitar una licencia para perforar pozos;

- Exigir que los trabajadores de las empresas de sondeos tengan la formación apropiada y respeten la legislación;

- Requerir a las empresas de sondeo el registro de la geología, características del pozo, caudales, calidad del agua, niveles piezométricos estáticos y dinámicos de los nuevos pozos para almacenarlos en una geodatabase;

- Instalar un tubo piezométrico en todos los pozos (con un diámetro mínimo de 1");

- Monitorear la piezometría, volúmenes captados y calidad de agua en una red de monitoreo con la distribución espaciotemporal adecuada

- Monitorear los caudales en los nacimientos y evaluación del estado de los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas

- Estimar la recarga y descarga natural

- Elaborar modelos numéricos debidamente calibrados para estimar los impactos que podrán producir las alteraciones climáticas y varios escenarios de demanda futuros.

Gestión de la demanda de agua

- Optimizar la eficiencia de riego

- Seleccionar cultivos con menor requerimiento hídrico

- Los precios de la electricidad para bombeo o del agua captada deberán reflejar los costos de abastecimiento, para incentivar el ahorro de agua

- Restringir la proximidad de nuevos pozos a pozos ya existentes para reducir la interferencia (a veces la implementación de esta medida no es sencilla según la superficie de los terrenos)

- Restringir la proximidad de pozos a zonas de descargas naturales de agua subterránea, generalmente asociadas a ecosistemas con elevado valor ambiental

- Restringir la profundidad de pozos de acuerdo con el tipo de uso (por ejemplo, los pozos para abastecimiento público podrían ser más profundos que los pozos para riego)

- Catastrar las áreas de cultivo y restringir el área máxima de cultivo regada por un pozo

- Revisión periódica y lectura de los contadores volumétricos de los pozos

- Revisión periódica de la disponibilidad de agua existente en base a los datos de monitoreo más recientes

- Involucrar a las comunidades en los planes de gestión de agua

- En sistemas subexplotados (donde la recarga es superior a la demanda), se permitirá una mayor flexibilidad de las medidas de gestión

- Otorgar derechos de explotación de agua subterránea con condiciones de uso en función de la evolución de la disponibilidad y calidad del agua
- Revisión periódica de los planes de gestión.

Gestión de la recarga en acuíferos o uso de fuentes alternativas

- Identificar y probar diferentes opciones para la maximización de la recarga, evaluando las potenciales fuentes de agua para recarga o como alternativa al agua subterránea;
- Desarrollar un plan de recarga o uso de fuentes alternativas para consulta pública;
- Otorgar derechos de recarga de aguas subterráneas para compensar el volumen captado, sujeto a las condiciones de funcionamiento.

4.3.4 Propuestas para la cuenca MAIPO

Como se ha mencionado anteriormente, la gestión de los recursos hídricos subterráneos de la cuenca de Maipo deberá tener el objetivo de gestionar de una manera integrada la sobreexplotación y el riesgo de contaminación de los acuíferos.

En la Figura 47 se muestra la relación entre las zonas preferenciales de recarga y las clases de mayor riesgo de contaminación.

