



Mejor Riego
para Chile

yo
cuido
el agua

“Marco operativo para proyectos de recarga artificial en acuíferos”

Informe final

“Marco operativo para proyectos de recarga artificial en acuíferos”

Informe final

Realizado por:



Chile

Santiago, 2020

Contenidos

Resumen ejecutivo.....	10
Capítulo I	12
1.- Introducción	12
1.1.- Antecedentes generales.....	12
1.2.- Alcance de este proyecto.....	14
1.2.1.- Relación con otras guías.....	14
1.2.2.- Cobertura de esta guía.....	15
1.3.- Antecedentes del marco legal en Chile	18
1.3.1.- Guías existentes en Chile.....	20
1.3.2.- Concurso nacional de obras de acumulación e infiltración.....	22
1.3.3.- Posicionamiento de esta guía con la normativa vigente	23
1.4.- Cómo usar esta Guía	24
2.- Definiciones y métodos de Recarga de Acuíferos Gestionada	24
2.1.- Tipos de acuíferos.....	24
2.2.- Definición, propósitos y elementos claves	26
2.3.- Descripción de métodos	28
2.3.1.- Uso de aguas tratadas en la recarga de acuíferos gestionada	31
2.3.2.- Métodos relevantes a esta guía.....	32
2.4.- Selección de método.....	35
2.5.- Peligros potenciales	37
2.5.1.- Peligros operacionales.....	37
2.5.2.- Peligros para la salud humana y el medioambiente	38
2.6.- Situaciones donde la recarga no es viable.....	40
Capítulo II	42
3.- Experiencia internacional.....	42
3.1.- Comparación de guías internacionales para la recarga de acuíferos	42
3.1.1.- Internacional.....	43
3.1.2.- Australia.....	44
3.1.3.- India	47
3.1.4.- California	49
3.1.5.- Europa.....	51
3.1.6.- Latinoamérica.....	52

3.1.7.- Otros países	52
3.2.- Recomendaciones para la guía en Chile.....	53
3.3.- Plataformas y herramientas de recarga de acuíferos	54
3.3.1.- SAGBI - Soil Agricultural Groundwater Banking Index.....	54
3.3.2.- Managed Aquifer Recharge Portal	55
3.3.3.- Database for GIS Based Suitability Mapping.....	55
3.3.4.- GIS Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA)	55
4.- Recarga de acuíferos en Chile	57
4.1.- Interacción con actores claves.....	57
4.1.1.- Entrevistas	58
4.2.- Descripción de proyectos de recarga de acuíferos en Chile.....	61
4.3.- Localización de oportunidades para la recarga de acuíferos.....	69
4.3.1.- Zonificación hidrogeológica de acuíferos	69
4.3.2.- Idoneidad de recarga de acuíferos	71
4.3.3.- Descripción de datos generados y recopilados.....	74
5.- Aspectos financieros y económicos de la recarga de acuíferos	76
5.1.- Análisis de costo-beneficio	78
5.2.- Costo nivelado del suministro de agua	81
Capítulo III.....	85
6.- Marco de desarrollo y gestión de proyectos	85
6.1- Evaluación de aplicabilidad	86
6.2.- Definición de escala	87
6.3.- Fase 1: Evaluación de viabilidad.....	88
6.3.1.- Selección del método de recarga	88
6.3.2.- Evaluación de viabilidad	88
6.3.3.- Evaluación económica de nivel de entrada.....	91
6.4.- Fase 2: Grado de dificultad y evaluación sanitaria.....	91
6.4.1.- Evaluación del grado de dificultad	91
6.4.2.- Encuesta sanitaria	97
6.4.3.- Evaluación económica detallada.....	100
6.5.- Fase 3: Diseño y operación	101
6.5.1.- Pruebas de recarga y esquemas piloto	101
6.5.2.- Diseño del esquema final.....	102
6.5.3.- Plan operacional preliminar	103
6.5.4.- Evaluación económica para un esquema a escala operacional	104
6.5.5.- Gestión de proyecto a escala operacional.....	104

6.6.- Uso de esta Guía como herramienta de evaluación.....	109
Capítulo IV	110
7.- Reflexiones y recomendaciones	110
7.1.- Guía de recarga de acuíferos gestionada.....	110
7.2.- Promover la implementación de la Recarga de Acuíferos Gestionada	110
7.2.1.- Incentivar proyectos que benefician a múltiples actores y fortalecen las Organizaciones de Usuarios de Aguas (OUAs)	111
7.2.2.- Fomentar el levantamiento, el intercambio y el análisis de información y datos relacionados con la RAG en Chile	111
7.2.3.- Generar confianza en las aplicaciones de proyectos RAG a través del desarrollo y difusión de proyectos exitosos.....	112
8.- Bibliografía	113
9.- Agradecimientos.....	120

Índice de tablas

Tabla 1. Comparación de la cobertura de esta Guía con las Guías de Agua Potable de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y con las Guías Australianas de RAG. Fuente: Elaboración propia.	17
Tabla 2. Componentes de un sistema de recarga de acuíferos gestionada. Fuente: modificada de NRMMC-EPHC-NHMRC (2009).	28
Tabla 3. Ejemplos de métodos de la recarga de acuíferos gestionada. Fuente: modificado de Page et al. (2018)there is a need to diversify future sources of supply and storage. However, to date, there has been a lag in the uptake of managed aquifer recharge (MAR.	29
Tabla 4. Criterios de selección del método de recarga. Fuente: Elaboración propia.....	36
Tabla 5. Resumen de peligros claves en la fuente del agua, agua subterránea y materiales de los acuíferos, para proyectos de recarga de acuíferos, con ejemplos de peligros específicos, riesgos y métodos preventivos. Fuente: modificado de NRMMC-EPHC-NHMRC (2009).....	39
Tabla 6. Experiencias de recarga de acuíferos en Chile (con suficiente información disponible). Fuente: Elaboración Propia según información entregada por cada proyecto.	66
Tabla 7. Métodos para cuantificar los beneficios de los proyectos RAG. Fuente: modificado de Maliva (2014).	79
Tabla 8. Costos de proyectos de recarga de acuíferos gestionada en Chile. Fuente: Elaboración propia según información entregada por cada proyecto.	84
Tabla 9. Evaluación de proyectos de primera escala. Fuente: Elaboración propia.....	87
Tabla 10. Evaluación de viabilidad. Fuente: Elaboración propia.....	88
Tabla 11. Evaluación de grado de dificultad. Fuente: Elaboración propia.....	95
Tabla 12. Encuesta sanitaria. Fuente: Elaboración propia, basado en OMS (2011).....	99
Tabla 13. Ejemplo de un plan de seguridad de agua (PSA) para la recarga de acuíferos gestionada. Fuente: Elaboración propia, basado en Denison et al., (2005) y OMS (2014).	106

Índice de figuras

Figura 1. Efecto potencial en la reducción de incertidumbres con la adopción de la Guía de RAG. Fuente: Elaboración propia.	13
Figura 2. Enfoque y alcance de esta Guía para fomentar la RAG en Chile para el sector agrícola. La Guía tiene un enfoque en proyectos de recarga intencionales y gestionados desde una escala doméstica hasta una escala comercial. Fuente: Elaboración propia.	16
Figura 3. Interacción entre las normas y regulación relevante a la recarga de acuíferos gestionada en Chile con esta Guía. Fuente: Elaboración propia.	23
Figura 4. Porosidad intergranular y porosidad por fisuración. Fuente: Sanchez (2011).	25
Figura 5. Ilustración de un acuífero no confinado. Fuente: Sánchez (2011).	25
Figura 6. Ilustración de un acuífero confinado. Fuente: Sánchez (2011).	26
Figura 7. Ilustración de un acuífero semiconfinado. Fuente: Sánchez (2011).	26
Figura 8. Ejemplo de la recarga de acuíferos gestionada con piscinas de infiltración para el sector agrícola, destacando los seis componentes clave del sistema. Fuente: Elaboración propia.	27
Figura 9. Marco de gestión de calidad del agua Fuente: NRMCC-EPHC-NHMRC (2009).	46
Figura 10. Diagrama de los pasos incluidos en la aplicación de guías Indias para la RAG, incluyendo implementación de plan de seguridad de agua. Fuente: Dillon et al. (2014).	48
Figura 11. Proyectos de recarga de acuíferos reportados en Chile. Fuente: Elaboración propia.	65
Figura 12. Zonificación hidrogeológica de la región de Atacama. Fuente: Elaboración propia, con datos de la DGA (1989).	70
Figura 13. Idoneidad de sitios para recarga de acuíferos con un criterio de priorización en la región de Atacama. Fuente: Elaboración Propia, con datos de la CNR (2013b) y la DGA (varios).	73
Figura 14. Flujo de trabajo de desarrollo de proyectos para la aplicación de esta Guía. Fuente: Elaboración propia.	85
Figura 15. Infiltrómetro de Doble Anillo. Fuente: ©UDSuelos-Universitat Politècnica de València (2010).	93
Figura 16. Permeámetro de Guelph. Fuente: Macías, et al. (2018).	93
Figura 17. Ejemplo de funcionamiento de un Slug Test. Fuente: Universidad de Chile (2011).	95



**Mejor Riego
para Chile**

yo
cuido
el agua

Resumen ejecutivo

Los desafíos que existen en Chile relacionados con el agua han impulsado la búsqueda de nuevas formas de gestionar el recurso hídrico con el fin de proporcionar seguridad hídrica a la sociedad. Por este motivo, la **Recarga de Acuíferos Gestionada (RAG)** comenzó a ser explorada como una alternativa que podría complementar las gestiones que actualmente se realizan en las distintas regiones del país. Desde el año 2012 se puede apreciar un aumento de interés en el tema, especialmente por parte de algunas autoridades públicas, las cuales han realizado una serie de estudios piloto con el objetivo de adquirir experiencia en la RAG, conocer los costos de las obras asociadas a distintas alternativas y entender sus principales problemas técnicos, administrativos y de gobernanza. En efecto, existe una variedad de estudios y experiencias a diferentes escalas y en distintas ubicaciones en Chile.

