

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

Julio 2021





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



## **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

## **35** 3. Modelo WetSpass

- 3.1 Suposiciones del modelo
- 3.2 Calibración

## **36** 4. Discusión de resultados

- 4.1 Impacto por cambio 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 Maule
  - 4.3.3 Estrategias de gestión
  - 4.3.4 Propuestas de medidas para la cuenca Maule

## **52** 5. Conclusiones

## **54** 6. Referencias

El presente documento corresponde a una síntesis del Informe General de la cuenca del río Maule, 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 21.052 km<sup>2</sup> e integra las áreas metropolitanas de Talca y Linares. La delimitación de la superficie de estudio corresponde a la cuenca del

río Maule, el cual tiene como tributarios principales los ríos Claro, Loncomilla, Puelche, Cipreses y Colorado.

Para el estudio de la recarga y el riesgo de contaminación se consideraron varios enfoques metodológicos. En 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.



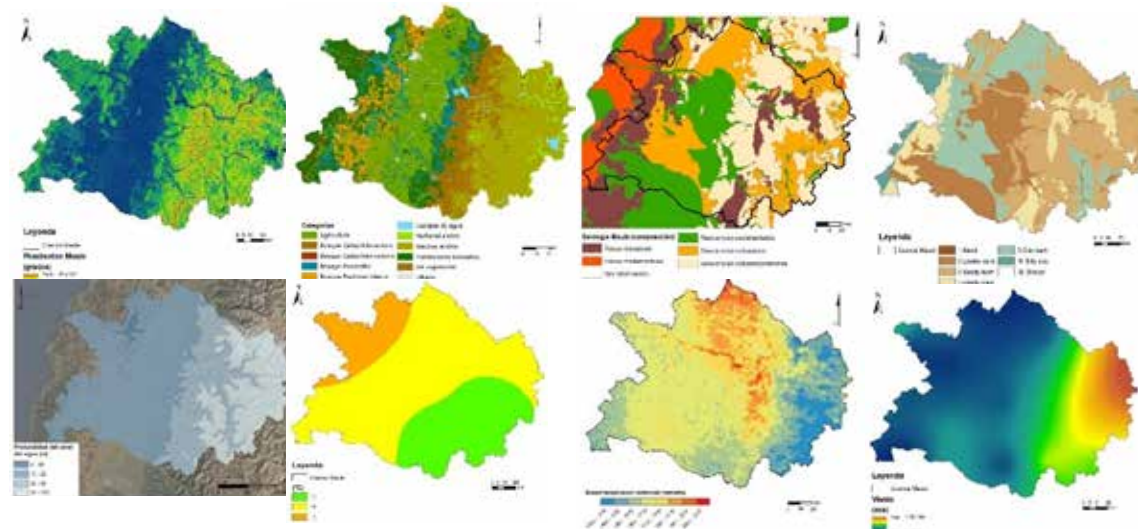


Figura 1: Variables de entrada de los modelos. De arriba de izquierda a derecha: pendientes, uso del suelo, geología, textura del suelo. Abajo de izquierda a derecha: precipitación, temperatura, evapotranspiración potencial, velocidad del viento.

- 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 25 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, plantaciones forestales y los bosques caducifolios.

- La cuenca presenta, esencialmente, suelos relativamente francos, de composición volcánica o vulcano-sedimentaria, suelos arcillo-arenosos y suelos con fracciones de arcilla elevadas.
- El estudio de la precipitación se fundamentó en la compilación y tratamiento de 41 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 500 y 1000 mm, principalmente en la zona central y oeste.

- En cuanto a la temperatura, los valores promedio anuales son más elevados hacia el noroeste, alcanzando valores de 14 a 15°C, mientras que los valores promedio son menores en zonas más elevadas de la cuenca, con valores entre 12 y 13°C.
- El mapa de evapotranspiración potencial (ETP) elaborado indica que el rango de valores que presenta mayor recurrencia corresponde al intervalo de 1650-1750 mm/año, representativo en la zona oeste-suroeste. La zona central y norte presentan valores de ETP mayores, alcanzando los 2167 mm/año.
- Las clases más recurrentes de velocidad del viento son aquellas con valores menores (1.8-3 m/s), asociadas a las zonas centro y oeste de la cuenca.
- Para el cálculo de la piezometría se consideraron datos de 12 piezómetros, de la Dirección General De Aguas. En un primer análisis de la información se observó una relación significativa entre el nivel piezométrico y la altitud, sin embargo, el reducido número de piezómetros no permitía asegurar que esta relación pudiera ser aplicada en las zonas sin información piezométrica (Figura 2);

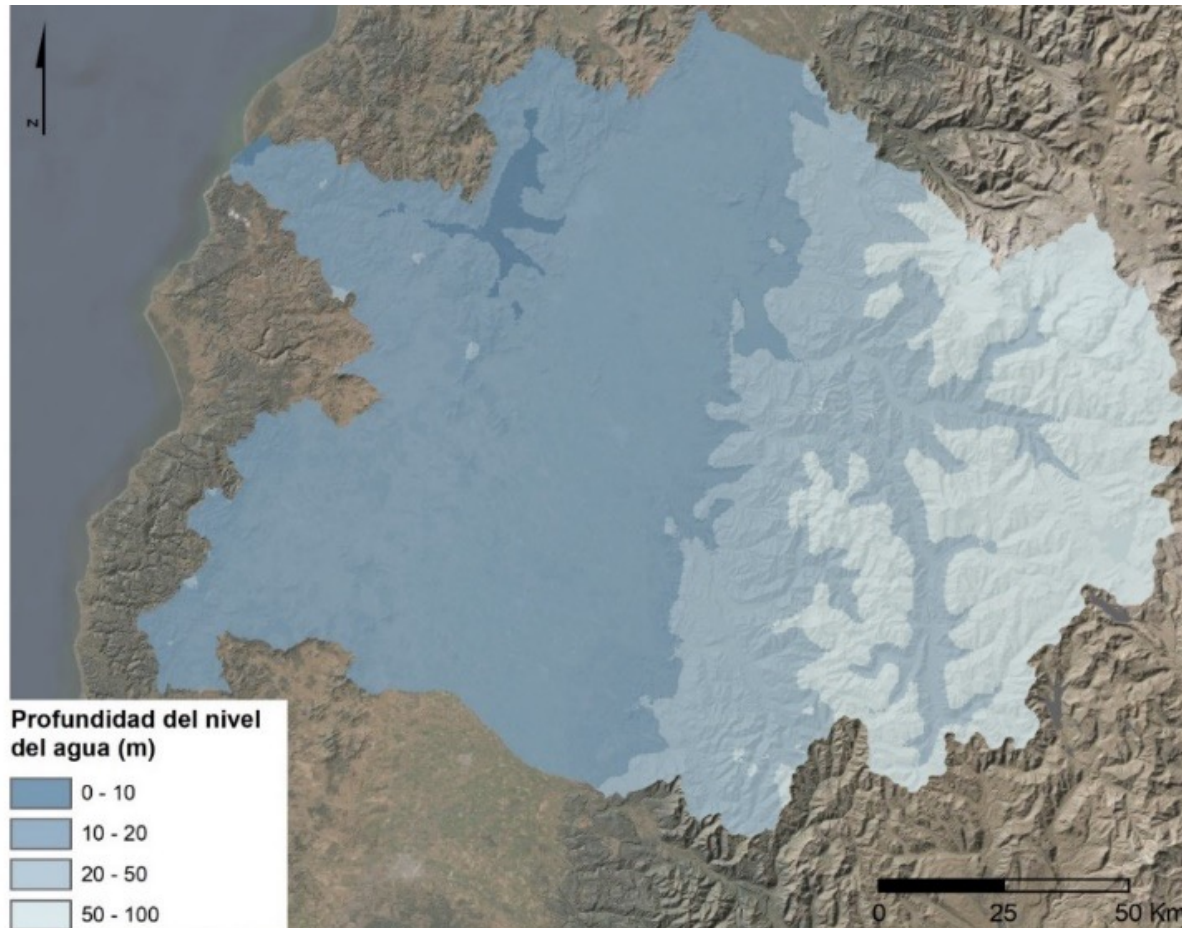


Figura 2: Profundidad del nivel piezométrico en la cuenca Maule.

Después de la implementación y calibración del modelo WetSpass, se confirmó que las zonas con mayor recarga se encuentran en el área central de la cuenca, donde el relieve es más suave y el tipo de suelo favorece la infiltración.

Los valores de recarga oscilan entre 0 y 1123 mm/año, con un valor promedio para toda la cuenca cercano a los 97 mm/año ( $47 \text{ m}^3/\text{s}$ ), para el año de 2016 (Figura 3).

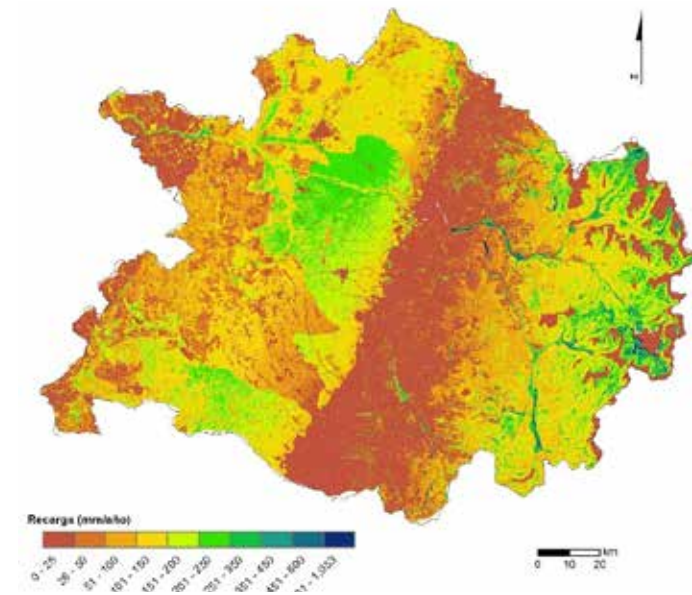


Figura 3: Valores de recarga en la cuenca Maule.

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 esta 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 55% de la recarga total (valores promedios de 211 mm/año, o 1122 hm<sup>3</sup>/año), mientras ocupa solamente el 26% de la superficie de la cuenca (5315 km<sup>2</sup>).

Estos valores se basan en los resultados del uso del suelo de 2016, ya que se trata de los datos más recientes (Figura 38). 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 55% de la recarga total, mientras ocupa solamente el 26% de la superficie de la cuenca.

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

Clase de recarga	Área (km <sup>2</sup> )	Mínimo (mm)	Máximo (mm)	Volumen total (hm <sup>3</sup> )	Recarga Promedio (mm)	Contribución para la recarga total
< Q1	5822	0	21	2	12	1%
Q1 < Q2	4381	22	95	59	259	13%
Q2 < Q3	5233	96	145	123	644	32%
Q3 < Max.	5315	146	1053	211	1122	55%

Como se muestra en la Figura 4, estas áreas se sitúan en el área central y suroeste de la cuenca, coincidiendo con el área de terrenos agrícolas. Los altos valores de recarga observados en la zona andina se deben a la alta precipitación y baja evapotranspiración de la zona. Sin embargo, la contribución de las precipitaciones a la recarga es menor en esta zona que en las zonas central y suroeste, ya que el porcentaje de precipitación que se infiltra en el suelo es mucho menor en las zonas inclinadas y con suelos poco desarrollados. Pero es importante destacar que, el área principal de recarga ubicada en el área central ocupa el 26% del territorio de la cuenca, sin embargo, genera el 55% de la recarga total de ella.

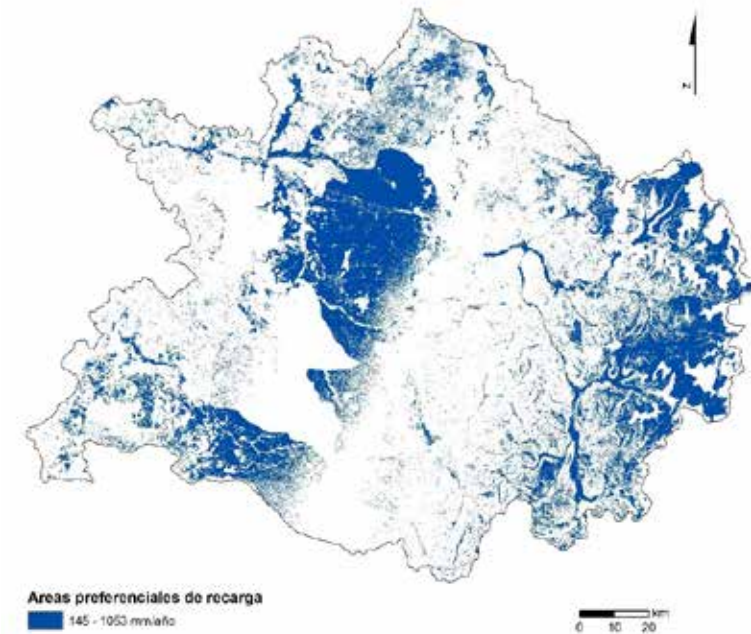


Figura 4: Identificación de las áreas principales de recarga.

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 de 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 escenario del año de 2016 (Pliscoff, 2020), muestra que las zonas (color naranja) y otra con riesgo menor hacia el este y el oeste (colores verdes y amarillos) (Figura 5). Las clases de riesgo mayores están asociadas a áreas donde ocurre simultáneamente un valor elevado de recarga y uso agrícola.

Este resultado está asociado a las prácticas agrícolas en terrenos poco inclinados, en un suelo con un componente arenoso significativo donde, además, la profundidad del nivel piezométrico oscila entre 10 y 20 m. Sin embargo, las zonas urbanas presentan un riesgo “Moderado a bajo” debido a los bajos niveles de recarga calculados por WetSpas en estas áreas.

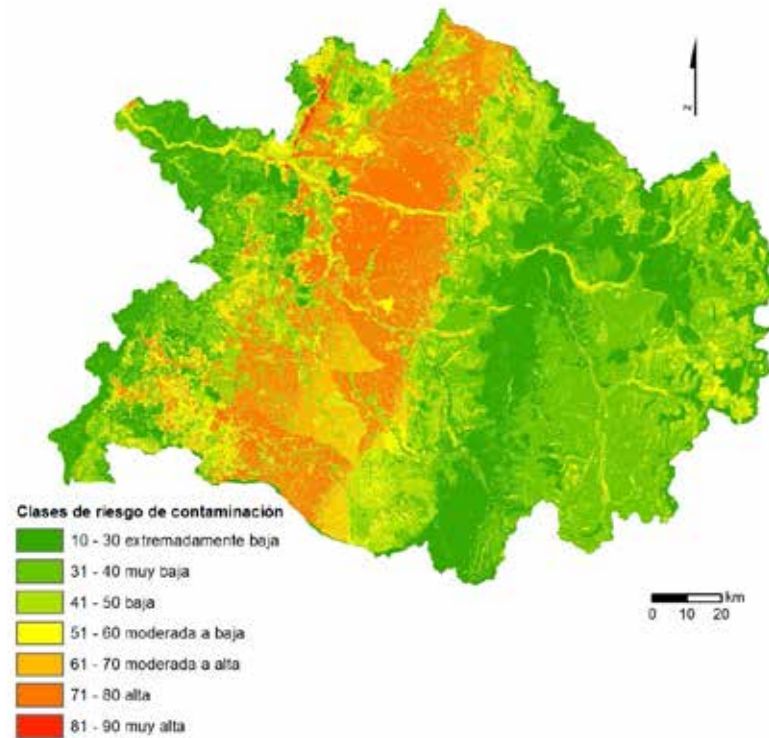


Figura 5: Impacto del uso del suelo en el riesgo de contaminación del agua subterránea.

Tanto la disponibilidad de agua subterránea como el riesgo de contaminación de esta son factores intrínsecamente relacionados con el uso del suelo. Utilizando los resultados del modelo WetSpas 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” (Pliscoff, 2020).

La comparación entre los valores de recarga de 1995 y de 2016 se presenta en la Figura 6. En general se observa que la recarga entre 1995 y 2016 se mantiene relativamente estable. Pero si se observan las variaciones más importantes, se verifica una disminución de la recarga en la zona oeste, causada por la transformación del uso del suelo en plantaciones forestales. Esto podría indicar que las plantaciones forestales del tipo pinos proporcionan condiciones que disminuyen la infiltración en esta área.

La clase de disminución asociado a este cambio alcanza los -449 mm de recarga (para un área de 7700 has). La variación negativa más significativa de la recarga es la disminución de entre -149 y -50 mm, que ocurre en un área aproximada de 1.218 km<sup>2</sup>.

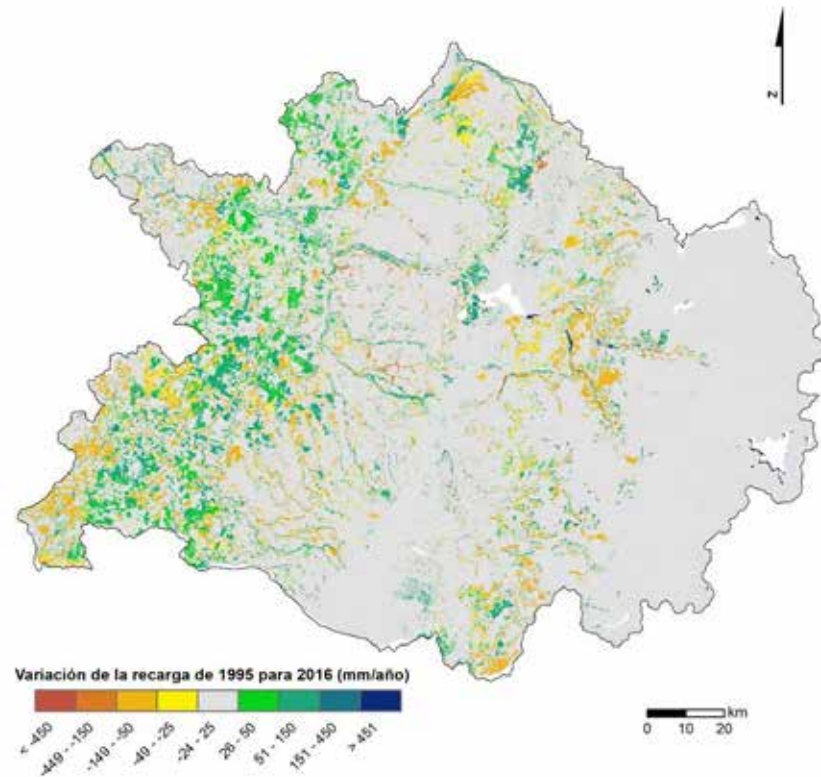


Figura 6: Impacto de los cambios del uso del suelo en la recarga entre 1995 y 2016.