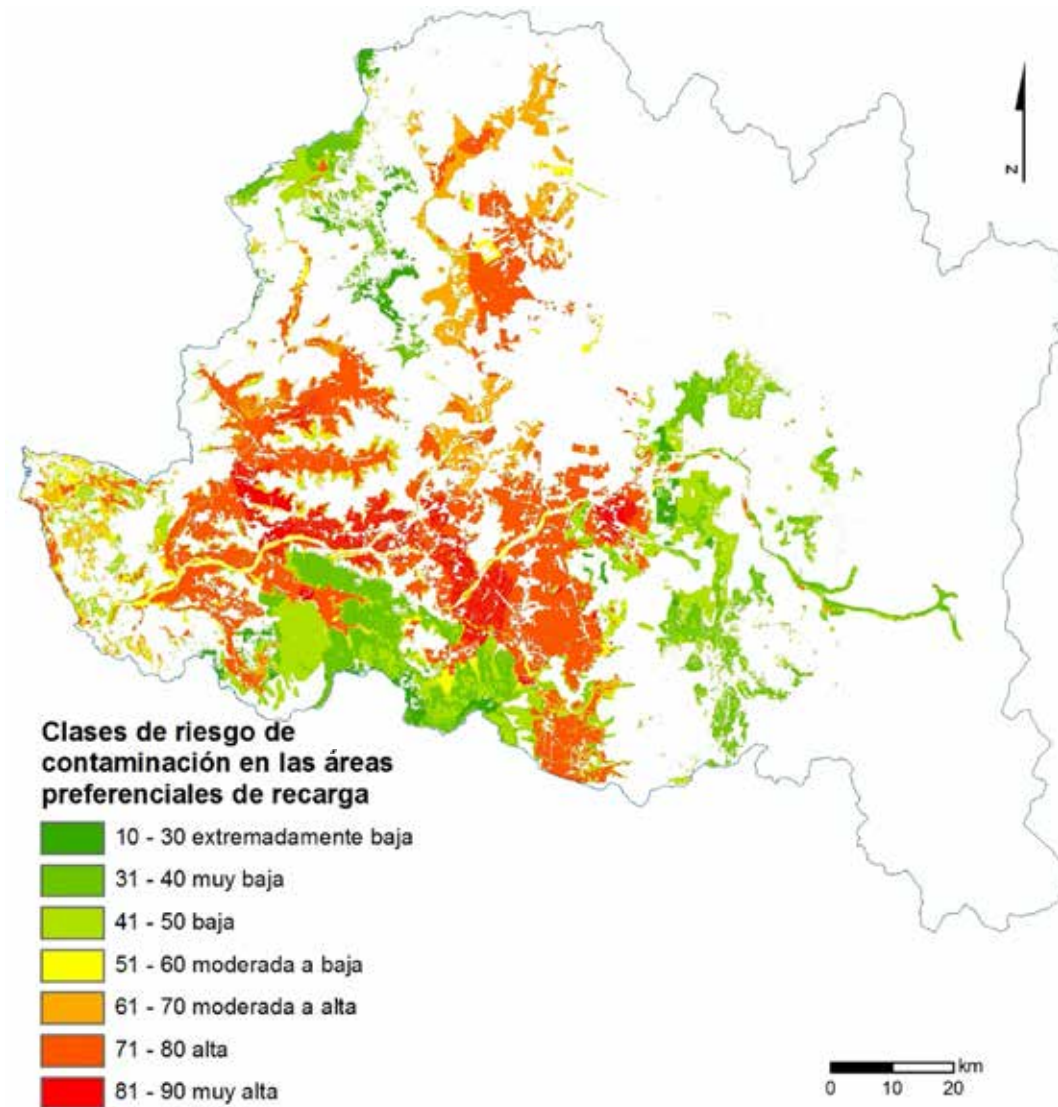


Figura 47 – Riesgo de contaminación en las áreas preferenciales de recarga.

La interdependencia entre calidad y cantidad genera la necesidad de tomar un enfoque con una visión holística, que permita identificar de manera adecuada las consecuencias de los diferentes escenarios de gestión que se pueden aplicar, tanto para la cantidad como para la calidad. Finalmente, se deberán tomar medidas que optimicen el balance entre el interés económico del acuífero, la salud pública y el medio ambiente. En este capítulo se sugieren algunas estrategias para la gestión de las aguas subterráneas de la cuenca Maipo.

