



Universidad de Concepción



FACULTAD DE CIENCIAS  
AMBIENTALES

# **EVALUACIÓN DE ZONAS FAVORABLES PARA PRO- YECTOS DE RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS EN LA CUENCA DEL BIOBÍO**

Habilitación presentada para optar al título de  
**Ingeniero Ambiental**

**EMMANUEL GARRIDO MUÑOZ**

Profesor Guía: Dr. Roberto Urrutia Pérez

Concepción, Chile

2021

**“EVALUACIÓN DE ZONAS FAVORABLES PARA RECARGA  
ARTIFICIAL DE ACUIFEROS EN LA  
CUENCA DEL RÍO BIOBÍO”**

**PROFESOR GUÍA: ROBERTO URRUTIA PÉREZ**



**PROFESOR COMISIÓN: Dr. JOSE ARUMI RIBERA**



**PROFESOR COMISIÓN: Dr. MAURICIO AGUAYO ARIAS**



**CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN MÁXIMA**

Conceptos que se indica en el Título

- ✓ Aprobado por Unanimidad: (En Escala de 4,0 a 4,9)
- ✓ Aprobado con Distinción: (En Escala de 5,0 a 5,6)
- ✓ Aprobado con Distinción Máxima: (En Escala de 5,7 a 7,0)

**Concepción, mayo 2021**



100 AÑOS  
DE  
DESARROLLO  
LIBRE DEL  
ESPIRITU

Por el desarrollo libre del espíritu

Casilla 160 C - Correo 3 - Fono (56-41) 204072 - Fax (56-41) 2207076 - Ciudad Universitaria - Concepción - Chile -

<http://www.eula.cl>

## ÍNDICE GENERAL

Índice de Tablas .....	II
Índice de Figuras .....	III
Resumen .....	IV
Abstract.....	IV
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Hipótesis o pregunta de investigación.....	3
1.2 Objetivos .....	3
<b>2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA O ANTECEDENTES GENERALES.....</b>	<b>3</b>
2.1 Disponibilidad a nivel mundial .....	3
2.2 Acuíferos y aguas subterráneas.....	4
2.3 Usos a nivel mundial .....	4
2.4 Problemas que enfrentan las aguas subterráneas.....	4
2.5 Recarga artificial de aguas subterráneas (RAAS).....	5
2.6 Aguas subterráneas en Chile .....	6
2.7 RAAS en Chile .....	7
2.8 Análisis de idoneidad de sitios .....	7
2.9 Aporte al conocimiento científico.....	9
<b>3. METODOLOGÍA .....</b>	<b>10</b>
3.1 Área de estudio .....	10
3.2 Metodología GIS-MCDA .....	12
3.3 Objetivo 1: Adaptar los criterios existentes para la confección de mapas de idoneidad al enfoque propuesto, correspondiente a la etapa del estudio de análisis bibliográfico.....	13
3.4 Objetivo 2: Determinar zonas con potencial para recarga artificial de aguas subterráneas, mediante procesos de toma de decisión con bases matemáticas.....	13
3.4.1 Estandarización .....	13
3.4.2 Resolución del problema de criterios múltiples .....	13
3.4.3 Medidas de consistencia .....	16
3.4.5 Suma ponderada .....	16
3.5 Objetivo 3: Analizar la aplicabilidad de Proyectos de recarga artificial de aguas subterráneas en las zonas de interés definidas. ....	17
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>17</b>
4.1 Análisis bibliográfico.....	17

4.1.1 Elección de criterios .....	25
4.2 Recolección de coberturas digitales.....	26
4.3 Reclasificación .....	31
4.4 Proceso AHP.....	39
4.4.1 Representación de los juicios de valor .....	39
4.4.2 Construcción de las matrices de juicio de valor .....	40
4.5 Selección de áreas de interés y aplicabilidad .....	45
4.6 Zonas de interés específicas .....	47
4.6.1 Área de interés 1 .....	47
4.6.2 Área de interés 2 .....	49
<b>5. DISCUSIÓN .....</b>	<b>53</b>
<b>6. CONCLUSIÓN .....</b>	<b>56</b>
<b>7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>59</b>
<b>8. ANEXOS .....</b>	<b>65</b>
Anexo1: mapas de coberturas digitales .....	65



## Índice de Tablas

Tabla N°1: Escala fundamental de Saaty.....	14
Tabla N°2: Ejemplo de matriz de comparación por pares. ....	15
Tabla N°3: Casos de estudio usados, origen, criterios y cantidad de criterios usados por estudio.....	17
Tabla N°3 (Continuación): Casos de estudio usados, origen, criterios y cantidad de criterios usados por estudio.....	19
Tabla N°4: Cantidad de criterios textualmente distintos utilizados en los casos de estudio.....	20
Tabla N°5: Tabulación de criterios: este procedimiento cuenta el número de veces que se presentan cada uno de los 36 valores únicos de criterios.....	22
Tabla N°8: criterios asociados.....	23
Tabla N°9: lista de criterios factibles de ser usados en el estudio.....	24
Tabla N°10: Casos estudios revisados y metodología usada por cada uno de ellos.....	39
Tabla N°11: Consistencia de las matrices extraídas de los casos de estudio..	40
Tabla N°12: pesos y clasificación de criterios en estudios que no usaron AHP. ....	41
Tabla N°13: Ranking de los estudios que por tener otras metodologías o no ser consistentes para el AHP no fueron considerados.....	42

Tabla N°14: estimación del peso del criterio importancia hidrogeológica (IH)..	<b>43</b>
Tabla N°15: Matriz de comparación por pares consolidada, Geomorfología (GM), Lineamientos (Li), Pendientes (Pend), Profundidad (Prof), Distancia a fuentes de agua (DFA), Importancia Hidrogeológica (IH) y Uso de suelo (US). .....	<b>44</b>
Tabla N°16: Vector prioridad resultante. ....	<b>44</b>
Tabla N°17: Balances sobre el estado de explotación de las aguas subterráneas en el SHAC del río Laja Bajo para 2018.....	<b>49</b>
Tabla N°18: Humedales costeros que se encuentran en zonas calificadas como buenas o muy buenas en el presente estudio.....	<b>50</b>
Tabla N°19: Balances de las extracciones y recarga de los acuíferos Coronel Norte y Sur. ....	<b>51</b>
Tabla N°20: Caudales críticos de extracción (l/s) de intrusión salina para la comuna de San Pedro de la Paz.....	<b>52</b>

## Índice de Figuras

Figura 1: Cuenca del Bio-Bio y sus acuíferos, elaboración propia a partir de DGA (2019), Diagnóstico de la calidad de aguas subterráneas de las regiones de Ñuble y Bío-Bío.....	<b>10</b>
Figura2: Mapa de reclasificación de alternativas para el criterio importancia hidrogeológica.....	<b>32</b>
Figura 3: Mapa de reclasificación de alternativas para el criterio geomorfología.....	<b>34</b>
Figura 4: Mapa de reclasificación de alternativas para el criterio distancia a fuentes de agua.....	<b>35</b>
Figura 5: Mapa de reclasificación de alternativas para el criterio profundidad. ....	<b>36</b>
Figura 6: Mapa de reclasificación de alternativas para el criterio uso de suelo.....	<b>37</b>
Figura 7: Mapa de reclasificación de alternativas para el criterio lineamientos.....	<b>38</b>
Figura 8: Mapa de reclasificación de alternativas para el criterio pendiente. ...	<b>39</b>
Figura 9: Mapa de idoneidad para proyectos de RAAS. ....	<b>46</b>
Figura 10: Grafico de zonas con potencial para RAAS expresado en unidad de área Km2.....	<b>47</b>
Figura 11: Mapa de zonas favorables para la subcuenca del rio laja bajo .....	<b>48</b>
Figura 12: superficies de la cuenca con distintas aptitudes para RAAS.....	<b>49</b>
Figura 13: Mapa de zonas favorables para la subcuenca del río Bío-Bío Bajo .....	<b>51</b>
Figura 14: superficies de la cuenca con distintas aptitudes para RAAS.....	<b>51</b>

## Resumen

El cambio climático y la prolongada sequía en la zona central de Chile han producido una creciente preocupación sobre la gestión y protección de los recursos hídricos en una región en que no parecía que dicho escenario fuese posible. Los impactos principales de la sequía han quedado de manifiesto en los cuerpos de agua superficiales como ríos y lagos que han visto una disminución de sus caudales y volúmenes respectivamente, condiciones que han llevado el interés nacional hacia nuevas fuentes de agua, como las aguas subterráneas. Las presiones actuales sobre el recurso hídrico subterráneo han producido la necesidad de buscar instrumentos de gestión y alternativas como la recarga artificial de aguas subterráneas (RAAS) que permitan hacer un uso sustentable del recurso. El presente estudio se ha centrado en identificar zonas con potencial para obras RAAS en la cuenca del río Biobío, para ello se elaboró un mapa de idoneidad en base a criterios con influencia en la recarga de acuíferos, siguiendo la metodología de análisis de decisión multicriterio basado en sistemas de información geográfica (GIS-MCDA) y, usando como herramienta para la resolución del problema de criterios múltiples el proceso de jerarquía analítica (AHP). Los resultados del mapa de idoneidad mostraron que las zonas malas y muy malas abarcan un 56% del área de estudio, las zonas regulares un 12% y las zonas buenas y muy buenas un 32%, ubicándose estas últimas principalmente en el valle central, en base a información local se identificaron áreas de interés específicas donde se evaluó la aplicabilidad de un proyecto RAAS. Se concluyó que existe una considerable falta de información en cuanto a aguas subterráneas, además, de carencias legislativas que impiden que la RAAS pueda ser más que solo una opción económica.

## **Abstract**

Climate change and prolonged drought in central Chile have produced growing concern about the management and protection of water resources in a region where such a scenario did not seem possible. The main impacts of the drought have been evident in surface water bodies such as rivers and lakes that have seen a decrease in their flows and volumes respectively, conditions that have led the national interest to new sources of water, such as groundwater. The current pressures on the underground water resource have produced the need to look for management instruments and alternatives such as the artificial recharge of underground water (RAAS) that allow a sustainable use of the resource. This study has focused on identifying areas with potential for RAAS works in the Biobío River basin, for which a suitability map was prepared based on criteria with influence on the recharge of aquifers, following the decision analysis methodology multi-criteria based on geographic information systems (GIS-MCDA) and, using the analytical hierarchy process (AHP) as a tool for solving the multi-criteria problem. The results of the bad suitability map show that the bad and very areas cover 56% of the study area, the regular areas 12% and the good and very good areas 32%, the latter being located mainly in the central valley. Based on local information, specific areas of interest were identified where the applicability of a RAAS project was evaluated. It was concluded that there is a considerable lack of information regarding groundwater, in addition to legislative deficiencies that prevent the RAAS from being more than just an economic option.

## 1. INTRODUCCIÓN

Chile es un país vulnerable a los efectos del cambio climático, debido a su geografía y a sus características socioeconómicas (OCDE, 2016). Dichos efectos ya se han manifestado en los últimos años, mediante eventos extremos como sequías e inundaciones, déficit de precipitaciones y caudales, pérdida de ecosistemas y una mayor presión sobre los recursos hídricos (Fernández-Escalante et al., 2018).

Desde el año 2010 la zona centro-sur del país ha experimentado un déficit de precipitaciones cercano al 30%. Esta pérdida de lluvias ha permanecido desde entonces de forma constante y se prevé que este factor se intensificará durante el periodo de 2030-2050. El déficit pluviométrico más el aumento de la temperatura han propiciado una sequía histórica, lo que ha desencadenado procesos como el desplazamiento de cultivos agrícolas hacia el sur, una disminución de caudales, reservas de aguas en la cabecera de los ríos y el retroceso de glaciares (CR2, 2015).

A pesar de la compleja realidad que Chile ha atravesado el último tiempo, este continúa siendo privilegiado en comparación a otros países, cuando se trata de recursos hídricos. El desafío en cuanto a dichos recursos ha sido su gestión debido a que la característica principal de estos es la distribución heterogénea en el territorio nacional encontrando realidades opuestas entre el norte, centro y sur del país, en la zona norte el agua es un bien extremadamente escaso y su disponibilidad va aumentando hacia el sur. En la macrozona sur que comprende el territorio desde la región del Biobío hacia el sur del país, a pesar de la disminución de la disponibilidad de agua, el crecimiento de la población y los sectores productivos se ha mantenido, lo que ha resultado en la sobreexplotación de muchas cuencas y de acuíferos.

Las aguas subterráneas se han vuelto de gran valor en la actualidad como consecuencia de la escasez de aguas superficiales, pero han caído en la misma dinámica que ellas, para 2016, de los 137 acuíferos definidos a nivel nacional 110 ya se encontraban en una situación de sobreasignación de sus recursos, por lo que se esperan conflictos relacionados al agotamiento de los acuíferos, como



la pérdida de ecosistemas dependientes de ellos, riesgo para la seguridad hídrica en poblaciones abastecidas con fuentes informales y contaminación del recurso. (OCDE, 2016)

La región del río Bío-Bío está ubicada dentro de la macrozona sur y posee niveles de disponibilidad hídrica bastante superiores a los estándares internacionales que consideran como situación de estrés hídrico por debajo 1700 m<sup>3</sup>/hab/año, en comparación para 2015 la región del Bío-Bío poseía una cantidad de 24432 m<sup>3</sup>/hab/año, sin embargo, a pesar de los valores positivos que posee la región, ha sufrido los efectos de la sequía y el cambio climático, además, ha atravesado episodios críticos en cuanto a la explotación de sus aguas superficiales y subterráneas, ya que la demanda de estos es muy severa principalmente centrada en el sector agrícola, industrial y consumo humano, un ejemplo de ello es la zona declarada de prohibición para nuevas explotaciones de aguas subterráneas Parque escuadrón en la región del Biobío, la cual obtuvo, esa condición precisamente a causa de la sobreexplotación y, además, se convirtió en la zona de prohibición que más al sur se encuentra en la actualidad (DGA, 2016).

Basado en los antecedentes, es de suma importancia comenzar a avanzar hacia una gestión eficiente y sustentable de las aguas subterráneas, y para ello es necesario levantar información y promover estudios que puedan ser un aporte como herramientas para la gestión de estos recursos. La recarga artificial de aguas subterráneas (RAAS), ya ha contribuido una gran variedad de soluciones tecnológicas en muchos lugares del mundo para hacer frente al cambio climático y la escasez hídrica, pero para lograr que la difusión y aplicación de dicha tecnología sea rápida y exitosa, se necesitan de herramientas de gestión como los mapas de idoneidad RAAS.

### **1.1 Hipótesis o pregunta de investigación**

¿Cuáles son las zonas más favorables, desde una perspectiva ambiental, para desarrollar proyectos de recarga artificial de acuíferos en la cuenca del Río Biobío?

## 1.2 Objetivos

**Objetivo general:** Evaluar zonas que podrían ser favorables para la recarga artificial de acuíferos en la Cuenca del Biobío.

**Objetivos específicos:**

- 1) **Adaptar** los criterios existentes para la confección de mapas de idoneidad al enfoque propuesto.
- 2) **Determinar** zonas con potencial para recarga artificial de aguas subterráneas, mediante procesos de toma de decisión con bases matemáticas.
- 3) **Analizar** la aplicabilidad de Proyectos de recarga artificial de aguas subterráneas en las zonas de interés definidas.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA O ANTECEDENTES GENERALES

### 2.1 Disponibilidad a nivel mundial

El agua es un recurso esencial para la vida, sin embargo, no es infinita, realidad que ha quedado de manifiesto en los últimos años debido a la actual escasez de agua dulce a nivel mundial, a este suceso se le atribuyen diversas causas como: la contaminación, sobreexplotación del recurso, cambio climático, entre otras. La realidad es que, del suministro de agua total del mundo, más del 96% corresponde a agua salada, del total de agua dulce, más del 68% está encerrado en hielo y glaciares, otro 30% del agua dulce se encuentra en el subsuelo posicionando a los ríos y lagos como la mayor fuente de agua dulce superficial que usan las personas, pero estas solo constituyen alrededor de 2,120 km<sup>3</sup>, aproximadamente 0,0002% del agua total del planeta (USGS, 2018).

### 2.2 Acuíferos y aguas subterráneas

Como se mencionó anteriormente un porcentaje importante del agua dulce esta almacenada en subsuelo específicamente en acuíferos, estos son una unidad geológica, que contiene agua y que, además, permite su circulación, por medio

de grietas y la porosidad de su estructura. Los países en la vanguardia del desarrollo en cuanto a estudio, protección y explotación de acuíferos como India, Estados Unidos y principalmente Australia han concebido definiciones más amplias de lo que significan las aguas subterráneas, las directrices RAAS australianas fueron únicas en este sentido por definir a los acuíferos como “reactores biogeoquímicos de los cuales se necesita información local sobre la mineralogía, la estructura de los acuíferos y la calidad del agua subterránea ambiental, con el fin de asegurar, la protección del acuífero y los ecosistemas relacionados y garantizar un funcionamiento sostenible” (Dillon et al., 2020), brindando la posibilidad que la discusión sobre la explotación de acuíferos a nivel mundial se aborde de manera interdisciplinaria, tomando en cuenta conceptos como medio ambiente y salud pública.

### **2.3 Usos a nivel mundial**

Las aguas subterráneas son usadas prácticamente para todo tipo de actividad humana, desde la minería hasta la agricultura intensiva, la industria y el consumo humano. A nivel mundial el 21% de la extracción total de agua subterránea está destinada al suministro de agua doméstica, por su parte, se estima que el agua subterránea extraída para el suministro de agua agrícola corresponde al 70% del total de extracción global de agua subterránea y que solo cerca del 9% de la extracción global de agua subterránea es bombeada por el sector industrial (FAO, 2016; FAO 2017), aunque estas cifras suelen ser muy cambiantes en cada país.

### **2.4 Problemas que enfrentan las aguas subterráneas**

La escasez de agua utilizable a nivel superficial, ha aumentado la presión sobre las aguas subterráneas tornándolas un recurso imprescindible en muchas partes del mundo, sobre todo en zonas áridas y semiáridas; pero como ya ha sucedido con otros recursos naturales a lo largo de la historia, “la explotación de las aguas subterráneas ha crecido a un ritmo muy rápido, tanto que, ha desafiado la capacidad humana para mantener el recurso y donde por efectos del clima se está

secando, el desafío se ha intensificado” (Dillon et al., 2019). Una serie de estudios recientes sobre gestión de aguas subterráneas han planteado que la contaminación, la disminución de niveles de agua, las tasas de explotación no sostenibles y el cambio climático son los principales peligros que acechan la integridad de las aguas subterráneas a nivel mundial (Dillon et al., 2019; Fuentes & Vervoort, 2020; Norouzi & Shahmohammadi-Kalalagh, 2019; Sallwey et al., 2019; Sandoval & Tiburan, 2019; IPPC, 2013).

## **2.5 Recarga artificial de aguas subterráneas (RAAS)**

La definición internacional de la RAAS abalada por la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH) dice que la RAAS es “una recarga intencional de un acuífero que utiliza una fuente de agua, incluida el agua reciclada, en condiciones controladas, para almacenarla para su uso posterior o para beneficio del medioambiente, mientras protege la salud humana y el medio ambiente” (Dillon et al., 2020). Este tipo de definiciones desarrolladas, han abordado otras aristas de lo que implica la RAAS, han mejorado la gobernanza y dado pie al desarrollo de directrices sólidas a nivel internacional, como las Directrices Nacionales Australianas, el Reglamento de Control de Inyección Subterránea y la Ley de Agua Potable Segura en Estados Unidos, entre otras, en las cuales se incorporan pautas y exigencias que los proponentes deben seguir, más allá de la evaluación técnica o el monitoreo de parámetros, lo que es actualmente considerado por la legislación chilena mediante el Reglamento sobre Normas de Exploración y Explotación de Aguas Subterráneas (MOP, 2014). A nivel internacional, se está tomando un enfoque preventivo y más amplio con el fin de preservar el medio ambiente y conservar la salud y condiciones de vida de las personas.