Sin embargo, el avance de la RAG a nivel nacional no se ve favorecida por el marco normativo que regula la gestión del recurso hídrico en el país, principalmente debido a que no aborda la temática directamente, generando incertidumbre a los potenciales interesados en implementar un proyecto RAG. La ausencia de un marco operativo orientado al fomento de nuevos proyectos RAG en Chile tampoco fomenta su desarrollo.

Con el fin de abordar estas carencias, la Comisión Nacional de Riego impulsó el presente estudio, denominado “Marco operativo para proyectos de recarga artificial en acuíferos”, el cual es una guía orientada a los usuarios de agua y las Organizaciones de Usuarios de Agua (OUA) para el desarrollo de proyectos RAG en Chile, principalmente en el contexto del sector agrícola. La adopción de una Guía metodológica permite conocer las distintas técnicas de RAG y los requerimientos técnicos, económicos y administrativos para implementar un proyecto de este tipo. De este modo, se espera que la aplicación de esta Guía acelere el progreso de los proyectos de bajo riesgo, reduzca la incertidumbre y el estancamiento de los demás proyectos, y permita la exitosa materialización de proyectos de diferentes escalas, evitando experiencias futuras poco satisfactorias.

Es importante resaltar que el alcance de este trabajo se centra en las aplicaciones de RAG sujetas a las siguientes condiciones:

- disponer de Derechos de Aprovechamiento de Aguas (DAA) superficiales posibles de infiltrar;
- la fuente de agua se restringe a agua superficial sin mayor intervención previa, es decir, agua de lluvia o de ríos;
- los acuíferos objetivo son no confinados o libres y no saturados; y
- el uso final del agua recuperada se restringe para el uso de riego agrícola.

Este documento describe los principales métodos de RAG utilizados a nivel mundial y sus características, incluyendo consideraciones respecto a los riesgos operacionales, ambientales y sociales vinculados a la utilización del agua superficial en la RAG. A su vez, se presenta una revisión de los enfoques regulatorios y las guías utilizadas internacionalmente en proyectos RAG, destacando principalmente la experiencia de Australia, India, California y Europa. Se destaca el enfoque de riesgo adoptado por Australia, que permite evaluar proyectos RAG orientados a distintos sectores, y donde la evaluación de la calidad del agua superficial y subterránea es fundamental. Es importante que la guía garantice agua segura y apropiada para ser utilizada, mediante la gestión de riesgos para las operaciones, la salud humana y el medioambiente.

Este documento comprende un análisis del contexto local de RAG en Chile abordando el marco legal existente y haciendo una revisión detallada de los distintos proyectos y pilotos que se han implementado y que cuentan con información disponible. Además, describe las zonas hidrogeológicas presentes en cuatro regiones de interés y realiza una evaluación preliminar de idoneidad de sitios a partir de la información disponible, mediante la incorporación de criterios de priorización en la ejecución de proyectos RAG. Adicionalmente, se documentan los

principales aspectos económicos y financieros a tener en consideración y se presenta una comparación de los costos de los proyectos RAG ejecutados en Chile.

La Guía está elaborada con un enfoque de desarrollo por fases, lo que tiene dos principales ventajas:

- i) inicialmente se requiere un bajo nivel de esfuerzo, inversión y complejidad, el que aumenta gradualmente a medida que el proyecto avanza por las fases de desarrollo; y
- ii) los riesgos financieros se minimizan al brindar una oportunidad más temprana de detener los proyectos que se revelan como no viables.

La Guía proporciona una secuencia sencilla para apoyar al usuario en el desarrollo de un proyecto RAG. En primer lugar, se evalúa si la guía es aplicable al tipo de proyecto que se está considerando. La Guía no aplica cuando el proyecto es considerado de alto riesgo y no otorga la seguridad requerida para la salud humana y/o el medio ambiente. Si se considera que la Guía es aplicable al proyecto, se procede a la definición de la escala. Esta definición ayuda a entender el nivel de orientación requerida para el desarrollo del proyecto. Los proyectos de primera escala son aquellos que son más sencillos (técnica y económicamente) o son de menor riesgo y solo requieren de una orientación menor por parte de la Guía. Los proyectos de segunda escala son aquellos que requieren de una mayor orientación y por ende se recomienda seguir las siguientes fases de desarrollo:

1. evaluación de la viabilidad del proyecto;
2. evaluación del grado de dificultad del proyecto, incluida una encuesta sanitaria; y
3. el diseño y operación del proyecto, incluida un piloto o al menos pruebas de recarga.

Durante todas las fases (1, 2 y 3) se recomienda la preparación de evaluaciones económicas para demostrar el valor del proyecto. Esto permite al ejecutor y/o a la agencia de financiación tomar decisiones y priorizar proyectos potenciales para su desarrollo. Para los proyectos de la primera y la segunda escala se han proporcionado fichas descriptivas para diferentes métodos de recarga que se consideran relevantes para el sector agrícola.

Este proyecto involucró una estrecha interacción con los actores relevantes en el entorno de la RAG en Chile, lo que complementa los resultados de la revisión de literatura nacional e internacional. Dicha interacción con los actores consistió en entrevistas, talleres y reuniones a lo largo del estudio. Su objetivo principal fue incorporar el valioso conocimiento local y experiencia de los actores relevantes en la elaboración de la Guía. La incorporación de los comentarios, dudas e incertidumbres de los actores permitió la adaptación de la Guía a las necesidades y requisitos locales.

Finalmente, el documento presenta algunas reflexiones y recomendaciones levantadas con respecto a la adopción de esta Guía, además de la promoción de la RAG en general como herramienta de gestión de recursos hídricos. Estas últimas enfatizan lo siguiente:

- 1) incentivar proyectos que beneficien a múltiples actores y fortalecen las Organizaciones de Usuarios de Aguas (OUAs);
- 2) fomentar el levantamiento, el intercambio y el análisis de información y datos relacionados con RAG en Chile; y
- 3) generar confianza en las aplicaciones de RAG a través del desarrollo y difusión de proyectos piloto exitosos.

Capítulo I

1.- Introducción

1.1.- Antecedentes generales

Cada vez con mayor frecuencia, se hace latente en Chile el problema de la escasez hídrica, ello debido al sostenido aumento de la demanda y la disminución de la oferta del recurso hídrico, la insostenible extracción subterránea, su distribución desequilibrada y excesiva contaminación de esta. Dicha escasez, obliga a adoptar algún paradigma emergente de la gestión sustentable de recursos hídricos. Una opción y componente histórico en la gestión de los recursos hídricos es el almacenaje de agua como un medio para asegurar su disponibilidad en el largo plazo. Los embalses han sido la respuesta tradicional como método para almacenar, porque permiten un llenado y liberación de agua de manera rápida, proporcionan un potencial de almacenaje considerable y son relativamente fáciles de administrar y monitorear. No obstante, los altos costos financieros, sociales y medioambientales de los embalses, junto con su vulnerabilidad ante la contaminación, las altas tasas de evaporación y la menor disponibilidad de terrenos, han empujado las investigaciones hacia métodos de almacenaje alternativos, tales como la **Recarga de Acuíferos Gestionada (RAG)** (Managed Aquifer Recharge, o MAR en inglés).

RAG es un término general que designa el conjunto de métodos utilizados para recargar agua a los acuíferos de manera intencional para su recuperación y uso posterior o para la obtención de un beneficio ambiental (Dillon, 2005). Anteriormente conocido como recarga artificial de acuíferos, hoy se incorpora el concepto de **gestión** como un componente clave a su desarrollo. El principal beneficio de la RAG es que los acuíferos ofrecen capacidades potenciales de almacenaje con magnitudes similares a embalses, pero con una menor inversión de capital y menores impactos sociales y medioambientales. Sin embargo, cada esquema RAG difiere en los beneficios que puede entregar y es posible que no siempre opere como se espera, por ejemplo, potenciales cambios en la calidad del agua durante el periodo de almacenaje, debido a las interacciones entre el material del acuífero, el agua subterránea nativa y el agua de recarga, puede generar riesgos considerables para la operación segura de los esquemas RAG. A menudo, estos riesgos son específicos a cada sitio y es difícil cuantificar su magnitud a menos que se realicen estudios detallados en cada sitio.

Desde el año 2012, se puede apreciar un aumento en el interés sobre la RAG, especialmente por parte del sector público, quienes han realizado una serie de estudios y pilotos con el objetivo de adquirir experiencia en la RAG, conocer los costos de las distintas obras y entender sus principales oportunidades y problemas técnicos, administrativos y de gobernanza. Sin embargo, generalmente, los esquemas piloto han tenido una corta duración y han encontrado problemas técnicos y financieros, por lo que, a pesar de todos los esfuerzos, a la fecha hay muy pocos esquemas formales de RAG a una escala operacional completa en Chile que funcionen de manera continua. El bajo nivel de adopción de RAG en Chile probablemente deriva de tres factores principales:

En primer lugar, la falta de esquemas exitosos de RAG formales y a gran escala o de experiencias piloto con largos periodos operacionales o aún en marcha en Chile, ha provocado que los riesgos sean percibidos en mayor cuantía que los beneficios potenciales de los esquemas RAG. Lo anterior trae como consecuencia, que este tipo de proyectos no sean apreciados como deseables. En contrapartida, los embalses han sido utilizados por décadas, su tecnología se entiende bien y, por lo general, las comunidades locales los han aceptado adecuadamente. Debido a que la RAG es una tecnología relativamente nueva, aún existe cierta desconfianza respecto a su utilización. No obstante, la opinión pública hacia una regulación adicional de caudales de agua en Chile, mediante la implementación de nuevos embalses, está comenzando a cambiar. Ahora las comunidades quieren mayores consideraciones respecto a los impactos medioambientales asociados a la instalación de infraestructura de gran tamaño, como también soluciones más económicas y sustentables, que en algunos casos significa no construir un nuevo embalse.