En el caso de la cuenca Maipo, teniendo en cuenta lo expuesto en capítulos anteriores, el modelo de gestión deberá comenzar por la mejora del conocimiento de los sistemas acuíferos y sus usuarios. En una primera fase se deberán instalar redes de monitoreo adicionales. Este tipo de red de monitoreo, denominadas redes de investigación tienen como objetivo el estudio de problemas hidrogeológicos específicos, por ejemplo la percolación entre diferentes capas, focos de contaminación, desplazamiento de plumas de contaminación, relación entre el agua superficial y el agua subterránea o intrusión salina, entre otras situaciones específicas de la cuenca. Paralelamente, la red de monitoreo activa, denominada generalmente como red de vigilancia, también deberá continuar en funcionamiento.

Por otro lado, la caracterización de los usuarios tiene la misma importancia que el estudio hidrogeológico. Determinar los volúmenes de agua necesarios, identificar las parcelas agrícolas, caracterizar las prácticas agrícolas actuales, incluyendo los productos utilizados, las expectativas de los agricultores, la experiencia con otros tipos de agricultura, son algunas de las informaciones importantes para definir el futuro modelo de gestión. Cabe destacar, que la proximidad a los agricultores se deberá realizar mediante una relación de confianza, ya que en caso contrario no será posible obtener toda la información necesaria.

La formación de mesas de diálogo, así como impartir pequeños seminarios son algunos de los medios más efectivos para generar espacios de intercambio que permitan comprender las principales preocupaciones de los usuarios y mostrarles los desafíos que existen en la gestión de los recursos hídricos de su región.

La compilación de toda la información disponible permitirá, en una primera fase, la realización de un modelo numérico de flujo que servirá como base para evaluar y proponer todas las decisiones técnicas.

La gestión de los usuarios, a pesar de ser el mejor camino para la mejora del estado de los acuíferos, es uno de los mayores desafíos en el modelo de gestión. Las cuestiones socioeconómicas son bastante relevantes en lo

que respecta al cambio de prácticas o hábitos, y los usuarios a menudo prefieren trasladar la resolución de los problemas de escasez o calidad de agua a las generaciones futuras.

En este sentido es importante, en una primera fase, comprender el marco legal del sistema de licencias de los recursos hídricos y los derechos de los propietarios de los terrenos.

En muchos casos, estos derechos se relacionan debido a la propiedad privada del subsuelo donde se encuentran las captaciones de agua subterránea. La existencia de licencias a perpetuidad es otro factor que limita la gestión de los recursos hídricos. Por esa razón, si existe base legal para este tipo de licencias, es necesario entender de qué manera se podrían cambiar o si existe la posibilidad de transferencia entre usuarios (especialmente entre un particular y el estado).

En base a la información compilada anteriormente, se deberán definir escenarios de uso de los recursos hídricos. Estos escenarios permitirán conocer los costos y beneficios unitarios, generando información de su factibilidad técnica y financiera.

La definición de los escenarios siempre deberá considerar una mejora de la eficiencia de riego, reduciendo el consumo de agua y mejorando la productividad. Este punto es decisivo para el éxito en la implementación de los escenarios

en el terreno, ya que el cambio en las prácticas agrícolas tiene un impacto muy significativo en la reducción del consumo de agua.

Estos escenarios deben, también, considerar medidas para minimizar la contaminación agrícola, por ejemplo, a través de la creación de guías de buenas prácticas agrícolas, teniendo en cuenta las tecnologías actuales. La tercera tarea para el desarrollo del modelo de gestión de los recursos hídricos subterráneos deberá ocuparse de la gestión de la recarga y la búsqueda de fuentes alternativas. Estas medidas, especialmente la propuesta de soluciones técnicas para el incremento de la recarga en la cuenca Maipo, serán de ámbito local teniendo en cuenta los usuarios existentes en una región determinada.