Después de 60 años de desarrollo, la RAAS se encuentra extendida en muchos lugares del mundo, principalmente en zonas áridas; pero, además, se ha consolidado como una opción viable como método de gestión para hacer frente al cambio climático. Los métodos de RAAS son variados y adaptables a las características diversas de los acuíferos, a grandes rasgos se dividen en métodos superficiales y en profundidad, los primeros son los preferidos para acuíferos cercanos a la superficie y a su vez se dividen en métodos que se pueden desarrollar dentro

del cauce y fuera de él, algunos ejemplos son las lagunas de infiltración, serpenteos y barreras fusibles o red de canales. En contraparte se encuentran los métodos en profundidad usados predominantemente en acuíferos que se encuentran a gran profundidad, dentro de estos se encuentran los pozos de inyección, galerías de infiltración, zanjas de infiltración, entre otros.

## **2.6 Aguas subterráneas en Chile**

El uso de las aguas subterráneas en Chile se asemeja a las tendencias mundiales con un gran porcentaje concentrado en la agricultura y, en menor medida en industria, minería y consumo humano.

Las dificultades que afectan al agua subterránea también se han repetido en Chile favoreciendo un escenario en el cual se están perdiendo fuentes importantes de agua superficial, por esto, al igual que en muchos lugares del mundo, las aguas subterráneas han tomado un valor fundamental en el país. Ha sido necesario crear e implementar nuevas leyes y reformas a la legislación actual que, hasta hace alrededor de 15 años, no ponía mayores restricciones a la explotación de las aguas subterráneas. El primer precedente se registró en 2005, con la reforma al código de aguas donde “se impusieron normas más estrictas sobre gestión de las aguas subterráneas, con el fin de proteger la capacidad de recuperación de los cuerpos de agua (OCDE, 2016)”, posteriormente se creó el Permiso Ambiental Sectorial (PAS) N°158 del Ministerio de Medio Ambiente (MMA, 2012), el cual otorga permiso para ejecutar obras de recarga artificial de aguas subterráneas, y por último se aprobó el Reglamento de Exploración y Explotación de Aguas Subterráneas D.S N°203, del Ministerio de Obras Públicas (MOP) 2014, aunque muchas de estas leyes no se han llevado a cabo de una manera óptima debido a falta de información, fallas de mercado y ausencia de sistemas de gestión local para este recurso.

## 2.7 RAAS en Chile

Una de las definiciones más recientes, que ha dado la legislación chilena, por medio de la Dirección General de Aguas, sobre la recarga artificial de aguas subterráneas es la siguiente, "es una técnica para incrementar intencionadamente los recursos hídricos subterráneos" y como "una alternativa hídrica de gestión del agua en la que se utiliza la capacidad de almacenamiento que tienen los acuíferos para introducir en los mismos, mediante diferentes tecnologías, agua procedente de distintas fuentes. El objetivo final es aumentar la disponibilidad del agua, la garantía de suministro y mejorar la calidad del agua" (DGA, 2016).

En Chile la viabilidad de estos proyectos se estudia desde alrededor de 2012 y, en su mayoría corresponden a estudios y pilotos de iniciativa pública con el objetivo de acumular experiencia, generalmente en cuencas del norte y del centro del país (CNR, 2020).

## 2.8 Análisis de idoneidad de sitios

La RAAS puede entregar grandes beneficios a nivel nacional, como la mantención de la agricultura, abastecimiento de pozos rurales para consumo humano, minimizar los efectos de la intrusión salina, recuperación de ecosistemas, etc. Antes de implementar proyectos RAAS es necesario una revisión de la experiencia internacional como australiana y estadounidense, ya que existen varios factores que pueden frenar o favorecer el desarrollo de estas obras de gestión, por ejemplo, una visión principalmente económica, poco conocimiento del cuerpo receptor, instalación de obras hidráulicas inadecuadas, siendo uno de los elementos disuasivos más importantes "la falta de información sobre los sitios idóneos para instalar proyectos RAAS" (Dillon et al., 2020).

La falta de información sobre la idoneidad de sitios para RAAS en los acuíferos es un problema constante para la expansión de este tipo de proyectos, ya que estos requieren una gran inversión y una mala ubicación puede resultar en grandes pérdidas económicas y daños ambientales, para minimizar estos riesgos es que se utilizan de manera cada vez más constante la evaluación de zonas

favorables para instalar proyectos RAAS, estos estudios son un paso inicial y de vital importancia para garantizar una larga vida y sostenibilidad de los proyectos.

La mayoría de las directrices disponibles sobre RAAS subraya la necesidad de planificar cuidadosamente los esquemas RAAS para garantizar la sostenibilidad y la capacidad de control. La selección de un sitio de recarga adecuado es un “paso crítico en la etapa de diseño de un proyecto RAAS, ya que el sitio influye en la selección de una técnica de recarga adecuada, la estrategia de operación y el mantenimiento de los esquemas de RAAS” (Rahman et al., 2012).

El análisis de idoneidad del sitio para RAAS, se puede realizar de forma estadística o mediante sistemas de información geográfica (SIG), la metodología más ampliamente usada y validada en esta área son los levantamientos de información geográfica con un análisis de decisión multicriterio (GIS-MCDA). A nivel más rudimentario, GIS-MCDA puede considerarse como un proceso que evalúa, transforma y combina datos geográficos y juicios de valor (de acuerdo con las preferencias del tomador de decisiones) para obtener información y priorizar entre alternativas en la toma de decisiones (Malczewski, 2006), al tiempo que es capaz de mostrar estos resultados gráficamente mediante un mapa de idoneidad. Existen una serie de estudios que han realizado una evaluación de esta metodología mediante la recopilación de estudios sobre RAAS y similares, que la han aplicado previamente, por ejemplo, Sallwey et al., (2019), realizó una recopilación y análisis con 63 estudios que aplicaban esta metodología.

Los estudios relacionados con la identificación de sitios de idoneidad para RAAS han crecido en gran cantidad la última década, así también ha crecido la diversidad de las formas de realizarlos si bien Sallwey et al., (2019) afirma que “Todavía existe una gran variación en los criterios y métodos utilizados para la identificación o selección de sitios RAAS, Sin embargo, hay algunos patrones consistentes en la aplicación de este enfoque”.

Los patrones que siguen la mayoría de los estudios en la actualidad, son los descritos por Rahman et al., (2012) “Un enfoque holístico para la selección de sitios basados en SIG debe seguir el esquema de: (i) definición del problema; (ii)

selección de áreas adecuadas (mapeo de restricciones); (iii) mapeo de idoneidad que incluye la clasificación de capas o criterios temáticos, la estandarización, la ponderación de los criterios y la superposición de capas; y (iv) análisis de sensibilidad”, es en cada uno de estos pasos en donde se encuentra la diversidad de formas de llevar a cabo los estudios en la actualidad.

## **2.9 Aporte al conocimiento científico**

Tradicionalmente los estudios relacionados con el mapeo de zonas favorables para RAAS, empiezan con consignas técnicas y/o económicas, por ejemplo, se elaboran en base a un método de recarga en particular, una fuente de agua para la recarga en particular o un uso definido para el agua recuperada después de la recarga, esto porque cada método o fuente de agua tiene un costo económico asociado. Sin embargo, como dicen las definiciones internacionales de los acuíferos estos son sistemas complejos, que necesitan una visión interdisciplinaria, es aquí donde el área de conocimiento de la ingeniería ambiental puede ayudar a conseguir la sustentabilidad de estos proyectos y la protección de los acuíferos. Incorporando la experiencia internacional en materia legal y científica, se puede definir un enfoque ambiental, el cual consiste en tratar al acuífero como parte de un ecosistema o como uno en sí mismo, teniendo como valor fundamental mantener las condiciones naturales del acuífero y, además, incorporar al análisis tradicional criterios ambientales y, objetivos de uso orientados a la conservación de ecosistemas dependientes de aguas subterráneas y la seguridad hídrica para la población.

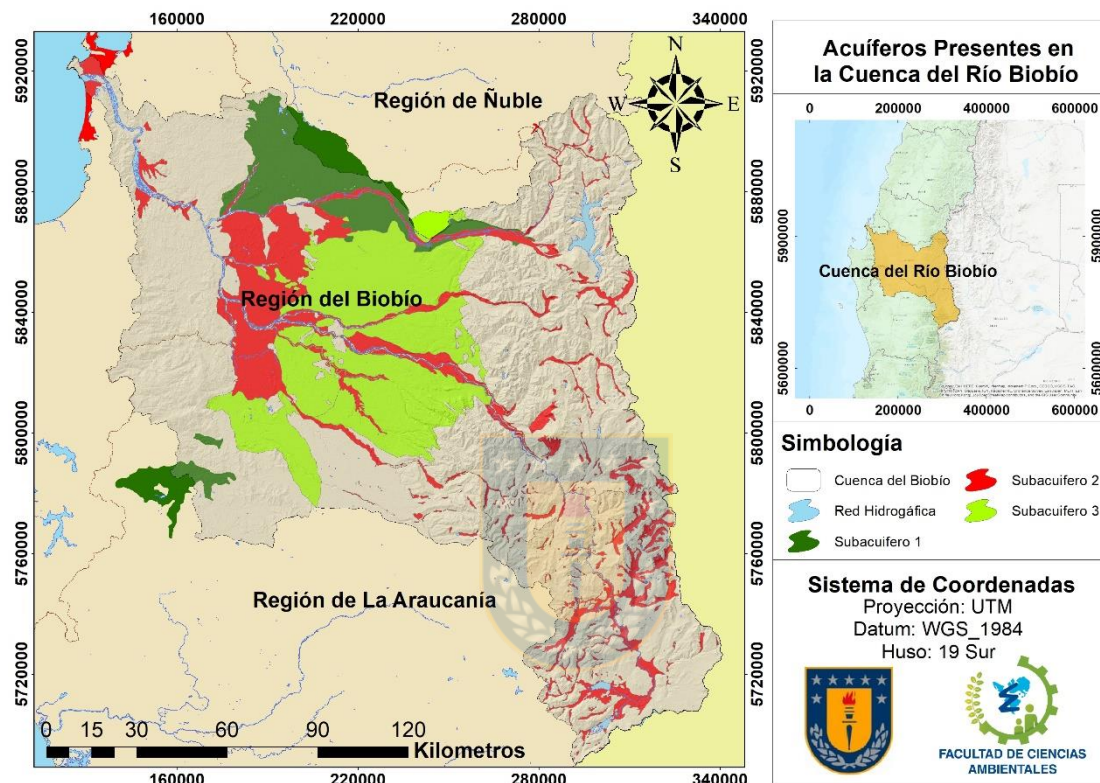
## **3. METODOLOGÍA**

### **3.1 Área de estudio**

La cuenca Hidrográfica del río Biobío, ubicada en la región del mismo nombre, es la tercera más grande del país, después de las de los ríos Loa y Baker en cuanto a extensión y caudal. Se extiende, entre los paralelos 36° 45' y los 39° 49' de latitud sur, sobre un área de 24.260 Km<sup>2</sup>, lo que corresponde al 3% de la superficie continental del país (Valdovinos & Parra, 2006), además, de la región



del Bío-Bío esta incluye a parte de las regiones de Ñuble y la Araucanía. La cuenca contiene 15 subcuencas menores, sometidas a la influencia de distintos ambientes y factores geográficos; por lo tanto, la dinámica del sistema es muy variable desde el inicio de su curso hasta su desembocadura, las principales subcuencas corresponden a las del Alto Biobío y las de los ríos Duqueco, Bureo, Vergara y Laja.



**Figura 1:** Área de estudio, Cuenca del río Biobío.

**Fuente:** elaboración propia a partir de DGA (2019), Diagnóstico de la calidad de aguas subterráneas de las regiones de Ñuble y Biobío.

El clima de la cuenca presenta características de transición entre los climas Mediterráneo y Templado Húmedo, predominante de la zona Sur, teniendo en general un régimen hidrológico mixto con aportes nivales y pluviales. En el sector costero, presenta un clima templado húmedo constante con precipitaciones que normalmente fluctúan entre 1.200 y 2.000 mm anuales de norte a sur. Hacia el interior, el clima templado costero húmedo posee temperaturas menos extremas donde las precipitaciones medias anuales alcanzan 1.330 mm con un período seco de cuatro meses (DGA,2019).

Las regiones del Biobío y de la Araucanía cuentan con cinco unidades morfológicas mayores que de oeste a este son las siguientes: Planicies litorales, Cordillera de la Costa, Depresión Central, La Montaña (o Precordillera) y la Cordillera Andina. También existe una unidad morfológica menor que se incluye en las anteriores, denominada Llanos de sedimentación fluvial y/o aluvional. Por otro lado, las formaciones geológicas presentes en la cuenca que inciden en la calidad del agua son las Rocas volcánicas del pleistoceno, Rocas volcánicas del cretácico inferior-alto y Rocas volcanosedimentarias del cretácico superior- terciario inferior. En la parte superior de los ríos Biobío y Laja, se observan influencias de tipo volcánica y sedimentaria, que se extiende en la Plataforma Piedemonte y Depresión Central, hasta la cordillera de la costa. Esta última, presenta mayoritariamente rocas graníticas sobre la que han ocurrido numerosos procesos de meteorización, los cuales han permitido la formación del suelo. La parte baja de la cuenca, se encuentra levemente influenciada por rocas sulfuradas, las que no presentan incidencia en la calidad de agua, debido a características tales como: cubierta vegetal, tipo de suelo, entre otros (DGA, 2012). En cuanto a presencia acuíferos en la cuenca del río Biobío, se delimita un solo gran acuífero a partir de las características geológicas de la zona, además, de dos acuíferos menores en las localidades de Mulchén, Los Ángeles y Yumbel. El gran acuífero principal se extiende a lo largo de todo el cauce del río Bío-Bío, desde su nacimiento hasta su desembocadura, este acuífero se subdivide en tres subacuíferos más pequeños los cuales se diferencian entre sí por el tipo de relleno permeable presente, también poseen distinta productividad y calidad química de las aguas. La cuenca del río Biobío, si bien es aprovechada principalmente de manera superficial, los acuíferos están siendo cada vez más explotados, lo cual responde a demandas para el desarrollo de diferentes actividades productivas en el territorio, principalmente riego, industria y agua potable (DGA,2019).

### **3.2 Metodología GIS-MCDA**

El tipo de investigación fue definido como mixto entre cualitativo y cuantitativo. Su alcance se considera exploratorio debido a que el tema de los mapeos de

idoneidad para RAAS es un área poco desarrollada nivel local y menor aun considerando enfoques ambientales. En base a lo anterior la metodología seleccionada para llevar a cabo el presente estudio fue el análisis de decisión multicriterio basado en sistemas de información geográfica (GIS-MCDA), este es un proceso que transforma y combina datos geográficos y juicios de valor para resolver problemas espaciales. Para ello considera modelos de datos geográficos, la dimensión espacial de los criterios de evaluación y las alternativas de decisión en la evaluación de los criterios. (Siobhan y Nimick, 2019). Esta metodología requiere que todos los criterios del conjunto deban estandarizarse para convertirlos en un esquema común, además, la escala de estandarización debe diferenciar claramente entre valores más aceptables y menos aceptables y representar la variabilidad en la región de estudio (Sallwey et al., 2019). En función de los requerimientos de esta metodología el estudio se dividió en distintas etapas las que coinciden con los objetivos y por ello las técnicas y herramientas usadas dentro de esta metodología se describieron en base a dichos objetivos.

### **3.3 Objetivo 1: Adaptar los criterios existentes para la confección de mapas de idoneidad al enfoque propuesto, correspondiente a la etapa del estudio de análisis bibliográfico.**

En esta etapa se llevó a cabo un levantamiento de información conformado por casos de estudio RAAS, estudios recopilatorios y relacionados a la RAAS, además, de documentos gubernamentales internacionales y nacionales. En base a la bibliografía se calcularon valores estadísticos y se extrajo información con la cual se definieron los criterios que fueron parte del análisis. Por último, en base a los criterios seleccionados se realizó una nueva búsqueda bibliográfica, para recolectar información digital de ellos.

### **3.4 Objetivo 2: Determinar zonas con potencial para recarga artificial de aguas subterráneas, mediante procesos de toma de decisión con bases matemáticas.**

Correspondiente a la etapa de procesamiento de datos. Esta etapa se dividió en dos subetapas la primera correspondió a la estandarización de la información de

los criterios y la segunda al proceso de resolución del problema de criterios múltiples.

### 3.4.1 Estandarización

La etapa de estandarización comenzó con la confección de las coberturas digitales correspondientes a cada criterio, para lo cual se utilizó el software ArcGIS 10.4. En segundo lugar, se definió la escala de estandarización para las alternativas que los criterios podían tomar, esta fue una escala de Likert con 5 alternativas, muy bueno, bueno, regular, malo y muy malo (Matas, 2018). Por último, para finalizar el proceso de estandarización, las coberturas digitales fueron re-clasificadas en base a dicha escala.

### 3.4.2 Resolución del problema de criterios múltiples

Para solucionar los problemas de criterios múltiples la metodología GIS-MCDA dispone de varias alternativas, como OWA, Bosque Aleatorio, lógica booleana, AHP, entre otras. Para el presente estudio la herramienta seleccionada fue el proceso de jerarquía analítica AHP, desarrollado por Saaty (1988), el cual ofrece una solución práctica a los tomadores de decisiones que enfrentan problemas de priorización, además, permite la integración de múltiples juicios expertos al tiempo que evita el sesgo (Sandoval & Tiburan, 2019).

El funcionamiento de AHP se basa en una comparación por pares entre los criterios realizada previamente por los expertos, el juicio de estos es subjetivo por lo que para reducir la incertidumbre el AHP tiene su propia escala de valoración.

**Tabla N°1:** Escala fundamental de Saaty.

Escala numérica	Escala verbal	Descripción
1	Igual importancia	Los dos elementos contribuyen igualmente a la propiedad o criterio.
3	El elemento es moderadamente más importante respecto al otro.	El juicio y la experiencia previa favorecen a un elemento frente al otro.
5	El elemento es fuertemente más importante respecto al otro	El juicio y la experiencia previa favorecen fuertemente a un elemento frente al otro.

7	La importancia del elemento es muy fuerte respecto al otro	Un elemento domina fuertemente.
9	La importancia del elemento es extrema respecto al otro	Un elemento domina al otro con el mayor orden de magnitud posible.
2,4,6,8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes.	
Recíprocos	Se utiliza cuando el segundo elemento es mayor en el criterio a comparar.	

**Fuente:** Elaboración propia a partir de (Saaty, 1988), proceso AHP.

Las comparaciones por pares realizadas por los expertos se ordenan en forma de matrices a cada una de ellas se le llama matriz de comparación por pares. De manera formal la matriz de comparación por pares se define como una matriz  $A$  de  $n \times n$ , que mide el juicio del tomador de decisiones de la importancia correspondiente a cada criterio. La comparación por pares se ejecuta de tal modo que el criterio en la fila  $i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, n$ ) se califica con respecto a cada criterio alterno, además, existen propiedades que esta matriz debe cumplir para ser coherente, la más importante es la propiedad de los juicios recíprocos, que dice que si  $A$  es una matriz de comparación por pares se debe cumplir que  $a_{ij} = 1/a_{ji}$ , lo que produce que todos los elementos de la diagonal  $a_{ii}$  sean iguales a 1, ya que en esta situación los criterios se han comparado con ellos mismos.