En segundo lugar, tal como sucede en varios países, la falta de respaldo legislativo y regulatorio es otra fuente de incertidumbre en la aplicación de la RAG. Existe un alto riesgo en la implementación de investigaciones, con

un costo económico potencialmente alto, cuando hay incertidumbre respecto a los estándares y procedimientos a cumplir y la estructura económica que permite determinar con confianza los costos del ciclo de vida y la viabilidad de los esquemas RAG a largo plazo.

En tercer lugar, las incertidumbres asociadas con limitaciones técnicas, particularmente obstrucciones de los acuíferos^a, el impacto potencial sobre terceros, como, por ejemplo, usuarios de aguas subterráneas cercanos, y la factibilidad de lograr volúmenes de recarga y recuperación adecuados, son riesgos que deben manejarse en forma sistémica. Del mismo modo, los riesgos tanto medioambientales como a la salud humana asociados con la RAG, así como con cualquier proyecto hídrico significativo, también deben ser abordados y manejados de manera apropiada.

Teniendo en cuenta estos factores de riesgo latente para la implementación de RAG, un primer paso clave para respaldar el desarrollo sostenible de las oportunidades para la RAG en Chile sería la reducción de incertidumbres que rodean su diseño y operación, particularmente con respecto a la formulación de un marco metodológico de evaluación y gestión de riesgos, en la forma de guías que ayuden a las partes interesadas y reguladores a gestionar los riesgos. Por este motivo, en 2019 la Comisión Nacional de Riego impulsó el presente estudio, denominado "Marco operativo para proyectos de recarga artificial en acuíferos", ejecutado por CSIRO, con apoyo de la Universidad de California Davis, con el fin de recopilar experiencias internacionales y nacionales, y adaptarlas al contexto local.

El objetivo general del presente estudio es establecer las bases técnicas y operativas y la confección de una Guía Metodológica orientada a los Usuarios(as) y Organización de Usuarios(as) del agua, para el desarrollo de proyectos RAG en Chile, a través del uso conjunto de las aguas superficiales y subterráneas, en el contexto de un proyecto de riego, basado en experiencias extranjeras.

La adopción de una guía metodológica permite conocer los distintos métodos de RAG y los requerimientos técnicos, económicos y administrativos para su implementación. El rol de la Guía para facilitar la implementación de nuevos proyectos se ilustra en la Figura 1. Se espera que la aplicación de esta Guía acelere el progreso de los proyectos de bajo riesgo, reduzca la incertidumbre y el estancamiento de los demás proyectos, y evite de forma eficaz y expedita la materialización de proyectos no adecuados, reduciendo experiencias futuras poco satisfactorias.

Rol de guías para la aprobación de proyectos de GRA

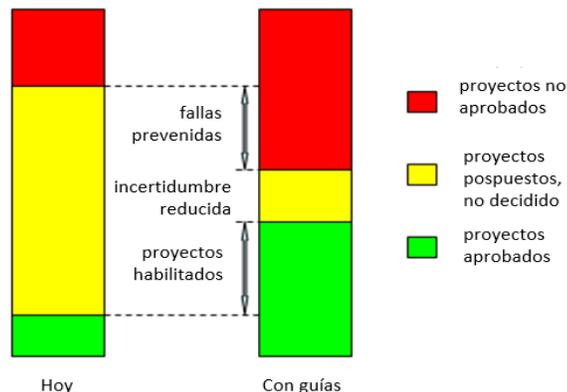


Figura 1. Efecto potencial en la reducción de incertidumbres con la adopción de la Guía de RAG. Fuente: Elaboración propia.

a.- La obstrucción puede ocurrir mecánicamente (partículas atrapadas en el suelo y la matriz del acuífero), biológicamente (crecimiento de biopelículas) y químicamente (reacción mineral ej. precipitación de hierro).

1.2.- Alcance de este proyecto

Este proyecto entrega una revisión de marcos de gestión internacional de riesgo aplicados a la RAG, a través de una revisión extensa de literatura a fin de levantar, comparar, contrastar y criticar la aplicabilidad de guías existentes de RAG, a nivel internacional, para el contexto de Chile. Al mismo tiempo, se entrega una revisión del estado del arte en la aplicación de RAG en Chile, incluido su contexto normativo existente, proyectos y pilotos realizados y su potencial desarrollo futuro. Tras considerar la experiencia internacional y nacional, se entrega un marco de desarrollo y gestión de proyectos RAG que forman las bases de la Guía. Por separado, se entrega un documento Guía Metodológica que recopila de manera muy resumida los aspectos más relevantes revisados en este documento, con un enfoque particular en su adopción por parte de los Usuarios(as) de Aguas y Organizaciones de Usuarios(as) de Aguas. Dicha Guía proporciona una herramienta amigable y accesible para acomodar diferentes niveles de experiencia y conocimiento en la RAG.

La Guía por sí sola no tiene carácter oficial y, por lo tanto, no exige el cumplimiento de ésta, su objeto es guiar al usuario. Puede ser útil para informar las consideraciones a nivel nacional y orientar sobre qué puede aplicarse a nivel local. Su objetivo es aumentar la confianza en proyectos RAG en Chile, específicamente en el sector agrícola, a través de una orientación técnica y con enfoque en garantizar la seguridad del agua potable para que ésta se considere parte integral de la planificación e implementación de una recarga adicional.

Debe enfatizarse que el alcance de este proyecto se centra en las aplicaciones de RAG limitadas a las siguientes condiciones:

- 💧 Disponer de Derechos de Aprovechamiento de Aguas (DAAs) superficiales posibles de infiltrar.
- 💧 La fuente de agua se restringe a agua superficial sin mayor intervención previa, es decir, agua de lluvia o de ríos.
- 💧 Los acuíferos objetivo son no confinados o libres y con zona no saturada.
- 💧 El uso final del agua recuperada se restringe al respaldo para la agricultura de riego.

1.2.1.- Relación con otras guías

Para la formulación de la presente Guía, se revisó diferentes enfoques a nivel internacional de guías relacionadas con la RAG, incluidas Australia, California, India, Europa y Latinoamérica, además del enfoque provisto por la Organización Mundial de Salud (OMS) (para más detalle sobre cada enfoque, ver la Sección 3.1). La implementación de esta Guía para la recarga de acuíferos es un paso hacia un suministro de agua más seguro y una mejor protección de las aguas subterráneas que la práctica actual. En esencia, este documento aplica elementos del enfoque de planificación de la seguridad del agua de la Organización Mundial de Salud (OMS) para proteger la calidad del agua potable (se encuentran más detalles en el Anexo 1.1). Además, se basa en gran medida en la etapa preliminar de la evaluación extraída de las Guías Australianas de RAG (NRMMC-EPHC-NHMRC, 2009) que forman parte de la Estrategia Nacional Australiana de Gestión de la Calidad del Agua (se encuentran algunos extractos y adaptaciones en el Anexo 1.2). Finalmente, incorpora un enfoque de estudio sanitario para identificar los peligros probables en la fuente de captación de agua de la cuenca.

Las Guías Australianas y de la OMS siguen los mismos principios en la gestión de riesgos para la salud pública para todos los tipos de usos del agua y tienen un enfoque similar en la gestión de los riesgos ambientales. Por lo tanto, requieren una adquisición sustancial de datos de calidad del agua para respaldar las evaluaciones cuantitativas de riesgos. Según la experiencia reportada en los talleres y entrevistas con usuarios, es poco probable que estos enfoques se adopten en Chile en el corto-mediano plazo, debido a la falta de disponibilidad de los datos necesarios para respaldar esas evaluaciones.

Los esfuerzos iniciales para aplicar las Guías Australianas de RAG a nivel internacional para evaluar el riesgo en

proyectos de recarga de acuíferos en Alemania, India, China, México, Sudáfrica, Costa Rica y Jordania por parte de hidrogeólogos con un profundo conocimiento de esos proyectos, encontraron que la primera parte de las Guías Australianas, consistente en una evaluación preliminar (nivel de entrada), fue útil y proporcionó una vía sistemática para identificar todos los problemas a abordar (Dillon et al., 2010). Sin embargo, se descubrió que la evaluación cuantitativa del riesgo necesitaba gran cantidad de datos y que los datos de calidad del agua necesarios para completar la evaluación a menudo no estaban disponibles, particularmente para los patógenos microbianos.

Por lo tanto, al desarrollar una guía para Chile, se decidió tempranamente adaptar la evaluación de nivel de entrada de Australia, que consiste en una evaluación de viabilidad y una evaluación de grado de dificultad del proyecto. Sin embargo, por sí solo, esto no examinó las potenciales causas de los problemas de calidad de la fuente de agua para la recarga de una manera que sugiriera medidas de protección. El enfoque de inspección sanitaria de la OMS es útil para identificar sistemáticamente los peligros potenciales y los eventos peligrosos y complementa el monitoreo de la calidad del agua para proteger la calidad del agua potable (OMS, 2012). Por lo tanto, el enfoque de la encuesta sanitaria de la OMS se incorporó a la evaluación de nivel de entrada de Australia para producir un plan de seguridad del agua (PSA) acorde con las guías de la OMS (2011, 2014) sobre el agua potable aplicadas a sistemas de pequeña escala (Denison et al. 2005; OMS, 2012). Las recomendaciones básicas para los parámetros de monitoreo de la calidad del agua se presentan en el Anexo 1.3.