Además de la gestión de los usuarios, se deberán definir escenarios de gestión de la recarga donde se evalúen los costos y beneficios de cada una de las soluciones propuestas para maximizar la recarga y captación de otras fuentes. En los últimos años se han probado con éxito algunas técnicas de manejo de la recarga de las cuales destacan las siguientes:

- Cambio en las prácticas de movilidad del suelo agrícola para evitar la escorrentía superficial;

- Inyección de agua directamente en un pozo utilizando drenajes en zona saturada o seca;
- Percolación en la base de lagunas o reservorios construidos sobre cursos de agua;
- Infiltración de agua captada en el tejado de los edificios, a través de su almacenamiento en tanques subterráneos;
- Construcción de pozos/zanjas cerca de los cursos de agua superficial;
- Lagunas de infiltración;
- Construcción de presas subterráneas (bastante complejas ya que se necesita conocer detalladamente la morfología de las formaciones geológicas en profundidad);
- Infiltración de agua residual tratada;
- Retención de sedimento fluvial con diques en los cursos de agua para formar pequeños acuíferos aluviales.

La elección de cualquiera de estas opciones deberá tener en cuenta las condiciones hidrogeológicas y la existencia de agua adecuada para potenciar la recarga. Estas dos variables son determinantes para el éxito en la implementación de estas medidas.

Al final de estas fases será posible determinar de una manera fidedigna, para la cuenca Maipo, el costo y beneficio por m³ de agua en los diferentes escenarios, así como el volumen total de agua ahorrado o conseguido adicionalmente.

Cabe destacar que después de la creación del plan de gestión de los recursos hídricos, todos los usuarios deberán comprender que están compartiendo un bien que no es ilimitado.

Conclusiones

En este informe se ha desarrollado el componente de Estimación de Recarga de Acuíferos, que consiste en la determinación de la recarga existente en los acuíferos de la cuencadel río Maipo, así como la distribución espacial de las zonas de recarga natural utilizando el modelo WetSpass.

Se presentan todos los insumos e información necesaria para la aplicación del modelo WetSpass, así como sus especificaciones y configuraciones. Se utilizaron mapas de inclinación del terreno, uso del suelo, textura del suelo, precipitación, temperatura, evapotranspiración potencial, velocidad del viento y profundidad del nivel piezométrico.

El proceso de calibración tuvo en cuenta información relativa a la recarga de aguas subterráneas disponible en el Diagnóstico Plan Maestro de Recursos Hídricos Región Metropolitana de Santiago, Informe Final Volumen 1 (2015). Los resultados confirman que la escorrentía superficial se genera mayoritariamente en la zona este de la región metropolitana de Santiago y, posteriormente, en las corrientes de agua que se originan en dirección al mar.

Los valores de recarga oscilan entre 0 y 292 mm/año (2016), con un valor promedio para toda la cuenca cercano a los 93 mm/año (45 m³/s). Las zonas donde la recarga es mayor no presentan una distribución espacial claramente definida, aunque se ubican, generalmente, al sur de la región metropolitana, favorecidas por la presencia de relieves suaves y suelos arenosos que permiten la infiltración. Las

principales zonas de recarga en la cuenca se encuentran en las planicies al sur de la región metropolitana, así como a lo largo de los territorios contiguos a las principales corrientes de la red hidrográfica del río Maipo.

Debido a la relación entre el uso del suelo y la disponibilidad y calidad de agua subterránea, se elaboró un estudio comparativo entre el uso del suelo en 1995 y 2016. Este estudio se basó en información del estudio “Análisis del estado actual de los ecosistemas terrestres, asociados a dos cuencas en Chile central: Maipo y Maule” en el cual se delimitaron espacialmente los diferentes tipos de ecosistemas identificados.

En este periodo se produjo un incremento significativo del área urbana, del 5,5% en 1995 al 8,9% en 2016. Esta alteración representa un incremento cercano al 62% del área urbana, especialmente perceptible en el área metropolitana de Santiago y las zonas limítrofes. Otro fenómeno que se observa es la discontinuidad creciente de los diferentes usos, siendo un claro ejemplo las áreas de bosques nativos, matorral y herbazal. Por otro lado, hay una reducción del área agrícola total en la cuenca, siendo desplazada por la expansión urbana, lo que también provoca una mayor discontinuidad en este uso. Por otro lado, de acuerdo con Pliscoff (2020), entre 1995 y 2016 hay una expansión productiva de la agricultura de un 1,9% desplazando zonas naturales.