**Tabla N°2:** Ejemplo de matriz de comparación por pares.

Criterio			
	1		
		1	
			1

**Fuente:** Elaboración propia en base a (Sandoval & Tiburan, 2019).

En el estudio existirán tantas matrices de comparación por pares como expertos participen en él, por lo que el siguiente proceso es encontrar un consenso entre las distintas opiniones plasmadas en las matrices, es decir todos los juicios individuales se sintetizan en uno solo, por ende, en una sola matriz, esta matriz debe

conservar todas las propiedades de las matrices anteriores (juicios recíprocos), para ello se utiliza la media geométrica:

$$\text{Media geométrica} = \sqrt[n]{X_1 * X_2 * X_3 * \dots * X_n}$$

Una vez sintetizados los juicios individuales de los expertos, se calculan los pesos relativos de cada criterio, normalizando la matriz para crear una nueva. Este proceso requiere básicamente dividir los elementos individuales de cada columna entre la suma de la columna. Por otro lado, para el cálculo de los vectores de prioridad de cada criterio, es necesario promediar cada fila de la matriz normalizada.

### 3.4.3 Medidas de consistencia

Anteriormente se mencionó que el AHP evita el sesgo y para ello este proceso posee medidas de consistencia para evaluar el juicio racional de un experto. Las medidas de consistencia son cuantificables y así se decide qué nivel de tolerancia es aceptable (Mendoza & Daniel, 2019).

En primer lugar, se calcula el índice de consistencia (CI)

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

Donde n es igual al número de criterios.

Luego, se debe calcular el índice de consistencia aleatoria IA, que es el índice de consistencia de una matriz de comparación por pares generada de manera aleatoria.

$$IA = \frac{1.98 * (n - 2)}{n}$$

Donde n es igual al número de criterios.

Y usando los dos parámetros calculados anteriormente se calcula la razón de consistencia RC que es igual a:

$$RC = \frac{CI}{IA}$$

Si RC es mayor a 0,10 se considera que existen juicios inconsistentes, por lo que se deben revisar las comparaciones por pares y corregir la inconsistencia.

El caso contrario si RC es menor o igual a 0,10 se consideran niveles aceptables y por ende que la matriz de comparación por pares es consistente.

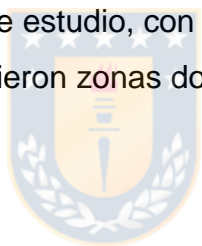
Estos parámetros se pueden calcular en cualquier momento del proceso tanto a las matrices individuales como a la matriz de consenso.

### 3.4.5 Suma ponderada

Una vez se tiene el vector prioridad se toman las coberturas reclasificadas anteriormente y usando nuevamente el software ArcGIS se utiliza la herramienta suma ponderada, multiplicando los pesos obtenidos en el AHP por las coberturas correspondiente, Finalmente, el resultado obtenido se vuelve a reclasificar según los parámetros de la escala de Likert.

### 3.5 Objetivo 3: Analizar la aplicabilidad de Proyectos de recarga artificial de aguas subterráneas en las zonas de interés definidas.

En base a información local se identificaron problemáticas asociadas al uso de aguas subterráneas en el área de estudio, con esta información más los resultados de la etapa anterior se definieron zonas donde se evaluó la aplicabilidad de proyectos RAAS.



## 4. RESULTADOS

### 4.1 Análisis bibliográfico

La primera actividad realizada fue la recolección y revisión de bibliografía, con el fin de elaborar una base bibliográfica, en la que se fundamentó la elección de los criterios que fueron parte del estudio. La base bibliográfica consistió en casos de estudio aplicados, estudios recopilatorios y directrices internacionales.

**Tabla N°3:** Casos de estudio usados, origen, criterios y cantidad de criterios usados por estudio.

ESTUDIO	CRITERIOS	CRITERIOS POR ESTUDIO
Estudio: Fuentes & Vervoort, 2020).	Pendiente (grados)	10
	Distancia a ríos o fuentes de agua	
	Distancia a usuarios (m)	



Área de estudio: Cuenca de Namoi, Australia.	Densidad de drenaje (km/km <sup>2</sup> )	
	Unidad hidrogeológica	
	acuífero ks (mm/día) conductividad	
	Rendimiento del acuífero (L/s)	
	Salinidad del acuífero (mg/L)	
	Profundidad del agua subterránea	
Estudio: (Norouzi & Shahmohammadi-Kalalagh, 2019) Área de estudio: Región de Shabestar, Iran.	suelo ks (mm/día)	9
	Permeabilidad	
	Pendiente	
	Profundidad del agua o espesor de Erosión	
	Uso de suelo	
	Calidad del Agua	
	suelo	
	Distancia del río	
Estudio: (Sandoval & Tiburan, 2019) Área de estudio: Reserva forestal Monte Makiling, Filipinas.	Aspecto de la pendiente	10
	Pendiente (%)	
	Geología	
	Suelo	
	Geomorfología	
	Cobertura de suelo	
	Transmisividad de acuíferos ( $\times 10^3$ )	
	Conductividad eléctrica (MS/CM)	
	Profundidad del agua (m)	
	Lineamientos	
Estudio: (Das & Pal, 2020). Área de estudio: Bloque Goghat-I, India.	Densidad de drenaje (m/m <sup>2</sup> )	6
	Geología	
	Geomorfología	
	Pendiente	
	Uso y cobertura de suelo	
	Textura de suelo	
Frecuencia del estanque		

**Tabla N°3 (Continuación):** Casos de estudio usados, origen, criterios y cantidad de criterios usados por estudio.

ESTUDIO	CRITERIOS	CRITERIOS POR ESTUDIO
Estudio: (Arshad et al., 2020).	Geomorfología	7
	Uso de suelo – Cobertura de suelo	
	Lluvia	
	Densidad de drenaje	
	Tipo de suelo	
	Permeabilidad de suelo	



Área de estudio:	Elevaciones	
Estudio: (Souissi et al., 2018). Área de estudio: Región de Gabes, Túnez.	Lineamientos	8
	Uso de suelo o cobertura de suelo	
	Litología	
	Densidad de drenaje	
	Pendiente	
	Suelo	
	Lluvia	
	Geomorfología	
Estudio: (Khan et al., 2020). Área de estudio: Cuenca de Yamuna, India	Densidad de drenaje	8
	Pendiente	
	Geología	
	Lluvia	
	Suelo	
	Fluctuación de agua	
	Uso de suelo o cobertura de suelo	
	Geomorfología	
Estudio: (R. Agarwal & Garg, 2016). Área de estudio: Cuencas de Loni y Morahi, India.	Geología	8
	Geomorfología	
	Uso de suelo o cobertura de suelo	
	Densidad de drenaje	
	Fluctuación del nivel freático	
	Pendiente	
	Suelo	
	Lluvia	
Estudio: (E. Agarwal et al., 2013). Área de estudio: Distrito de Unnao, India.	Densidad de drenaje	9
	Profundidad de agua subterránea antes y después un monzón	
	Geomorfología	
	Suelo	
	Uso de suelo	
	Geología	
	Lluvia	
	Pendiente	
	Lineamientos	

**Tabla N°3 (Continuación):** Casos de estudio usados, origen, criterios y cantidad de criterios usados por estudio.

ESTUDIO	CRITERIO	CRITERIOS POR ESTUDIO
	Geología	7
	Uso de suelo o cobertura de suelo	

Estudio: (Rajasekhar et al., 2020).	Pendiente	
	Suelo	
	Densidad de drenaje	
	Zona vadosa	
Área de estudio:	Potencial de escorrentía	
Autor: (Saravanan et al., 2020).	Geomorfología	8
	Densidad de lineamientos	
	Litología	
	Pendientes	
Área de estudio: Cuenca de Gundihalla, Distrito de Chitradurga,	Uso de suelo/ cobertura de suelo	
	Lluvia	
	Densidad de drenaje	
	Suelo	
Estudio: (Kadhem & Zubari, 2020).	Uso de suelo/ cobertura de suelo	8
	Tipo de suelo	
	Geomorfología	
	Geología	
	Curvatura	
	Densidad de drenaje	
	Distancia a lineamientos	
Área de estudio: Baréin.	Pendientes	
	Litología	
	Uso de suelo/ cobertura de suelo	
	Pendiente	
	Geomorfología	
	Lineamientos	
	Lluvia	
Estudio: (Zghibi Adel, 2020).	Densidad de Drenaje	8
	suelo	
	Pendiente	
	Densidad de drenaje	
	Suelo	
	Geomorfología	
	Geología	
Área de estudio: Acuífero de Korba, Túnez.	Profundidad del agua subterránea antes y después de los monzones.	8
	Recarga neta anual media de agua sub-	
	Proximidad a cuerpos de agua superfi-	
	Pendiente	
	Densidad de drenaje	
	Suelo	
	Geomorfología	
Estudio: (Navane & Sahoo, 2020).	Geología	8
	Profundidad del agua subterránea antes y después de los monzones.	
	Recarga neta anual media de agua sub-	
	Proximidad a cuerpos de agua superfi-	
	Pendiente	
	Densidad de drenaje	
	Suelo	
Área de estudio: Distrito de Latur, India.	Geomorfología	
	Geología	
	Profundidad del agua subterránea antes y después de los monzones.	
	Recarga neta anual media de agua sub-	
	Proximidad a cuerpos de agua superfi-	
	Pendiente	
	Densidad de drenaje	
Suelo		

**Fuente:** Elaboración propia en base a bibliografía.

La tabla N°3 muestra los casos de estudio usados como bibliografía, que fueron 14. En estos estudios se usaron diferentes criterios, distintas cantidades de ellos e inclusive distintas metodologías, se calculó la cantidad media de criterios usada por estudio que fue de 8,14, dicho valor fue comparado con el obtenido en el

estudio recopilatorio de (Sallwey et al., 2019) que fue de 7,4, con el fin de definir la cantidad de criterios adecuada que fue usada en el estudio.

Por otro lado, se encontró un patrón común en el origen de los casos de estudio, la mayoría se realizó en zonas con una limitada cantidad de agua disponible o en áreas con estrés Hídrico, correspondientes a zonas áridas y semiáridas, del sur de Asia, oriente medio y Australia.

**Tabla N°4:** Cantidad de criterios textualmente distintos utilizados en los casos de estudio.

Criterios	N°
Pendiente (grados)	1
Distancia a ríos o fuentes de agua (m)	2
Distancia a usuarios (m)	3
Densidad de drenaje (km/km <sup>2</sup> )	4
Unidad hidrogeológica	5
acuífero ks (mm/día)	6
Rendimiento del acuífero (L/s)★	7
Salinidad del acuífero (mg/L)★	8
Profundidad del agua subterránea (m)	9
suelo ks (mm/día)	10
Permeabilidad	11
Erosión	12
Uso de suelo	13
Calidad del Agua	14
suelo	15
Aspecto de la pendiente	16
Geología	17
Geomorfología	18
Transmisividad de acuíferos ( $\times 10^3$ M <sup>2</sup> /S)	19
Conductividad eléctrica (MS/CM)	20
Lineamientos	21
Textura de suelo	22
Frecuencia del estanque	23
Lluvia	24
Tipo de suelo	25
Elevaciones	26
Litología	27
Fluctuación de agua	28
Fluctuación del nivel freático	29

Profundidad de agua subterránea antes y después de monzón	<b>30</b>
Zona vadosa	<b>31</b>
Potencial de escorrentía	<b>32</b>
Densidad de lineamientos	<b>33</b>
Curvatura	<b>34</b>
Distancia a lineamientos	<b>35</b>
Recarga neta anual media de agua subterránea.	<b>36</b>

**Fuente:** Elaboración propia en base a bibliografía.

En la Tabla N°4 se contabiliza un total de 36 criterios textualmente distintos usados en los 14 casos de estudio que son parte de la base bibliográfica revisada, a pesar que a primera vista se identifican criterios similares existen algunos que destacan y que se repiten de manera semejante en cada estudio, por ejemplo, criterios como pendiente, densidad de drenaje, uso de suelo, entre otros.

**Tabla N°5:** Tabulación de criterios: este procedimiento cuenta el número de veces que se presentan cada uno de los 36 valores únicos de criterios.

Clase	Valor	Frecuencia	Relativa	Acumulada	Rel. acum.
1	Aspecto de la pendiente	1	0,0088	1	0,0088
2	Calidad del Agua	1	0,0088	2	0,0175
3	¿Conductividad eléctrica (? S/CM)	1	0,0088	3	0,0263
4	Curvatura	1	0,0088	4	0,0351
5	Densidad de drenaje	12	0,1053	16	0,1404
6	Densidad de lineamientos	1	0,0088	17	0,1491
7	Distancia a lineamientos	1	0,0088	18	0,1579
8	Distancia a ríos o fuentes de agua	2	0,0175	20	0,1754
9	Distancia a usuarios (m)	1	0,0088	21	0,1842
10	Elevaciones	1	0,0088	22	0,1930
11	Erosión	1	0,0088	23	0,2018
12	Fluctuación de agua	1	0,0088	24	0,2105
13	Fluctuación del nivel freático	1	0,0088	25	0,2193
14	Frecuencia del estanque	1	0,0088	26	0,2281
15	Geología	8	0,0702	34	0,2982
16	Geomorfología	11	0,0965	45	0,3947
17	Lineamientos	4	0,0351	49	0,4298
18	Litología	3	0,0263	52	0,4561

19	Lluvia	7	0,0614	59	0,5175
20	Pendiente	13	0,1140	72	0,6316
21	Permeabilidad	2	0,0175	74	0,6491
22	Potencial de escorrentía	1	0,0088	75	0,6579
23	Profundidad del agua	5	0,0439	80	0,7018
24	Proximidad a cuerpos de agua superficial	1	0,0088	81	0,7105
25	Recarga neta anual media de agua subterráneas	1	0,0088	82	0,7193
26	Rendimiento del acuífero (L/s)	1	0,0088	83	0,7281
27	Salinidad del acuífero (mg/L)	1	0,0088	84	0,7368
28	Suelo	10	0,0877	94	0,8246
29	Textura de suelo	1	0,0088	95	0,8333
30	Tipo de suelo	2	0,0175	97	0,8509
31	Transmisividad de acuíferos ( $\times 10^3$ M <sup>2</sup> /S)	1	0,0088	98	0,8596
32	Unidad hidrogeológica	1	0,0088	99	0,8684
33	Uso de suelo	12	0,1053	111	0,9737
34	Zona vadosa	1	0,0088	112	0,9825
35	acuífero ks (mm/día)	1	0,0088	113	0,9912
36	suelo ks (mm/día)	1	0,0088	114	1,0000

Fuente: Elaboración propia en por medio de Statsgraphics.

**Tabla N°6:** Criterios frecuentemente usados a lo largo del tiempo en estudios de mapeo de zonas RAA.

Criterios	Cantidad de usos
Densidad de drenaje	12
Geología	8
Geomorfología	11
Lluvia	7
pendiente	13
Suelo	10
Uso de suelo	12

Fuente: Elaboración propia en base a bibliografía.

Para considerar que un criterio tiene algún grado de relevancia este debía repetirse al menos en la mitad de los estudios analizados, es decir, 7 veces. Este listado es independiente de la importancia relativa que se le asigne a cada criterio en un estudio, como explica Sallwey et al., (2019), por ejemplo, el criterio de pendiente se destaca con números de uso bastante mayores que el resto de los

critérios, pero no el más relevante entre sus pares, a pesar de lo anterior esta lista puede significar una base intrínseca de análisis para todos los estudios de este tipo.

Por último, los resultados de los criterios más usados se compararon con los obtenidos en el estudio de Sallwey et al., (2019), que fueron los siguientes: geomorfología, pendiente, suelo, densidad de drenaje, uso de la tierra, grosor del acuífero o nivel freático y geología o litología. A pesar que el análisis de criterios más usados en su mayoría se llevó a cabo con casos de estudio posteriores a la publicación de Sallwey et al., (2019) los resultados son prácticamente los mismos, lo que entrega un buen sustento, sobre el uso de estos criterios como base para el estudio.

**Tabla N°8:** criterios asociados.

Criterios asociados	Número
Pendiente/ aspecto de la pendiente/ elevaciones/ potencial de escorrentía/ curvatura	1
Uso o cobertura de suelo/ erosión	2
Densidad de drenaje/ permeabilidad/ frecuencia de estanque/ks suelo.	3
Geología/unidades hidrogeológicas/litología	4
Suelo/tipo/textura	5
Conductividad eléctrica/salinidad/calidad de agua	6
Profundidad/ fluctuación del nivel freático/fluctuación de agua/ zona vadosa	7
Recarga neta promedio anual/ rendimiento del acuífero	8
Transmisividad/ ks acuífero	9
Lineamientos/ densidad de lineamientos/ distancia a lineamientos	10

Distancia a fuentes de agua/ proximidad a cuerpos de agua/ frecuencia de estanque.	11
------------------------------------------------------------------------------------	----

**Fuente:** Elaboración propia en base a bibliografía.

En la lista anterior se contabilizaron 3 criterios que no tenían similares a los cuales asociar, estos fueron geomorfología, distancia a usuarios y lluvia, los anteriores más la lista de criterios asociados redujo la lista inicial de 36 a 14 criterios.

**Tabla N°9:** Lista de criterios factibles de ser usados en el estudio.

critério	Cantidad
Pendiente	1
Uso de suelo	2
Geología	3
Suelo	4
Calidad de agua	5
Lineamientos	6
Distancia a fuentes de agua	7
Profundidad del agua subterránea	8
Rendimiento	9
Transmisividad	10
Densidad de drenaje	11
Geomorfología	12
Lluvia	13
Distancia a usuarios	14

**Fuente:** Elaboración propia en base a bibliografía.

#### 4.1.1 Elección de criterios

En base a la lista anterior de 14 criterios de la tabla N°9 y la información levantada durante el análisis bibliográfico, se elaboró la lista definitiva. Para la selección final, se tuvieron en cuenta las características locales del área de estudio, información disponible y el enfoque del estudio.

Fundamentado en las características locales del área de estudio se descartó el criterio de lluvia, ya que, de acuerdo con los parámetros establecidos en los casos de estudio, evaluar los valores locales de lluvia bajo dichos parámetros, no contribuiría en nada a alcanzar los objetivos del estudio, debido a que los valores locales del criterio lluvia superan ampliamente a los revisados en los casos de estudio.

Se excluyó el criterio de calidad del agua, en función del enfoque del estudio, el cual es de un carácter ambiental, por lo tanto, independiente de la obra RAAS a realizar se debería conservar y proteger las características naturales del acuífero lo que incluye la calidad de sus aguas, ya sean buenas o malas.

El criterio de distancia a usuarios fue descartado debido a la falta de información, ya que el presente estudio no tiene un beneficiario específico de la recarga identificado. Otros criterios de los que no se encontró información de calidad fue geología, rendimiento y transmisividad; pero en su lugar se usó un criterio compuesto por los anteriores, importancia hidrogeológica del que si se disponía de información.

Por último, los criterios de densidad de drenaje y suelo no se consideraron debido a que los otros criterios elegidos, como geomorfología o pendiente, cubrieron la función de ambos criterios, además, que sobre el suelo no se obtuvo información.

## **4.2 Recolección de coberturas digitales**

Una vez definidos los criterios que serán parte del estudio, es necesario buscar sus correspondientes coberturas digitales para integrarlos al estudio, esta información puede provenir de mapas reales que se pueden digitalizar o bien las coberturas se pueden buscar en bases de datos digitales gubernamentales o de acceso público.

### **Importancia Hidrogeológica**

Este es un criterio compuesto, el cual considera las unidades geológicas, más la productividad de los pozos estudiados y la permeabilidad, para definir este criterio.



Esta capa se obtuvo de la mapoteca de la dirección general de aguas (DGA), específicamente del mapa hidrogeológico de Chile publicado en 1986, esta información se encuentra en formato shape y georreferenciada en UTM zona 19s WGS84. La capa del mapa hidrogeológico usada fue ocurrencia de aguas subterráneas, la cual se procesó en base a su atributo de impacto hidrogeológico. El procesamiento en ArcGIS consistió en cortar el shape de ocurrencia de aguas subterráneas usando una máscara de la cuenca del Bio-Bio, luego el resultado fue transformado a ráster. Esta capa no tenía toda la extensión de la cuenca por lo que se usó una máscara de la cuenca del Bio-Bio y se unió a esta, los valores desconocidos se clasificaron con la menor valoración.