En ausencia de un estudio de caso y datos de calidad del agua asociados, no se puede afirmar que el enfoque fue validado y que su aplicación garantizará la seguridad. Sin embargo, se puede afirmar que la aplicación de esta Guía, que requiere solo información básica que sea fácilmente observable, logrará que la recarga del acuífero sea más segura. El siguiente paso sería aplicar, probar y refinar esta Guía para la recarga de acuíferos en condiciones rurales y urbanas, para una gama más amplia de tipos de agua, tipos de acuíferos, métodos de recarga, usos finales del agua recargada y capacidades de las instituciones implementadoras. El progreso a través de las mejoras incrementales realizadas a lo largo del tiempo es coherente con los principios claves de la planificación de la seguridad del agua (OMS, 2012) y se aplica localmente y a nivel sistémico como lo recomienda Anderson et al., (2000).

Reconociendo esta realidad, esta Guía tiene por objeto proporcionar una vía de transición en la que la información básica fácilmente observable en un sitio de recarga de acuíferos existente o propuesto se utilice para mejorar la seguridad y desempeño de un proyecto. Sin datos, este enfoque no puede asegurar la protección efectiva de las aguas subterráneas. Sin embargo, el objetivo de esta Guía es que se tenga en cuenta y se inicie el proceso de evaluar calidad del agua como práctica estándar para los proyectos nuevos y existentes en Chile. También puede ser utilizada como una herramienta de selección para identificar sitios donde se requieren investigaciones más rigurosas. De este modo, se considera esta Guía una primera versión que debería ser actualizada una vez que existan más datos y conocimiento local proporcionado por nuevos proyectos de recarga e investigación adicional sobre los acuíferos.

1.2.2.- Cobertura de esta guía

Esta Guía es aplicable a proyectos de recarga que utilizan aguas de fuentes naturales en cuencas rurales y periurbanas (por ejemplo, agua desviada de los ríos, lluvia, escorrentía). Si bien podría aplicarse a otras fuentes como las aguas pluviales urbanas, los efluentes cloacales y los efluentes industriales, incluidas las aguas residuales de la industria agroalimentaria, es probable que éstas contengan cargas de contaminantes considerablemente más elevadas, por lo que se necesitaría una amplia recopilación de datos y una gestión más rigurosa para proporcionar una protección razonable de la calidad del agua para los usuarios de las aguas subterráneas y el medio ambiente. Se remite al lector a la guía de la OMS sobre reutilización del agua (OMS, 2017) y a las Directrices Australianas para el Reciclaje del Agua (NRMMC-EPHC-AHMC, 2006; NRMMC-EPHC-NHMRC, 2009) para obtener más información sobre la forma en que estos tipos de fuentes de agua pueden utilizarse de forma segura.

Esta Guía es aplicable a los acuíferos no confinados (ver Sección 2.1 para definiciones generales de tipos de

acuíferos). Es necesario seguir trabajando para su aplicación en acuíferos confinados y acuíferos utilizados como suministro de agua potable municipal. La razón de esto es que la recarga de agua que contiene oxígeno en aguas subterráneas confinadas que están agotadas en oxígeno poseen una alta probabilidad de que ocurra una oxidación de minerales reactivos y potencialmente libere metales en el agua subterránea en concentraciones que podrían en algunos casos exceder los valores de referencia para el agua potable.

La Figura 2 ilustra el alcance y enfoque de esta Guía de RAG para el sector agrícola.

Recarga de agua subterránea	No Gestionada			Gestionada			
	Descarga de aguas	Recarga incidental	Intencional pero no gestionada	RAG a escala doméstica	RAG a escala comunitaria	RAG a escala comercial	RAG a escala comercial con estricta regulación
Gestión de riesgos	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Cualitativo simplificado	Encuesta sanitaria, plan de seguridad del agua	Cuantitativo basado en el riesgo	Basado en riesgo y con criterios
Ejemplo	Pozos secos	Desmonte	Modificación del cauce	Infiltración de escorrentía en el techo	Piscinas de infiltración	Aguas pluviales comerciales ASR	Gran escala en acuífero de agua potable
Costo relativo / complejidad	N/a	N/a	N/a	Bajo	Bajo	Medio	Alto
Fuente de agua	N/a	N/a	Aguas naturales	Aguas naturales	Aguas naturales	Cualquier	Cualquier
Tipo de Acuífero	No Confinado	No Confinado	No Confinado	No Confinado	No Confinado	No Confinado/ confinado	No Confinado/ confinado
Uso finales adecuados	Desconocida	Desconocida	Desconocida	Solo agua no potable*	Solo agua no potable*	Cualquier	Cualquier

*a menos que sea tratada y potabilizada

Guías RAG Chile

riesgos no gestionados | complejidad, costo, confianza, flexibilidad, nivel de riesgo gestionado

Mayor complejidad y gestión →

Figura 2. Enfoque y alcance de esta Guía para fomentar la RAG en Chile para el sector agrícola. La Guía tiene un enfoque en proyectos de recarga intencionales y gestionados desde una escala doméstica hasta una escala comercial. Fuente: Elaboración propia.

Esta Guía cubre una gama limitada de tipos de fuentes de agua, sistemas de acuíferos y usos del agua (Tabla 1) debido principalmente a su enfoque para fomentar proyectos RAG en el sector agrícola y no en agua potable, por ejemplo. Por otra parte, existen limitaciones en términos de recopilación de datos que permitirían brindar asesoramiento confiable, particularmente sobre los riesgos microbianos para la salud pública y la liberación de metales tóxicos en acuíferos. Por lo tanto, este documento Guía pretende hacer que la recarga intencional actual sea más segura y no necesariamente 100% segura. Por otra parte, el establecimiento de proyectos de demostración de recarga con monitoreo creará confianza entre los entes reguladores, la comunidad y la industria antes de embarcarse en proyectos más desafiantes.

Tabla 1. Comparación de la cobertura de esta Guía con las Guías de Agua Potable de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y con las Guías Australianas de RAG. Fuente: Elaboración propia.

Cobertura	Esta Guía (CNR)	Guías de la OMS sobre agua potable	Guías Australianas de RAG
Tipo de Fuente de Agua			
Agua superficial rural sin mayor intervención *	✓	✓	✓
Aguas pluviales urbanas			✓
Aguas residuales tratadas			✓
Aguas desalinizadas			✓
Aguas residuales industriales			✓
Tipo de Acuífero			
No confinado	✓	✓	✓
Confinado		✓	✓
Condición del Agua Subterránea			
Agua subterránea no utilizada para beber	✓		✓
Agua subterránea utilizada para beber locamente	✓	✓	✓
Agua subterránea utilizada para el suministro público de agua potable.		✓	✓
El agua subterránea sostiene ecosistemas sensibles			✓
El agua subterránea es salobre ^a	✓		✓
El agua subterránea está contaminada			
Metodología			
Evaluación de cuenca		✓	✓
Evaluación de escritorio basada en datos disponibles, incluso si es limitada	✓	✓	✓
Evaluación de riesgos basada en investigaciones y datos de monitoreo.		✓	✓
Programas de monitoreo	✓	✓	✓
Manejo de obstrucciones	✓		✓
Recuperación en acuíferos salobres	✓		✓

a.- Agua salobre es aquella que tiene más sales disueltas que el agua dulce, pero menos que el agua de mar.

Cobertura	Esta Guía (CNR)	Guías de la OMS sobre agua potable	Guías Australianas de RAG
Reacciones biogeoquímicas en acuíferos.			✓
Costo y confianza			
Bajo costo y facilidad de implementación	✓	✓	
Mejora la protección de la salud	✓	✓	✓
Alta confianza en la protección de la salud**		✓	✓
Alta confianza en la protección del medio ambiente**			✓

* Agua lluvia y agua de ríos.

** La Guía tiene un enfoque en proyectos RAG del sector agrícola y por lo tanto no abordan estos aspectos en profundidad, es decir, no garantizan 100% confianza en la protección de la salud o medio ambiente, pero sí busca mejorar la protección actual de proyectos.

1.3.- Antecedentes del marco legal en Chile

En esta sección, se resume el marco legal entorno a la RAG en Chile. Por otra parte, se realiza una revisión de la guía metodológica desarrollada por la Dirección General de Aguas (DGA) para postular a permisos y evaluar proyectos RAG. Finalmente, se revisa el concurso público, en marco de la Ley de Fomento de Riego, que se abrió a principios de 2019 por parte de la CNR, el primero específicamente dirigido a proyectos RAG.

La RAG o la Recarga Artificial de Acuíferos^a, como es ampliamente conocido en Chile, está recogida en el ordenamiento jurídico chileno a través del Código de Aguas^{b,c}, que contempla la realización de obras RAG y regula la gestión de los derechos (artículos 66 y 67) y del Reglamento sobre Normas de Exploración y Explotación de aguas subterráneas (DGA, 2013), creado a través del Decreto Supremo DGA n°203 publicado en el Diario Oficial, donde los artículos 47 a 49 establecen el procedimiento administrativo y norman las iniciativas de proyectos de recarga artificial. Por otra parte, existen una serie de leyes y normas ambientales que son relevantes a considerar^{d,e,f}, a pesar de que no son específicas a la RAG. En el Anexo 1.4 se resume las diferentes leyes relevantes.

De acuerdo al Código de Aguas, las aguas consideradas factibles de ser utilizadas para la RAG en Chile son: a) aguas superficiales corrientes o detenidas; b) aguas subterráneas previamente extraídas del acuífero; c) aguas pluviales^g correspondientes al artículo 10 del Código de Aguas; y d) aguas tratadas, ya sea agua potable, aguas procedentes de una planta desalinizadora, aguas de plantas de tratamiento de aguas servidas o aguas procedentes de efluentes industriales (reguladas o no por el D.S. MINSEGPRES N°46/2002) (DGA, 2016b).