En cuanto a los cambios en el riesgo de contaminación, de manera general, el riesgo de contaminación en esta cuenca es similar entre los años 1995 y 2016. Sin embargo, existe un incremento del riesgo en el área de transición entre la zona montañosa y el área central, así como un incremento significativo en algunas zonas al centro y norte.

La sustitución de pequeñas áreas de bosque nativo o agrícolas dispersas por zonas urbanas provocó un incremento del riesgo de contaminación. La reducción de riesgo se observa, principalmente, en las áreas que en 1995 conformaban bosques espinosos y en 2016 están ocupadas por plantaciones forestales (Figura 40), lo que ocasionó la disminución en la capacidad de infiltración en los suelos.

De una manera general, el incremento de recarga tiene un efecto de aumento del riesgo de contaminación cuando se trata de usos de suelo que pueden tener riesgo asociado, tal como zonas de agricultura, zonas urbanas, nuevas zonas de bosque en que las condiciones de infiltración son propicias a los procesos de recarga. La relación entre las zonas preferenciales de recarga (145 a 1053 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 2651 km<sup>2</sup> (50 % de toda el área de zonas preferenciales de recarga).

Las clases con menor riesgo de contaminación corresponden a 2665 km<sup>2</sup> (los restantes 50 % de toda el área de zonas preferenciales de recarga). Eso es decir que mitad de las zonas preferenciales de recarga están con riesgo de contaminación significativo.

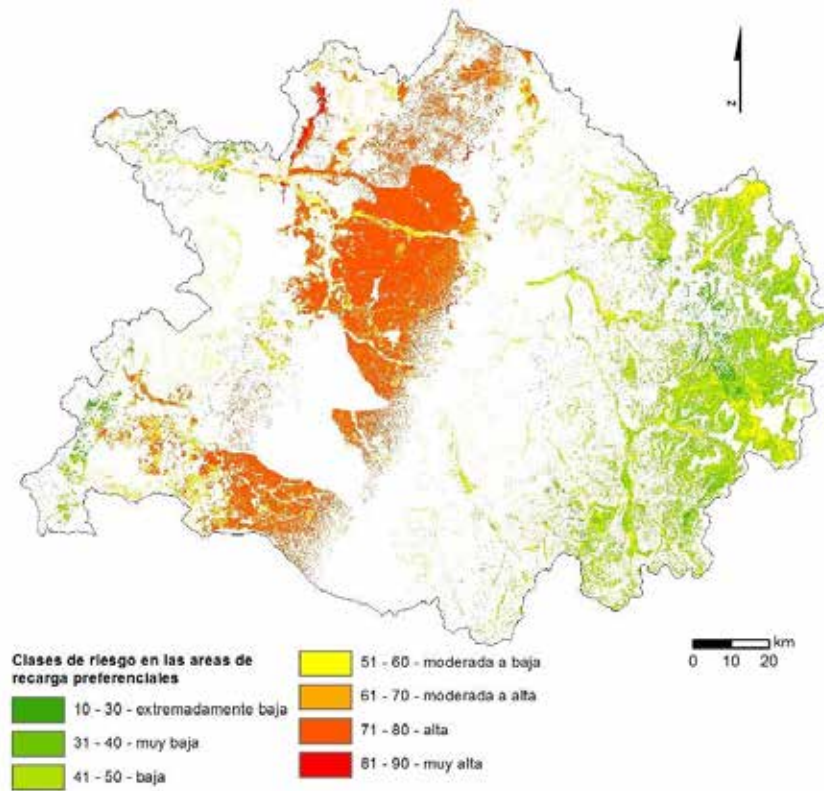


Figura 7 – Riesgo de contaminación en las áreas preferenciales de recarga.

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 Maule deberá tener en cuenta las siguientes conclusiones:

- La localización de las principales zonas de recarga está vinculada a áreas agrícolas.
- Existe una disminución de las áreas de recarga en la zona costera debido a la transformación de áreas de bosque espinoso en plantaciones forestales.
- 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 alto debido a la agricultura.

Gracias al trabajo realizado se puede concluir que el mayor reto para la gestión de los recursos hídricos subterráneos en la cuenca del Maule 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 hídricos, su sustentabilidad podría estar en juego.

Tabla 2 - Resumen de las estadísticas de la recarga.

Parámetro	Área (km <sup>2</sup> )	Recarga (mm/año)
<b>Potencial de infiltración en la Cuenca</b>	<b>5822</b>	<b>0-21</b>
	<b>4382</b>	<b>21-95</b>
	<b>5234</b>	<b>95-145</b>
	<b>5316</b>	<b>145-1053</b>
<b>Infiltración con riesgo de contaminación</b>	<b>2651</b>	<b>145-1053</b>
<b>Infiltración sin o bajo riesgo de contaminación</b>	<b>2665</b>	<b>145-1053</b>

El siguiente paso, que se propone, para la elaboración de un modelo de gestión sustentable de los recursos hídricos subterráneos de la cuenca de Maule, 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).

Este componente que será realizado, a través de la presente consultoría, corresponde a Estimación de Recarga de Acuíferos en la cuenca del Maule, cuyo desafío es determinar a través del modelo WetSpass (Water and Energy Transfer between Soil, Plants and Atmosphere) la recarga existente en los acuíferos, de las distintas cuencas analizadas en la iniciativa, y determinar las zonas de recarga natural actuales.

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

De acuerdo con lo dispuesto en los términos de referencia, en este documento se presentan los resultados obtenidos para la cuenca del río Maule, 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, 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, que posteriormente fue recortado con la forma de la cuenca del río Maule. 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 3934 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 Maule.

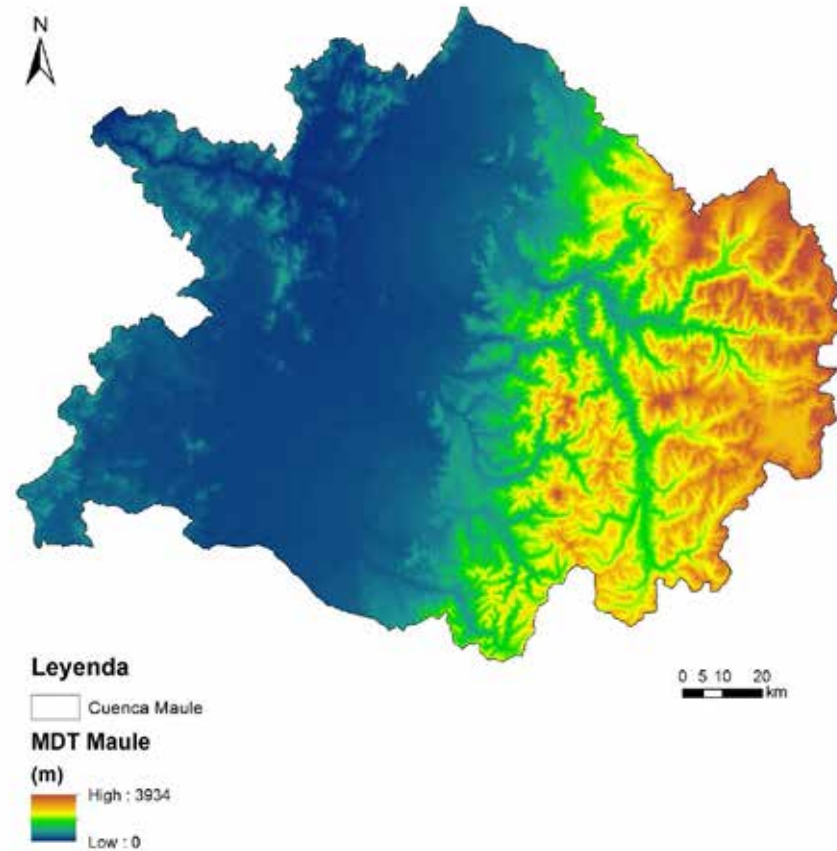


Figura 8 – Modelo digital del terreno.

En la Figura 9 se representa el mapa de pendiente de la cuenca Maule, 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 múltiples 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 bien delimitada por una planicie alargada que se extiende en el eje norte-suroeste.

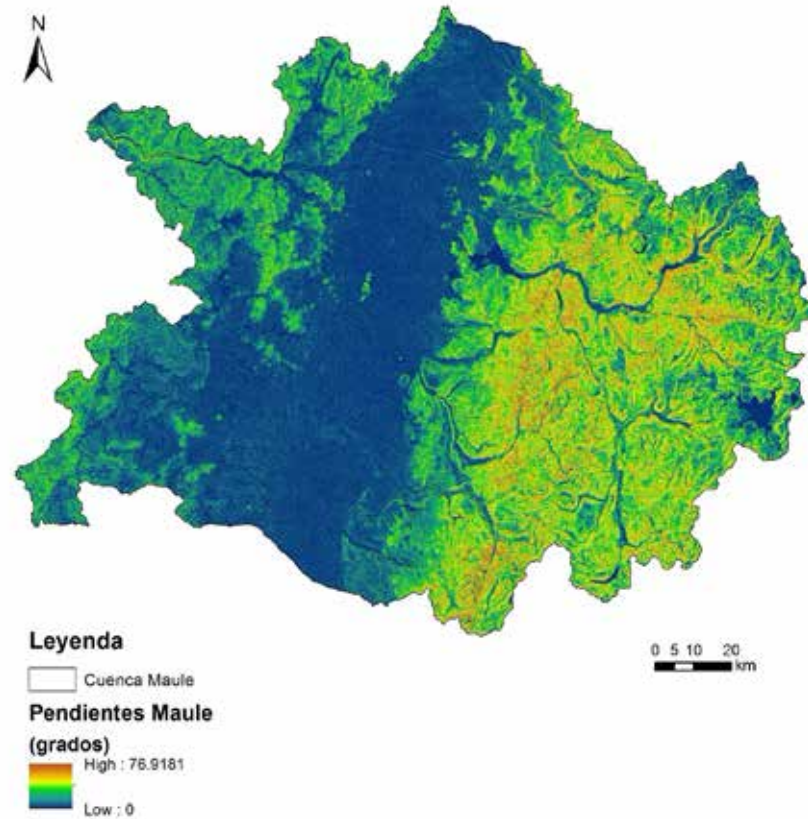


Figura 9 – Pendiente del terreno en la Cuenca Maule (grados).

En la Figura 10 se muestra un histograma o gráfico de frecuencia de clases de la pendiente del terreno en la cuenca de Maule, basado en el mapa de la Figura 9. En este gráfico se muestra claramente la predominancia de pendientes suaves entre 0 y 4 grados, a pesar de que también hay un área significativa con pendientes entre 5 y 15 grados. Como se prevé, las áreas con mayor inclinación, a pesar de su extensa dispersión espacial, son menos frecuentes ubicándose, prácticamente en su totalidad, en la zona este de la cuenca.

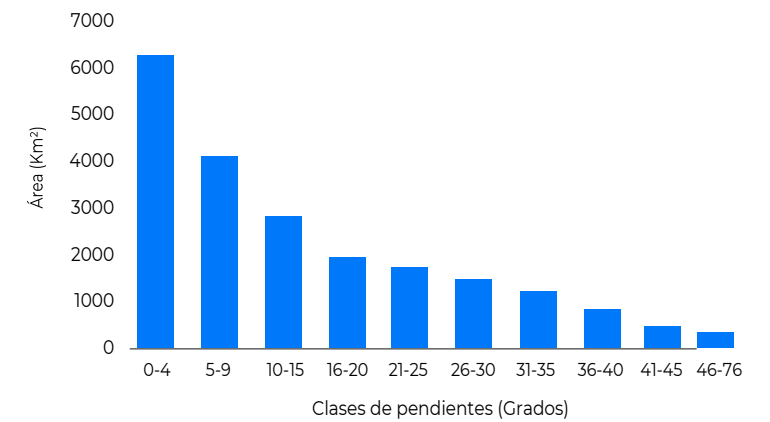


Figura 10 – Frecuencia de clases de pendiente del terreno.

## 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 capítulo se presenta un estudio comparativo entre el uso del suelo en 1995 y 2016. Se analizan las variables de recarga y riesgo de contaminación del agua subterránea por nutrientes para ambos años.

Esta observación está basada en información del estudio “Análisis del estado actual de los ecosistemas terrestres asociados a dos cuencas en Chile central: Maipo y Maule” (Plisicoff, 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 Maule 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. 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. Allí se verifica que las categorías que ocupan mayor territorio en la cuenca Maule son

“Agricultura” (28,0% en 1995; 24,4% en 2016), “Matorral andino” (26,9% en 1995; 25,7% en 2016) y “Plantaciones forestales” (10,0% en 1995; 18,0% en 2016). Nótese que el área ocupada por “Plantaciones forestales” prácticamente se duplica. En el gráfico se puede verificar los valores totales de área y su porcentaje para cada categoría y para toda la cuenca.

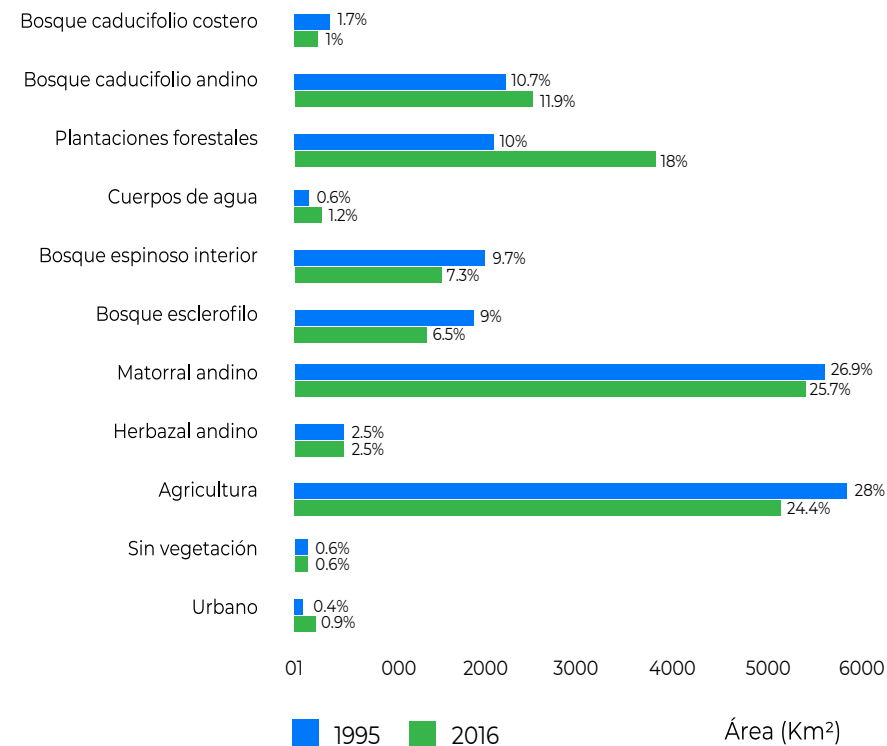


Figura 11 – Categorías de uso del suelo en la cuenca de Maule, para 1995 y 2016.

La evolución espacial del uso del suelo se presenta en la Figura 12 y Figura 13. En las imágenes se observa que en la región dicho está fuertemente asociado a la geomorfología de la cuenca. Por este motivo hacia el este, en las zonas de montaña, se encuentran las áreas matorral andino y bosque caducifolio andino.

En la transición entre la zona de montaña y central también se encuentran áreas de plantaciones forestales, que han crecido de manera significativa en el periodo analizado, en esta zona y en la franja costera. Otro fenómeno que se observa es la creciente fragmentación y discontinuidad espacial de las diferentes categorías, siendo un claro ejemplo las áreas de bosques y agricultura.

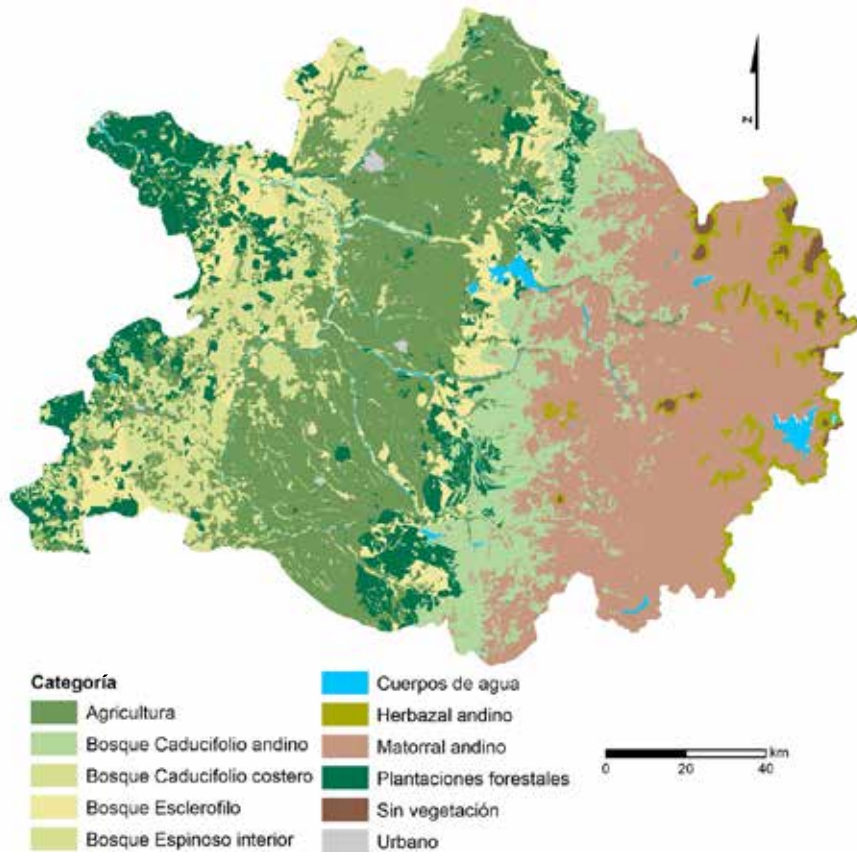


Figura 12 – Categorías de uso del suelo en 1995 (Pliscoff, 2020).