### **Geomorfología**

La geomorfología de un área tiene un papel dominante en el movimiento y almacenamiento de agua subterránea, afectando a los acuíferos de dos formas, mediante la pendiente y el material primario del suelo, en resumen, la geomorfología muestra el efecto combinado de la escorrentía y la infiltración la recarga potencial del acuífero, por lo que identificar una unidad geomorfológica favorable para la recarga, generalmente proporciona una indicación directa de posibles acuíferos y zonas de recarga. Hay criterios que se relacionan con la geomorfología, como la pendiente y el suelo, pero no se ha identificado alguno que se pueda reemplazar por este.

Las coberturas geomorfológicas regionales actualizadas hasta 2016, se obtuvieron desde la red del centro de desarrollo urbano sustentable (CEDEUS) en formato shape, estas fueron elaboradas en base a modelos de elevaciones digitales SRTM y el mapa geológico de Chile, facilitado por Sernageomin. El procesamiento en ArcGIS de estas capas incluyó la unión de las coberturas regionales en las que se encuentra la cuenca del río Bio-Bio y la posterior confección de la cobertura de la cuenca a través de la herramienta corte, usando una máscara de esta y finalmente rasterizar la cobertura antes obtenida.

### **Distancia a fuentes de agua**

Dado que los cuerpos de agua continentales especialmente los ríos pueden recargar los acuíferos en las temporadas de agua alta, a través de las inundaciones

y el aumento de su caudal, esta distancia se considera uno de los parámetros importantes en la recarga del acuífero. El parámetro, adquiere mayor importancia si las inundaciones o crecidas se consideran como la o una de las fuentes de recarga de los proyectos RAAS, una distancia más cercana a los cuerpos de agua se considera idónea hasta cierto punto, dado que las distancias demasiado pequeñas se consideran poco idóneas debido a que el agua puede regresar nuevamente al cuerpo de agua, finalmente las distancias largas se consideran muy malas debido a los costos de transporte e infraestructura.

Esta capa se elaboró en base a la cobertura de la red hidrográfica de la cuenca, obtenidas desde el estudio hidrogeológico de la cuenca del río Bio-Bio, la confección se realizó con la herramienta distancia euclidiana, la cual calculó la distancia a todas las fuentes de agua ya sean lagos, ríos o embalses, en esta herramienta se manejaron los parámetros ambientales para que el análisis se limitara a los cuerpos de agua dentro de la cuenca.

### **Profundidad del agua subterránea**

La profundidad al agua subterránea es la distancia desde el suelo al nivel freático, hidrológicamente, esta distancia llamada también zona insaturada, es el factor principal que controla el movimiento del agua desde la superficie de la tierra hasta el acuífero. Este criterio es un indicador de la presión atmosférica y de poros en la superficie, por lo que está directamente relacionado con la cantidad de agua almacenada, además, determina los tipos de obras RAAS a usar, ya que estos varían según la profundidad del agua subterránea.

La capa de profundidad de la cuenca se obtuvo del estudio hidrogeológico de la cuenca del Biobío, es necesario mencionar que este criterio se definió a partir del nivel estático (m) de 209 pozos que se midieron en la cuenca, luego se calcularon los niveles estáticos medios y se confeccionó la cobertura con zonas comprendidas en un mismo rango de profundidad, la cual el mismo estudio definió en 5 tramos. Una falencia que presenta esta capa es que no abarca toda el área de la cuenca, ya que está elaborada en base a datos de pozos, existe un límite en cuanto al área que se puede predecir a partir de un pozo, es por ello por lo que la capa no comprende el área cordillerana, debido a que no hay pozos

estudiados en esa zona. Finalmente, el único procesamiento que esta capa requirió fue transformar la cobertura de shape a formato ráster.

Esta capa no tenía toda la extensión de la cuenca por lo que afecta a la suma ponderada final, debido a esto se usó una máscara de la cuenca del Biobío y se unió a esta capa los valores para las áreas desconocidas se clasificaron con el menor valor.

### **Uso de suelo**

Es un criterio muy importante para la identificación de zonas para de RAA, influye directamente en el proceso de recarga del acuífero, mediante distintos factores como, la escorrentía superficial, la evapotranspiración, la infiltración de agua, capacidad de retención de esta última y el ciclo del agua. Las coberturas con vegetación, agrícolas o sitios anegados generalmente permiten una mejor infiltración debido a la porosidad del suelo y la protección que brindan ante las fuerzas erosivas, por otro lado, los asentamientos humanos y los terrenos erosionados tienen un mal potencial de recarga. Los criterios asociados al uso de suelo son la erosión, o cuando se ve el uso por separado del uso o cobertura del suelo. Cabe destacar que para los métodos de recarga que requieren remoción de la capa superficial este criterio deja de ser relevante.

Los datos de uso de suelo se encuentran en formato shape con proyección UTM WGS 84 uso 18s, disponibles en la página de Infraestructura de datos espaciales (IDE) del ministerio de agricultura (MINAGRI), como catastro de uso de suelo 2014 para la región de la Araucanía y 2015, para la anterior región del Bio-Bio. Como se trata de Shape files regionales con alta cantidad de información, esta se simplificó para ambos usando la herramienta de ArcGIS dissolve sobre el atributo de USO, luego estos se proyectaron en coordenada WGS\_1984\_UTM\_Zone\_19S, para que coincidiera con las demás capas que se están trabajando en el estudio, a continuación se fusionaron las capas de regionales en las que se encuentra la cuenca, esto se hizo mediante la herramienta merge, el resultado se convirtió a formato ráster y finalmente se extrajeron los uso de suelo de la cuenca del Bio-Bio mediante la herramienta extrac by mask, usando como máscara el shape de la cuenca del Biobío.

## **Lineamientos**

Las estructuras geológicas de una zona sufren colapsos de la roca y deformación a causa de los cambios de tensión en el tiempo, los lineamientos son las manifestaciones lineales de estos colapsos y deformaciones, como las fallas, zonas de fractura, zonas de cizalla, intrusiones ígneas, diques, vetas y juntas. Los lineamientos son una característica importante en la recarga y movimiento de las aguas subterráneas al aumentar la porosidad y permeabilidad del lecho rocoso, lo que produce rutas subterráneas donde el agua puede transitar y también lugares donde esta puede almacenarse.

Esta capa se obtiene del estudio hidrogeológico de la cuenca del río Bio-Bio. Este se encuentra en formato shape de líneas, por lo que para preparar la capa que será parte del estudio se necesitará un procesamiento previo en el software ArcGIS. La capa final que se obtendrá es un mapa de densidad de lineamientos, para esto primero es necesario calcular la longitud de todos los lineamientos presentes en la cuenca, luego se aplica la herramienta de ArcGIS densidad de línea, lo que resulta en un mapa que muestra los sitios donde más se concentran los lineamientos, en relación con el área total de la cuenca, por eso esta capa está en unidades de  $\text{km}/\text{km}^2$ .

## **Pendientes**

La pendiente es un factor muy importante para la identificación de zonas favorables para la RAA, en los estudios consultados los expertos están de acuerdo en que la pendiente incide en la cantidad de agua disponible para la recarga, esto lo lleva a cabo controlando directamente dos acciones, la escorrentía superficial y la tasa de infiltración, aunque esta última también depende en parte del tipo de suelo, estos parámetros poseen una relación inversa en cuanto a la pendiente, a mayor pendiente, mayor escorrentía superficial y menor tasa de infiltración y viceversa a menor pendiente menor escorrentía y mayor tasa de infiltración. Expertos también mencionan que la pendiente es un parámetro complementario a la topografía de un área, por lo que en la actualidad los estudios, además, de la pendiente han elegido usar criterios complementarios relacionados con el re-

lieve, como las elevaciones y el aspecto de la pendiente, o bien sumar esta información a la de pendientes para tener una base más consolidada. De la revisión bibliográfica anterior podemos concluir que la pendiente es el criterio más ampliamente usado en los estudios de identificación de zonas favorables para RAAS y que existen varios criterios más que se pueden asociar a la pendiente, como lo son, la topografía, elevaciones, aspecto de la pendiente, potencial de escorrentía.

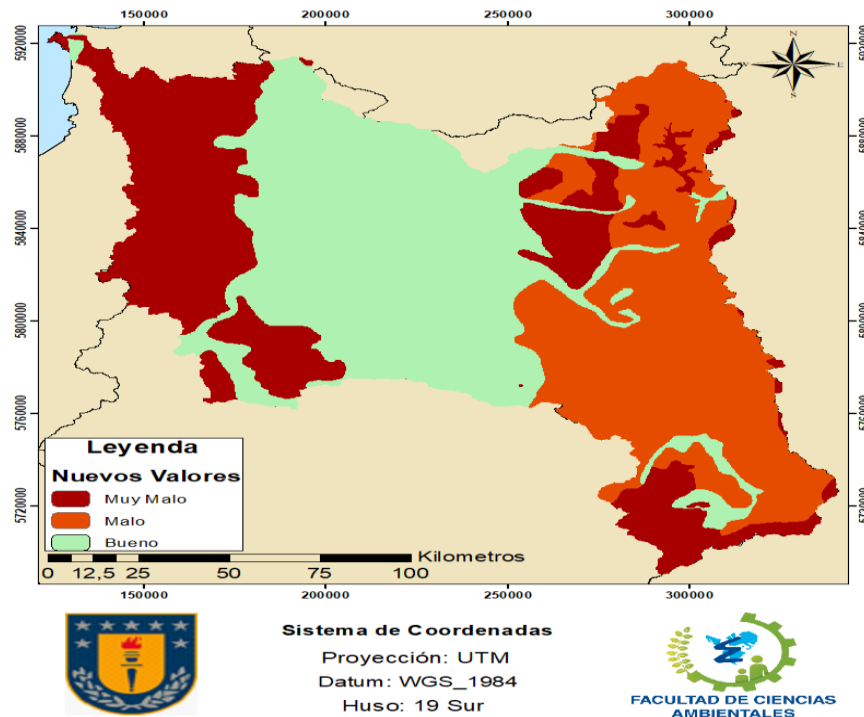
El mapa de pendientes se elaboró en base a datos de elevaciones de la cuenca del río Biobío, obtenidas desde la plataforma de imágenes satelitales, Earth explorer de la USGS, se descargaron varios DEM SRTM con una resolución de 30m correspondientes a las distintas partes de la cuenca del Biobío, esto se comprobó mediante un shape de la cuenca disponible en el estudio hidrogeológico de la cuenca del Bio-Bio. Los DEM se procesaron en el software ArcGIS 10.4, en primer lugar, los ráster se unieron en uno solo mediante la herramienta Mosaic to new ráster, en este paso también se definió su proyección UTM WGS 84 19s, en segundo lugar, se cortó el ráster mediante la herramienta extrac by mask, usando como mascara el shape de la cuenca del Bio-Bio mencionado anteriormente. El último paso antes de calcular la pendiente es eliminar las imperfecciones que pueda tener el ráster de superficie, esto se lleva a cabo mediante la herramienta de hidrología fill. El mapa final de pendientes se obtiene aplicando la herramienta de superficie, slope al ráster que anteriormente se rellenó.

### **4.3 Reclasificación**

#### **Importancia hidrogeológica**

El criterio de importancia hidrogeológica ya venía con una clasificación previa des de su fuente, por lo que sus valores solo se adaptaron a la escala común con la que se trabajó en los demás criterios.

### Mapa de Importancia Hidrogeológica Reclasificado



**Figura2:** Mapa de reclasificación de alternativas para el criterio importancia hidrogeológica.

**Fuente:** Elaboración propia, en base a procesamiento de información en SIG.

### Geomorfología

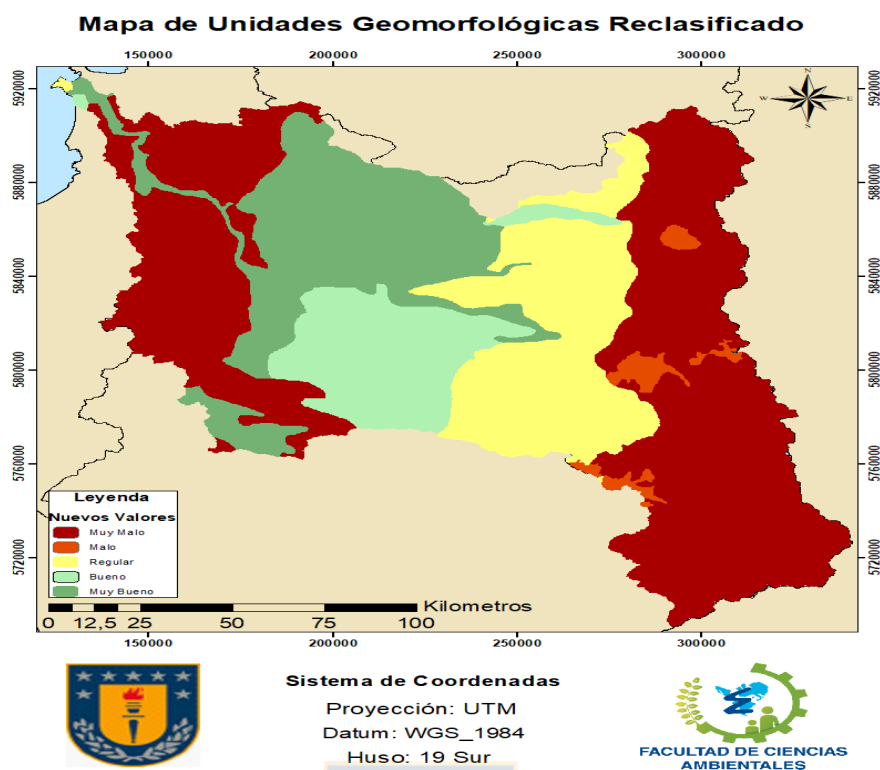
En base a la bibliografía las formaciones geomorfológicas que tuvieron una mayor valoración son las llanuras de inundación, planas, fluviales y aluviales, además, de ríos y cuerpos de agua. En el área de estudio existe un llano central y otros sedimentarios; pero ambos de origen fluvial, aluvial o glaciar.

Las formaciones consideradas muy buenas fueron conformadas por todas las terrazas, colinas y laderas volcánicas con pendientes suaves, también se consideraron las llanuras aluviales antiguas, paleocanales, dunas de arena y superficies de abanico para-deltaicas. Se identificaron ciertas similitudes en la aptitud para RAAS en algunas formaciones del área de estudio y en base a ellas se clasificaron como buenas las formaciones de llano central con morrenas y conos, las cuencas sedimentarias Inter montañosas y las planicies marinas.

En las zonas declaradas como Moderadas, aparecieron colinas y mesetas de un relieve relativamente bajo, además, de llanuras erosionadas y desérticas. En el área de estudio se encontró una unidad morfológica distinta a la presente en los casos de estudio, esta fue la precordillera que debido a sus características también fue ubicada en la categoría de moderada.

Según la bibliografía se consideran mala para proyectos RAAS, aquellas formaciones que poseen pendientes superiores, como conos volcánicos, llanuras de colinas y montañas. El área de estudio presenta la cordillera de la costa, una formación que si bien en general no tiene grandes elevaciones si tiene pendientes pronunciadas, específicamente en el área de la cuenca esta comienza a aumentar su altura por lo que no la hacen una buena formación para proyectos RAAS.

Existió una disyuntiva en las zonas declaradas como muy malas, debido a que hubo estudios que juzgaron los cuerpos de agua como una muy mala formación para la recarga de aguas subterráneas, aunque en general se referían a lagos, marismas costeras y lugares en los que existe constante intercambio marino. Las demás formaciones que fueron clasificadas como muy malas corresponden a los grandes cordones montañosos y la cordillera.



**Figura 3:** Mapa de reclasificación de alternativas para el criterio geomorfología.

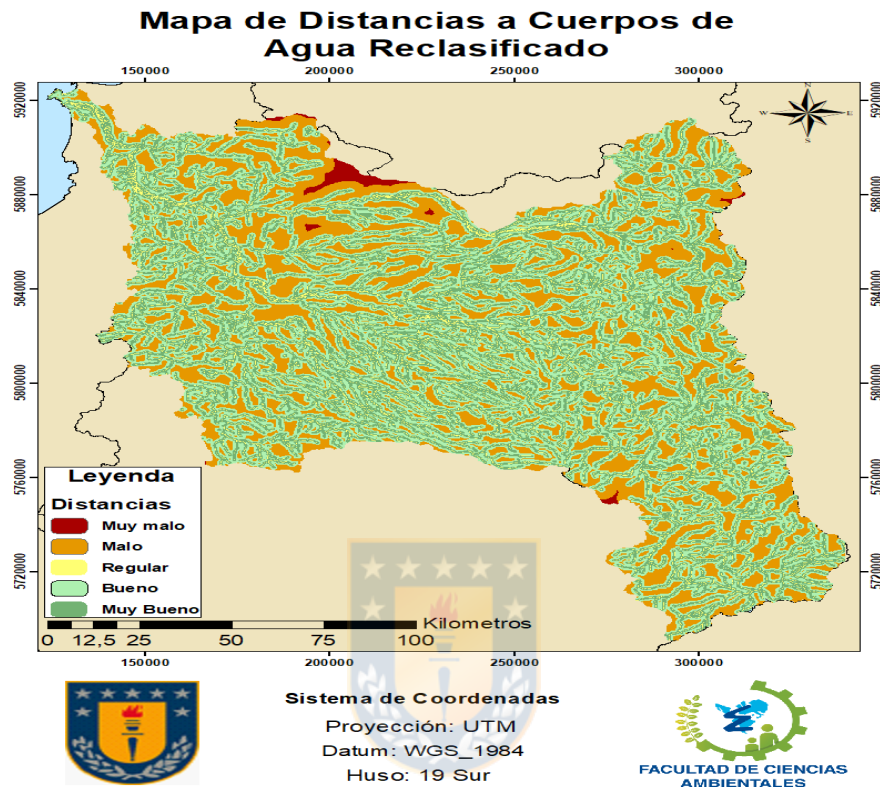
**Fuente:** Elaboración propia, en base a procesamiento de información en SIG.

### **Distancia a fuentes de agua**

Basados en la descripción del criterio, las distancias extremadamente cortas no son muy buenas, dado que el agua puede volver al cuerpo de agua. Las grandes distancias son aún peores, ya que si la fuente fuese un cuerpo de agua su transporte a un lugar lejano implicaría un alto costo económico. En cuanto a los valores establecidos en los estudios que usaron este criterio, se puede establecer que la peor valoración es para distancias superiores a 3000m o 5000m y las valoraciones más altas están entre los 50 y los 500 metros, igualmente las distancias que se encuentran desde 300- 500 a 1000m también se valoran de buena manera las distancias entre 1000 a 3000-5000, por ultimo las distancias demasiado cercanas no se consideran las peores debido a que si bien no es las más idónea el proyecto igualmente no tendría impedimentos para realizarse esto sin considerar que existen métodos que se aplican dentro de los cauces, las barreras



fusibles son un ejemplo de estos. Por tanto, la valoración para las distancias a fuentes de agua es la siguiente: Entre 50- 300 metros muy buena, entre 300-1000 metros buena, entre 0-50 metros regular, entre 1000 – 4000 metros malo y Mayor a 4000 metros muy mala.