Después del cálculo realizado con el modelo WetSpas utilizando los usos del suelo de 1995 y 2016, se pudieron determinar los impactos que los cambios en el uso del suelo han provocado en los procesos de recarga.

En la simulación con el uso del suelo del año 2016 la situación cambia, tanto cuantitativamente como en la distribución espacial de la recarga. La transición de algunas áreas agrícolas a usos urbanos afectó a la dinámica de los acuíferos locales, especialmente al tratarse de zonas importantes para la recarga de los acuíferos regionales.

Debido a este incremento de las áreas impermeables, el promedio anual de recarga en este escenario disminuye de 47,9 m³/s (99 mm/año) en 1995 a 45,0 m³/s (93 mm/año) para 2016, lo que representa un descenso de 2,0 m³/s (6 mm/año o 6,1%). Espacialmente, se verificó que ocurrió una disminución de entre 100 y 150 mm en una superficie de 297 km².

Con el objetivo de identificar las zonas preferenciales de recarga, se realizó una reclasificación de los valores de recarga para representarlos por cuartiles de área. Se consideró que las áreas con valores más elevados de recarga corresponden a los valores superiores al cuartil Q3 (>75%) y, por tanto, son las áreas de conservación más importantes, y que totalizan 3781 km² (Tabla 9). Estas áreas contribuyen con el 46% del total de la recarga (647 hm³) ocupando tan solo el 25% de la superficie de la cuenca, y se encuentran mayoritariamente hacia el suroeste de la cuenca, donde se llevan a cabo las mayores extracciones (Figura 42). Estas áreas se encuentran en un proceso de pérdida de continuidad espacial, a medida que la urbanización e impermeabilización del territorio incrementa. Se realizó un análisis del riesgo de contaminación por nutrientes que fue basado en el Índice de Susceptibilidad (IS).

Se verificó que las clases de riesgo más elevadas están claramente asociadas a las áreas agrícolas (sur y suroeste de Santiago) y se ubican en terrenos con pendientes suaves y una composición arenosa significativa.

Las clases con alto y muy alto riesgo de contaminación representan 10,7 % del área de la cuenca (2016). El área identificada como el área de recarga principal tiene un riesgo de contaminación de alto a muy alto en aproximadamente el 41,6% del área.

En cuanto a la evolución del riesgo de contaminación entre 1995 y 2016 se puede concluir, de manera general, que el riesgo es similar en ambos años.

La tendencia del nivel piezométrico en la cuenca presenta una tendencia negativa, es decir, existe un riesgo significativo de que los acuíferos se encuentren en un régimen de sobreexplotación. Por ese motivo, se presentan algunas propuestas que podrían ayudar a abordar la situación a través de la gestión de los recursos hídricos subterráneos en la cuenca Maipo. Estas soluciones implican trabajo tanto del lado de la demanda como de la oferta considerando, además, el riesgo de contaminación asociado a las zonas de máxima recarga.

Estas soluciones deberán basarse siempre en un conocimiento detallado de los acuíferos, a través de la elaboración de modelos numéricos de flujo que permitan simular los efectos de diferentes escenarios de gestión en los recursos hídricos subterráneos.

Referencias

Abdollahi, K., Bashir, I., Verbeiren, B., Harouna, M.R., Griensven, A.V., Huysmans, M., Batelaan, O., (2017) A distributed monthly water balance model: formulation and application on Black Volta Basin. *Environ Earth Sci* (2017) 76:198. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6512-1>

Aller, L., Bennet, T., Lehr, J.H. & Petty, R. J. (1987) DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. U.S. EPA Report 600/2-85/018, 1987.