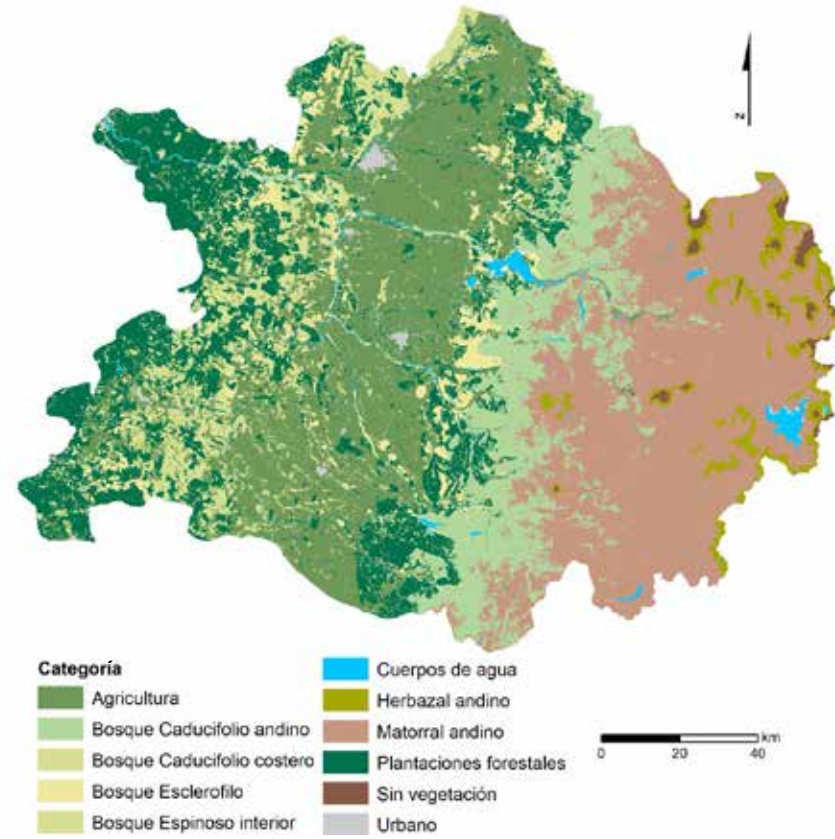


Figura 13 – Categorías de uso del suelo en 2016 (Pliscoff, 2020).

Por otro lado, ocurrió una reducción de la superficie utilizada por las áreas agrícolas de 3,6% (700 km<sup>2</sup>), que pierden conectividad debido a la expansión de las plantaciones forestales. 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 WetSpass	Descripción WetSpass <sup>1</sup>
Bosque Esclerófilo	36	shrub
Bosque Espinoso interior	36	shrub
Herbazal andino	23	meadow
Matorral andino	33	mixed forest
Sin vegetación	7	excavation
Bosque Caducifolio andino	305	oak
Bosque Caducifolio costero	305	oak
Cuerpos de agua	55	unnavigable river/open water
Urbano	1	city center build up
Agricultura	21	agriculture
Plantaciones forestales	302	pine

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 para el modelo.

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.

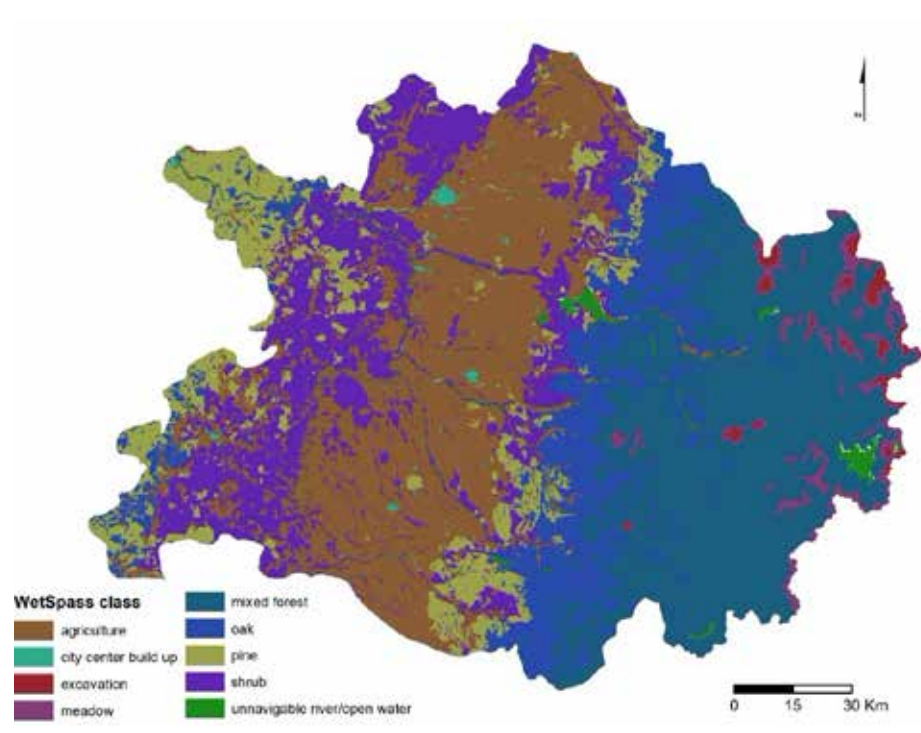


Figura 14 – Clases de WetSpass para el uso del suelo en 1995

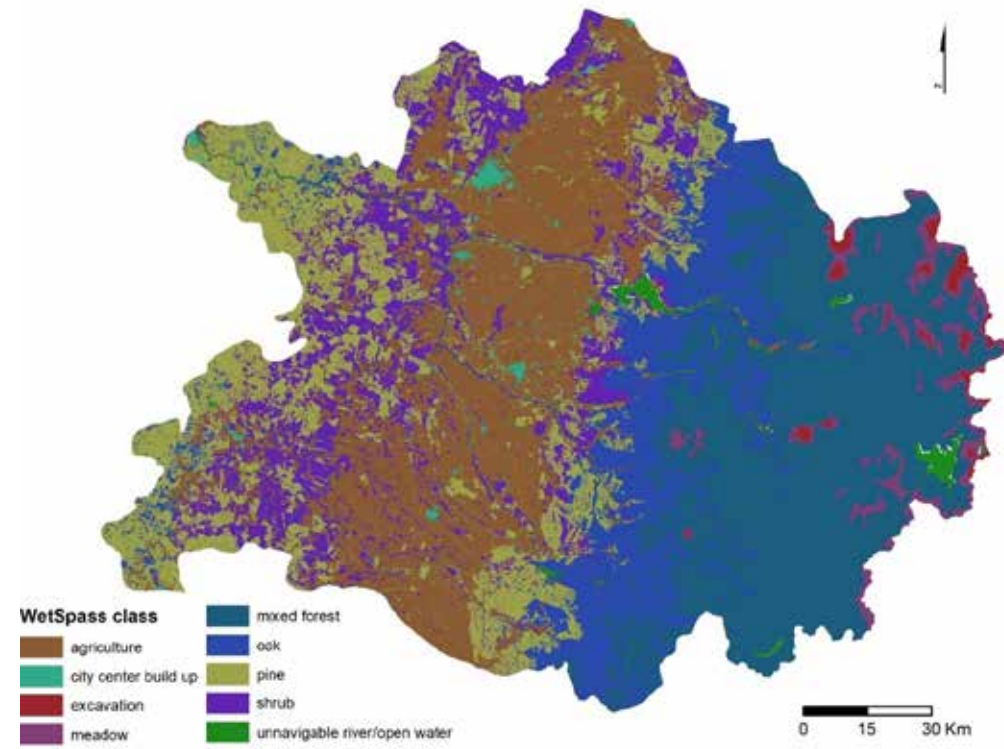


Figura 15 - Clases de WetSpass para el uso del suelo en 2016.

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. Los parámetros considerados para cada clase están en la Tabla 4.

Tabla 4 - Parámetros considerados para cada clase<sup>1</sup>.

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	0,2	0	0,8	0	0,3	2	0,12
7	Sin vegetación	0	1	0	0	0,05	0	0,001
21	Agricultura	1	0	0	0	0,4	4	0,6
23	Herbazal	1	0	0	0	0,5	8	0,1
28	Pradera húmeda	1	0	0	0	0,3	2	1,3
33	Matorral	0,8	0,2	0	0	1,5	2	4
36	Bosques	1	0	0	0	0,1	9	0,12
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	0,5	0,3	0,2	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 fue 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, así como su interacción con otros componentes y factores como el uso de esos suelos, 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 la información disponible y los siguientes criterios: edad geológica del terreno (Era y Periodo), y tipo de composición litológica.

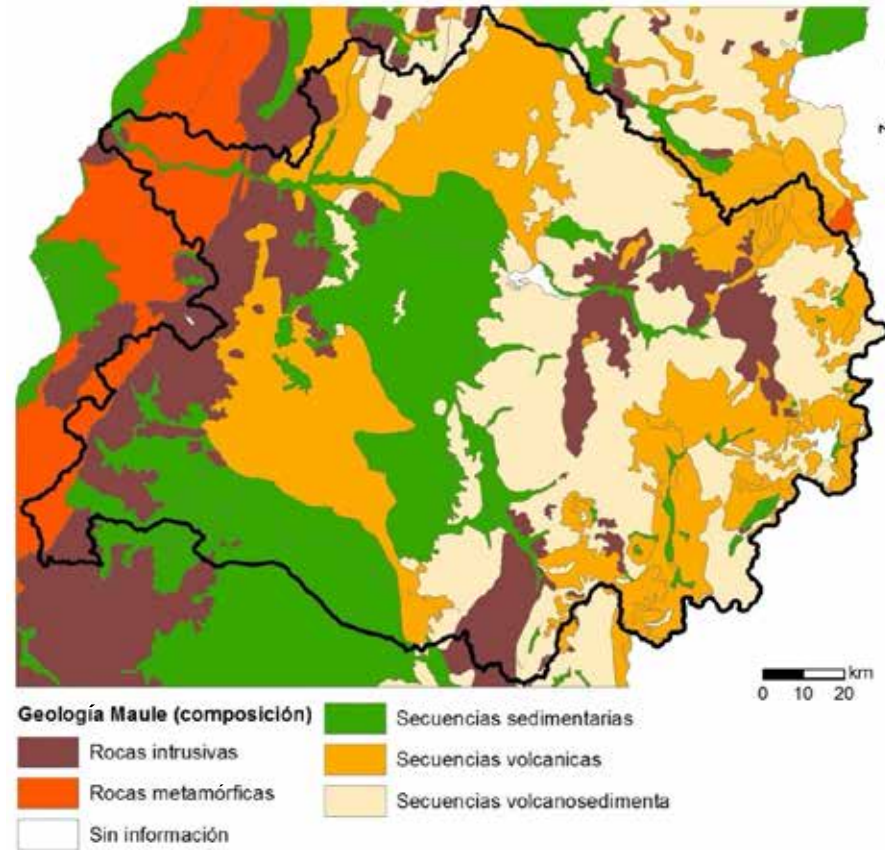


Figura 16 – Geología agrupada por tipo de composición litológica.

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 posible, 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 estos. 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 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.

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

ERA	PERIODO	GEOLOGIA	COMPOSICIÓN	SUELO <sup>1</sup>	COD. WETSPASS
Sin información	Sin información	Sin información	Sin información	Clay (glaciar)	12
Cenozoico	Cuaternario	Q1	Secuencias sedimentarias	loamy sand	2
Cenozoico	Cuaternario	Qf	Secuencias sedimentarias	sandy loam	3
Cenozoico	Cuaternario	Qe	Secuencias sedimentarias	Sand	1
Cenozoico	Cuaternario	Q3i	Secuencias volcánicas	sandy loam	3
Cenozoico	Cuaternario	Qm	Secuencias sedimentarias	loamy sand	2
Cenozoico	Cuaternario	Q1g	Secuencias sedimentarias	loamy sand	2
Cenozoico	Neógeno	PI3t	Secuencias volcánicas	clayloam	9
Cenozoico	Neógeno	PPI3	Secuencias volcánicas	sandy loam	3
Cenozoico	Neógeno	Mg	Rocas intrusivas	sandy clayl	7
Cenozoico	Neógeno	PP1r	Secuencias sedimentarias	loamy sand	2
Cenozoico	Neógeno	M3i	Secuencias volcánicas	clayloam	9
Cenozoico	Neógeno	MP3	Secuencias volcánicas	clayloam	9
Cenozoico	Neógeno	Mimg	Rocas intrusivas	sandy clayl	7
Cenozoico	Paleógeno	OM2c	Secuencias vulcano-sedimenta	sandy loam	3
Mesozoico	Cretácico	Ki2m	Secuencias vulcano-sedimenta	sandy loam	3
Mesozoico	Cretácico	Kia2	Secuencias vulcano-sedimenta	sandy loam	3
Mesozoico	Cretácico	Kia1c	Secuencias sedimentarias	loamy sand	2
Mesozoico	Cretácico	Ki2c	Secuencias vulcano-sedimenta	sandy loam	3
Mesozoico	Cretácico	Kiag	Rocas intrusivas	clayloam	9
Mesozoico	Cretácico	Ks1m	Secuencias sedimentarias	loamy sand	2
Mesozoico	Jurásico	Js1c	Secuencias sedimentarias	loamy sand	2
Mesozoico	Jurásico	Ji1m	Secuencias sedimentarias	loamy sand	2
Mesozoico	Jurásico	J3i	Secuencias volcánicas	sandy loam	3
Mesozoico	Jurásico	Js1m	Secuencias sedimentarias	loamy sand	2
Mesozoico	Jurásico	Jig	Rocas intrusivas	clayloam	9
Mesozoico	Triásico	Tr1m	Secuencias sedimentarias	loamy sand	2
Mesozoico	Triásico	Tr1c	Secuencias sedimentarias	loamy sand	2
Paleozoico	Paleozoico	PzTr4	Rocas metamórficas	silty clay	11
Paleozoico	Paleozoico	Pz4a	Rocas metamórficas	silty clay	11
Paleozoico	Paleozoico	Pz4b	Rocas metamórficas	silty clay	11
Paleozoico	Paleozoico	CPg	Rocas intrusivas	sandy clayl	7
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 WetSpas.

Un análisis rápido de los diferentes tipos de textura muestra que los suelos más comunes en la cuenca del río Maule son los suelos relativamente francos, de composición volcánica o vulcano-sedimentaria (sandy loam), suelos arcillo-arenosos (loamy sand), y suelos con fracciones de arcilla elevadas (clayloam). 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.

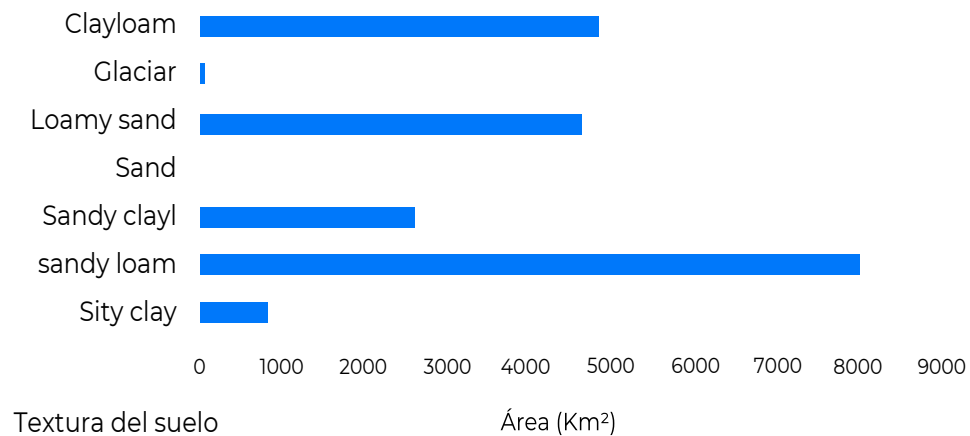


Figura 17 – Área ocupada por los diferentes tipos de suelo, con los nombres de las clases originales de WetSpass.

Los parámetros utilizados, en las simulaciones del modelo WetSpass, para cada tipo de suelo en la cuenca del Maule 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 considerados<sup>1</sup>.

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
9	clayloam	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 suelos en inglés para mantener la terminología original y poder identificarlos fácilmente en caso de realizar un análisis posterior en WetSpass.

De esta manera, de acuerdo con el enfoque adoptado en este estudio, el mapa de texturas de suelo para la región del Maule se muestra en la Figura 18.

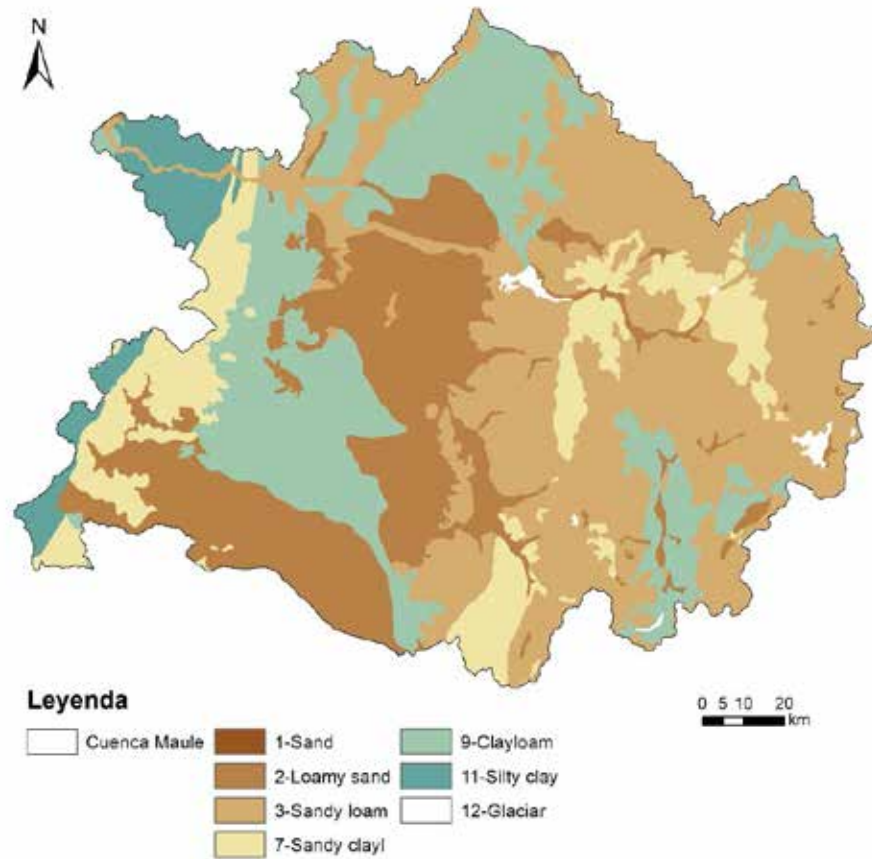


Figura 18 – Clasificación final de la textura del suelo para WetSpas (nombres según WetSpas).