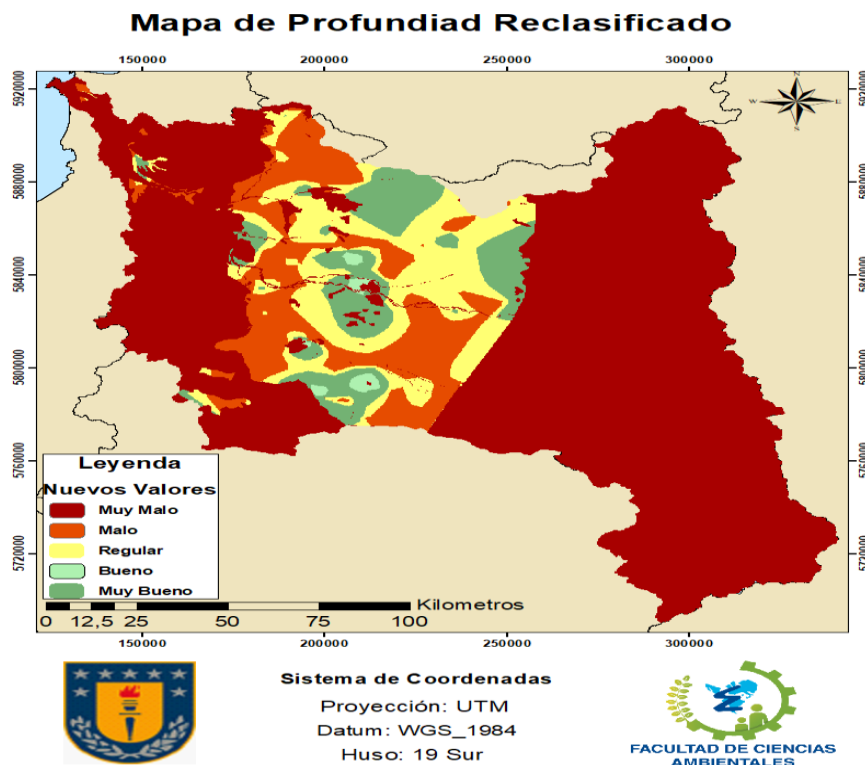


**Figura 4:** Mapa de reclasificación de alternativas para el criterio distancia a fuentes de agua.

**Fuente:** Elaboración propia, en base a procesamiento de información en SIG.

## Profundidad

Las capas de potencial hidrogeológico y de profundidad de nivel freático están clasificadas desde su origen, así que por razones del estudio se mantendrán con esa clasificación.

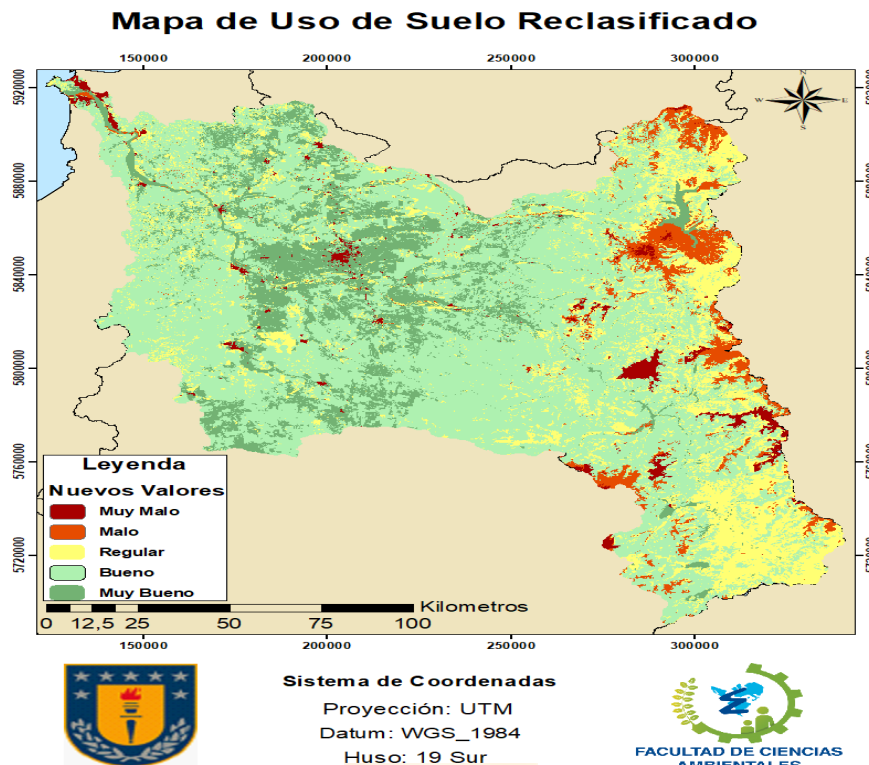


**Figura 5:** Mapa de reclasificación de alternativas para el criterio profundidad.

**Fuente:** Elaboración propia, en base a procesamiento de información en SIG.

### Uso de suelo

En este criterio las valoraciones fueron muy distintas, lo que se puede atribuir a las características locales, el objetivo del proyecto y el tipo de obra de RAAS. Por ejemplo, los terrenos agrícolas se encuentran en 4 de 5 valoraciones, por otro lado, los cuerpos de agua se encuentran en valoraciones muy buenas y otras muy malas. Aun así, se logran ver tendencias para los usos de suelo presentes en la cuenca, de este modo se han clasificado en 5 clases: cuerpos de agua y terrenos agrícolas como muy bueno, bosques y humedales como bueno, praderas, terrenos en barbecho y matorrales como regular, las áreas sin vegetación fueron clasificadas como malas y por ultimo las zonas urbanas, industriales y glaciares fueron clasificadas como muy malas. Glaciares se clasificó como muy malo debido a la ausencia referencias bibliográficas sobre este uso y a consideraciones ambientales.



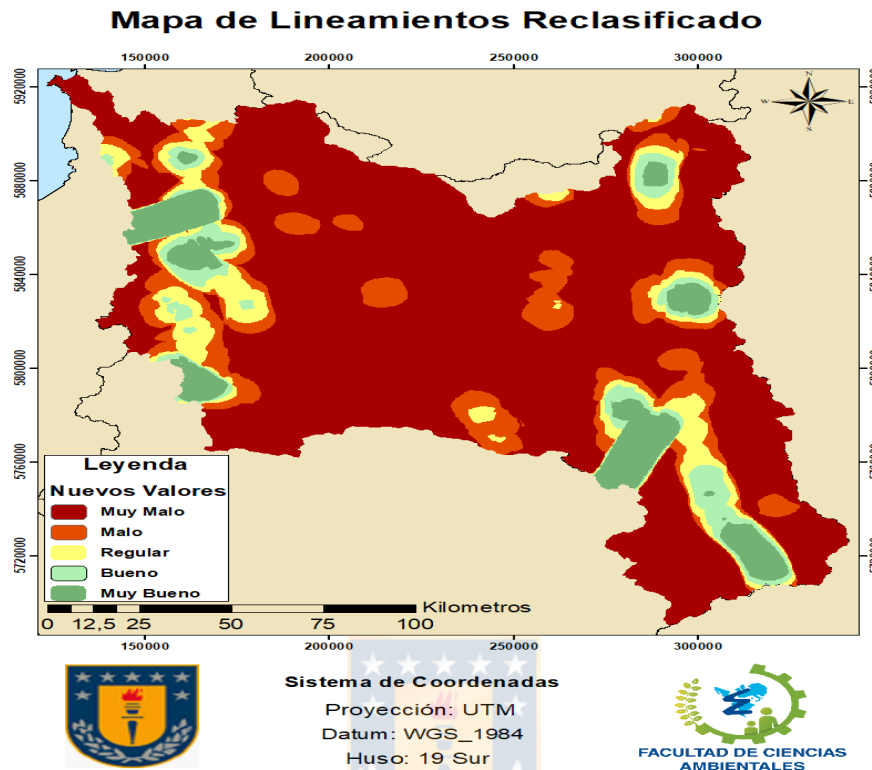
**Figura 6:** Mapa de reclasificación de alternativas para el criterio uso de suelo.

**Fuente:** Elaboración propia, en base a procesamiento de información en SIG.

### Lineamientos

Debido a que los lineamientos ofrecen una ruta para las aguas subterráneas es bueno cuando existe una buena densidad de estos, por tanto, según la bibliografía se tomaron en cuenta como valores muy buenos aquellos entre 1 a 2 en general o mayor de 2. Los valores considerados buenos son densidades que rondan entre 0,5 y 2, los valores moderados entre 0,5 y 1,5 y por último los valores malos y muy malos se encuentran entre 0 y 0,5. No se halló una tendencia que permitiese tomar valores exactos; pero debido a que las capas se reclasificaron en 5 clases, se siguió un patrón similar a los estudios revisados que tuviesen la misma cantidad de clases estos fueron 3, aunque uno de estos 3 posee valores totalmente diferentes al resto de todos los estudios sus valores son opuestos lo que se puede atribuir al tipo de RAAS que se quiere llevar a cabo en esa área de estudio en específica.

Por lo que la clasificación para este estudio será: Muy bueno  $2 <$ , Bueno 1,5 - 2, Moderado 1-1,5, Malo 0,5-1 y Muy malo 0-0,5.

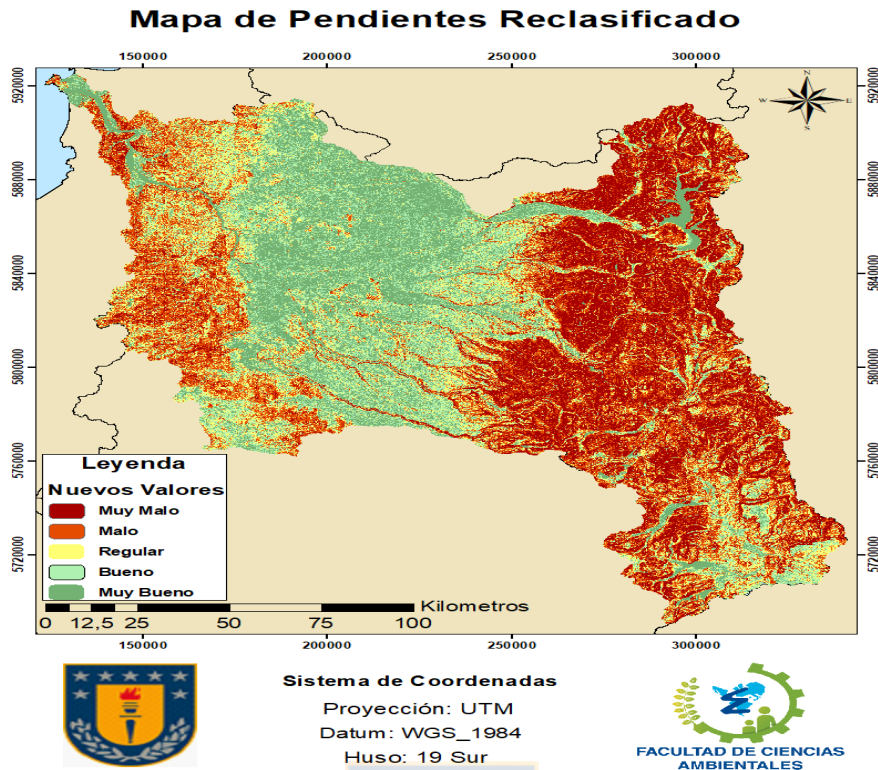


**Figura 7:** Mapa de reclasificación de alternativas para el criterio lineamientos.

**Fuente:** Elaboración propia, en base a procesamiento de información en SIG.

## Pendientes

Según la bibliografía los valores de pendiente que se consideraron muy buenos tanto en grados como en porcentajes oscilaron entre 0 y 7, aunque la mayoría se de estos valores se distribuían entre 0 y 2. Los valores considerados buenos entre 0,1 y 15 existiendo una clara tendencia de los datos a ubicarse entre 2 y 5. Los valores moderados, van desde 2,5 a 16,59 estando la mayoría de los datos entre 3 y 10. Los valores malos se encontraron entre 4 y 30, aquí los valores se observaron más distribuidos entre 4 a 10 y entre 10 y 30. Para los valores considerados muy malos la mayoría consideró valores muy malos valores sobre 15 ya sea en grados o porcentaje. Para el presente estudio el atributo de pendiente se utilizó en grados por lo que se consideraron valores de muy bueno 0-2, bueno 2-5, moderado 5-10, malo de 10-20 y muy malo  $20 <$ .



**Figura 8:** Mapa de reclasificación de alternativas para el criterio pendiente.

**Fuente:** Elaboración propia, en base a procesamiento de información en SIG.

#### 4.4 Proceso AHP

##### 4.4.1 Representación de los juicios de valor

Cada caso de estudio en el que se haya usado el proceso AHP, se consideró como un juicio de valor por parte de un experto, además, de los estudios seleccionados solo se tomaron en cuenta los criterios que coincidieron con el listado definido en el presente estudio.

**Tabla N°10:** Casos estudios revisados y metodología usada por cada uno de ellos.

Estudio	Proceso de análisis mul-	observaciones
(R. Agarwal & Garg, 2016)	AHP de Saaty	En el estudio no sale la matriz de comparación por pares. No se puede usar
(E. Agarwal et al., 2020)	ANP/AHP	Ninguna
(Das & Pal, 2020)	AHP	Ninguna
(Khan et al., 2020)	AHP	Ninguna
(Fuentes & Vervoort,	AHP	ninguna

(Kadhem & Zubari,	literatura	No usa AHP
(Norouzi &	Random forest	No usa AHP
(Souissi et al., 2018)	Proceso de combinación	No usa AHP
(Arshad et al., 2020)	AHP	No tiene la matriz de comparación por pa-
(Rajasekhar et al.,	AHP	Ninguna
(Sandoval & Tiburan, 2019)	AHP	Su tabla no tiene valores coherentes
(Saravanan et al., 2020)	AHP	No tiene la matriz de comparación por pa-
(Zghibi Adel, 2020)	AHP	Ninguna
(Navane & Sahoo,	AHP	Ninguna

Fuente: Elaboración propia en base a bibliografía.

Se encontraron 11 estudios que usan AHP como herramienta de análisis multicriterio, pero en algunos de ellos no estaba la matriz de comparación por pares por ende se descartaron, finalmente hubo 8 estudios en la bibliografía que contaron con los datos necesarios para trabajar con la metodología AHP.

#### 4.4.2 Construcción de las matrices de juicio de valor

Las matrices de comparación por pares se elaboraron en base a datos de matrices consolidadas de cada uno de los estudios analizados, por lo que estas deberían ser consistentes, no obstante, al tomar en cuenta solo algunos de los datos, se volvió necesario, confirmar la consistencia de las nuevas matrices de comparación por pares.

**Tabla N°11:** Consistencia de las matrices extraídas de los casos de estudio.

ESTUDIO	CR	ESTADO
1	0,072	Consistente
2	0,019	Consistente
3	0,045	Consistente
4	0,015	Consistente
5	0,170	No consistente
6	0,013	Consistente
7	0	Consistente
8	0,467	No consistente

Fuente: Elaboración propia.

Solo 6 matrices de comparación por pares conservaron su consistencia en relación con los criterios usados en el presente estudio. Con las matrices seleccionadas se procedió a la confección de la matriz consolidada, aplicando la media geométrica a cada comparación por pares, para así obtener cada valor de la



matriz final. Existieron casos de comparaciones por pares que se encontraron una sola vez y otras comparaciones que no aparecieron en ninguna de las 6 matrices de comparación por pares seleccionadas, por lo que se consultó al resto de los estudios que se descartaron por inconsistencia o por no haber usado AHP para estimar los valores faltantes.

**Tabla N°12:** Pesos y clasificación de criterios en estudios que no usaron AHP.

Estudio	criterio	peso	Clasifica-
<b>(R. Agarwal &amp; Garg, 2016)</b>	Geología	0,19	2
	Geomorfología	0,23	1
	Uso de suelo	0,05	7
	Densidad de drenaje	0,09	6
	Fluctuación de nivel freático	0,19	3
	Pendiente	0,05	8
	suelo	0,09	5
	lluvia	0,11	4
<b>(Kadhem &amp; Zuhari, 2020)</b>	Todos sus criterios tienen igual valor	-	-
<b>(Norouzi &amp; Shahmohammadi-Kalalagh, 2019)</b>	Permeabilidad	0,23	1
	Pendiente	0,2	2
	Profundidad del agua	0,18	3
	Erosión	0,17	4
	Uso de suelo	0,12	5
	Calidad de agua	0,1	6
	Suelo	0,06	7
	Distancia a fuentes de agua	0,04	8
	Aspecto de la pendiente	0,01	9
<b>(Souissi et al., 2018)</b>	lineamientos	2	5
	Densidad de drenaje	1,5	6
	Uso de suelo	2,5	2
	Litología	4	1
	Pendiente	2,5	3
	suelo	1	8
	Lluvia	1,5	7
	geomorfología	2	4
<b>(Arshad et al., 2020)</b>	Geomorfología	0,21	1
	Uso de suelo	0,16	2
	lluvia	0,14	5
	Densidad de drenaje	0,11	6
	Tipo de suelo	0,14	4
	permeabilidad	0,15	3
	Elevación	0,10	7
	pendiente	0,0844	7
	suelo	0,075	10

<b>(Sandoval &amp; Ti- buran, 2019)</b>	Geología	0,0943	5
	geomorfología	0,0834	8
	profundidad	0,1212	2
	Uso de suelo	0,0974	4
	Conductividad eléctrica	0,0934	6
	Transmisividad	0,1585	1
	Densidad de drenaje	0,0766	9
	lineamientos	0,1157	3
<b>(Saravanan et al., 2020)</b>	Geomorfología	0,28	1
	Lineamientos	0,14	3
	Litología	0,08	6
	pendiente	0,11	5
	Uso de suelo	0,13	4
	Lluvia	0,15	2
	Densidad de drenaje	0,06	7
	suelo	0,05	8
<b>(Rajasekhar et al., 2020)</b>	Geología	0,14	3
	Uso	0,08	6
	Densidad de drenaje	0,19	2
	Suelo	0,03	7
	Zona vadosa	0,09	5
	Lluvia	0,22	1
	Pendiente	0,13	4

Fuente: Elaboración propia en base a bibliografía.

Los datos consultados en estos estudios correspondieron al ranking de clasificación de cada estudio, se identificaron los criterios definidos para el presente estudio y se calcularon medidas de tendencia central, como la media o la media geométrica para la confección una nueva lista de importancia la cual se usó para definir los pesos de los valores faltantes en la matriz consolidada de comparación por pares.

**Tabla N°13:** Ranking de los estudios que por tener otras metodologías o no ser consistentes para el AHP no fueron considerados.

Criterios del estudio	Valor Promedio en los estudios	Media geométrica	Ranking según promedios
<b>Geomorfología</b>	3	2	1
<b>Uso de suelo</b>	4,3	3,6	4
<b>Profundidad</b>	3,3	2,6	2
<b>Pendiente</b>	4,8	4,4	5



<b>Distancia a fuentes de agua</b>	8	8	6
<b>lineamientos</b>	3,7	3,6	3

Fuente: Elaboración propia.

Otra fuente de incertidumbre surgida en la matriz de comparación por pares consolidada es el criterio de impacto hidrogeológico. Este se consideró en base al mapa hidrogeológico nacional (DGA,1986), el cual tiene una clasificación de impacto hidrogeológico compuesto por criterios como la geología, la productividad de pozos por ende la de los acuíferos, sentido de escurrimiento, entre otros que no son tan relevantes para el estudio, para estimarle un valor a este criterio sus componentes se asociaron a criterios presentes en los estudios recopilados en la bibliografía, criterios como la geología, transmisividad y rendimiento de los acuíferos.

**Tabla N°14:** Estimación del peso del criterio importancia hidrogeológica (IH).

Criterios asociados a IH	Valores en estudios con AHP										Promedio	Media geométrica
<b>Geología /unidades hidrogeológicas</b>	14,6	9,43	7,8	13	19	15,3	14	13	33	8	14,71	13,46
<b>Transmisividad</b>	5,21					15,85					10,82	8,88
<b>Rendimiento del acuífero</b>	4,64					17					10,53	9,09
<b>total</b>											36,1	31,4

Fuente: Elaboración propia a partir de bibliografía.

Del valor total anterior se infirió que el criterio de impacto hidrogeológico tiene un peso realmente importante que los criterios que lo componen por sí solo no lo lograrían, debido a esto se catalogó para efectos de la matriz de comparación por pares consolidada como el criterio más importante.