A pesar de lo anterior, la legislación actual en Chile respecto a la RAG tiene un carácter bastante general y confuso. Con el objetivo de abordar esta brecha en la normativa, en los últimos años, la DGA ha impulsado el desarrollo de algunos documentos y normativas circulares para guiar el proceso de presentación y análisis de

a.- De acuerdo a la "Guía metodológica para presentación de proyectos de recarga artificial" (DGA, 2016a), se entiende la recarga "artificial" de acuíferos como el procedimiento por el que se añade agua a un acuífero desde la superficie para incrementar intencionadamente la disponibilidad de los recursos hídricos subterráneos o para mejorar la calidad de estos. Puede realizarse por distintos métodos, ya sea favoreciendo la infiltración o por medio de la inyección.

b.- Código de Aguas: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=5605>

c.- D.S 203/2013 Reglamento sobre Normas de Exploración y Explotación de Aguas Subterráneas: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1060095>

d.- Ley 19.300 Sobre Bases Generales del Medio Ambiente (1994): <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=30667>

e.- DS.40/2012 Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1053563>

f.- DS. 46/2002 Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=206883>

g.- El uso de las aguas pluviales que caen o se recogen en un predio de propiedad particular corresponde al dueño de éste, mientras corran dentro de su predio o no caigan a cauces naturales de uso público. En consecuencia, el dueño puede almacenarlas dentro del predio por medios adecuados, siempre que no se perjudique derechos de terceros.

proyectos RAG y clarificar algunos aspectos de la normativa existente (DGA, 2016c)^h (DGA, 2016b)ⁱ (DGA, 2019a)^j (DGA, 2019b)^k. Específicamente, en 2014 se elaboró un documento denominado “Diagnóstico de metodología para la presentación y análisis de proyectos de recarga de acuíferos” (DGA, 2014) y subsecuentemente en 2016 se publicó la “Guía metodológica para la presentación de proyectos de recarga artificial” (DGA, 2016a).

Actualmente, existe una Indicación Sustitutiva al Proyecto de Ley (contenido en el Boletín N° 7543-12), presentada por el Ejecutivo al Senado el 31 de enero de 2019, la cual propone incorporar al Título IV del Código de Aguas una nueva sección sobre la “Recarga artificial de acuíferos” (Fundación Chile, 2019). Dicho proyecto busca establecer una gestión coordinada del agua entre la DGA y las Organizaciones de Usuarios de Aguas (OUA). Al respecto, se hace una distinción más clara entre los proyectos que tienen que recibir un permiso por parte de la DGA y cuales no. En tal sentido, los métodos entendidos como recarga “natural” o “accidental”, destacando la infiltración de aguas lluvias y la infiltración por perdidas de conducción de agua, no requerían permiso de la DGA. Al mismo tiempo, los proyectos RAG que no tengan por finalidad solicitar nuevos Derechos de Aprovechamiento de Aguas (DAAs), no requieren permiso por parte de la DGA (2016a). La Ley propuesta específica que, si se realiza una recarga al acuífero con agua proveniente de la misma cuenca y con el objetivo de aumentar la disponibilidad del agua para los DAAs existentes, el proyecto solo requería una aprobación por parte de la OUA correspondiente (por ejemplo, Junta de Vigilancia o CASUB). Sin embargo, considerando la Circular N°01, la DGA podrá “exigir la presentación de un informe técnico que contenga las especificaciones técnicas de la obra y exigir la instalación de un sistema de medición de la calidad y cantidad de agua” y “en el evento de constatar contaminación de las aguas o la afectación de DAA de terceros, se podrá impedir, denunciar o sancionar su funcionamiento” (DGA, 2019a).

En cambio, los proyectos que sí requerían permiso de la DGA tienen las siguientes características:

- 💧 la utilización de agua proveniente de una fuente ajena a la cuenca;
- 💧 tiene por objeto constituir nuevos DAAs;
- 💧 no exista una OUA legalmente constituida.

En los últimos meses, Verónica Delgado, investigadora Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2 y académica de la Facultad de Ciencias Jurídicas y Sociales de la Universidad de Concepción, y José Luis Arumi, investigador de Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería (CRHIAM) y decano de la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Concepción, publicaron dos columnas en El Mercurio^{lm}, las cuales analizan el estado actual de la legislación con respecto a la RAG en Chile, sus vacíos fundamentales y las indicaciones al proyecto de reforma al Código de Aguas presentadas recientemente. En particular, destacan el vacío desde el punto de vista ambiental, mencionando la poca claridad sobre la calidad de la fuente de agua que se puede recargar. A pesar de mencionar que todos los proyectos de recarga tendrán que asegurarse de “no afectar la calidad del agua”, no hay precisión sobre los parámetros de calidad que hay que cumplir, dejando mucha subjetividad todavía.

h.- Minuta Técnica para el PAS 158. 1-23.

i.- Circular N°4 DGA, Sep 2016: https://dga.mop.gob.cl/legislacionynormas/normativascirculares/Circulares/circular_4_2016.pdf

j.- Circular N°1 DGA, Feb 2019: https://dga.mop.gob.cl/legislacionynormas/normativascirculares/Circulares/Circular_1_febrero.pdf

k.- Circular N°2 DGA, Abr 2019: https://dga.mop.gob.cl/legislacionynormas/normativascirculares/Circulares/Circular_N2.pdf

l.- <https://www.elmercurio.com/legal/noticias/opinion/2019/05/03/la-recarga-artificial-de-aguas-subterranas-en-el-derecho-chileno-parte-i.aspx>

m.- <http://www.elmercurio.com/Legal/Noticias/Opinion/2019/06/19/La-recarga-artificial-de-aguas-subterranas-en-el-derecho-chileno-indicacio-nel-Ejecutivo-a-la-reforma-del-Codigo-de-Aguas-Parte-II.aspx>

1.3.1.- Guías existentes en Chile

En los últimos años la DGA ha trabajado con la motivación de facilitar el proceso de desarrollar proyectos RAG en Chile, principalmente a través del desarrollo de una guía metodológica para la presentación, evaluación y análisis de los proyectos de recarga. Los documentos desarrollados en 2014 y 2016 ofrecen un contexto y resumen sobre la RAG en Chile, a la luz de estándares internacionales basados en las experiencias realizadas por Australia, Estados Unidos, Holanda, Reino Unido, Canadá, Alemania, Sudáfrica e Israel entre otros. A continuación, se resume la información más relevante de los documentos.

“Diagnóstico de metodología para la presentación y análisis de proyectos de recarga de acuíferos” (DGA, 2014)

El primer documento fue desarrollado por la Consultora Amphos 21 Consulting Chile Ltda. para la División de Estudios y Planificación de la DGA, con el objetivo de generar una metodología que permitiera la evaluación de los proyectos RAG y al mismo tiempo servir como una guía para los usuarios que estén interesados en fomentar este tipo de proyectos. La propuesta de guía presentada pretende establecer los contenidos mínimos que debe tener un proyecto RAG en Chile en el momento de presentarse, en coherencia con el Art. 48 del DS N° 203. Más específicamente, incluye aspectos de (DGA, 2014):

- 💧 Caracterización de calidad de las aguas de recarga;
- 💧 Plan de monitoreo; y
- 💧 Plan de acción frente a una eventual contaminación relacionada con la recarga.

Al mismo tiempo, el informe incluye una revisión de las iniciativas RAG desarrolladas en Chile hasta la fecha de elaboración (2014) e intenta aplicar y validar la metodología desarrollada a tres proyectos en particular. El documento establece dos procedimientos para implementar un proyecto RAG en Chile:

1) Procedimiento de solicitud de obra de recarga

Los requisitos establecidos para realizar una solicitud para implementar una obra de recarga son (DGA, 2014):

- 💧 Individualización del solicitante.
- 💧 Descripción del agua a recargar (su naturaleza física y su situación jurídica).
- 💧 Memoria técnica que debe incluir:
 - 💧 Descripción del proyecto de recarga (tipo de obras; plan de operación y mantención; modelación de la recarga sobre la cantidad de aguas del sector hidrogeológico).
 - 💧 Descripción y características del sector de la recarga (geológicas e hidrogeológicas). Incluye zona no saturada; permeabilidad, almacenamiento y geometría del sector; nivel del acuífero; y calidad de aguas.
 - 💧 Características de aguas que se infiltrarán (calidad).
 - 💧 Plan de monitoreo del sector, de su calidad de aguas y del caudal y volumen de recarga.
 - 💧 Plan de acción frente a eventual contaminación del sector.

A su vez, los requisitos establecidos para la aprobación de obras de infiltración son (DGA, 2014):

- Cumplimiento normativa referida
- Cumplimiento normas comunes de procedimiento
- No provoque colmatación del acuífero
- No provoque contaminación de las aguas

2) Procedimiento de constitución del respectivo derecho provisional

Los requisitos establecidos para realizar una solicitud de constituir derechos provisionales en el contexto de un proyecto de recarga son:

- Cumplir requisitos del artículo 140 del Código de Aguas
- Expresar que se constituye con cargo a la obra de recarga artificial ya aprobada en el sector hidrogeológico y adjuntar sus antecedentes
- Por excepción, puede otorgarse en otro sector, siempre que esté claramente interrelacionado y su punto de captación esté en una zona directamente influenciada

A su vez, los requisitos establecidos para la constitución del derecho provisional son:

- Cumplimiento normativa referida
- Cumplimiento normas comunes de procedimiento
- Solicitante tenga obra de recarga aprobada y operando
- Balance hídrico que permita definir el volumen adicional generado en el sector a causa de la infiltración
- Que el ejercicio de este derecho no provoque perjuicios a otros derechos de aguas existentes

En el Anexo 1.4.2, se puede encontrar el índice de contenidos mínimos para la memoria técnica de solicitud de un proyecto RAG que funciona como guía para la evaluación por fase de los proyectos; y los parámetros determinantes en la selección previa del tipo de dispositivo/método de recarga.