## 2.5 Precipitación

### 2.5.1 Información base

La información de lluvia generada para la cuenca hidrográfica de Maule se basa en series de precipitación registradas en 47 estaciones. De todas ellas, se eligieron aquellas con series más completas o las ubicadas en zonas con poca información, resultando en 41 estaciones para este estudio.

En la Figura 19 se muestran las estaciones de lluvia seleccionadas. Las estaciones se distribuyen prácticamente por toda la cuenca, exceptuando la zona sureste

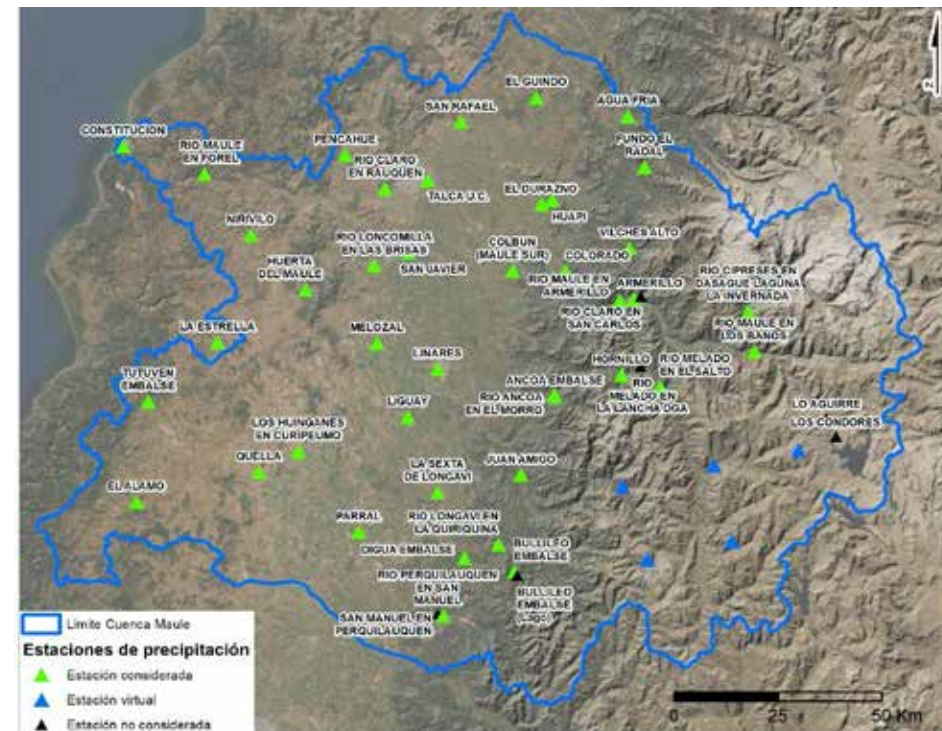


Figura 19 - Ubicación de las estaciones de precipitación

Se consideraron los datos comprendidos en el periodo completos. En la Tabla 7 se resumen las características de las estaciones, y el valor de precipitación promedio anual de cada estación se muestra en la última columna.

En dicha tabla, además, se aprecian las estaciones consideradas para rellenar las series de datos incompletas. En algunos casos, se tuvieron que considerar

varias estaciones simultáneamente para rellenar los datos faltantes.

Durante el año 2018, 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.

Estaciones consideradas	N.º de valores medidos	Fecha inicial	Fecha final	Valores faltantes	Estaciones consideradas para rellenar datos faltantes	Precipitación promedio anual (mm)
AGUA FRIA	181	Jul-92	Ene-19	174	HUAPI	1110,92
ANCOA EMBALSE	347	Ene-88	Nov-17	11	COLORADO	1488,75
ARMERILLO	356	Ene-88	Feb-19	2	COLORADO	2019,13
BULLILEO EMBALSE	355	Ene-88	Feb-19	3	RIO LONGAVI EN LA QUIRIQUINA	1962,71
COLBUN (MAULE SUR)	358	Ene-88	Feb-19	-	-	923,19
COLORADO	358	Ene-88	Feb-19	-	-	1275,76
EL GUINDO	358	Ene-88	Feb-19	-	-	626,96
CONSTITUCION	298	Jul-92	Feb-19	60	TUTUVEN EMBALSE, QUELLA <sup>2</sup>	740,79
DIGUA EMBALSE	243	Ene-88	Feb-19	112	BULLILEO EMBALSE	1365,97
EL ALAMO	282	May-94	Feb-19	76	TUTUVEN EMBALSE	796,02
EL DURAZNO	303	Jun-92	Feb-19	53	HUAPI	830,93
FUNDO EL RADAL	299	Jul-92	Feb-19	58	ARMERILLO	1687,03
HORNILLO	354	Ene-88	Feb-19	3	ARMERILLO	1907,15
HUAPI	354	Ene-88	Feb-19	4	COLORADO	878,55
HUERTA DEL MAULE	304	Jun-92	Feb-19	50	PENCAHUE, MELOZAL <sup>2</sup>	631,56
JUAN AMIGO	303	Jun-92	Feb-19	55	ANCOA EMBALSE	1449,39
LA ESTRELLA	303	Jun-92	Feb-19	54	TUTUVEN EMBALSE	621,33
LA SEXTA DE LONGAVI	301	Jun-92	Feb-19	56	DIGUA EMBALSE	1015,85
LIGUAY	352	Ene-88	Feb-19	24	LINARES	862,11
LINARES	356	Ene-88	Feb-19	2	ANCOA EMBALSE	805,53
LOS HUINGANES EN CURIPEUMO	269	Jun-94	Feb-19	88	PARRAL	656,83
MELOZAL	352	Ene-88	Feb-19	5	LINARES	676,98
PENCAHUE	349	Ene-88	Nov-17	7	TALCA U.C.	588,42
QUELLA	355	Ene-88	Feb-19	3	EL ALAMO	627,22
RIO ANCOA EN EL MORRO	219	May-99	Feb-19	138	ANCOA EMBALSE	1431,33
RIO CIPRESES EN DASAGUE LAGUNA LA INVERNADA	27	Jun-15	Feb-19	328	HORNILLO, ARMERILLO <sup>2</sup>	1004,47
RIO CLARO EN RAUQUEN	222	Feb-99	Feb-19	135	TALCA U.C.	567,74
RIO LONCOMILLA EN LAS BRISAS	194	May-01	Feb-19	161	SAN JAVIER	614,76
RIO LONGAVI EN LA QUIRIQUINA	192	Apr-01	Feb-19	167	BULLILEO EMBALSE	1342,32
RIO MAULE EN ARMERILLO	195	Jun-01	Feb-19	162	ARMERILLO	1934,19
RIO MAULE EN FOREL	192	May-01	Feb-19	164	NIRIVILO; TUTUVEN EMBALSE <sup>2</sup>	843,43
RIO MAULE EN LOS BAÑOS	28	May-15	Feb-19	329	ARMERILLO	1180,07
RIO MELADO EN EL SALTO	164	Apr-03	Feb-19	192	HORNILLO	1500,22
SAN JAVIER	351	Ene-88	Feb-19	6	LINARES	677,91
SAN MANUEL EN PERQUILAUQUEN	236	Ene-98	Feb-19	122	BULLILEO EMBALSE	1445,25
SAN RAFAEL	299	Jun-92	Feb-19	58	COLORADO	655,74
TALCA U.C.	356	Ene-88	Feb-19	2	COLORADO	581,72
TUTUVEN EMBALSE	351	Ene-88	Feb-19	5	LA ESTRELLA	826,69
VILCHES ALTO	235	Ene-98	Feb-19	122	ARMERILLO	1715,99

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

Debido a la existencia de un área sin información de precipitación, en el sureste de la cuenca, antes de seleccionar el método de interpolación se realizó un análisis previo para conocer la relación entre la precipitación promedio anual y las características fisiográficas de la cuenca hidrográfica (longitud -X, latitud - Y, altitud).

En la Tabla 8 se muestra la relación con las diferentes variables.

Variables	Altitud	Y	x
Precipitación promedio anual	0,66	0,33	0,63

A pesar de tratarse de relaciones poco significativas, se estimó la lluvia anual, a partir de estas variables, para evaluar la relación entre los valores observados y estimados.

Tabla 9 –Relación entre los valores observados y estimados por relación con diferentes variables fisiográficas.

Método de estimación	Correlación entre valores observados y estimados (Pearson)
Relación lineal: f (X)	0,63
Relación lineal: f (Y)	0,33
Relación lineal: f (altitud)	0,66
Relación multilinear: f (X; altitud)	0,68
Relación multilinear: f (X; Y; altitud)	0,75

Este análisis previo, concluye que la relación que explica mejor la variación de la precipitación se obtiene utilizando las tres variables: altitud, X e Y. Dado que este valor de Pearson no es muy alto y que la cuenca presenta una red de registros de precipitación con buena cobertura espacial, esta relación solo se consideró para la construcción de series de precipitación en 5 estaciones virtuales en el área sureste de la cuenca.

Después de este estudio previo se interpolaron los valores utilizando el método de kriging. En la Figura 20 se muestra el variograma con el modelo esférico utilizado. Como se observa en la figura, no se consideró un modelo omnidireccional.

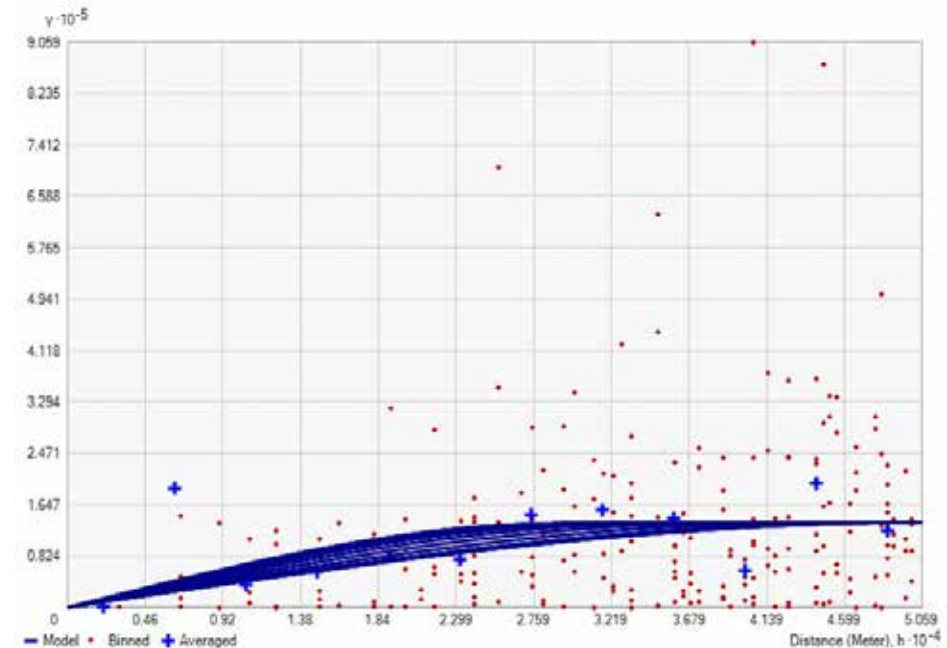


Figura 20 – Modelación del variograma para la interpolación de los valores de precipitación.

El resultado final se muestra en la Figura 21.

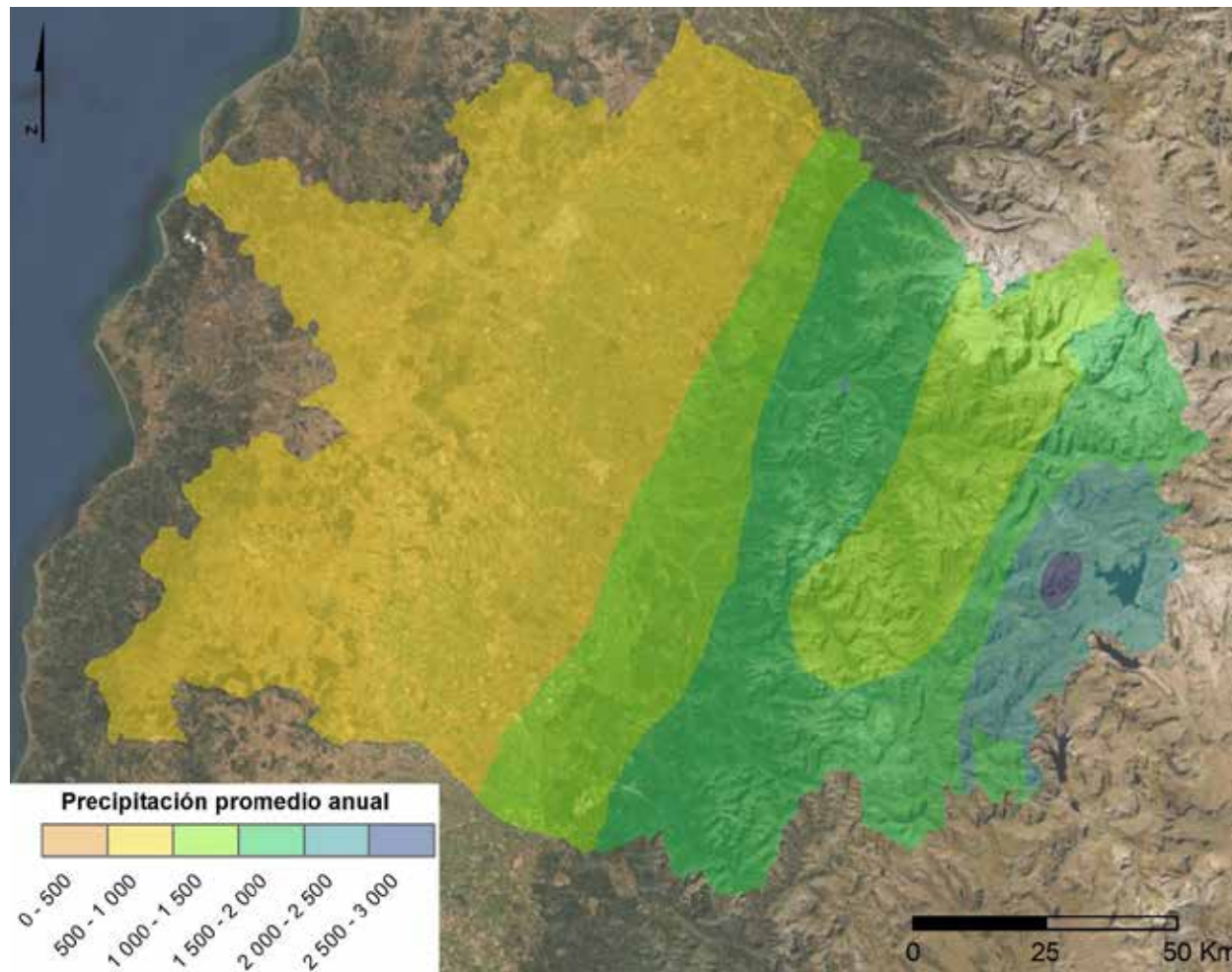


Figura 21 – Valores finales de precipitación promedio anual para el periodo 1988 – 2018.

Existe un incremento de la precipitación promedio anual hacia el sureste, donde se presentan las áreas más elevadas. En esta zona, la precipitación alcanza valores de hasta 2500 mm. Como se mencionó, anteriormente, esta área está relacionada con las estaciones virtuales, con lo cual se podrían estar sobreestimando estos valores.

A pesar de haber tenido que extrapolar las cifras de precipitación para las áreas sin información, la mayor parte está cubierta por estaciones de precipitación. Esto reduce la incertidumbre asociada a los valores considerados para el modelo WetSpass.

En la Figura 22 se muestra el histograma de los valores estimados donde se verifica que la clase más frecuente se sitúa en el rango de 500 a 1000 mm.

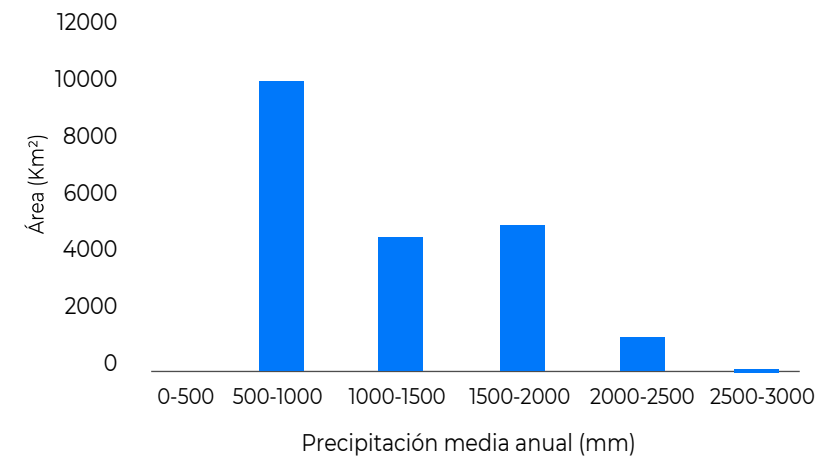


Figura 22 – Histograma de los valores de precipitación promedio anual estimados.

### 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 2018.

Con esta metodología, se demostró que existe una tendencia estadísticamente significativa de descenso en algunas estaciones de precipitación. De las 41 estaciones analizadas, 7 presentan tendencia a disminuir y 34 no presentan ninguna propensión. 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 Maule se basa en series de temperatura promedio de 7 estaciones. En la Figura 23 se muestran las seleccionadas y se observa que la distribución espacial no es representativa.

El relleno de las series se realizó utilizando los datos de la estación Péncahue, que presenta un registro más completo, teniendo en cuenta que la correlación entre las estaciones era muy elevada.