**Tabla N°15:** Matriz de comparación por pares consolidada, Geomorfología (GM), Lineamientos (Li), Pendientes (Pend), Profundidad (Prof), Distancia a fuentes de agua (DFA), Importancia Hidrogeológica (IH) y Uso de suelo (US).

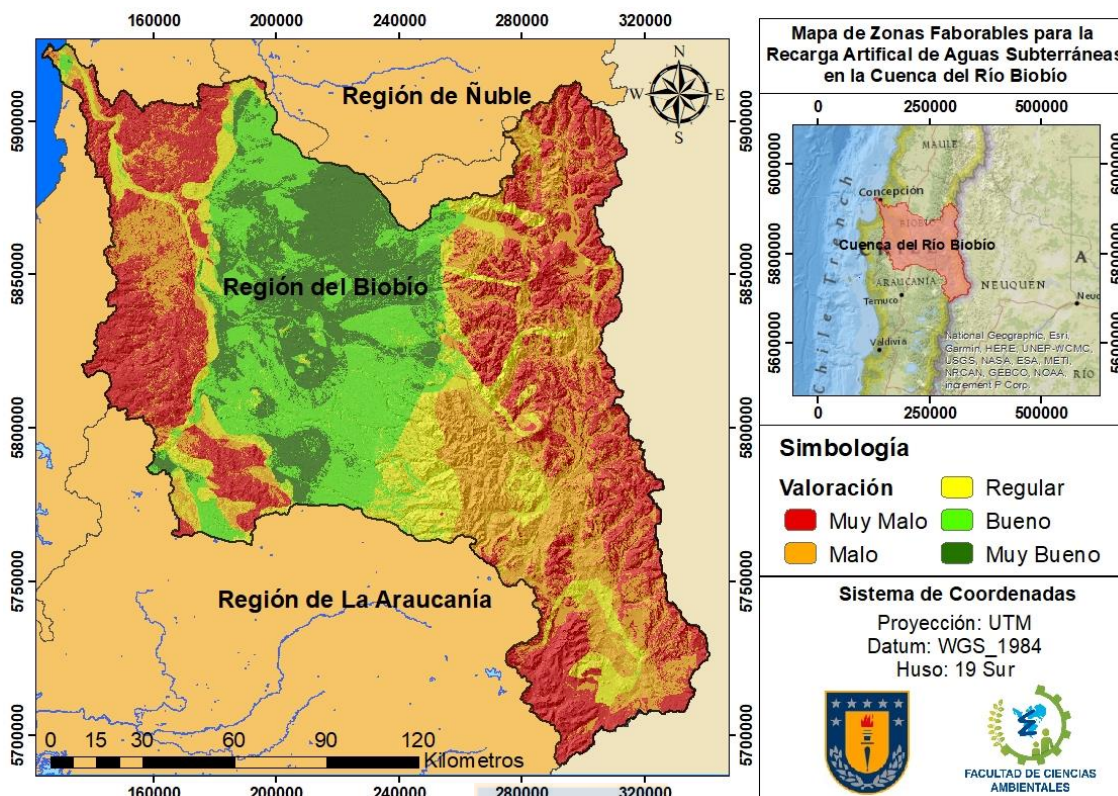
Criterios	GM	Li	Pend	Prof	DFA	IH	US
GM	1	3,16	1,36	1,41	3	0,33	1,46
Li	0,32	1	1,15	0,33	2	0,25	1,12
Pend	0,74	0,87	1	0,59	1,92	0,33	1,32
Prof	0,71	3	1,70	1	1,73	0,5	4
DFA	0,33	0,55	0,52	0,58	1	0,2	0,5
IH	3	4	3	2	5	1	4
US	0,69	0,89	0,76	0,25	2	0,25	1

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla N°16:** Vector prioridad resultante.

Criterios	Valores finales
Importancia hidrogeológica	0,36
Geomorfología	0,18
Profundidad	0,19
Densidad de lineamientos	0,09
Uso de suelo	0,09
Distancia a fuentes de agua	0,06
Pendientes	0,11

Fuente: Elaboración propia.



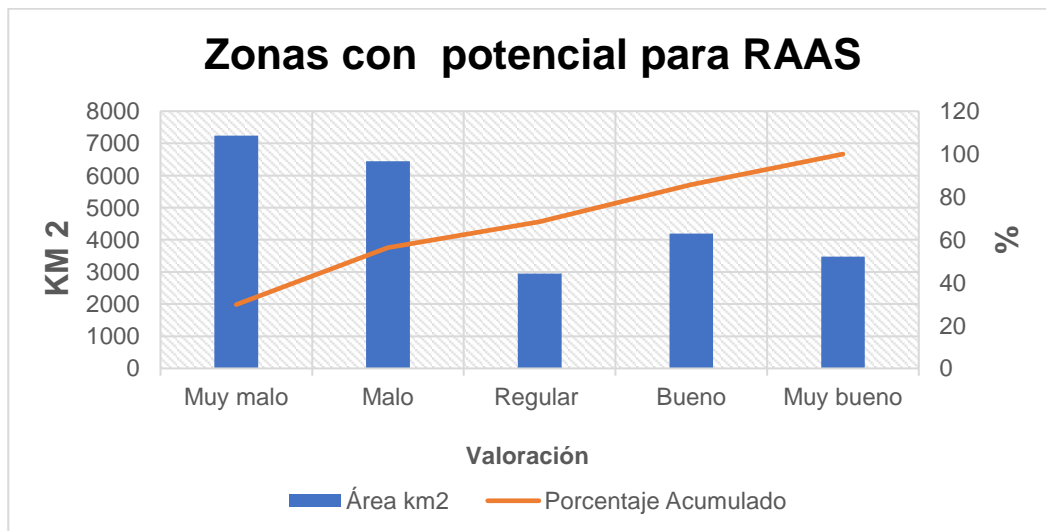
**Figura 9:** Mapa de idoneidad para proyectos de RAAS.

**Fuente:** Elaboración propia, en base a procesamiento de información en SIG.

#### 4.5 Selección de áreas de interés y aplicabilidad

Los resultados obtenidos en el mapa de idoneidad exponen las aptitudes del área de estudio para llevar a cabo la RAAS. En la cuenca una superficie de 13686km<sup>2</sup> está calificada con un potencial malo o muy malo para la recarga, esta extensión abarca alrededor de un 56% del total de la cuenca y se concentra en las formaciones cordilleranas, correspondientes a la Cordillera de los Andes y de la Costa. Las zonas que según los resultados presentaron aptitudes regulares, tienen una extensión de 2952km<sup>2</sup> y conforman un poco más del 12% de la extensión total de la cuenca. Las zonas regulares se agrupan en áreas de precordillera, también cercanas a cuerpos de agua que atraviesan zonas definidas como malas o muy malas y lugares en que las aguas subterráneas se encuentran a gran profundidad. Por último, las zonas definidas como buenas y muy buenas conforman un área de 7667km<sup>2</sup>, lo que se traduce en un 32% de la superficie total de la cuenca, además, estas zonas coinciden en gran parte de su extensión

con la presencia de acuíferos. En su mayoría las áreas buenas y muy buenas se asocian al valle central, ubicado entre las cordilleras de los Andes y de la Costa, además, de un pequeño porcentaje de estas zonas que se encuentra en planicies costeras.



**Figura 10:** Grafico de zonas con potencial para RAAS expresado en unidad de área Km<sup>2</sup>.

**Fuente:** Elaboración propia en Excel.

El análisis general sobre la aplicabilidad de proyectos de recarga artificial en el área de estudio se basará en las características de la RAAS que pueden ser un aporte o solución definitiva para las problemáticas ambientales identificadas en la cuenca. En base a lo anterior, la RAAS se proyecta como una medida de gestión eficaz para las distintas necesidades que presenta la cuenca. Puede modificar de manera positiva el número de población que depende de camiones aljibe para su abastecimiento de agua potable.

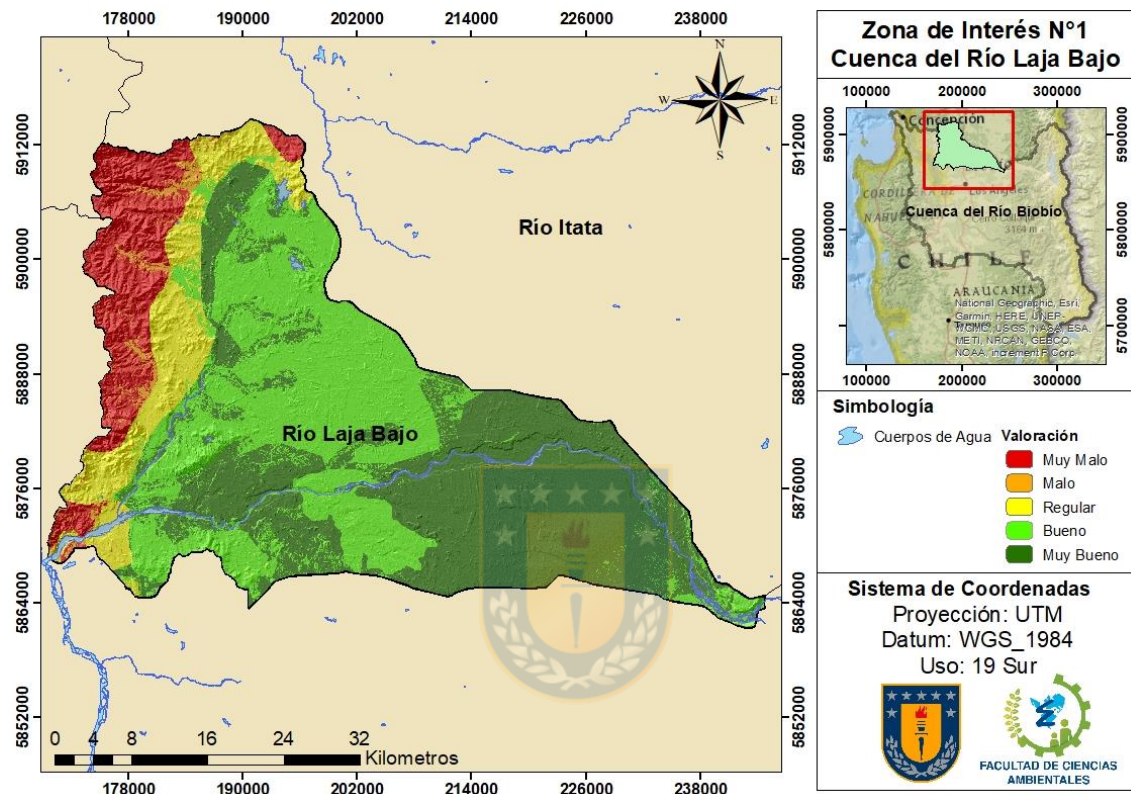
En el sector agrícola puede ser una buena opción para mitigar los impactos que ha producido el déficit de precipitaciones y la sequía, que ha afectado las fuentes de agua para el riego, como lo son los cauces superficiales y las aguas subterráneas.

En cuanto a la explotación de los recursos hídricos subterráneos puede ser una gran alternativa de mitigación o reparación según corresponda, para acuíferos

sobreexplotados, con problemas de contaminación como intrusión salina y para reparación o mantención de ecosistemas dependientes de ellos como humedales.

## 4.6 Zonas de interés específicas

### 4.6.1 Área de interés 1



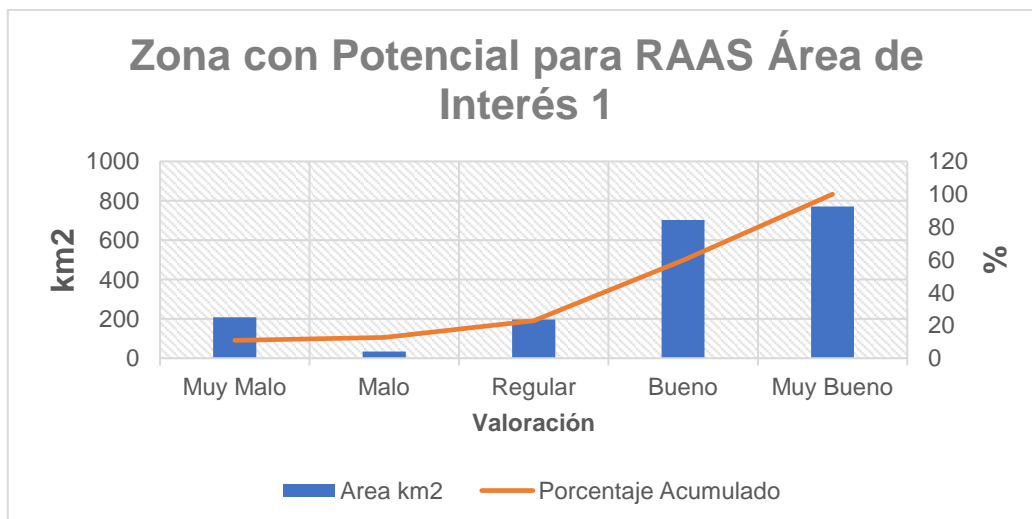
**Figura 11:** Mapa de zonas favorables para la subcuenca del río Laja Bajo.

**Fuente:** Elaboración propia.

La primera zona de interés seleccionada es una de las dos subcuencas del río Laja, específicamente la ubicada en el valle central, llamada cuenca del río Laja Bajo, la cual posee una superficie de 1917 km<sup>2</sup>, además, cuenta con cuerpos de agua superficiales de importancia como las lagunas Los Litres y Los Caulles.

En esta subcuenca está definido un sector hidrogeológico de aprovechamiento común SHAC, es decir, un acuífero que gracias a sus características permite una delimitación de este y una gestión individual de sus aguas, (DGA, 2014).





**Figura 12:** Superficies de la cuenca con distintas aptitudes para RAAS.

**Fuente:** Elaboración Propia.

Según los resultados obtenidos, las zonas pertenecientes a la SHAC del río Laja Bajo están clasificadas en un 40,33% de su área como muy buena para la RAAS, un 36,76% como buena, un 10,27% como regular, un 1,76% como mala y un 10,88% de superficies clasificadas como muy mala para la recarga.

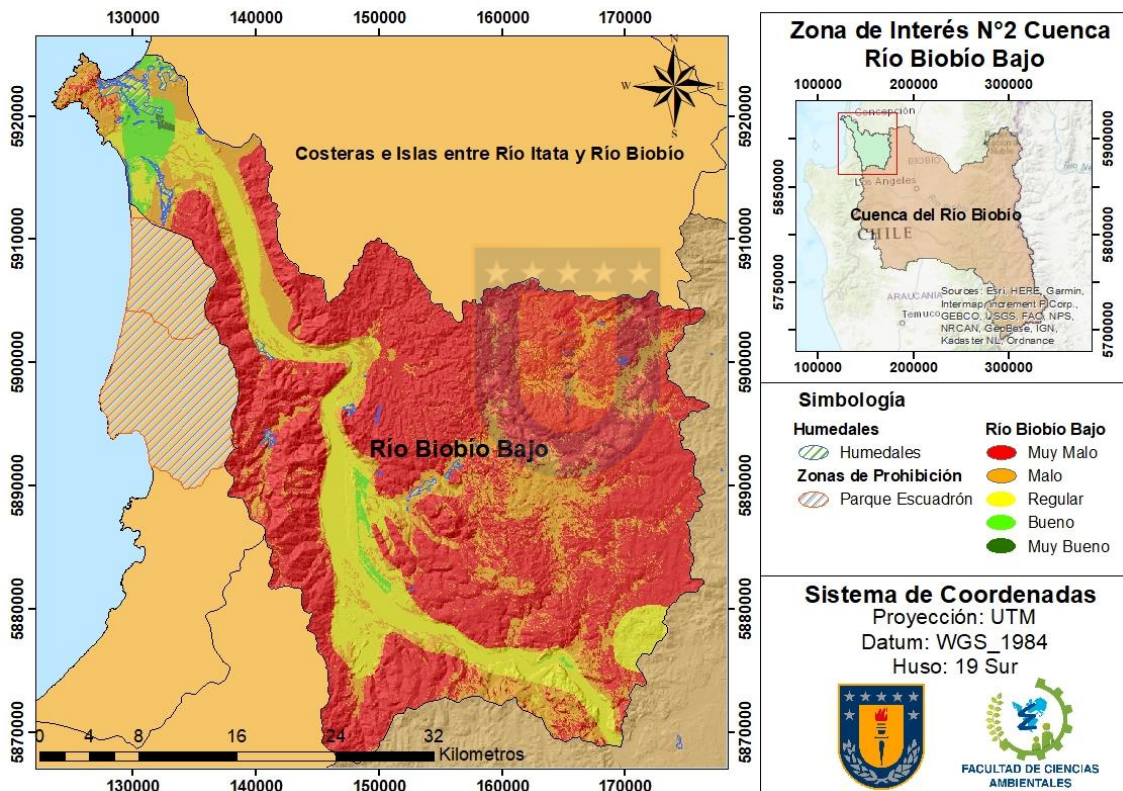
La cuenca del Laja en su conjunto ha experimentado problemas relacionados al agua, la laguna del Laja la cual se considera la unidad hidrológica más importante de esta cuenca en su momento llegó a tener solo el 10% de su capacidad, por su parte la subcuenca del río Laja Bajo vio afectada su mayor atracción turística los Saltos del Laja, debido a la escasez de agua para mantener la belleza escénica de las cascadas. Específicamente en cuanto a las fuentes de aguas subterráneas, el estado de la SHAC del río Laja Bajo ha sido preocupante debido a la inminente sobreexplotación de sus recursos subterráneos, según datos del catastro público de aguas (CPA), en esta subcuenca para 2018 ya se habían entregado derechos de agua equivalentes a un 95% de la capacidad de recarga natural del acuífero, alcanzando el límite del volumen sostenible de explotación planteado por la DGA, donde los DAA otorgados no deben superar la recarga natural de los acuíferos. En la cuenca el principal uso de los DAA subterráneos es para el riego, uso doméstico/saneamiento y uso industrial, más una gran cantidad de la que no se tiene información.

**Tabla N°17:** Balances sobre el estado de explotación de las aguas subterráneas en el SHAC del río Laja Bajo para 2018.

DAA subterráneos del SHAC del río Laja Bajo otorgados		DAA subterráneos en trámite		Recarga estimada del acuífero	Caudal disponible		Sobreexplotación potencial	
N.º	l/s	N.º	l/s	l/s	l/s	%	l/s	%
417	2584	84	1313	2726	142	5	1171	43

**Fuente:** Elaboración propia en base a datos de la sectorización hidrogeológica del acuífero del río Laja Bajo (DGA, 2018).

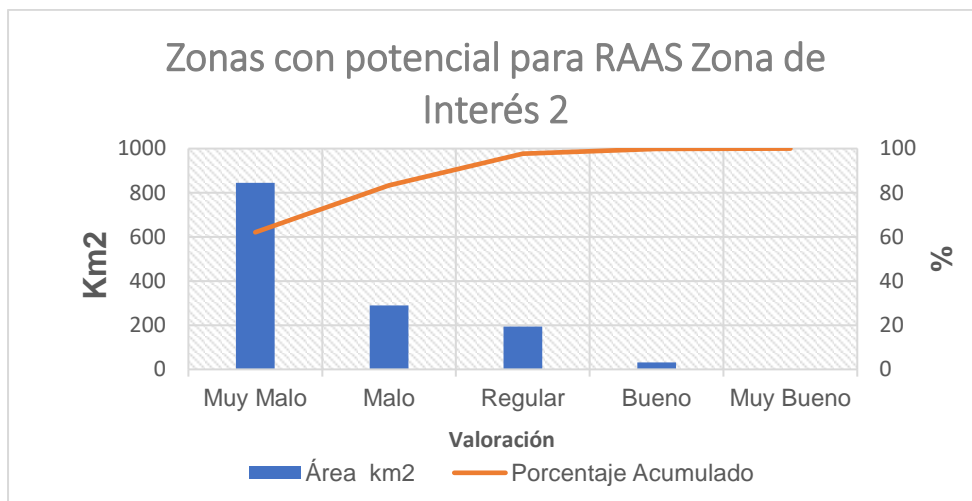
#### 4.6.2 Área de interés 2



**Figura 13:** Mapa de zonas favorables para la subcuenca del río Biobío Bajo.

**Fuente:** Elaboración propia.

La segunda zona de interés definida se encuentra dentro de la subcuenca río Biobío Bajo, esta cuenca posee una extensión de 13666km<sup>2</sup> y abarca desde la cordillera de la costa hasta la desembocadura del río Biobío en el mar.