Como parte de la validación de la metodología que está aquí propuesta, se analizaron tres estudios piloto de RAG ejecutados en Chile (Cuenca del río Choapa, Cuenca del río Quilimarí y los acuíferos del Valle del río Aconcagua). Dicho análisis concluye que los proyectos evaluados son trabajos básicos, basados en aspectos clásicos de la hidrogeología y a menudo modelos numéricos. Sin embargo, no abordan aspectos centrales como la justificación de la necesidad del proyecto, aspectos medioambientales, evaluación de riesgos, aspectos económicos y operacionales.

“Guía metodológica para la presentación de proyectos de recarga artificial” (DGA, 2016c)

Este documento fue desarrollado por el Departamento de Administración de Recursos Hídricos de la DGA, de forma complementaria al anterior. Se publica la guía que establece el procedimiento para la presentación de proyectos RAG, resumiendo y simplificando algunos aspectos claves del documento anterior. Al mismo tiempo, da una visión más completa sobre el proceso de presentación de proyectos a la DGA.

Dada la variedad de proyectos RAG ejecutados durante los últimos años en la cuenca del río Copiapó, se contactó

a la DGA de la Región de Atacama para entender su postura sobre los proyectos realizados y la información requerida para regularizar las obras. En el Anexo 1.4.3 se puede encontrar más información al respecto.

1.3.2.- Concurso nacional de obras de acumulación e infiltración

A principios de 2019, en marco de la Ley de Fomento al Riego N°18.450^a, la CNR amplió el concurso nacional para incluir piscinas de infiltración por primera vez, con la intención de repetirlo cada año (CNR, 2019), lo cual está alineado con la posición general de la CNR para promover proyectos RAG en el sector agrícola en Chile. Sin embargo, la entidad pública no recibió postulaciones al concurso con respecto a proyectos de infiltración.

Dado a que esta Guía tiene por objetivo acompañar el proceso de postulación al concurso de CNR, es muy importante entender las razones del porqué no recibieron postulaciones al concurso. Según lo descrito en la introducción de este informe, hay tres factores principales asociados a la baja adopción de RAG en Chile, posiblemente explicando la falta de postulaciones al concurso: i) falta de esquemas exitosos y formales de RAG con una larga historia de operación; ii) falta de respaldo legislativo y regulatorio; iii) existencia de limitaciones técnicas. Estos tres factores generan incertidumbre sobre la implementación de proyectos RAG, reduciendo la confianza en sus potenciales beneficios.

Hay otros factores potenciales que podrían haber influido en el concurso también, como i) una difusión insuficiente del concurso y de la incorporación de RAG como una nueva opción para los potenciales postulantes; ii) complejidad de las bases del concurso y falta de apoyo de CNR para despejar las dudas que surgieron; iii) percepción de insuficiencia respecto del presupuesto y al tiempo de ejecución de las obras.

Como las razones mencionadas anteriormente son meras posibilidades, se sugiere analizar en mayor profundidad las explicaciones a la falta de participantes en el concurso. Para ello, se sugiere revisar cuales fueron las consultas levantadas mientras el concurso estuvo abierto. Esta información puede ser muy útil para entender la incertidumbre de los potenciales postulantes. Luego, se sugiere contactar a personas reconocidas por su experiencia sobre recarga de acuíferos gestionadas, para conocer sus opiniones asociadas a la ausencia de postulaciones. Para obtener dichas opiniones se recomienda enviar una encuesta semi estructurada mediante correo electrónico, para luego realizar un taller de trabajo, para determinar las principales razones y acceder a recomendaciones de mejora para una próxima convocatoria.

En cuanto a la convocatoria, el “Concurso Nacional de obras de acumulación e infiltración” (N* 06-2019) fue dirigido a pequeños agricultores y pequeños empresarios (incluyendo Comunidades y Asociaciones Indígenas) para el cofinanciamiento de proyectos que se desarrollen entre las regiones de Arica y Parinacota y Biobío. El presupuesto total fue de \$2.000 millones, con un monto máximo de 15.000 UF para financiar un proyecto y un máximo adjudicación de 80% del costo total del proyecto. También podrían postular Organizaciones de Pequeños Usuarios y Organizaciones de Usuarios.

La postulación fue abierta a los siguientes tipos de obras:

- a) Obras de Acumulación (de regulación estacional y de regulación corta); y
- b) Construcción de piscinas de infiltración, sin modificación de cauce natural.

Dado a que el monto máximo de cada proyecto no podía superar las 15.000 UF, los proyectos de este concurso no se someterían a la evaluación social requerida por el Ministerio de Desarrollo Social para proyectos de costo mayor (más información en Sección 5). Es importante señalar que, en el caso de proyectos cuyas obras sean de piscinas de infiltración, dichas obras no estarán asociadas a una eventual solicitud de constitución de derechos de aprovechamiento provisional de aguas subterráneas, por tanto, no se encuentran obligadas a someterse al

a.- La Ley de Fomento al Riego es un instrumento para bonificar la construcción de una obra de riego y/o drenaje, a través de un sistema de concursos, enfocando en el sector de pequeña agricultura y con 5 objetivos principales: i) Tecnificar la aplicación del agua de riego; ii) Fomentar la eficiencia en la conducción y distribución del agua de riego; iii) Construir y/o mejorar obras de arte en los sistemas de conducción y distribución; iv) Habilitar suelos de mal drenaje; v) Obras de riego que incorporen fuentes de Energías Renovables no Convencionales en su diseño (CNR, s. f). <https://www.cnr.gob.cl/wp-content/uploads/2019/03/Reglamento-Ley-N%C2%BA-18.450.pdf>

procedimiento establecido en los artículos 66 y 67 del Código de Aguas, y en los artículos 47 siguientes del D.S. 203 de 2013 sobre “Normas de Exploración y Explotación de Aguas Subterráneas”, de acuerdo con la Circular DGA N°1 del 14 febrero de 2019 (CNR, 2019).

Sin perjuicio de lo anterior, las obras de captación que se utilicen en el proyecto deberían contar con las autorizaciones correspondientes (por ejemplo, compuerta, marco partididor, etc.). En el caso de proyectos cuyas obras fuesen piscinas de infiltración deberían cumplir con la normativa vigente ante la DGA. Se recomendó considerar para este tipo de obras un sedimentador (decantador) y cajón aforador, para la medición del caudal de entrada a la piscina de infiltración.

Finalmente, el o los proyecto(s) debiera(n) contener:

- a) Información relativa a la ubicación de los puntos de captación y recarga; y
- b) Un sistema de medición de cantidad de agua.

Los Manuales e Instructivos correspondientes se encuentran disponibles en la página web institucional al momento de la convocatoria y se aplicarían referencialmente para la presentación de proyectos a concurso.

1.3.3.- Posicionamiento de esta guía con la normativa vigente

La Figura 3 intenta ilustrar la interacción entre las normas y regulación relevante a la RAG en Chile y, al mismo tiempo, proponer el posicionamiento de esta Guía de RAG dentro del marco general. Este ejercicio es muy relevante para poder sensibilizar el alcance de la Guía y ayuda para su socialización más adelante.

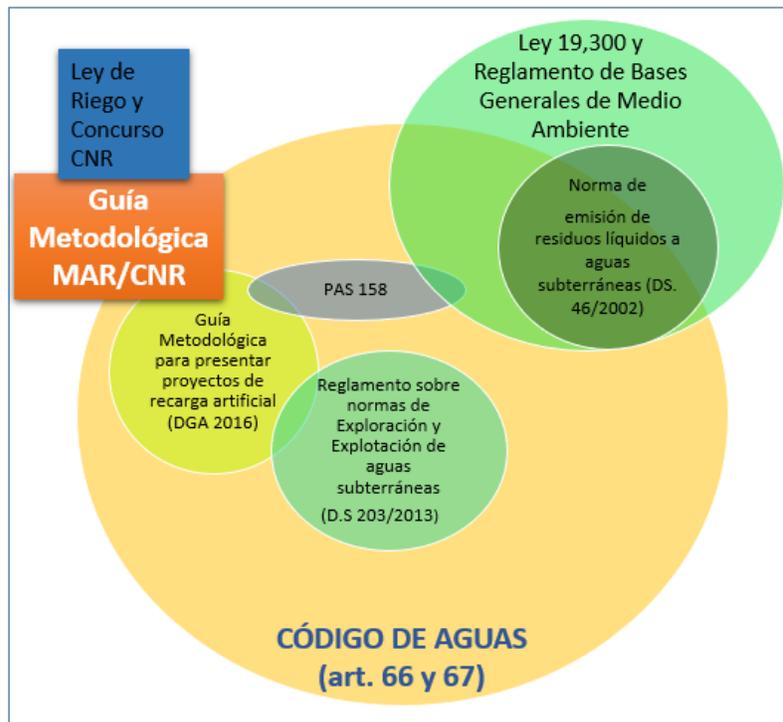


Figura 3. Interacción entre las normas y regulación relevante a la recarga de acuíferos gestionada en Chile con esta Guía. Fuente: Elaboración propia.

Esta Guía será utilizada por parte de la CNR para apoyar el proceso de formulación del “Concurso nacional de obras de acumulación e infiltración” de la Ley de Fomento de Riego, también tiene la intención que sea utilizada por los usuarios(as) de aguas y entidades responsables para la implementación de proyectos RAG en Chile. A pesar de que esta Guía no es vinculante dentro del Código de Aguas, se considera importante que las autoridades reconozcan la Guía como herramienta complementaria para rellenar algunas de las brechas existentes en este tema.

1.4.- Cómo usar esta Guía

La adopción de una guía robusta llevará a una mejor comprensión y cuantificación de los riesgos asociados y entregará un marco de gestión sólido para mitigarlos. Lo anterior podría aumentar el uso de la RAG al reducir la incertidumbre para las posibles partes interesadas, así como los costos de las decisiones de aprobación y de regulación. Los resultados de la aplicación de esta Guía también pueden utilizarse para comunicar al público que se están manejando los riesgos para la salud humana y el medioambiente, facilitando la aceptación de la comunidad.