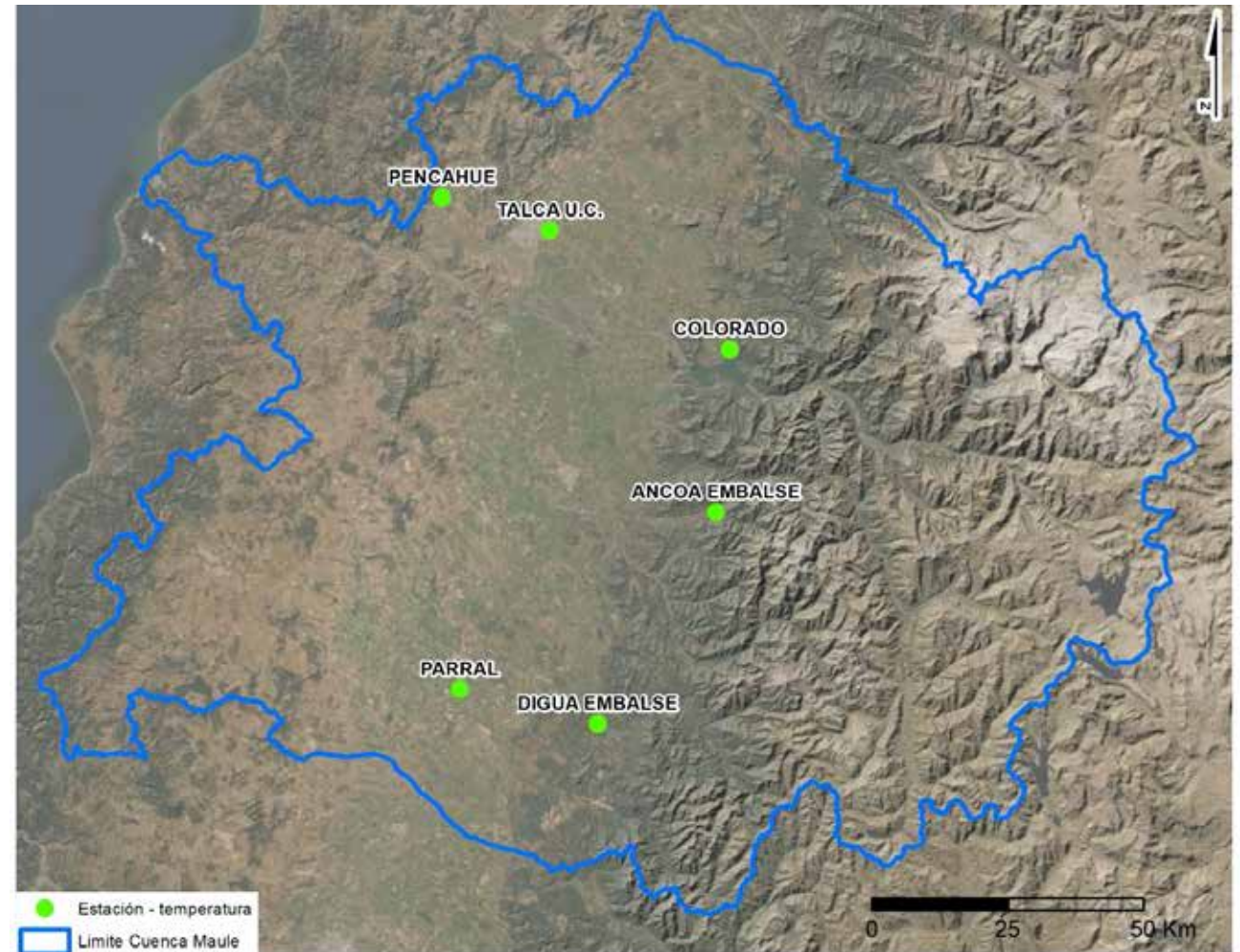


Figura 23 – Localización de las estaciones meteorológicas (temperatura) utilizadas en el estudio.

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 10 se resumen los valores de temperatura promedio de las estaciones consideradas.

Tabla 10 – Valores de temperatura promedio anual.

Estación	Temperatura promedio anual (°C)
ANCOA EMBALSE	13,66
COLORADO	13,51
DIGUA EMBALSE	12,85
PARRAL	14,22
PENCAHUE	15,08
TALCA U.C.	14,55

Para interpolar, espacialmente los valores de temperatura promedio anual, se realizó un análisis previo con el fin de estudiar la relación entre los valores de temperatura y las características de las estaciones, en este caso ubicación y altitud.

La conexión entre los valores observados y simulados fue elevada, con un coeficiente de correlación de Pearson de 0,96. Sin embargo, cabe la posibilidad de que esta relación elevada estuviera asociada al número reducido de estaciones, por lo que no se consideró para la estimación de temperatura en la cuenca.

La interpolación de los valores se realizó directamente a partir de las cifras de temperatura de las estaciones, utilizando el método de kriging. A pesar

de la incertidumbre asociada al resultado, la distribución de temperatura acompaña el gradiente altitudinal de forma natural. El resultado se muestra en la Figura 24.

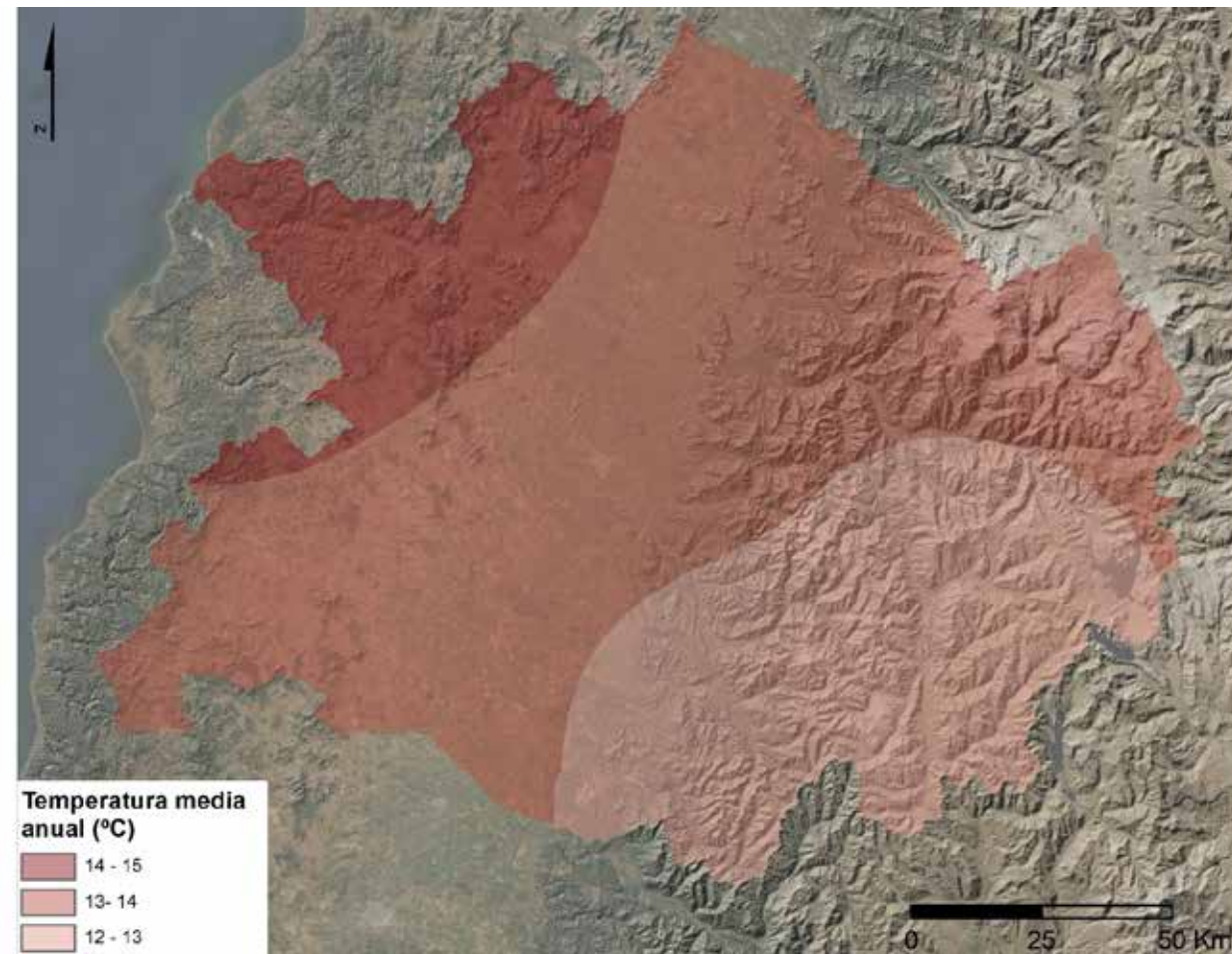


Figura 24 – Temperatura promedio anual en la cuenca hidrográfica del río Maule.

El mapa de temperaturas muestra que los promedios anuales son más elevados en la zona noroeste de la cuenca, con valores del orden de los 15°C, mientras que los más bajos se encuentran en las zonas más altas, al este de la cuenca, con valores del orden de los 12°C.

Según el análisis de frecuencia de clases, representado en la Figura 25, el rango de valores que presenta mayor recurrencia son los 14°C que se dan, principalmente, en la zona central.

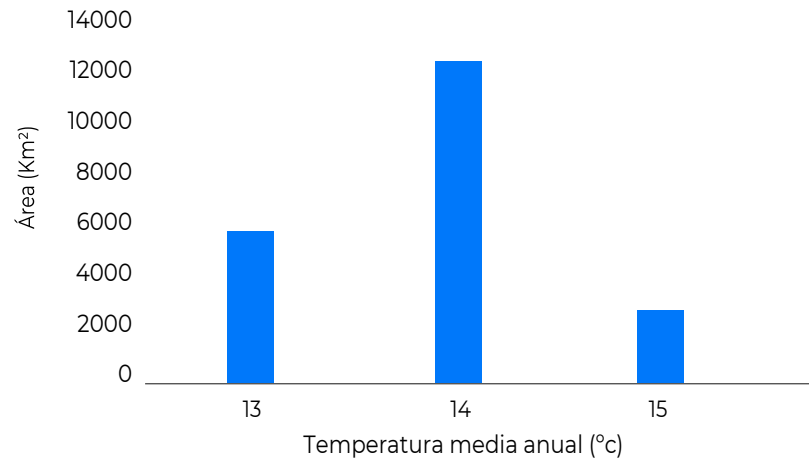


Figura 25 - Histograma de valores promedio de temperatura

El análisis de tendencia de las series de temperatura, calculado a nivel estacional, utilizando el método de Mann-Kendal no fue conclusivo. De las seis estaciones estudiadas, tres presentan tendencia a incrementar, dos a descender y una no presenta tendencia significativa.

La estación de Ancoa Embalse, destaca con una tendencia de subida en los meses de abril, mayo, julio, agosto, septiembre y octubre. La estación Digua Embalse, por otro lado, presenta tendencia descendente en los meses de abril, junio, julio y septiembre. Se desconoce si esta relación pudiera estar relacionada con la operación de los embalses.

## 2.7 Evapotranspiración potencial

El mapa de evapotranspiración potencial para la cuenca de Maule 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 Maule manifiesta un déficit hídrico real. El mapa para la evapotranspiración potencial para el quinquenio 2000-2014 está representado en la Figura 26.

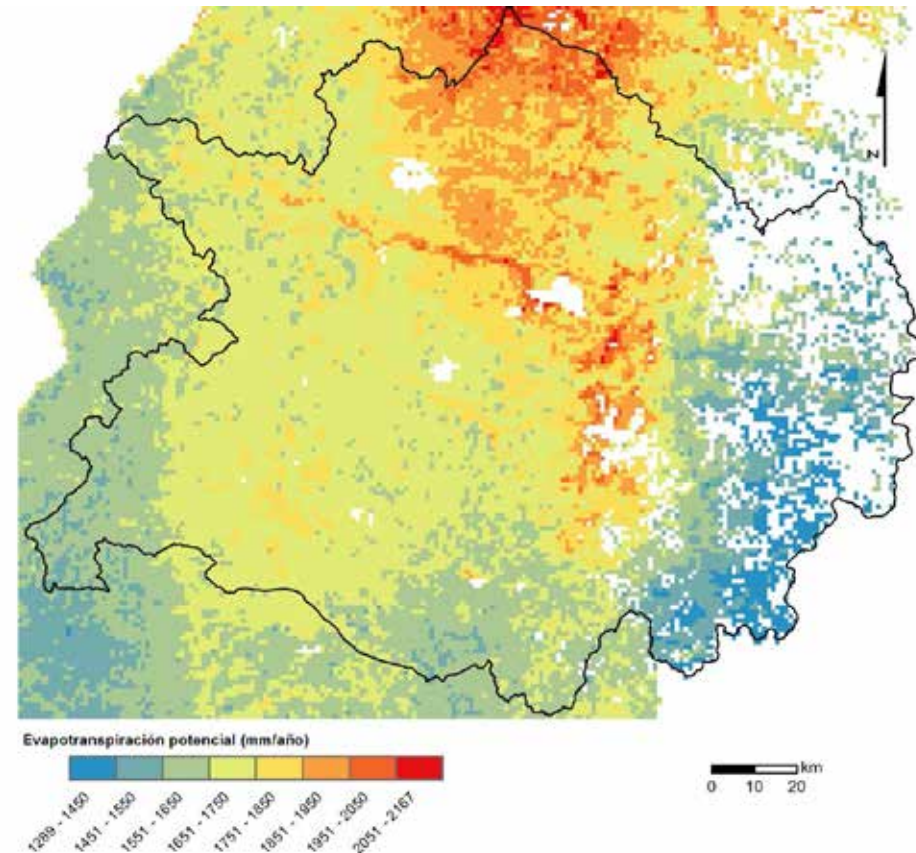


Figura 26 - Evapotranspiración potencial promedio anual para la región (fuente: Galleguillos et al., 2019).

Como puede ver 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 Maule se muestra en la Figura 26.

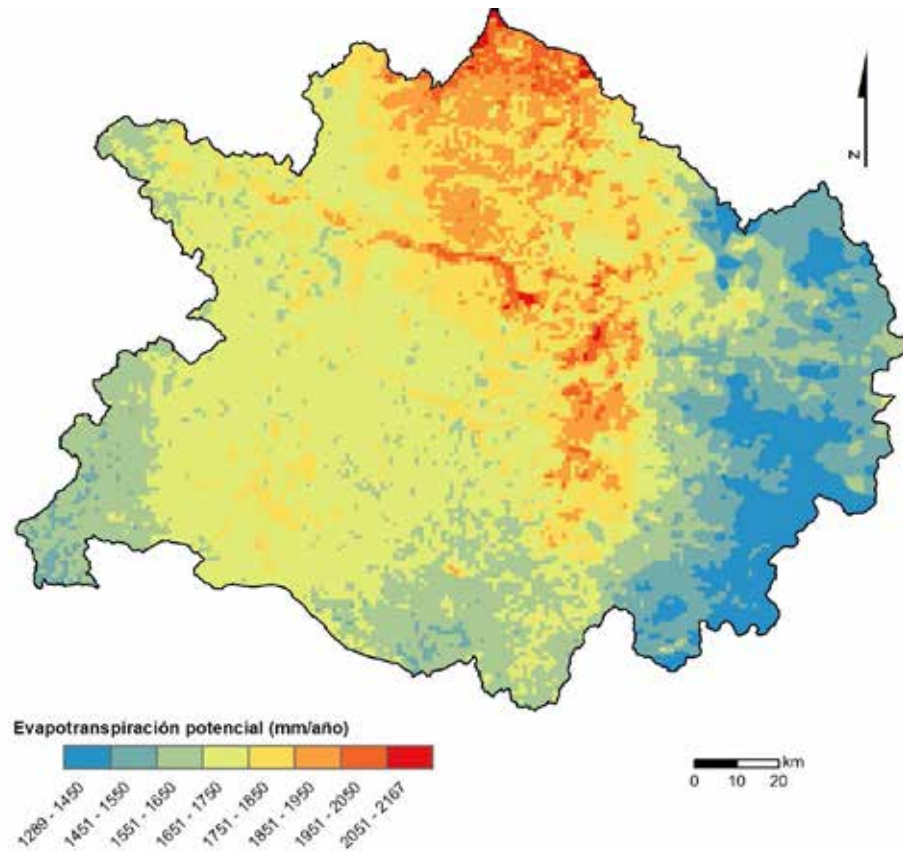


Figura 27 - Mapa completo de evapotranspiración potencial promedio anual para la cuenca de Maule.

La zona de transición entre los Andes, zona centro, 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 las cifras anuales, para correr el modelo y lograr 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 28, el rango de valores que presenta mayor recurrencia corresponde al intervalo de 1650-1750 mm/año, con principal presencia en la zona centro. Sin embargo, cabe señalar que, en general, los valores de evapotranspiración potencial son moderadamente elevados y con gran representatividad en toda la cuenca. Este aspecto se observa en la misma figura, y donde se aprecia también que existen algunas áreas con valores abajo de 1650 mm/año en el este, sur y oeste de la cuenca.

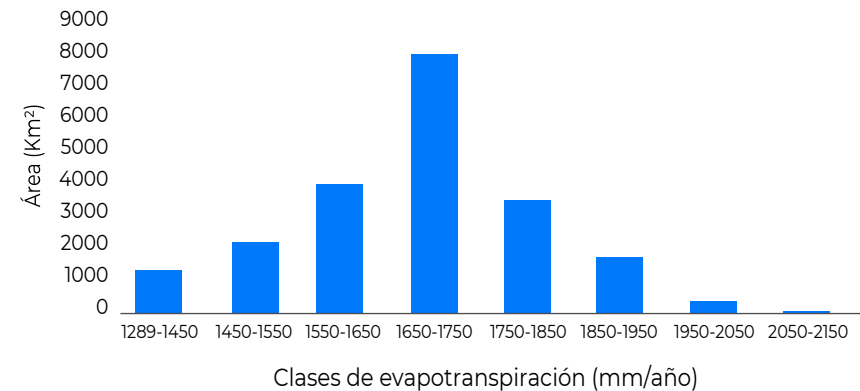


Figura 28 - Clases de frecuencia de evapotranspiración potencial promedio anual.-

## 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 patrón empleado es el WRF (Weather Research and Forecasting) 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.