**Figura 14:** Superficies de la cuenca con distintas aptitudes para RAAS.

Fuente: Elaboración Propia.

Según el resultado del mapa de idoneidad para RAAS esta cuenca en su mayoría posee áreas malas o muy malas para la recarga un 21,25% y 62,09% respectivamente, las zonas regulares ocupan 14,27% de la cuenca y las zonas buenas y muy buenas solo un 2,31% y 0,08% respectivamente, sin embargo, este pequeño porcentaje está ubicado en una zona vital importancia dentro de la cuenca.

El área de mayor interés dentro la SHAC del río Biobío Bajo se encuentra cerca de la desembocadura del río Biobío y se le consideró de importancia debido a la presencia de un acuífero costero y humedales como Lengua y Los Batros los cuales son parte de santuarios de la naturaleza. Al interceptar los humedales con el acuífero y las zonas que se declararon como buenas o muy buenas, se encontró que todos los humedales están ubicados sobre el acuífero y que todos en algún punto de su extensión se localizan sobre zonas buenas o muy buenas.

**Tabla N°18:** Humedales costeros que se encuentran en zonas calificadas como buenas o muy buenas en el presente estudio.

Humedales que interceptan zonas para RAAS
Sistema de humedal Huachipato
Huachipato 1
Huachipato 2
Sistema humedal los coipos
Humedal Lengua



Humedal Los Batros
Humedal Playa Costa sur

**Fuente:** Extraído de bibliografía (inventario de humedales 2020, IDE MINAGRI).

Otro punto de interés para el análisis se encuentra en el sector sur del acuífero costero específicamente entre el límite de la SACH del Bío-Bío Bajo y la cuenca llamada Costeras e Islas entre ríos Bío-Bío y Carampangue, debido a que en este límite comienza la zona de prohibición para nuevas explotaciones de aguas subterráneas en los SHAC Coronel norte y Coronel sur, que a pesar de que no encontrarse en la cuenca comparten la misma unidad acuífera por lo que un proyecto de RAAS en la cuenca también podría afectar a este sector.

Los SHAC Coronel Norte y Sur fueron declarados zonas de prohibición para nuevas explotaciones de aguas subterráneas a causa de la sobreexplotación de los recursos del acuífero en 2018. En esta zona existe una gran cantidad de usuarios de aguas subterráneas y considerando los usuarios con derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas formales, en las comunas de San Pedro de la Paz y Coronel, se cuentan 147 captaciones, de las cuales 139 se encuentran en el sector costero.

**Tabla N°19:** Balances de las extracciones y recarga de los acuíferos Coronel Norte y Sur.

Acuífero	Recarga natural estimada	Demanda comprometida a 2018 m <sup>3</sup> /año	Recarga natural + DAAS provisionales	Sobreexplotación relacionada a la demanda comprometida	Sobreexplotación asociada a DAAS provisionales
Coronel norte	3185136	28732937	6370272	802%	50%
Coronel sur	6906384	47564974	13812768	647%	50%

**Fuente:** Elaboración propia a partir de resolución N°23, 2018 DGA, MOP.

El problema de la sobreexplotación de este acuífero trajo consigo otra amenaza para las aguas subterráneas costeras, la intrusión salina. A diferencia de las aguas subterráneas continentales los acuíferos costeros se encuentran conectados hidráulicamente al mar, por lo que se produce una transición desde el agua dulce a salada, en condiciones naturales este equilibrio se mantiene solo con

pequeñas variaciones a causa de las altas y bajas de marea; pero las actividades antrópicas como las elevadas tasas de extracción de aguas subterráneas conducen a una disminución en las cargas hidráulicas, provocando un desbalance y permitiendo el ingreso de agua salina hacia el interior del acuífero, la que gradualmente va desplazando al agua dulce hasta llegar al nivel freático.

La actualización del estudio hidrogeológico Parque Escuadrón calculó las profundidades de la interfaz de agua dulce-salada para varias extracciones de aguas subterráneas, además, estimó los caudales críticos a partir de los cuales comenzaría a producirse el fenómeno de intrusión salina, encontrando 3 pozos en los que se supera ampliamente el caudal crítico determinado.

**Tabla N°20:** Caudales críticos de extracción (l/s) de intrusión salina para la comuna de San Pedro de la Paz.

Comuna	Prof. interfaz (m)	Prof. Pozo (m)	Q máx. (l/s)	Q DAAS(l/s)
San pedro	50	26	19	40
San pedro	54	28	21	40
San pedro	60	20	149	5
San pedro	60	20	149	5
San pedro	60	6	272	3
San pedro	54	9	63	1
San pedro	58	36	6	25

**Fuente:** Extraído de bibliografía (Actualización Estudio Hidrogeológico Parque Escuadrón).

## 5. DISCUSIÓN

Los resultados de la evaluación de zonas favorables mostraron que la implementación de obras RAAS se encuentra bastante limitada en la cuenca del río Biobío, tanto en área como en el tipo de obra. Si bien la clasificación del mapa de idoneidad va de menos apta a más apta, en las zonas malas o muy malas que conforman más de la mitad de la superficie de la cuenca, si el análisis se focaliza en algunos criterios específicos, el resultado es que no se pueden aplicar obras

RAAS de ningún tipo, ya sea por las condiciones adversas o por la falta de información en criterios cruciales. Algunos de estos criterios también limitan el tipo de obra RAAS que se puede construir, por ejemplo, en el criterio de profundidad la mayoría del área con información evidenció niveles freáticos cercanos a la superficie entre 5m y 25m, lo que restringe los métodos de recarga viables solo a los del tipo superficial, además, otro gran porcentaje de superficie se encuentra entre los 0m y 10 m lo que implica que los volúmenes de recarga tampoco pueden ser muy grandes y la existencia de riesgos, asociados a la capacidad de responder ante eventos extremos o los efectos que puede provocar una subida de nivel freático en pozos domésticos, los que pueden ser adversos. Estos resultados no empañan los beneficios que puede tener una obra RAAS bien desarrollada, pero si, aclaran que la RAAS no es una herramienta fácil de implementar y que necesita de información previa, de herramientas de gestión temprana como lo son los mapas de idoneidad y que son los sistemas naturales los que dictan que es posible de hacer y qué no.

En la etapa de análisis bibliográfico, se planteó un tema de discusión referido al origen geográfico de los estudios utilizados, lugares que en su mayoría resultaron ser áridos y semiáridos con una disponibilidad limitada de fuentes de agua para la recarga, realidades opuestas al área de estudio en donde el problema principal no es la escasez de agua, si no la sobreexplotación de los recursos hídricos subterráneos. Las distintas condiciones de base entre estas zonas, pueden ser una variable importante para tener en cuenta al momento de elaborar futuros estudios, ya que, por ejemplo, estas pueden provocar variaciones importantes en la elección y valoración de los criterios por parte de los expertos. El presente estudio solo contó con las opiniones extraídas de la bibliografía, por lo que queda abierta la interrogante de cuanto pudo haber cambiado la valoración de los criterios de haber contado con el juicio de expertos locales.

En cuanto a los criterios seleccionados se encontró un grupo de criterios que se repiten en la mayoría de los estudios analizados densidad de drenaje, geología, geomorfología, lluvia, pendiente, suelo, uso de suelo, estos se podrían considerar la base para la mayoría de los estudios de idoneidad de RAAS, de dichos

criterios en la presente investigación la densidad de drenaje y geología se unieron en el criterio de importancia hidrogeológica, mientras que el criterio de lluvia no se usó, ya que no resultó relevante debido las características del área de estudio.

En relación con el valor de los criterios se obtuvieron resultados bastante variables, esto se atribuye al contexto local de los estudios y a la propia opinión subjetiva de los expertos. Como se mencionó antes este estudio contó solo con el análisis bibliográfico como opinión experta, por lo que, en caso de tener valoraciones dispares entre estudios no se pudo generar un consenso, además, los criterios o comparaciones que no se encontraban disponibles en estudios que usaron AHP se infirieron desde estudios con otras metodologías y bibliografía. A pesar de lo anterior se lograron valores aceptables para el proceso AHP, donde se evidenció claramente un grupo de criterios más importante que otro, los criterios de impacto hidrogeológico, profundidad y geomorfología tuvieron una influencia mucho mayor en el resultado final, es decir en el mapa de idoneidad.

La selección de zonas de interés para RAAS se llevó a cabo en base a las necesidades determinadas en la cuenca y a las propias ventajas que ofrece la RAAS. De manera general para toda la cuenca se determinó que la RAAS puede ser un aporte a la seguridad hídrica de las personas que dependen de fuentes de abastecimiento informales principalmente pozos y camiones aljibe; pero el mayor obstáculo en esta materia que impidió que se definieran zonas específicas fue la falta de información, se tienen antecedentes regionales y a nivel municipal sobre los gastos en servicios de camiones aljibe para una población estimada; pero no se tiene ninguna información de los sectores o domicilios donde las empresas de transporte de agua entregan sus servicios, ni tampoco de la fuente de agua previa que se disponía antes de depender de camiones aljibe, con esa información se podrían identificar zonas dentro del área de estudio donde un proyecto de RAAS, beneficiaría a la mayor cantidad de gente posible con una fuente de agua permanente y así brindar una solución definitiva y más económica a los municipios.

Las áreas específicas de interés se eligieron en base características locales y a la existencia de conflictos ambientales en dichas zonas, como la sobreexplotación del recurso hídrico, ecosistemas dependientes de aguas subterráneas degradados y contaminación de acuíferos. Para la zona de interés N°1 río Laja Bajo, se consideró a la RAAS como una gran alternativa para gestión de los recursos hídricos subterráneos, con el fin de evitar que la explotación llegue a niveles críticos donde se corra el riesgo que el acuífero sea declarado en restricción o prohibición. Además, la zona posee características relevantes incluso para la elección del tipo de obra RAAS. El valle central de la cuenca es un área agrícola, que gracias al riego produce una recarga constante en los acuíferos, además, estas zonas cuentan con una gran cantidad de canales de riego, los que pueden ser usados para conducir el agua a los acuíferos de la zona, por esta misma razón es que no se recomienda el revestimiento de canales de riego dado que perderían su capacidad de aportar a la recarga de aguas subterráneas.

En la zona N°2 río Biobío Bajo y el acuífero costero de la región del Biobío, se consideraron de interés para analizar la viabilidad de un proyecto RAAS, por distintos factores el primero de ellos es la existencia de humedales. Los humedales son ecosistemas que se encuentran bajo una constante amenaza por la acción antrópica, son utilizados para extracción de aguas subterráneas, drenados para explotación de turberas, entre otras actividades, en esos escenarios la RAAS puede afectar de manera positiva a los humedales, contribuyendo, por ejemplo, a mantener en acuíferos costeros la denominada barrera terminal, es decir, la conectividad hídrica del humedal con el mar, al mantener una dinámica estable entre el caudal de agua dulce y la intrusión salina. Ya se han llevado a cabo estudios para aplicar la RAAS como medida de restauración para humedales degradados (Escalante & Rodríguez, 2006; Fernández Escalante, 2005). Por otro lado, en cuanto a las zonas de prohibición SHAC Coronel Norte y Sur, la RAAS puede ser una muy buena alternativa de gestión para combatir el fenómeno de intrusión salina en todo el acuífero, tanto en el área de estudio como en sus zonas aledañas, también puede ser una buena medida de mitigación para los impactos adversos que la sobreexplotación ha causado en el acuífero.

## 6. CONCLUSIÓN

Las fuentes de información consultadas para elaborar el estudio, es decir, la cartografía, las coberturas digitales e información local sobre propiedades relevantes para el estudio, es un tema para mejorar a nivel nacional, ya que la información se encuentra muy dispersa, muchas de las capas definidas a rasgos generales, con bases de datos muy pobres para respaldarlas o simplemente la información no existía. La aplicación exitosa de la RAAS en todas sus fases (selección del sitio, investigación e implementación) depende de la calidad de la información disponible y a medida que la RAAS ha ido transformándose una medida sustentable se necesita más información sobre los procesos naturales de los acuíferos, para asegurar la protección de la salud y el medio ambiente. Es por esto, por lo que antes de entregar incentivos para el desarrollo de proyectos RAAS es necesario fortalecer las instituciones a cargo de la gestión de las aguas subterráneas, por ejemplo, implementando un modelo gestión de cuencas que se preocupe tanto de las aguas superficiales como de las subterráneas. Es absolutamente necesaria la creación una base de datos pública orientada a reunir información actualizada a través de una red de monitoreo de parámetros ambientales en los acuíferos. La actualización de la información de base es vital para obtener resultados de calidad en herramientas de gestión temprana como la evaluación de zonas favorables para RAAS y así obtener sus beneficios como reducir la incertidumbre en los proponentes de este tipo de proyectos, agilizar los procesos de revisión y aumentar la confianza de las comunidades en este tipo de proyectos.

El enfoque de la presente investigación es de carácter ambiental, por lo que considera la RAAS como una alternativa sustentable que puede ser un aporte a la solución de necesidades ambientales, sociales y económicas, sin embargo, la normativa nacional no se encuentra a la par con estos objetivos.

La gobernanza en esta materia se encuentra poco desarrollada y de manera unilateral enfocada al ámbito económico, por ejemplo, solo se le entrega la iniciativa de estos proyectos al sector privado, además, la legislación establece que la RAAS genera la posibilidad de entregar nuevos derechos de agua provisionales, esta medida por si sola produce que la RAAS no signifique ningún aporte

como medida de gestión. Por otro lado, están las exigencias que los solicitantes de obras de recarga artificial deben cumplir según el reglamento de explotación y exploración de aguas subterráneas, que consisten solo en presentar un informe técnico con las especificaciones solicitadas y dada la vulnerabilidad de las aguas subterráneas, los casos de sobreexplotación que se han estado produciendo los últimos años y que existe un Permiso Ambiental Sectorial de por medio, es necesario que estas obras pasen por un proceso de evaluación ambiental del SEA ya sea como DIA o EIA. Por último, se debería trabajar en la elaboración de unas directrices nacionales sobre RAAS basadas en estándares internacionales, con el fin de facilitar y agilizar los estudios previos que se requieren antes que se aprueben este tipo de proyectos y con el fin que también el estado use la recarga artificial de acuíferos como una solución a demandas sociales y protección del medio ambiente.

Asociado también a la gobernanza a nivel nacional es necesario replantearse el volumen sustentable de explotación de los acuíferos, principalmente porque la recarga natural es un valor variable, mientras que los derechos de agua no lo son, por lo que fácilmente se puede caer en un sobre otorgamiento de derechos de agua o en la sobreexplotación del acuífero, sumado a esto están los derechos de agua provisionales que se pueden entregar aún si se ha alcanzado el límite de explotación del acuífero y por último el hecho de que no se toman medidas de gestión mientras no haya afectación a derechos de terceros, lo que implica que la sobreexplotación puede continuar hasta que hayan impactos visibles, lo complejo de esta situación es que en muchas ocasiones cuando ya se ha alcanzado ese punto, el daño es irreversible.

En respuesta estas situaciones a nivel internacional ya existen países que han implementado medidas de gestión, Estados Unidos lo hizo a través de la Ley de gestión Sostenible de Aguas Subterráneas implementada en el estado de California en 2014. Dicha ley crea instituciones a las cuales encarga el rendimiento sostenible como su principal objetivo de gestión. El rendimiento sostenible ha sido definido por la legislación anterior tomando en cuenta las limitaciones físicas, sociales, económicas y ambientales de las aguas subterráneas para determinar que impactos son soportables, esto ha dado un margen flexible para actuar



a nivel local y ya se ha llevado a cabo en varias zonas de California, una de ellas corresponde al distrito de riego del sur de San Joaquín en el valle central de California (Miro & Famiglietti, 2019).

Como resumen final, la RAAS y los mapas de idoneidad pueden ser una herramienta de gestión eficiente para hacer un uso sustentable del recurso hídrico subterráneo; pero deben estar acompañadas por una base datos sólida, monitoreos actualizados y una gestión a nivel de cuenca que vele tanto por la integridad de los acuíferos como por los sistemas socioeconómicos y naturales asociados a ellos.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agarwal, E., Agarwal, R., Garg, R. D., & Garg, P. K. (2013). Delineation of groundwater potential zone: An AHP/ANP approach. *Journal of Earth System Science*, 122(3), 887–898. <https://doi.org/10.1007/s12040-013-0309-8>

Agarwal, R., & Garg, P. K. (2016). Remote Sensing and GIS Based Groundwater Potential & Recharge Zones Mapping Using Multi-Criteria Decision-Making Technique. *Water Resources Management*, 30(1), 243–260. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1159-8>

Arshad, A., Zhang, Z., Zhang, W., & Dilawar, A. (2020). Mapping favorable groundwater potential recharge zones using a GIS-based analytical hierarchical process and probability frequency ratio model: A case study from an agro-urban region of Pakistan. *Geoscience Frontiers*, 11(5), 1805–1819. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.12.013>

Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia. (2015). Informe a la Nación. La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro. *Informe a La Nación*, 26. [www.cr2.cl/megasequia](http://www.cr2.cl/megasequia)

Circular N°4 Dirección General de Aguas (DGA) (2016). *Instruye sobre la aplicabilidad del Permiso Ambiental Sectorial, PAS 158 del D.S. MMA N°40/2012, para ejecutar obras para la recarga artificial de acuíferos, y actualiza las instrucciones contenidas en las Minutas DCPRH N°23/2015 y DCPRH*



N°8/2016. Santiago de Chile 2016.

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)/Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), *Evaluaciones del desempeño ambiental: Chile 2016*, Santiago, 2016.

Das, B., & Pal, S. C. (2020). Assessment of groundwater recharge and its potential zone identification in groundwater-stressed Goghat-I block of Hugli District, West Bengal, India. *Environment, Development and Sustainability*, 22(6), 5905–5923. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00457-7>

Decreto N°203 Ministerio de Obras Públicas (MOP) (2013). *Aprueba Reglamento sobre normas de exploración y explotación de aguas subterráneas*. Santiago de Chile, mayo de 2013.

Dillon, P., Stuyfzand, P., Grischek, T., Lluria, M., Pyne, R. D. G., Jain, R. C., Bear, J., Schwarz, J., Wang, W., Fernández, E., Stefan, C., Pettenati, M., van der Gun, J., Sprenger, C., Massmann, G., Scanlon, B. R., Xanke, J., Jokela, P., Zheng, Y., ... Sapiano, M. (2019). Sixty years of global progress in managed aquifer recharge. *Hydrogeology Journal*, 27(1), 1–30. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1841-z>

Dillon, Peter, Page, D., Vanderzalm, J., Toze, S., Simmons, C., Hose, G., Martin, R., Johnston, K., Higginson, S., & Morris, R. (2020). Lessons from 10 years of experience with Australia's risk-based guidelines for managed aquifer recharge. *Water (Switzerland)*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/w12020537>

Dirección General de Aguas (DGA) (2016). *Atlas del agua Chile 2016*, Santiago de Chile 2016.

Fernández-Escalante, E., San Sebastián Sauto, J., Villanueva Lago, M., & Calero Gil, R. (2018). La recarga gestionada de los acuíferos como una técnica polivalente y efectiva de adaptación al cambio climático. *CONAMA 2018, January 2019*, 0–27.