Batelaan, O., De Smedt, F. (2007) GIS-based recharge estimation by coupling surface–subsurface water balances. *J Hydrol* 337(3):337–355. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.02.001>

Burke, J. J. & Moench, M. (2000) *Groundwater and Society: Resources, Tensions and Opportunities. Themes in Groundwater Management for the Twenty-first Century.* United Nations Department of Economic and Social Affairs and the Institute for Social and Environmental Transition, New York, USA.

Casanova, M., Salazar, O., Seguel, O., Luzio, W. (2013) *The Soils of Chile.* World Soils Book Series, Springer. ISBN 978-94-007-5949-7 (eBook)

Dillon, P., Pavelic, P., Page, D., Beringen H. and Ward J. (2009) *Managed Aquifer Recharge: An Introduction*, Waterlines Report No 13, Feb 2009

Doerfliger, N., Zwhalen, F. (1997) EPIK- A new method for outlining of protection areas in karstic environment in Gunnay, G., Jonshon, Al. (eds) – international Symposium and Field seminar on karst waters and environmental impacts, Antalya, Turkey, Balkema, Rotterdam, pp.117-123.

Escalante, Enrique & Dillon, Peter & Twinhof, Albert. (2012). Management of recharge/discharge processes and aquifer equilibrium states.

Hargreaves, G. H., Samani, Z. A. (1985) Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied Engineering in Agriculture, v.1, n.2, p.96-99.

Diagnóstico Plan Maestro de Recursos Hídricos Región Metropolitana de Santiago (2015) Informe Final Volumen 1. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas del Gobierno de Chile

Liu, Y.B., De Smedt, F. (2004) WetSpa Extension, Documentation and User Manual. Department of Hydrology and Hydraulic Engineering, Vrije Universiteit Brussel, Belgium.

Ribeiro L. (2005) Desenvolvimento e aplicação de um novo índice de susceptibilidade dos aquíferos à contaminação de origem agrícola - in Actas do 7º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, ed. CDROM, APRH, Évora, Portugal.

Ribeiro, L., Pindo, J.C., Dominguez-Granda, L. (2017) Assessment of groundwater vulnerability in the Daule aquifer, Ecuador, using the susceptibility index method.

Science of The Total Environment, Volume 574, 1 January 2017, Pages 1674-1683. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.004>

Servicio Nacional de Geología y Minería (2003) Mapa geológico de Chile: versión digital. Publicación geológica digital, No. 4, 2003, Base Geológica escala 1:1.000.000

Scharp, C., Alveteg, T., Johansson, P-O. And Caldera, M. (1997) Assigning a groundwater protection value – methodology development, in Groundwater in the urban environment, International association of Hydrogeologists, XXVII congress, 21-27 September, Nottingham, UK, 659-664.

Stigter, T.Y., Ribeiro, L., Dill, A.M.M.C. (2006) Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinisation and nitrate contamination levels in two agricultural regions in the south of Portugal. Hydrogeol J 14, 79–99. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0396-3>

Uribe, J.M., Cabrera, R., Fuente, A., Paneque, M. (2012) Atlas Bioclimático de Chile. Laboratorio de Bioenergía y Biotecnología Ambiental, Departamento de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales Renovables, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile, 224 p.

Zhang, Y., Weissmann, G. S., Fogg, G. E., Lu, B., Sun, H., & Zheng, C. (2018) Assessment of Groundwater Susceptibility

to Non-Point Source Contaminants Using Three-Dimensional Transient Indexes. International journal of environmental research and public health, 15(6), 1177. <https://doi.org/10.3390/ijerph15061177>

Estimación de la recarga en la cuenca del río **Maipo** a través del **Modelo WetSpass**

Julio 2021



ESCENARIOS
HÍDRICOS
2030
CHILE