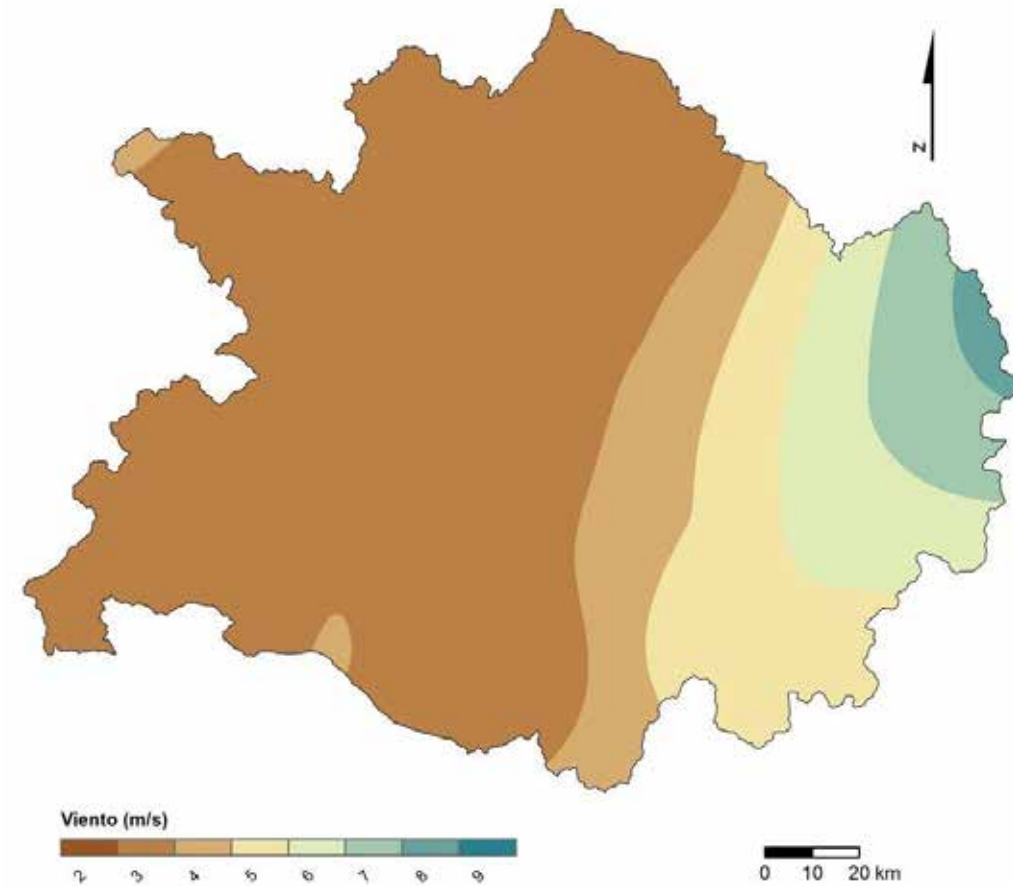


Figura 29 - Mapa de velocidad del viento (m/s).

De este modo, partiendo del modelo WRF, se generó una red de información para cubrir el área de la cuenca de la manera más uniforme posible. Para cada punto, dentro de la cuenca, se obtuvo un reporte del modelo con valores de la velocidad del viento a diferentes elevaciones del suelo. La información utilizada para WetSpass fue la correspondiente a la altura de 5,5 metros sobre el suelo. La interpolación de estos valores se realizó a través de la aplicación de técnicas de geoestadística, en este caso kriging ordinario. El mapa generado WetSpass, y se muestra en la Figura 29.

En la Figura 30 se observan las frecuencias de clases del mapa de velocidad del viento. Las del viento menor, asociadas a las zonas centro y oeste de la cuenca.

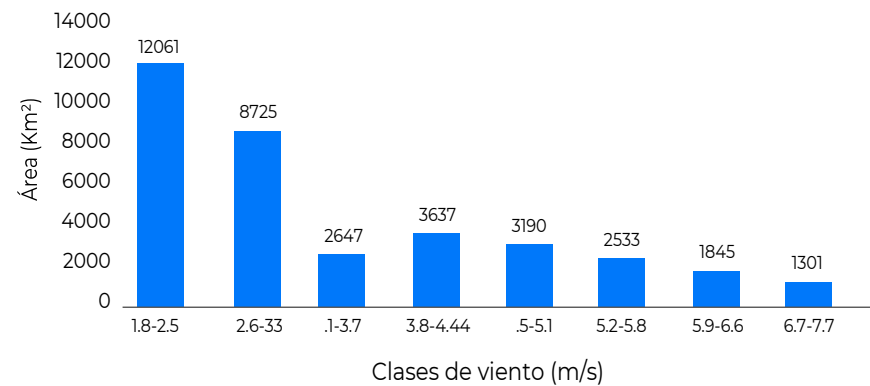


Figura 30 - Clases de frecuencia para la velocidad del viento.

## 2.9 Profundidad del nivel piezométrico

Para el cálculo de la piezometría se partió de la información registrada por 12 piezómetros (Figura 31).

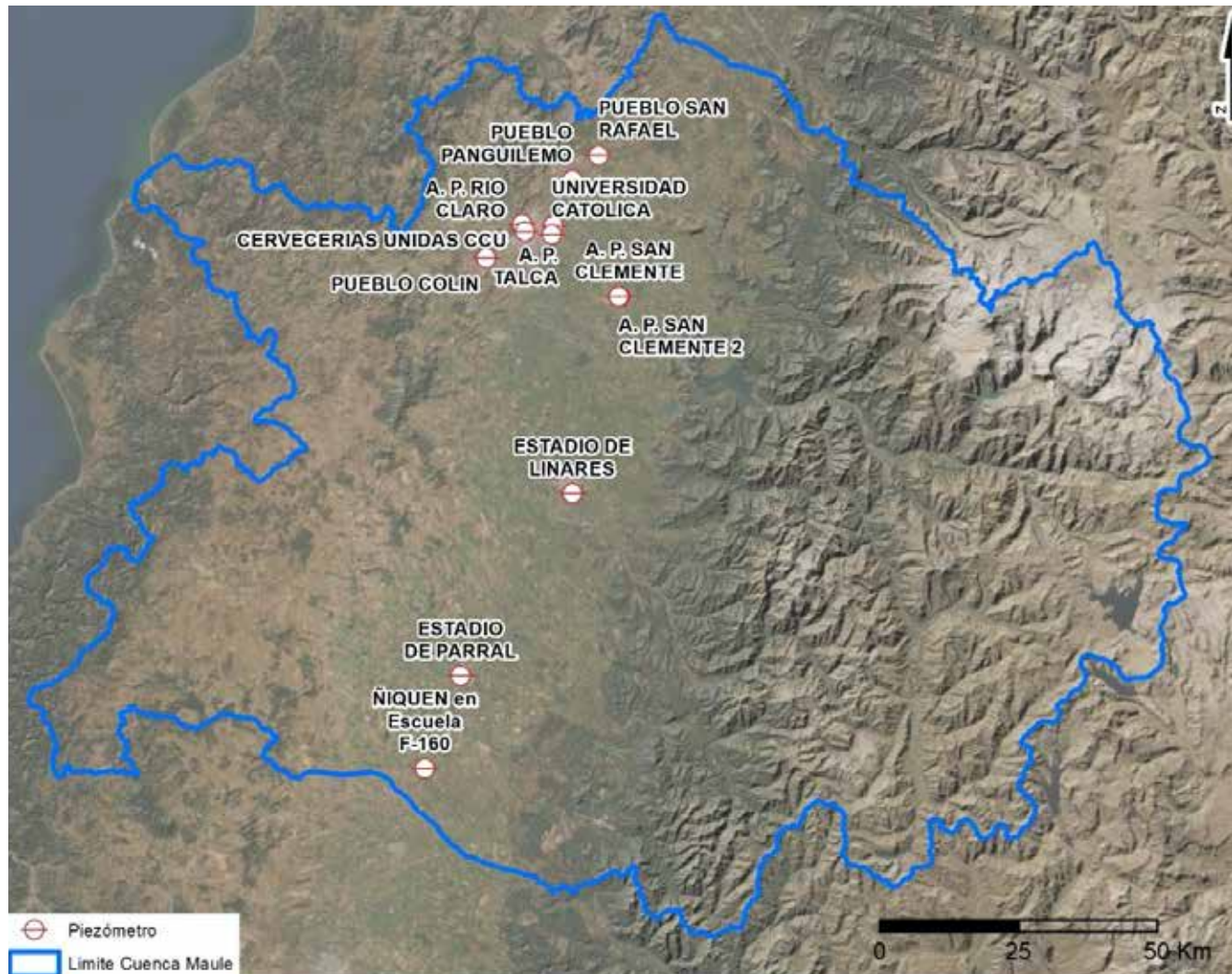


Figura 31 – Piezómetros en la cuenca del Maule.

En un primer análisis de la información se observó una relación significativa entre el nivel piezométrico<sup>1</sup> y la altitud, sin embargo, el reducido número de piezómetros no permitía asegurar que esta relación pudiera ser aplicada en las zonas sin información.

Por ese motivo, se comparó esa relación con la misma de la cuenca de Maipo. En la Figura 32 se muestran las relaciones entre piezometría y altitud para las cuencas de Maule y Maipo. Al tratarse de tendencias muy similares, la relación se dio por válida para la cuenca de Maule y fue considerada para representar la profundidad del nivel piezométrico.

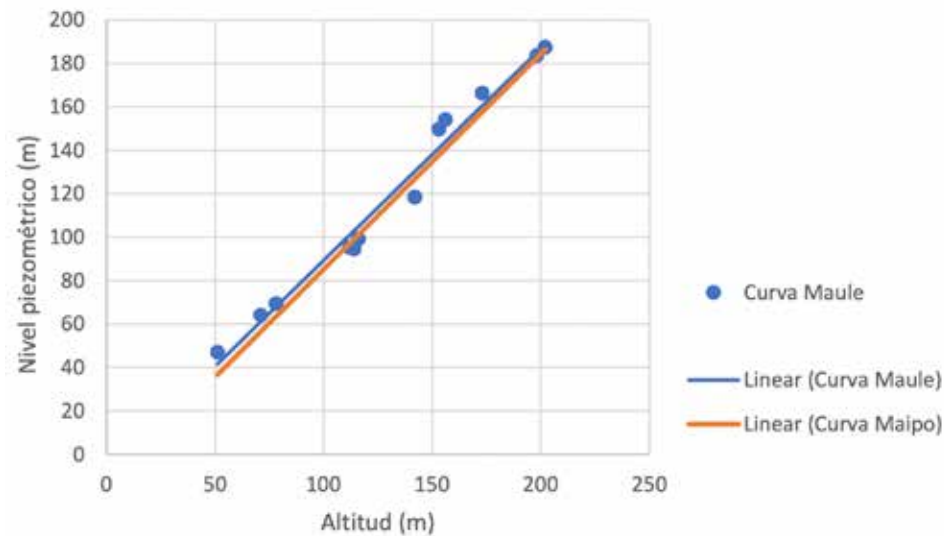


Figura 32 – Relación entre la altitud y el nivel piezométrico.

En la Figura 33 se muestra la profundidad del nivel piezométrico utilizada como insumo inicial para el modelo WetSpass.

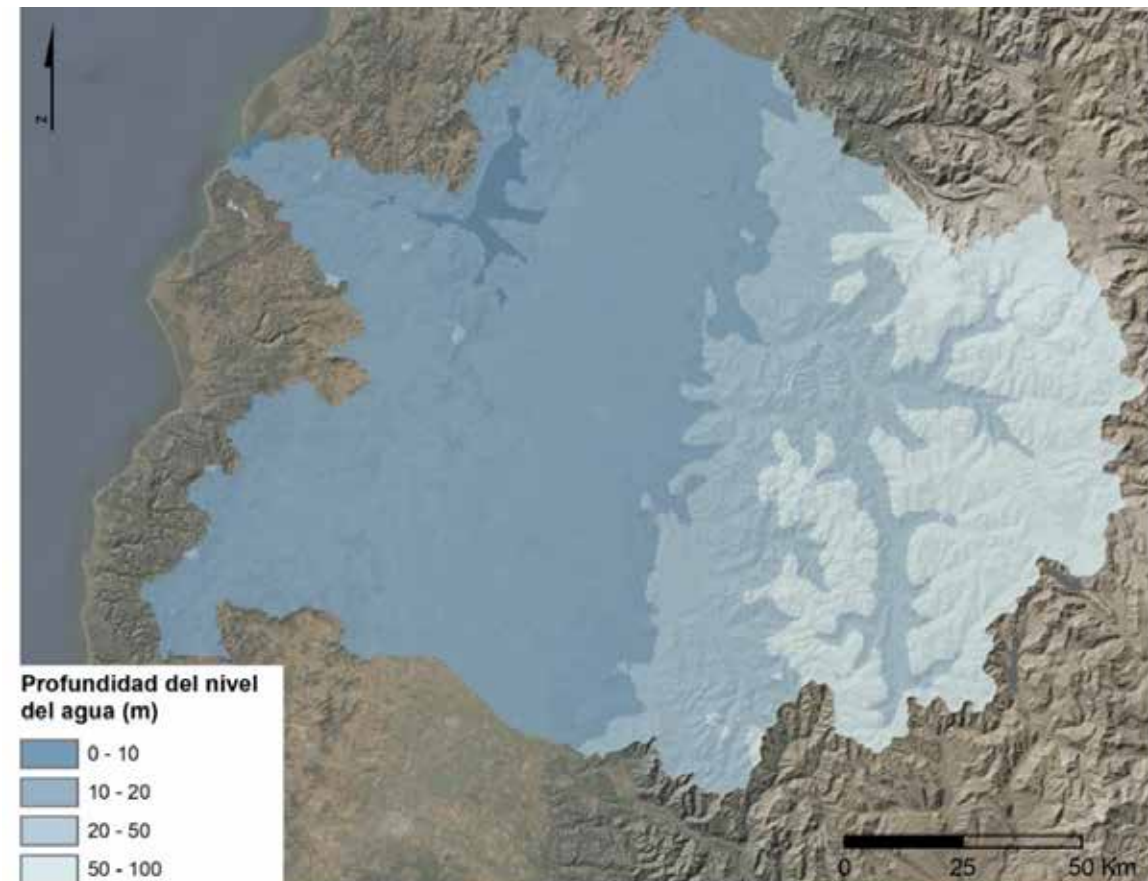


Figura 33 – Profundidad del nivel piezométrico en la cuenca Maule.

Debido a la escasez de los datos, no fue posible evaluar la tendencia del nivel piezométrico.

1. 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.

## 3.1 Suposiciones del modelo

Según los objetivos de este trabajo, el modelo WetSpass de la región hidrográfica del río Maule 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, 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: 6115482.101427 m
- Izquierda: 166589.285402 m
- Derecha: 381665.637821 m
- Abajo: 5948369.678928 m

Utilizando esta referencia espacial y la misma resolución en todos los mapas, se garantizó la homogeneidad de la información, generando archivos raster con el mismo número de filas y columnas para todos los insumos. En este caso, todos los mapas incorporados al modelo WetSpass tenían 7,169 filas y 5,570 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 Maule, Informe Final Volumen N.º II (2017). Para este documento se calcularon los recursos subterráneos sustentables (recarga media anual de los acuíferos) a nivel regional.

Uno de los resultados 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  $\alpha$  (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).

## 4.1 Impacto por cambios en el uso del suelo

### 4.1.1 Recarga

La aplicación del modelo WetSpass para los años 1995 y 2016 permiten 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, con la excepción del mapa de uso del suelo.

En la Figura 34 se muestra la recarga calculada a partir del uso del suelo de 1995. Como ya se observó en los resultados obtenidos durante el proceso de calibración del modelo, las áreas con mayor recarga se encuentran en la zona central de la cuenca donde el relieve es más suave y el tipo de suelo favorece la infiltración.

En cuanto a la simulación, utilizando el uso del suelo de 2016, la situación cambia a nivel cuantitativo, pero esencialmente en términos de distribución de la recarga (Figura 35). Como se puede observar en la Figura 35, un área significativa fue convertida a plantaciones forestales durante el periodo analizado (1995 a 2016). Esta variación del uso del suelo provocó una alteración en la distribución de la recarga, principalmente, en la zona oeste de la cuenca (171272 has).

Aunque se mantuvo el valor promedio de recarga para toda la cuenca, se redujo la recarga local en el área de plantaciones forestales, a saber, pinos y eucaliptos. Por otro lado, la escorrentía en estas áreas se ha incrementado debido al factor de impermeabilización que implican las condiciones del suelo asociadas a este tipo de plantaciones. Así, el valor promedio de recarga para toda la cuenca es de 97 mm/año (2042 hm<sup>3</sup>/año) para el año 2016, que está muy próximo del valor calculado en el Plan de Recursos Hídricos Región Maule (2017), de 94 mm/año (1996 hm<sup>3</sup>/año). Esa diferencia representa un poco más de 2% del valor de referencia, lo que es considerado un error aceptable y poco significativo.

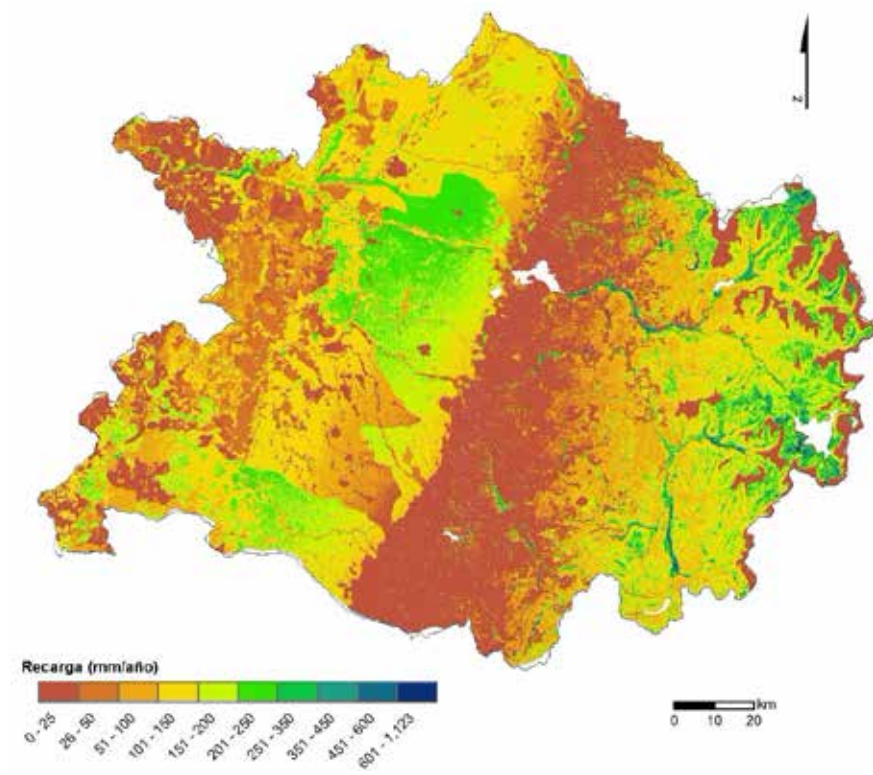


Figura 34 – Distribución de la recarga promedio anual en el año 1995.