Fuentes, I., & Vervoort, R. W. (2020). Site suitability and water availability for a managed aquifer recharge project in the Namoi basin, Australia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 27(December 2019), 100657. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100657>

Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático (IPPC)/Organización de Naciones Unidas (ONU) (2013). *Cambio Climático 2013 Bases Físicas, Resumen para Responsables de Políticas, Resumen Técnico y Preguntas Frecuentes*, disponible en: <https://www.un.org/es/sections/issues-depth/climate-change/index.html>

Hídrica consultores SPA/ dirección general de aguas (DGA) (2018). *Sectorización hidrogeológica del acuífero del río Laja, región del Bío-Bío*. Santiago de Chile, octubre 2018.

Kadhem, G. M., & Zubari, W. K. (2020). Identifying Optimal Locations for Artificial Groundwater Recharge by Rainfall in the Kingdom of Bahrain. *Earth Systems and Environment*, 4(3), 551–566. <https://doi.org/10.1007/s41748-020-00178-2>

Khan, A., Govil, H., Taloor, A. K., & Kumar, G. (2020). Identification of artificial groundwater recharge sites in parts of Yamuna River basin India based on Remote Sensing and Geographical Information System. *Groundwater for Sustainable Development*, 11(February), 100415. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100415>

Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7), 703–726. <https://doi.org/10.1080/13658810600661508>

Matas, A. (2018). *Diseño del formato de escalas tipo Likert: un estado de la cuestión Likert-Type Scale Format Design: State of Art. 20*.

Mendoza, A., & Daniel, C. S. (2019). *Aplicación del proceso de jerarquía analítica (AHP) para la toma de decisión con juicios de expertos Application of the Analytical Hierarchy Process (AHP) for decision-making with expert judgment*. 27, 348–360.

Ministerio de Agricultura (MINAGRI)/ Comisión Nacional de Riego (CNR) (2020). *Marco operativo para proyectos de recarga artificial en acuíferos*. Santiago de Chile, 2020.

Ministerio de Obras Públicas (MOP)/ Dirección General de Aguas (DGA)(2012).

*Estudio Hidrogeológico Cuenca del río Bío-Bío*, Santiago de Chile.

Ministerio de Obras Públicas (MOP)/ Dirección general de aguas (DGA) (2014). *Estimación preliminar de las recargas de agua subterránea y determinación de los sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común de las cuencas de las regiones del Maule, Biobío, la Araucanía, los ríos y los lagos*. Santiago de Chile, Julio de 2014.

Ministerio de Obras Públicas (MOP)/ Dirección General de Aguas (DGA)(2019). *Diagnóstico de la calidad de aguas subterráneas de las regiones de Ñuble y Bío-Bío*, Santiago de Chile.

Ministerio de Obras Públicas (MOP)/ Dirección General de Aguas (DGA) (30/04/2020). *Planilla Decretos de Escasez Hídrica 2008-2020*, disponible en: <https://dga.mop.gob.cl/administracionrecursoshidricos/decretosZonasEscasez/Paginas/default.aspx>

Miro, M. E., & Famiglietti, J. S. (2019). A framework for quantifying sustainable yield under California's Sustainable Groundwater Management Act (SGMA). *Sustainable Water Resources Management*, 5(3), 1165–1177. <https://doi.org/10.1007/s40899-018-0283-z>

Navane, V. S., & Sahoo, S. N. (2020). Identification of groundwater recharge sites in Latur district of Maharashtra in India based on remote sensing, GIS and multi criteria decision tools. *Water and Environment Journal*, 0, 1–16. <https://doi.org/10.1111/wej.12650>

Norouzi, H., & Shahmohammadi-Kalalagh, S. (2019). Locating groundwater artificial recharge sites using random forest: a case study of Shabestar region, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 78(13), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8381-2>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (2016). *Global Diagnostic on Groundwater Governance*, FAO, Rome. disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i5706e.pdf>

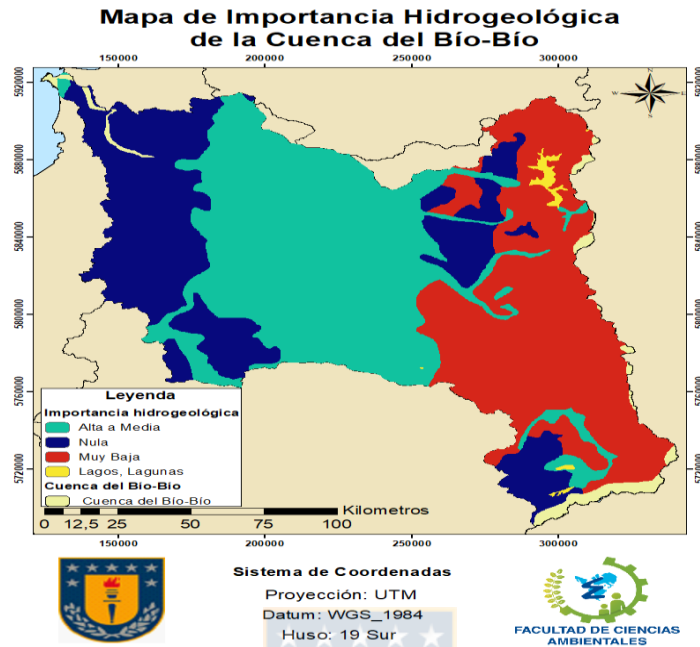
Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO)

- (2017). *EL ESTADO MUNDIAL DE LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACION*, FAO, Roma, disponible en: <http://www.fao.org/3/a-I7658s.pdf>
- Rahman, M. A., Rusteberg, B., Gogu, R. C., Lobo Ferreira, J. P., & Sauter, M. (2012). A new spatial multi-criteria decision support tool for site selection for implementation of managed aquifer recharge. *Journal of Environmental Management*, 99, 61–75. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.01.003>
- Rajasekhar, M., Gadhiraaju, S. R., Kadam, A., & Bhagat, V. (2020). Identification of groundwater recharge-based potential rainwater harvesting sites for sustainable development of a semiarid region of southern India using geospatial, AHP, and SCS-CN approach. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(2). <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4996-6>
- Resolución N°23, dirección general de aguas DGA (2018). *Declara zonas de prohibición para nuevas explotaciones de aguas subterráneas en los sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común denominados Coronel Norte y Coronel Sur, Región del Bío-Bío*. Santiago noviembre de 2018.
- RHYMA ingeniería spa/ dirección general de aguas 2016. *Actualización estudio hidrogeológico parque escuadrón*. Chile, 2016.
- Saaty, T. L. (1988). *WHAT IS THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS? Introduction In our everyday life, we must constantly make choices concerning what tasks to do or not to do, when to do them , and whether to do them at all . Many problems such as buying the most cost effective.*
- Sallwey, J., Bonilla Valverde, J. P., Vásquez López, F., Junghanns, R., & Stefan, C. (2019). Suitability maps for managed aquifer recharge: A review of multi-criteria decision analysis studies. *Environmental Reviews*, 27(2), 138–150. <https://doi.org/10.1139/er-2018-0069>
- Sandoval, J. A., & Tiburan, C. L. (2019). Identification of potential artificial groundwater recharge sites in Mount Makiling Forest Reserve, Philippines using GIS and Analytical Hierarchy Process. *Applied Geography*, 105(February), 73–85. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2019.01.010>
- Saravanan, S., Saranya, T., Jennifer, J. J., Singh, L., Selvaraj, A., & Abijith, D.

- (2020). Delineation of groundwater potential zone using analytical hierarchy process and GIS for Gundihalla watershed, Karnataka, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(15). <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05712-0>
- Servicio geológico de los Estados Unidos (USGS) (6 June 2018), *Where is Earth's Water?* disponible en: [https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/where-earths-water?qt-science\\_center\\_objects=0#qt-science\\_center\\_objects](https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/where-earths-water?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects)
- Siobhan Ryan and Ellis Nimick. (11 de agosto de 2019). *Multi-Criteria Decision Analysis and GIS*. Disponible en: <https://storymaps.arcgis.com/stories/b60b7399f6944bca86d1be6616c178cf>
- Souissi, D., Msaddek, M. H., Zouhri, L., Chenini, I., El May, M., & Dlala, M. (2018). Mapping groundwater recharge potential zones in arid region using GIS and Landsat approaches, southeast Tunisia. *Hydrological Sciences Journal*, 63(2), 251–268. <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1414383>
- Valdovinos, C., & Parra, O. (2006). La Cuenca del Río Biobío. Historia Natural de un Ecosistema de uso Múltiple. *Publicaciones Centro EULA*, 1–25. <http://www.eula.cl/images/stories/documentos/3.pdf>
- Zghibi Adel. (2020). *and Multi-Influencing Factors to Map Groundwater Recharge Zones in a Semi-Arid Mediterranean*.

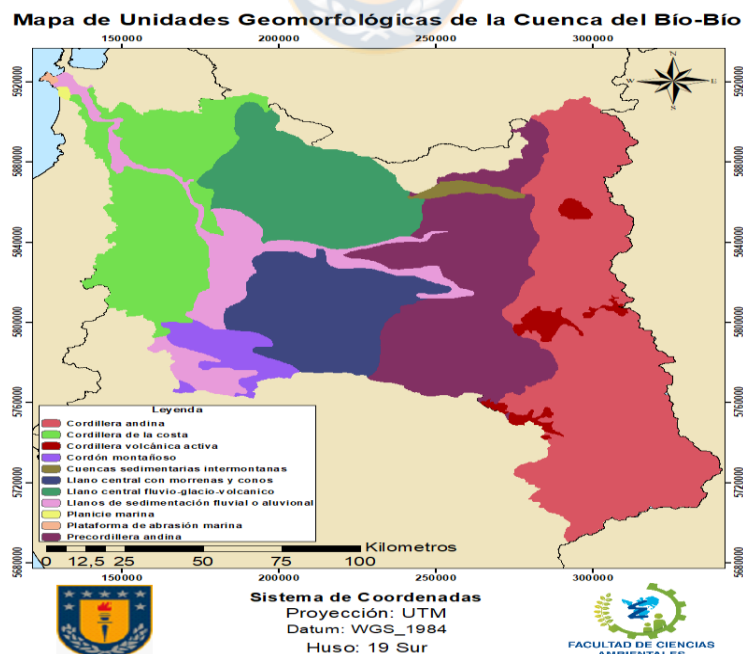
## 8. ANEXOS

### Anexo1: mapas de coberturas digitales



**Figura N°1:** Mapa de Importancia Hidrogeológica en la cuenca del Río Biobío.

**Fuente:** Elaboración propia a partir Mapa Hidrogeológico de Chile.

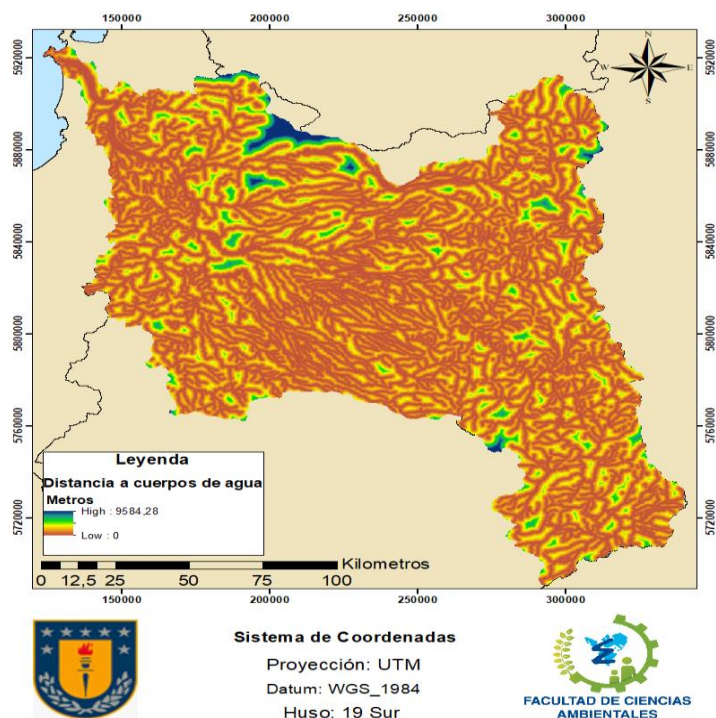


**Figura N°2:** Mapa de unidades Geomorfológicas en la cuenca del Río Biobío.

**Fuente:** Elaboración propia a partir de Capas regionales de Geomorfología (CEDEUS).



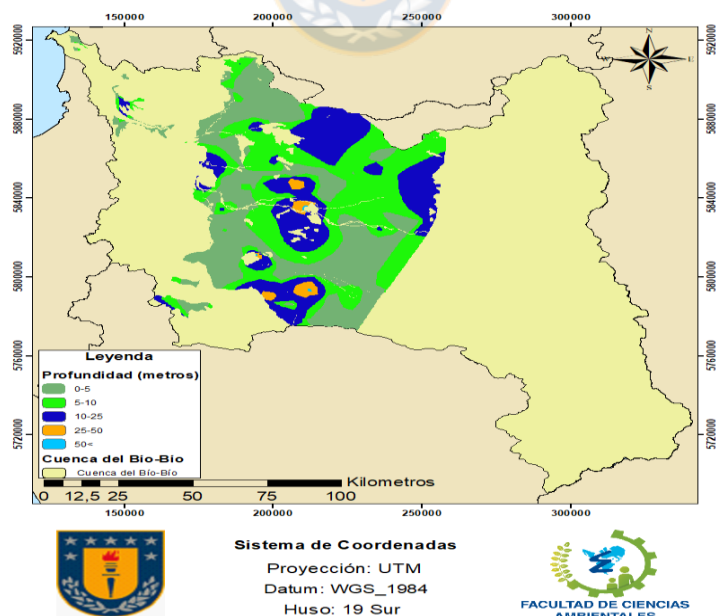
**Mapa de Distancias a Cuerpos de Agua de la Cuenca del Bio-Bío**



**Figura N°3:** Mapa de distancias a fuentes de agua en la cuenca del Río Biobío.

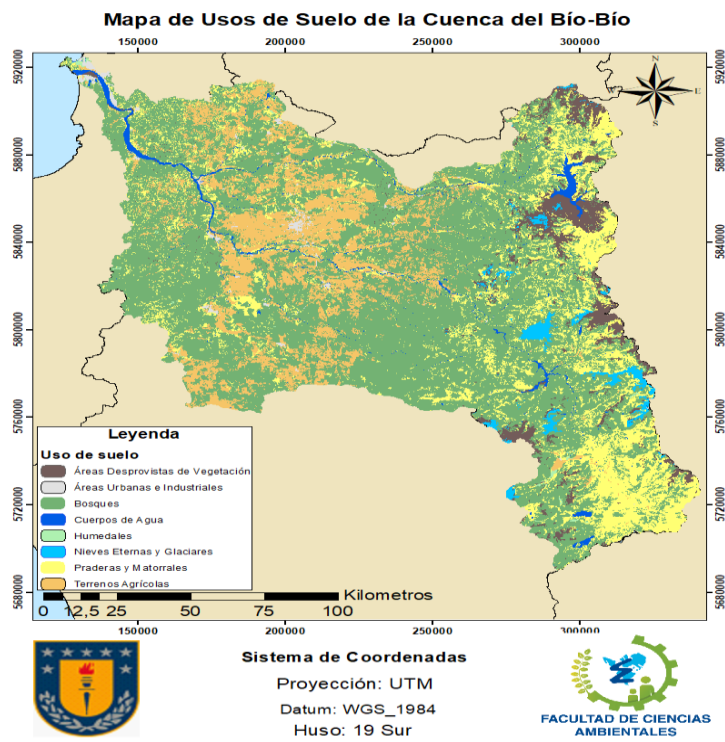
**Fuente:** Elaboración propia a partir de red hidrográfica de la cuenca del Río Biobío.

**Mapa de Profundidad de la Cuenca del Bio-Bío**

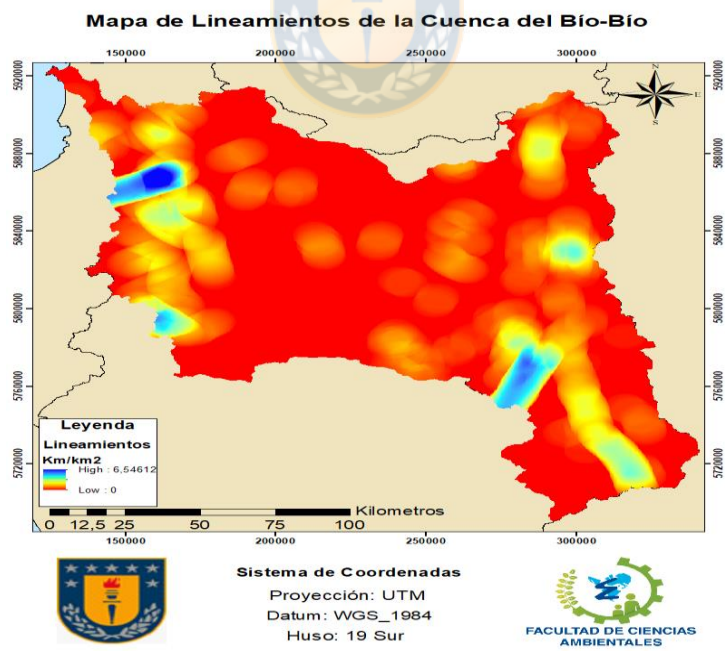


**Figura N°4:** Mapa de Profundidad del nivel freático en la cuenca del Río Biobío.

**Fuente:** Extraído de Estudio Hidrogeológico de la Cuenca del Biobío.

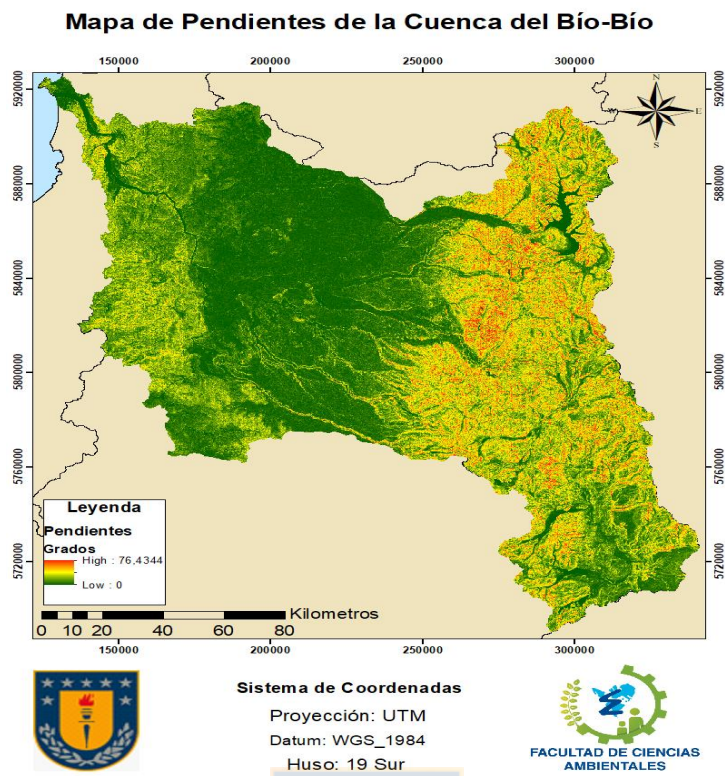


**Figura N°5:** Mapa de uso de suelo en la cuenca del Río Biobío.  
**Fuente:** Elaboración propia a partir de coberturas regionales de uso de suelo.



**Figura N°6:** Mapa de unidades de Densidad de lineamientos en la cuenca del Río Biobío.  
**Fuente:** Elaboración propia a partir de Estudio Hidrogeológico de la cuenca del Río Biobío.





**Figura N°7:** Mapa de Pendientes en la cuenca del Río Biobío.

**Fuente:** Elaboración propia a partir de DEM SRTM.