Este informe corresponde al informe final del proyecto que forma las bases de la Guía Metodológica de RAG en Chile, disponible en CNR (2020). La Guía proporciona una herramienta orientada a los Usuarios(as) y Organizaciones de Usuarios(as) de Agua para desarrollar un proyecto RAG o mejorar su práctica actual, enfocado en el sector agrícola. Ayuda a identificar los riesgos potenciales de la implementación de proyectos y medidas que los reduzcan, a fin de hacer más segura la reposición de aguas subterráneas. Se puede aplicar a proyectos de recarga no gestionados existentes, como una herramienta de selección para identificar sitios donde se requieren investigaciones más rigurosas y al desarrollo de nuevos proyectos. También pueden utilizarse junto con otras guías existentes, como requisito previo para la inversión pública.

La Guía incluye una breve introducción a los diferentes métodos de RAG que se consideran más relevantes para el sector agrícola en Chile. También se proporciona información para ayudar a seleccionar el método más apropiado en correspondencia a los factores particulares de cada proyecto. Luego se resume el marco de desarrollo y gestión de proyectos RAG recomendado para su aplicación en Chile en el sector agrícola. Finalmente, se ha desarrollado una serie de fichas descriptivas de los diferentes métodos de RAG que entregan una descripción del método, las principales consideraciones para su desarrollo, operación y mantención, y casos de aplicación.

2.- Definiciones y métodos de Recarga de Acuíferos Gestionada

Esta sección define tipos de acuíferos, para realizar recarga, la recarga de acuíferos gestionada (RAG), describe los componentes típicos de un sistema, proporcionando orientaciones sobre cómo seleccionar un método de recarga y describe métodos para realizar evaluaciones económicas.

2.1.- Tipos de acuíferos

Un acuífero consiste en rocas o sedimentos que conforman un compartamiento donde sus poros pueden ser ocupado por agua, los cuales puede circular agua libremente en cantidades significativas, bajo la acción de la gravedad.

Existen una gran variedad de tipos de acuíferos, los cuales pueden ser clasificados en base a diferentes criterios:

1. Según sus características litológicas o tipo de poros (Hispagua, 2020):

 **Acuíferos porosos o detríticos:** son de rocas o sedimentos detríticos^a con una permeabilidad variable que depende, esencialmente, de la porosidad intergranular del material de sus rocas y de la interconexión entre los poros. Están compuestos de material no consolidado depositado por el agua con diferentes tamaños de grano, por ejemplo, gravas, arenas, arcillas, formaciones o depositos aluviales, limos, etc. Por lo general, se encuentran adyacentes a ríos o paleocanales^b enterrados y suelen ser menos profundos que los acuíferos de roca fracturada o kársticos. Los niveles de agua a menudo fluctúan debido a las tasas variables de recarga y bombeo. Por su naturaleza poco profunda y no confinada, estos acuíferos son susceptibles a la contaminación.

a.- Material suelto o sedimento de rocas. Son los productos de la erosión, el transporte, la meteorización —química y física— y de los procesos geológicos externos.

b.- Canal dentro de un sedimento relleno por material posterior. Antiguos canales bajos las arenas.

- Acuíferos fisurados** (por fracturas) **y/o kársticos** (por solución): son de rocas carbonatadas (calizas/dolomías) u otro tipo de rocas que presenten fracturación. Poseen alta permeabilidad debido a grietas y fisuras, tanto de origen mecánico como de origen de disolución.
- Acuíferos mixtos:** su porosidad se debe a todas las causas anteriores. Por ejemplo: arenas calcáreas o calcarenitas.

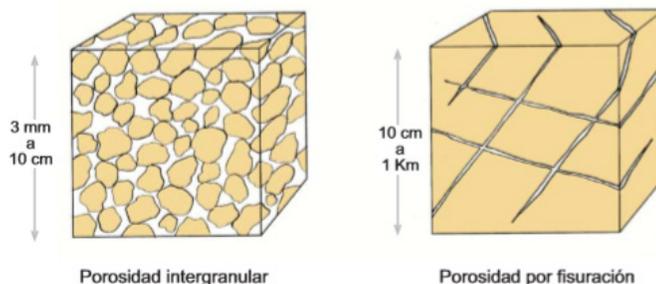


Figura 4. Porosidad intergranular y porosidad por fisuración. Fuente: Sanchez (2011).

2. Según la presión hidrostática (Sánchez, 2011):

- Acuíferos no confinados** o libres (Figura 5) se caracterizan por ser superficiales y por no tener una capa confinante de baja permeabilidad. Su límite superior (el nivel freático) está a presión atmosférica. En dicho acuífero, al extraer agua, el nivel freático descenderá del nivel normal o histórico.

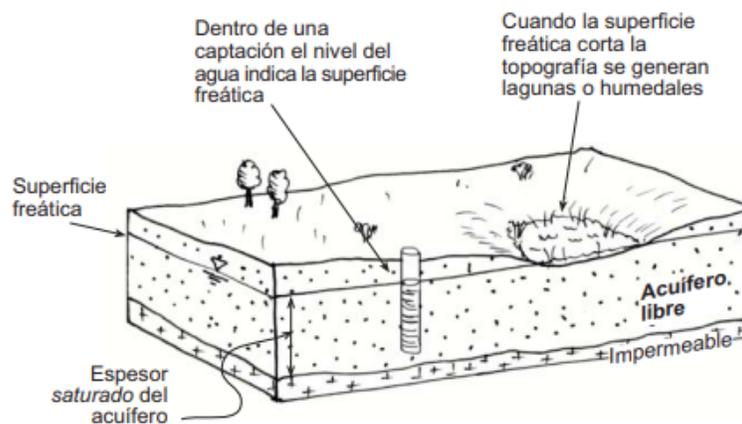


Figura 5. Ilustración de un acuífero no confinado. Fuente: Sánchez (2011)

- Acuíferos confinados** o cautivos (Figura 6) se caracterizan por ser limitados, en su parte superior, por una capa de permeabilidad muy baja, a través de la cual, el flujo de agua es prácticamente nulo. El material del acuífero está completamente saturado y su límite superior está sometido a una presión mayor a la presión atmosférica. En el caso de su perforación, el nivel de agua ascendería, eventualmente hasta la superficie.

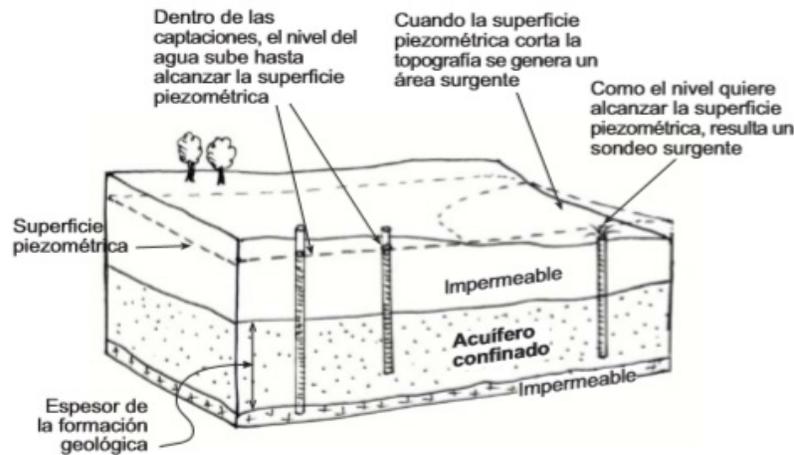


Figura 6. Ilustración de un acuífero confinado. Fuente: Sánchez (2011)



Acuíferos semiconfinados (Figura 7) son más frecuentes que los acuíferos confinados, también se encuentran a presión, pero algunas de sus capas confinantes son semipermeables, como un acuitardo, y a través de ellas se producen filtraciones.

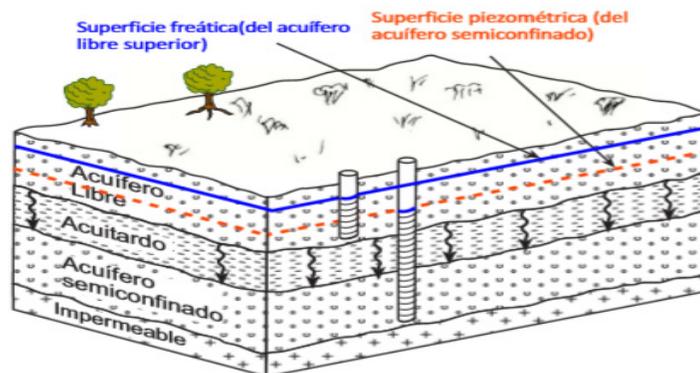


Figura 7. Ilustración de un acuífero semiconfinado. Fuente: Sánchez (2011).

2.2.- Definición, propósitos y elementos claves

La recarga de acuíferos gestionada (RAG) es la recarga intencional de agua a los acuíferos para su posterior recuperación o beneficio ambiental. El proceso gestionado busca la protección adecuada de la salud humana y el medio ambiente e implica la gestión de los volúmenes y la calidad del agua. Esto es distinto de la recarga intencional no gestionada o simplemente la descarga o el drenaje de agua, donde no se realiza un monitoreo o manejo activo.

El objetivo principal de esta Guía está enfocado en el uso del agua recargada para el riego en la agricultura. A su vez, la Guía también puede ser utilizada para otros usos finales u objetivos para el agua recargada, como:

-  Beneficios ambientales, por ejemplo, restaurar los sistemas de agua subterránea agotados, es decir, sostener los ecosistemas dependientes del agua subterránea.
-  Barrera para prevenir la intrusión salina en las regiones costeras de acuíferos.

c.- Roca o sedimento semipermeable que puede contener agua que es transmitida lentamente.