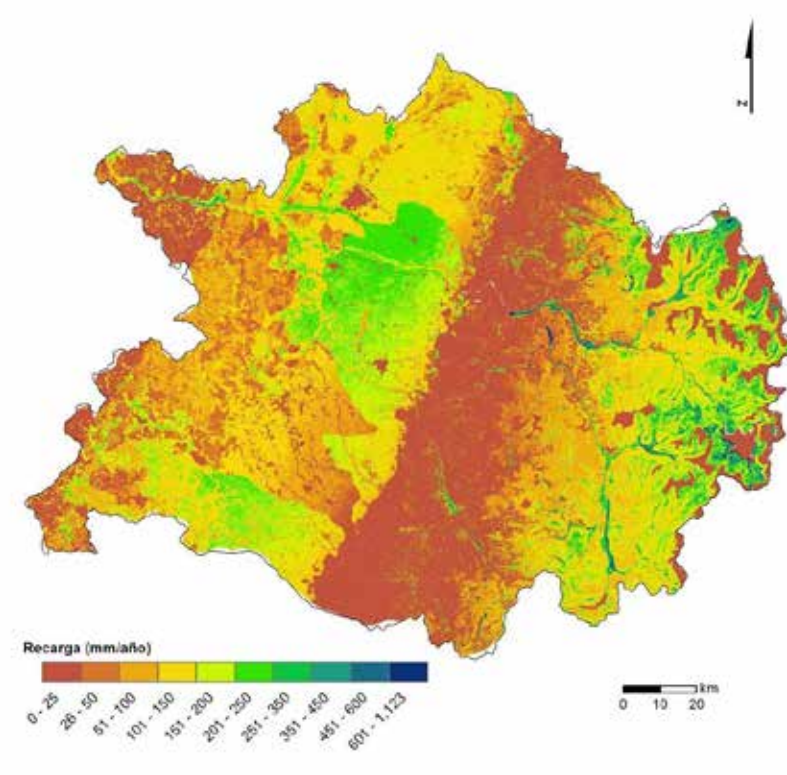


Figura 35 – Distribución de la recarga promedio anual en el año 2016.

Las cifras de recarga máxima (601-1123 mm/año) están ubicados en la zona andina, debido a los valores altos de precipitación, más precisamente, en valles donde la infiltración es posible, y los pendientes son más bajos. Los valores de recarga mínima (0-25 mm/año) están asociados a zonas donde la infiltración no tiene condiciones naturales para acontecer, como las zonas de suelos más arcillosos, en el corredor de transición entre zonas altas y valle, de norte a sur, y las zonas de plantaciones forestales esencialmente en el oeste de la cuenca.

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 áreas urbanas y en algunas 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 36. 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.

Si se observan las variaciones más importantes (rango de <-450 a -50 mm/año, de la Figura 36), se verifica una disminución de la recarga en la zona oeste, causada por la transformación del uso del suelo en plantaciones forestales. Esto podría indicar que las plantaciones forestales del tipo pinos y/o eucaliptos proporcionan condiciones que disminuyen la infiltración en esta área. La clase de disminución asociado a este cambio alcanza los -449 mm de recarga.

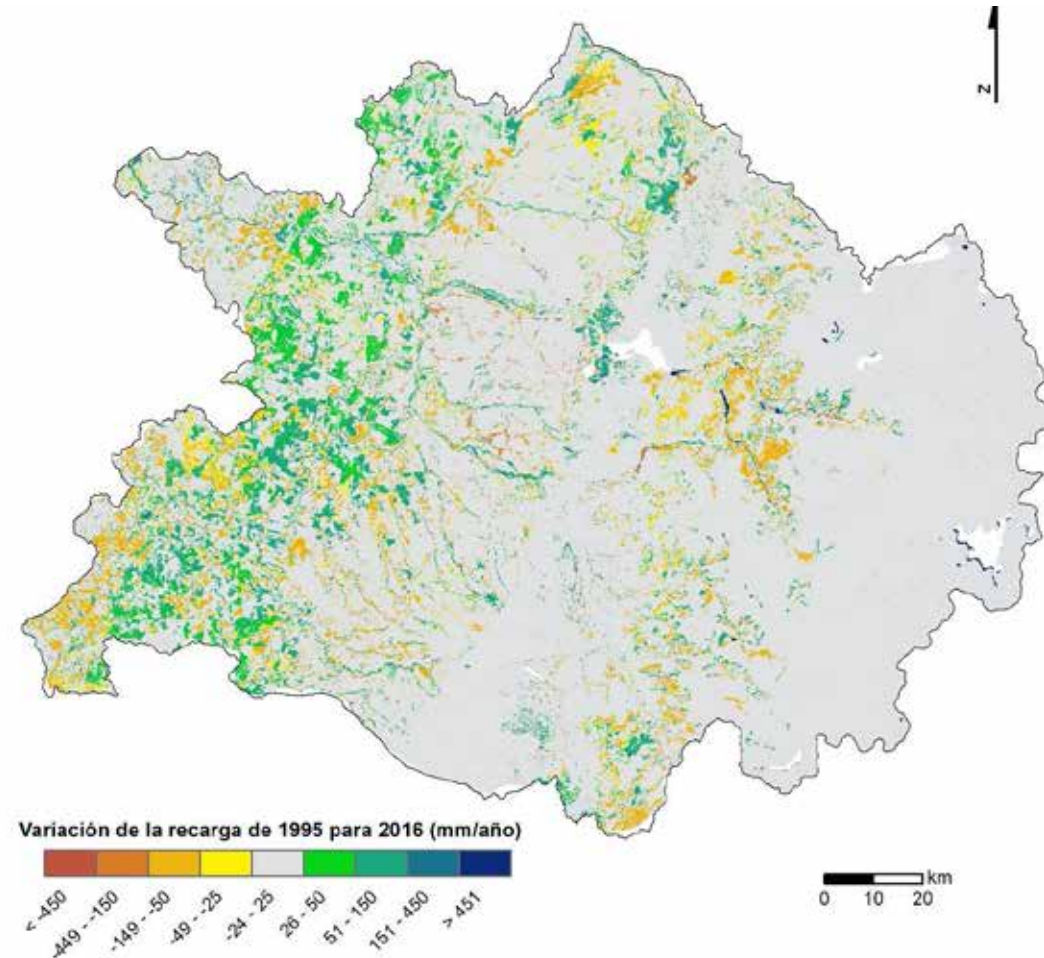


Figura 36 – Distribución y cuantificación de los cambios en los valores de recarga entre 1995 y 2016.

En general se observa que la recarga, entre los dos años, se mantiene relativamente estable, como se ve en la Figura 37. En esta figura, se observa también que la variación más significativa de la recarga es la disminución de entre -149 y -50 mm, que ocurre en un área aproximada de 1218 km<sup>2</sup>.

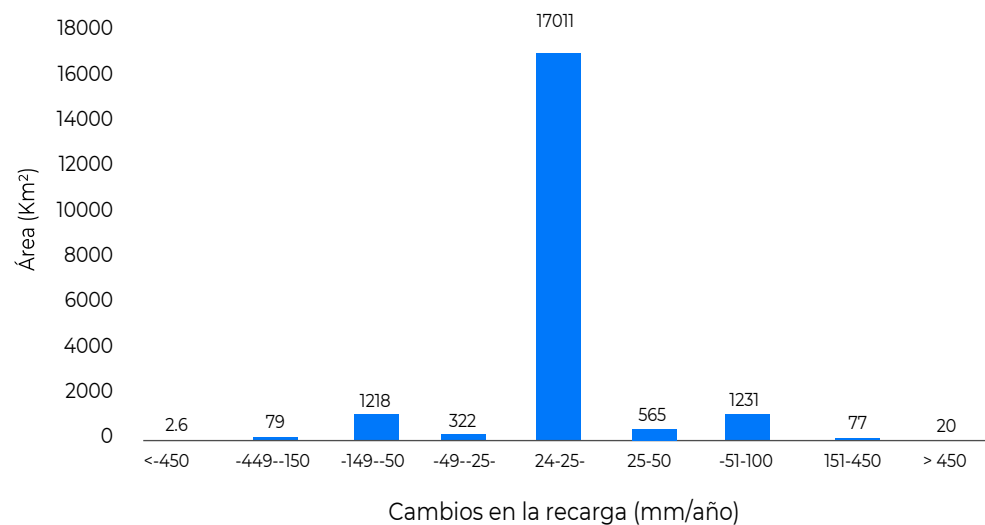


Figura 37 – Frecuencia de clases de cambios en los valores de recarga.

Con el objetivo de identificar las zonas preferenciales de recarga, se efectuó una reclasificación de los valores de recarga para representarlos por cuartiles. Se consideró que las áreas con valores más elevados 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.

En base a los límites del primer, segundo y tercer cuartil (Q1, Q2 y Q3 respectivamente) y el valor máximo, se definieron cuatro rangos de valores. Las celdas que presentan cifras entre el tercer cuartil y el máximo 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 38). 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 55% de la recarga total, mientras ocupa solamente el 26% de la superficie de la cuenca.

Tabla 11 - Estadísticas de la distribución espacial de la recarga.

Clase de recarga	Área (km <sup>2</sup> )	Mínimo (mm)	Máximo (mm)	Volumen total (hm <sup>3</sup> )	Recarga Promedio (mm)	Contribución para la recarga total
< Q1	5822	0	21	2	12	1%
Q1 < Q2	4381	22	95	59	259	13%
Q2 < Q3	5233	96	145	123	644	32%
Q3 < Max.	5315	146	1053	211	1122	55%

En la Figura 38, se puede comprobar que las áreas de recarga preferenciales (entre Q3 y Max.) se sitúan en las zonas central y suroeste de la cuenca, coincidiendo con el área de terrenos agrícolas. Los altos valores de recarga observados en la zona andina se deben a la alta precipitación y baja evapotranspiración menor en este lugar que en las zonas central y suroeste, ya que el porcentaje de precipitación que se infiltra en el suelo es mucho menor en las zonas inclinadas y con suelos poco desarrollados.

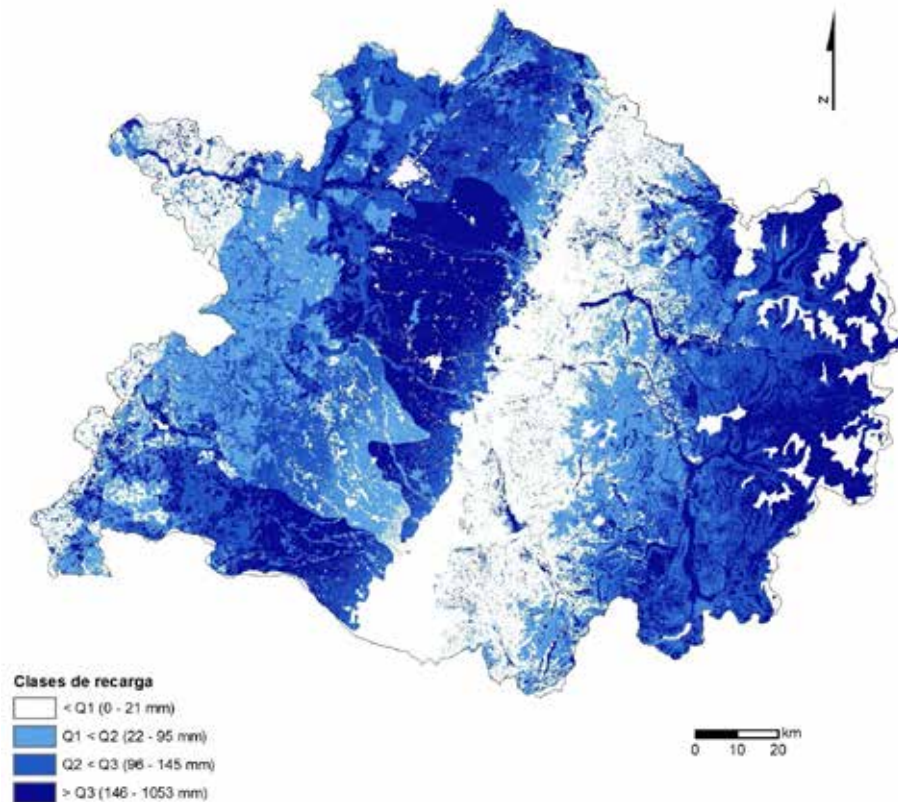


Figura 38 – Frecuencias de clase de la recarga en 2016.

## 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 12.

Tabla 12 - Puntuación del tipo de uso del suelo.

Ocupación del suelo	Puntuación
<b>Áreas agrícolas</b>	
Regadíos (cultivos anuales, ...)	90
Cultivos permanentes (viñas, huertos, oliveras, ...)	70
Áreas agrícolas heterogéneas	50
Pastos y áreas agroforestales	50
<b>Áreas artificiales</b>	
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
<b>Áreas naturales</b>	
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 13).

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 13 - 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

En la Figura 39 y Figura 40 se presentan los resultados de la aplicación del IS a la cuenca de Maule, para el uso del suelo de 1995 y 2016 respectivamente. Se puede comprobar que el riesgo de contaminación, en el área de estudio, se divide en dos zonas: una con riesgo mayor en el área central y otra con riesgo menor hacia el este y el oeste.

Las clases de riesgo mayores están asociadas a áreas donde ocurre simultáneamente un valor elevado de recarga y uso agrícola. Este resultado está asociado a las prácticas agrícolas en terrenos poco inclinados en un suelo con un componente arenoso significativo donde, además, la profundidad del nivel piezométrico oscila entre 10 y 20 m. Sin embargo, las zonas urbanas presentan un riesgo "Moderado a bajo" debido a los bajos niveles de recarga calculados por WetSpas en estas áreas.

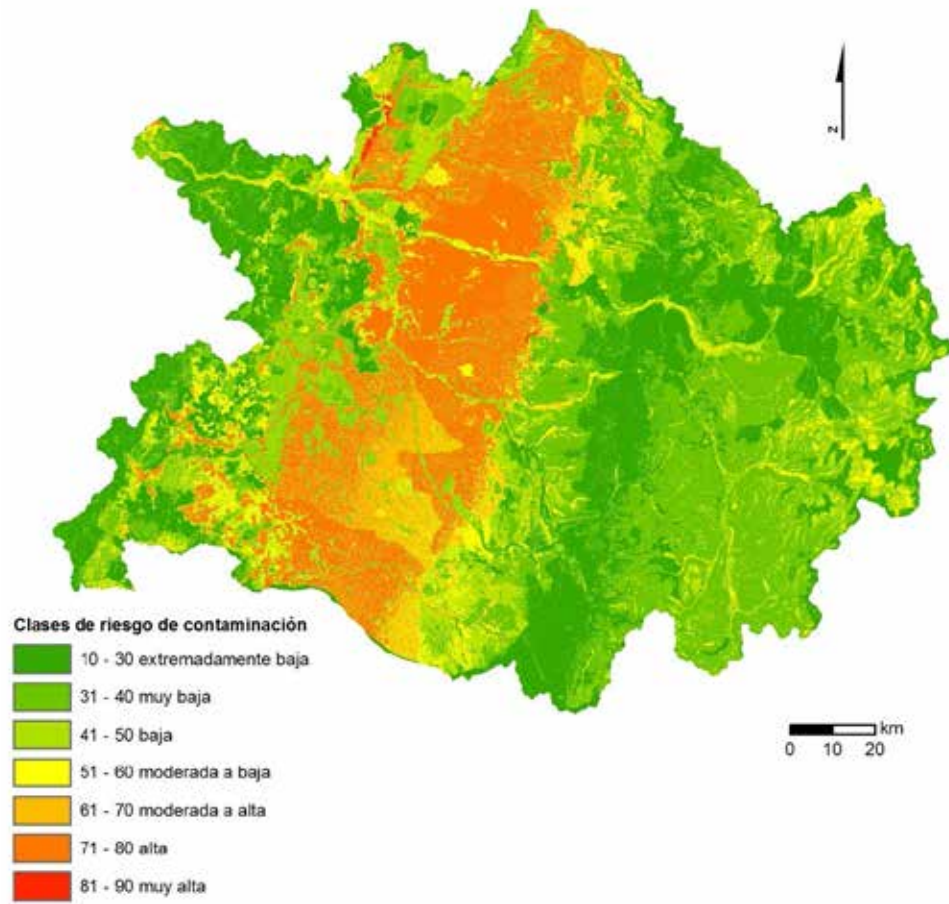


Figura 39 – Mapa de riesgo de contaminación para el año 1995.

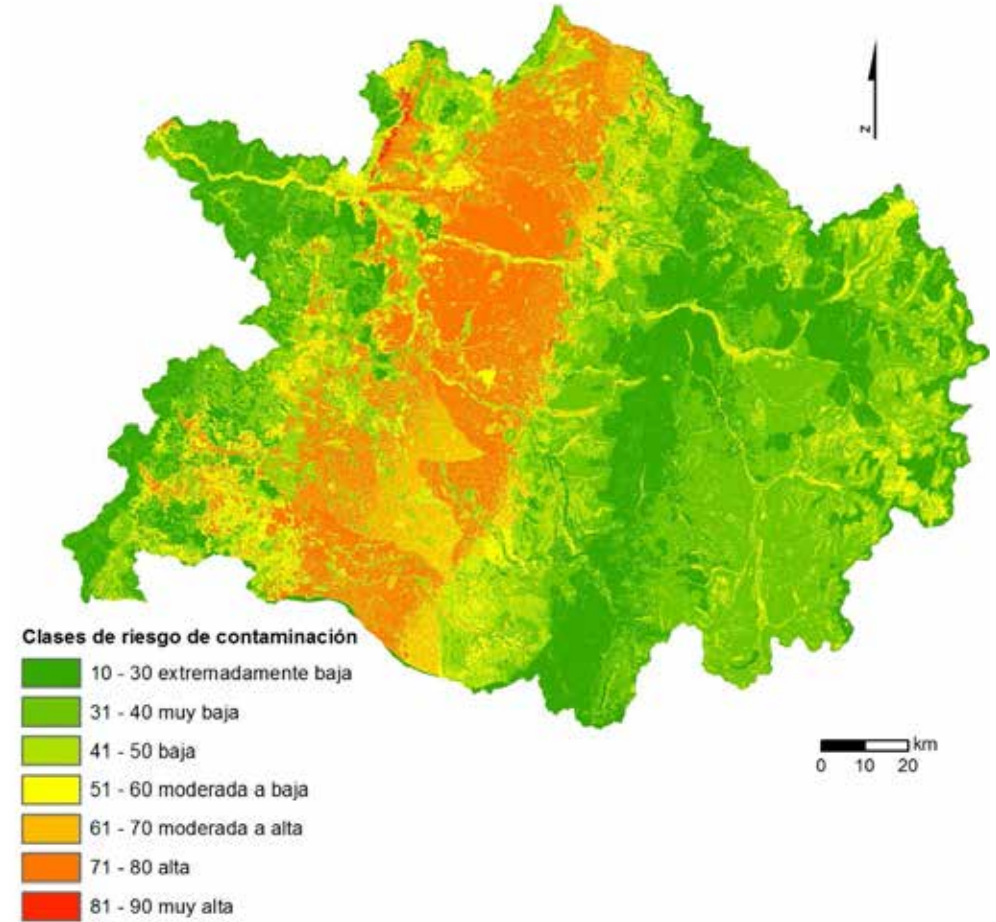


Figura 40 – Mapa de riesgo de contaminación para el año 2016.

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 41).

Se puede concluir, de manera general, que el riesgo de contaminación en esta cuenca es similar entre los años 1995 y 2016. Sin embargo, existe un incremento del peligro en el área de transición entre la zona montañosa y el área central, así como un aumento significativo en algunas zonas al centro y norte. La sustitución de pequeñas áreas de bosque o agrícolas dispersas por zonas urbanas provocó un incremento del riesgo de contaminación. La reducción de ese peligro se observa principalmente en las áreas que en 1995 conformaban bosques espinosos y en 2016 están ocupadas por plantaciones forestales.

De una manera general, la ampliación de recarga tiene un efecto de incremento del riesgo de contaminación cuando se trata de usos de suelo que pueden tener riesgo asociado, tal como zonas de agricultura, urbanas o nuevas zonas de bosque en que las condiciones de infiltración son propicias a los procesos de recarga.

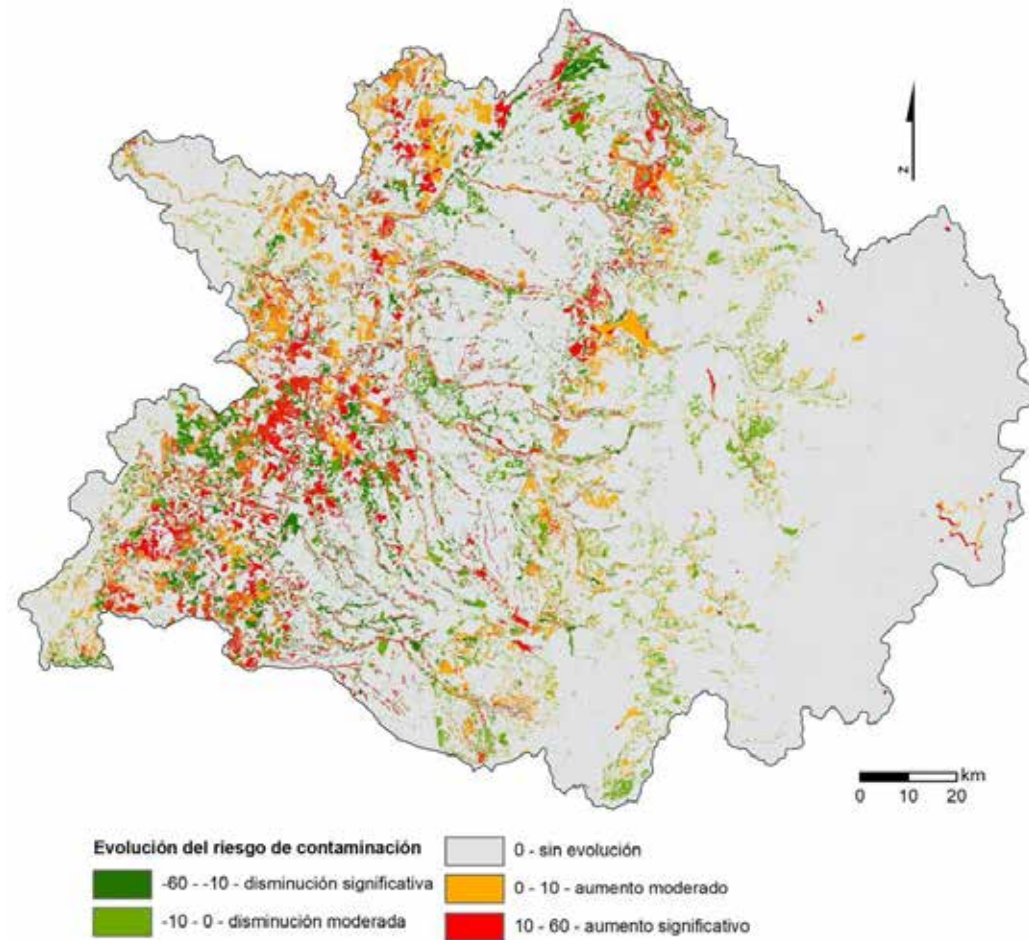


Figura 41 – Mapa de cambios en la vulnerabilidad entre 1995 y 2016.

En el gráfico de la Figura 42 se muestra la variación del área para las clases de frecuencia asociado a la evolución del riesgo de contaminación entre estos años. Se observa que cerca del 11% del área presenta un incremento del riesgo de contaminación, mientras que un 8% 2% del área), dato que indica que los cambios en la cuenca estudiada son reducidos. Se puede concluir que los cambios observados indican un incremento relativo del riesgo, que no se puede considerar como un incremento elevado del riesgo.

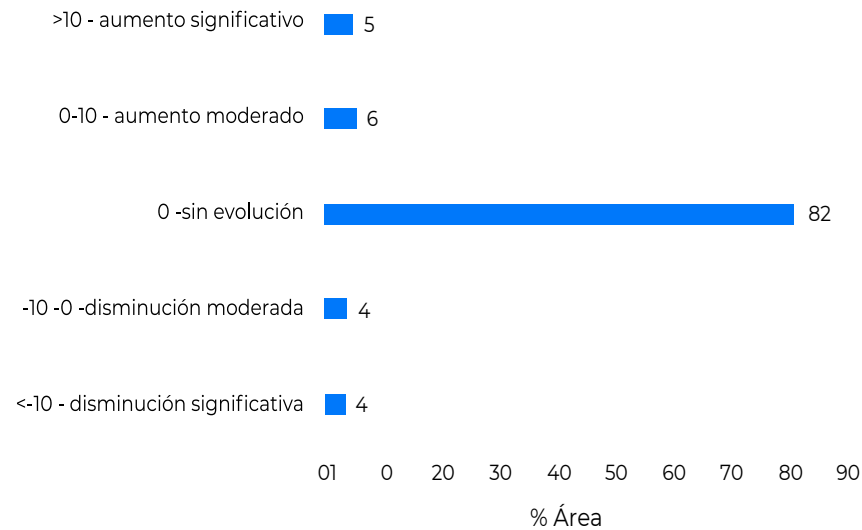


Figura 42 – Evolución de la vulnerabilidad entre 1995 y 2016.

## 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 falta de certidumbre, 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 propuestos. Otro aspecto para tener en cuenta es la selección del equipo de monitoreo, ya que actualmente existen equipos automáticos que transmiten la información por vía telemática con gran fiabilidad y que minimizan el desplazamiento habitual de personal operativo a los lugares inspeccionados. 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. Para la precipitación se verificó que la información disponible era adecuada para el estudio, con una representatividad espacial bastante significativa en toda la cuenca, excepto un área hacia el sureste donde no se dispone de información.

La resolución temporal y periodicidad también fueron adecuadas, a pesar de la disminución substancial de datos en los últimos años en varios puntos de la red de estaciones.

Respecto a la temperatura, las estaciones se distribuyen mayoritariamente en la zona central de la cuenca, de manera que se tuvo que recurrir al método de kriging para gestionar el error de interpolación. Este hecho se debe al distanciamiento excesivo entre las estaciones y la ausencia de estaciones en los sectores oriental y occidental de la cuenca. Ya que se trata de una variable fácil de medir, se recomienda realizar un esfuerzo para que en algunas estaciones de lluvia también sea posible medir la temperatura.

De todas las variables climáticas compiladas, el viento fue la más complicada. No se encontraron series de datos de velocidad 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.

En relación con el monitoreo del nivel piezométrico, los puntos existentes son escasos y, además, más del 50% se ubican en la zona norte, sesgando cualquier estudio que se lleve a cabo que no tome en consideración la tendencia espacial. Por este motivo es urgente realizar un esfuerzo para el desarrollo de esta red de monitoreo, que servirá de base para numerosos tipos de gestión de los recursos hídricos. Por ejemplo, esta red es idónea 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. 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 usando como referencia la comparación con los valores de

piezometría de la cuenca Maule, lo que conlleva un alza de la incertidumbre.

Otras variables que considerar en futuras redes de monitoreo, es el control de la calidad del agua subterránea y el 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 Maule, 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, el agua subterránea es un recurso con un gran potencial para el abastecimiento público, la economía y los ecosistemas dependientes, siendo estos 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 Maule

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

- Según los resultados del estudio, la localización de las principales zonas de recarga está vinculada a áreas agrícolas.
- Existe una disminución de las áreas de recarga en la zona costera debido a la transformación de áreas de bosque espinoso en plantaciones forestales.
- 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 alto debido a la agricultura.

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 podrá estar en juego.

La falta de información no permite analizar la tendencia de los niveles piezométricos, que indicaría si existe o no un descenso continuo de éstos. Por este motivo no es posible saber si el acuífero se encuentra en un régimen de sobreexplotación y, consecuentemente, no se conoce si la disponibilidad de agua en el futuro podrá disminuir.

#### 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 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 usos más valorizados dependiendo siempre, por supuesto, de 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 calidad, 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 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 enfocadas a la gestión de la demanda.

La herramienta principal que permite incrementar la oferta de agua subterránea es la recarga de acuíferos. Actualmente, existen varias metodologías para maximizar el volumen de recarga, incrementando la disponibilidad de agua y contribuyendo a la reducción de problemas de sobreexplotación. 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.

Existen varios métodos para fomentar la recarga de acuíferos (Dillon et al., 2009). La elección de estos dependerá de las condiciones hidrogeológicas locales, así como la disponibilidad y calidad de agua para infiltración. Entre las diferentes características del acuífero a recargar, 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. 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.

Allí se deberá realizar un análisis costo-beneficio de las soluciones previamente consideradas, pues 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 m<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup> de agua ahorrado).
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 m<sup>3</sup> de agua ahorrado).

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 aumentar 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 de medidas para la cuenca MAULE**

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

En la Figura 43 se muestra la relación entre las zonas preferenciales de recarga y las clases de mayor riesgo de contaminación.

Como se observa en la figura, la mayor parte de la zona principal de recarga presenta un riesgo de contaminación alto. Este hecho se debe abordar con una visión holística, mediante la consideración adecuada de las consecuencias que podrían derivar de los diferentes escenarios de gestión posibles, tanto para la cantidad como para la calidad del agua subterránea. Al final, se deberán tomar medidas que optimicen el interés económico del acuífero, la salud pública y el medio ambiente.

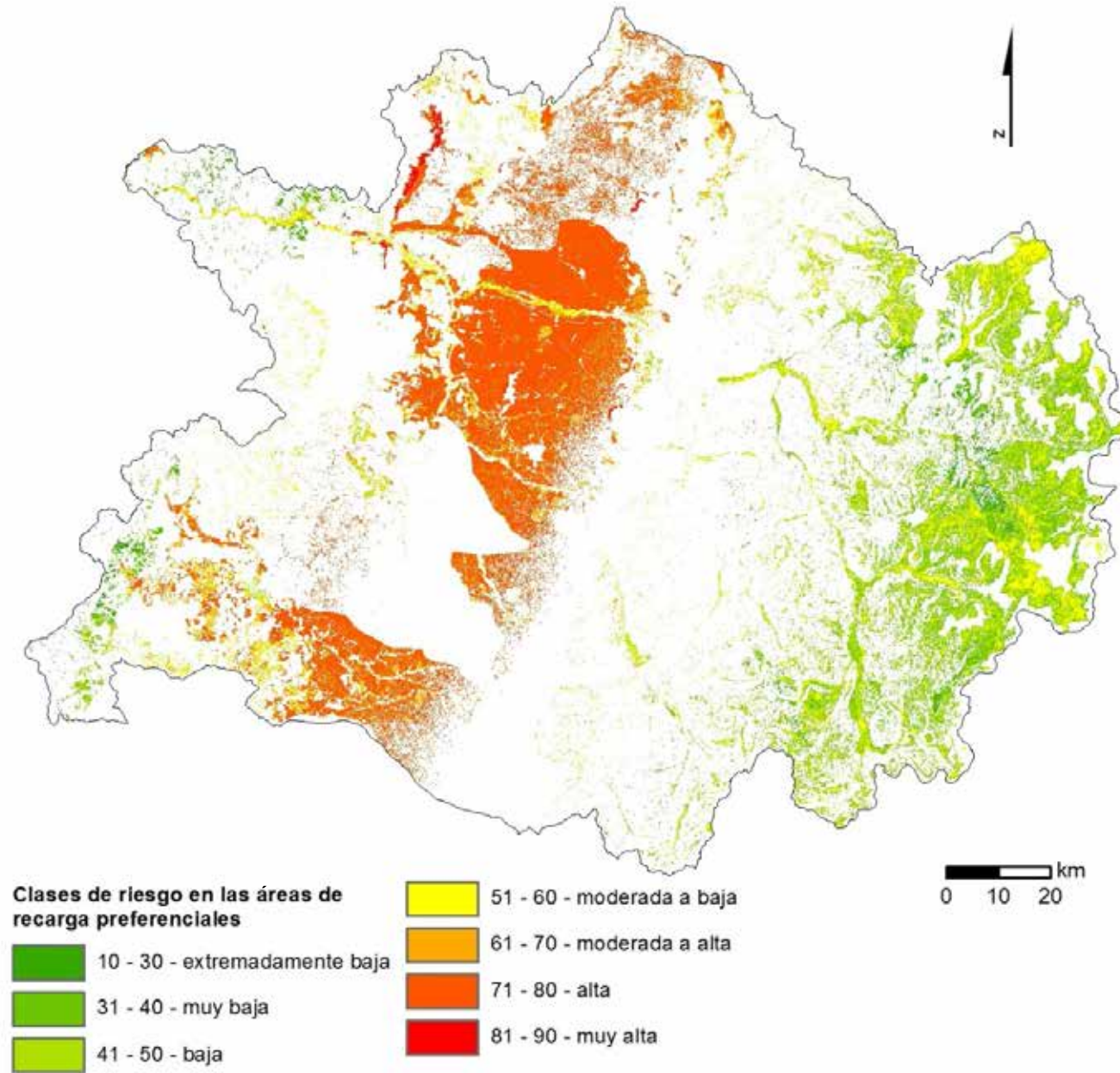


Figura 43 – Riesgo de contaminación en las áreas preferenciales de recarga.

En el caso de la cuenca Maule, 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 de vigilancia. Este tipo de red de monitoreo, tienen como objetivo el estudio general de los acuíferos, por ejemplo, el régimen de explotación, la dirección del flujo y el estado cualitativo del agua. Posteriormente a la generación del conocimiento base, se recomienda la instalación de una red operacional, con una mayor densidad de puntos de control y un mayor número de variables de calidad de agua, que permita analizar el impacto en el acuífero correspondiente a zonas agrícolas específicas.

El diseño de estas redes de monitoreo deberá tener en cuenta la densidad de la red (puntos por km<sup>2</sup>), la representatividad estadística (mínimo 5 puntos) y la representatividad espacial (índice de representatividad superior al 80%). Este último parámetro es fundamental para evitar los sesgos en la interpretación de los datos en el futuro.

Esta información es esencial para poder conocer los impactos que las actividades humanas provocan en el acuífero y poder definir medidas de gestión del acuífero adecuadas.

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 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.

# 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 Maule, así como la distribución espacial de las zonas de recarga natural utilizando el modelo Water and Energy Transfer between Soil, Plants and Atmosphere (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.

Los resultados confirman que la escorrentía se genera mayoritariamente en la zona este y, posteriormente, en las corrientes de agua que se originan en dirección al mar.

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 forestal, del 10% en 1995 al 18% en 2016. Por otro lado, de acuerdo con Pliscoff (2020), entre 1995 y 2016 hay una expansión productiva de la agricultura de un 2.8%. Todavía, en términos netos el área entre los dos años disminuyó del 28 al 25% provocando, además, una mayor discontinuidad en este uso.

Después del cálculo realizado con el modelo WetSpass 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 de 2016 la situación cambia ligeramente, tanto cuantitativamente como en la distribución espacial de la recarga. En áreas que han sido sustituidas por plantaciones forestales se observa una reducción de la recarga, y en nuevas áreas de agricultura la recarga aumentó, por las condiciones de infiltración más favorables de los terrenos agrícolas, y también por el riego que contribuye a la infiltración. Todavía, estas dinámicas del uso del suelo no cambian significativamente el promedio anual de recarga que es de 97 mm/año (2042 hm<sup>3</sup>/año) en 1995 y 2016.

Aunque el cambio de la recarga en la cuenca no parezca significativo, cuando se analiza a nivel espacial, se observa un cambio de zonas preferenciales de la recarga inducidas por todos los otros cambios de uso del suelo, es decir, la sustitución de bosques nativos por áreas de agricultura, o zonas urbanas. 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 celdas del modelo con valores más elevados de recarga corresponden a los valores superiores al cuartil Q<sub>3</sub> (>75%) y, por tanto, son las áreas de conservación más importantes, que totalizan 5315 km<sup>2</sup> (Tabla 11). Estas áreas contribuyen con el 55% del total de la recarga (146 mm o 1053 hm<sup>3</sup>/año) ocupando tan solo el 26% de la superficie de la cuenca (Figura 38).

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 y se ubican en terrenos con pendientes suaves y una composición arenosa significativa.

Las clases con alto y muy alto riesgo de contaminación representan 14% 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 39% del área de la cuenca.

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 ausencia de una red de monitoreo del nivel piezométrico no permite realizar una evaluación del régimen de explotación de los acuíferos de la cuenca Maule. Por este motivo, se propone como primera medida de

gestión del agua subterránea de esta cuenca la implementación de una red de monitoreo de vigilancia de cantidad y calidad del agua.

# 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

Batelaan, O., De Smedt, F., 2007. GIS-based recharge estimation by coupling surface–subsurface water balances. *J Hydrol* 337(3):337–355  
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)  
Hargreaves, G. H., Samani, Z. A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, v.1, n.2, p.96-99.

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

Pliscoff, P. (2020) *Análisis del estado actual de los ecosistemas terrestres, asociados a dos cuencas en Chile central: Maipo y Maule. Estudio realizado para Escenarios Hídricos 2030.* Universidad Católica de Chile.

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

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.

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

Julio 2021