Sin embargo, hay otros usos finales, como el aumento de agua potable, el suministro industrial no potable y los usos domésticos no potables, los que están excluidos de esta Guía, ya que presentan un mayor nivel de riesgo y, por ende, requieren de una comprensión aún más rigurosa en cuanto a investigación, monitoreo y tratamiento.

Esta Guía está orientada a los **acuíferos no confinados**. Existen otros tipos de acuíferos que no son abarcados por esta Guía, por lo que es necesario seguir trabajando para una futura aplicación en acuíferos confinados, acuíferos semiconfinados y otros tipos de acuíferos utilizados como suministro de agua potable municipal. La razón de esto es que la recarga de agua que contiene oxígeno hacia acuíferos confinados que almacenan agua que está agotada de oxígeno, es que existe una alta probabilidad de que ocurra una oxidación de minerales reactivos y potencialmente libere metales en el agua subterránea en concentraciones que podrían, en algunos casos, exceder los valores de referencia para el agua potable.

La Figura 8 y la Tabla 2 destacan los seis componentes clave de un sistema RAG para el sector agrícola. Para cada componente es posible aplicar un rango de medidas de gestión y técnicas de monitoreo, dependiendo de los riesgos específicos asociados con la RAG y su operación.

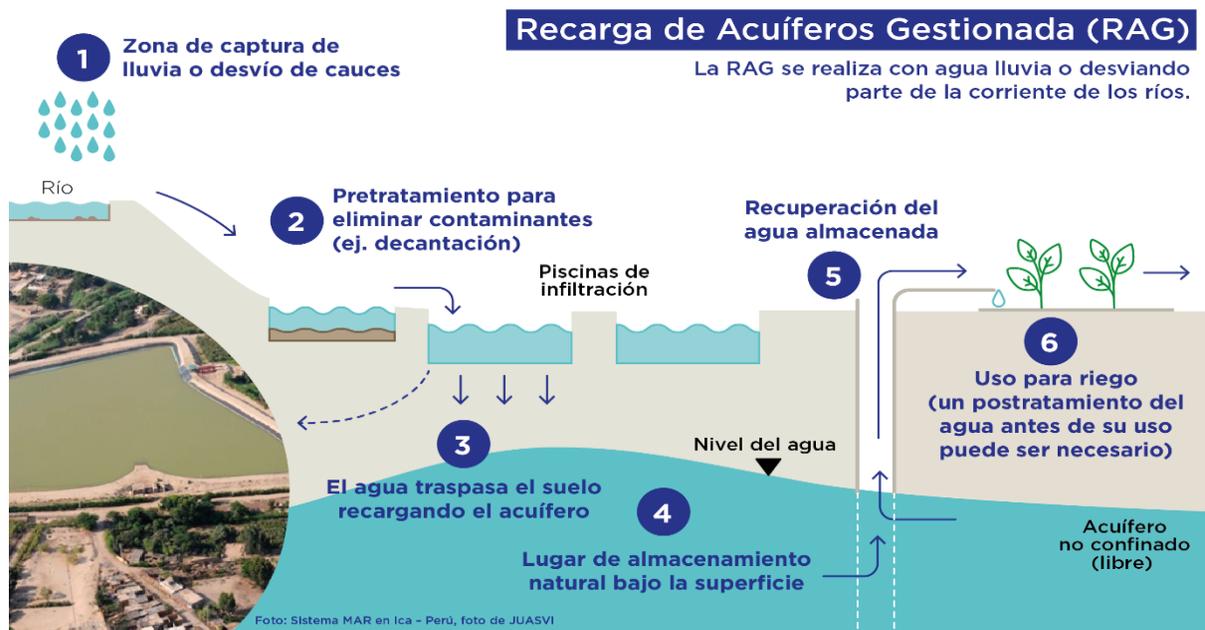


Figura 8. Ejemplo de la recarga de acuíferos gestionada con piscinas de infiltración para el sector agrícola, destacando los seis componentes clave del sistema. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Componentes de un sistema de recarga de acuíferos gestionada. Fuente: modificada de NRMMC-EPHC-NHMRC (2009).

Componente	Ejemplos
1. Zona de captura	Presa, piscina de detención, humedal, canal.
2. Pretratamiento	Sistemas pasivos ej. humedales, biofiltro, balsas de decantación. Sistemas de ingeniería ej. filtro de arena.
3. Recarga	Infiltración ej. piscina, canal, zanja, pozo seco, lecho del río. Pozo de inyección.
4. Almacenamiento subterráneo	El acuífero donde se almacena el agua.
5. Recuperación	Pozo de recuperación. Descarga intencional a un ecosistema dependiente del agua subterránea.
6. Uso final	Riego agrícola, agua de proceso industrial*, suministro de agua potable*, beneficio ambiental ej. sostener ecosistemas acuáticos, restaurar acuíferos agotados (un postratamiento, ej. microfiltración o cloración, puede ser necesario según el uso final del agua).

*No cubierto en esta Guía.

2.3.- Descripción de métodos

La recarga de acuíferos gestionada posee una amplia gama de métodos disponibles para recargar agua a fin de cumplir con las variadas condiciones locales, incluyendo técnicas de infiltración para recargar acuíferos no confinados y técnicas de inyección de pozos, por ejemplo, almacenaje y recuperación en acuíferos (Aquifer Storage and Recovery, o ASR) o almacenamiento, transferencia y recuperación en acuíferos (Aquifer Storage, Transfer and Recovery, o ASTR) que por lo general son más adecuados para acuíferos más profundos y confinados. La Tabla 3 describe las características de los métodos de RAG, incluyendo los beneficios y requerimientos de dichos sistemas.

Tabla 3. Ejemplos de métodos de la recarga de acuíferos gestionada. Fuente: modificado de Page et al. (2018)there is a need to diversify future sources of supply and storage. However, to date, there has been a lag in the uptake of managed aquifer recharge (MAR.

Métodos de recarga	Descripción	Beneficios y requerimientos
ASR	Almacenamiento en acuífero con recuperación (aquifer storage recovery): inyección de agua en un pozo para su almacenamiento y recuperación desde el mismo pozo.	Esto es especialmente útil en acuíferos con agua salobre, donde el almacenamiento es el objetivo principal y el tratamiento del agua es una consideración menor, pero aún ocurre. Comúnmente utilizado para almacenar agua potable en los EE.UU. y aplicado con éxito para la reutilización de aguas residuales tratadas y aguas pluviales urbanas para el riego de la horticultura en Australia. Generalmente se requiere una mayor calidad del agua para compensar la posible obstrucción de pozos. La ventaja de este sistema es que requiere una superficie menor, pero generalmente los costos son más altos para los sistemas de inyección, por lo que se aplica en mayor medida en entornos urbanos para un uso de agua de mayor valor.
ASTR	Almacenamiento, transferencia y recuperación en acuíferos (aquifer storage, transfer and recovery): implica inyectar agua en un pozo para su almacenamiento y luego recuperación en un pozo diferente.	Se utiliza para lograr un tratamiento adicional del agua en el acuífero (especialmente para los patógenos y microcontaminantes), al extender el tiempo de residencia ^a del agua en el acuífero más allá de un solo pozo. Generalmente se requiere una mayor calidad del agua para compensar la posible obstrucción de pozos. La ventaja de este sistema es que requiere una superficie menor, pero generalmente los costos son más altos para los sistemas de inyección, por lo que se aplica en mayor medida en entornos urbanos para un uso de agua de mayor valor.
Pozos secos	Son pozos poco profundos donde los niveles freáticos están a mayor profundidad, esto permite la infiltración de agua de muy alta calidad en un acuífero profundo no confinado.	Permitir la recarga de acuíferos profundos. La calidad del agua puede ser un problema, especialmente si se usa agua turbia con muchos sedimentos.
Estanques de percolación, represa filtrante o vertederos de recarga	Las represas construidas en ríos intermitentes ^b detienen el agua que se infiltra a través del lecho del río para mejorar el almacenamiento en acuíferos no confinados y se extrae aguas abajo.	Mejora la infiltración natural del río creando una serie de represas más pequeñas. Una forma rentable de aumentar la recarga en ríos intermitentes.
Recolección de agua de lluvia para su almacenamiento en acuíferos	La escorrentía del techo se desvía hacia un pozo lleno de arena o grava y se deja filtrar hasta el nivel freático donde se recupera a través de un pozo de bombeo.	Generalmente de una escala más pequeña que otros métodos de recarga, pero puede ser muy efectiva cuando es utilizada por muchos usuarios. Por lo general, solo requiere una evaluación de riesgos simplificada.
Bancos filtrantes en lechos de ríos	Extracción de agua subterránea de un pozo cerca o debajo de un río o lago para inducir la infiltración del agua superficial.	Esto mejora y hace más consistente la calidad del agua recuperada, siendo más utilizado como un método de tratamiento de agua que un sistema de almacenamiento de agua.

a.- Es el tiempo promedio que el agua infiltrada mantiene en el acuífero o subsuelo antes de su recuperación natural o intencional.

b.- Ríos intermitentes (también conocidos como ríos efímeros) refieren a ríos con un régimen particular, que tienen caudales superficiales de forma temporal durante y después de un período de lluvia en la localidad inmediata.

Métodos de recarga	Descripción	Beneficios y requerimientos
Galerías de infiltración	Corresponde a zanjas subterráneas en suelos permeables que permiten la infiltración a través de la zona no saturada hacia un acuífero no confinado.	Requiere menos superficie que las piscinas de infiltración y hay menos posibilidades de obstrucción por crecimiento excesivo de algas.
Filtración en dunas	Infiltración de agua de piscinas construidas en dunas y su extracción desde pozos o piscinas a menor altura.	Se utiliza para mejorar la calidad del agua y para equilibrar la oferta y la demanda en lugar de aumentar el almacenamiento adicional de agua.
Piscinas de infiltración	Implica desviar el agua superficial hacia piscinas fuera del cauce, permitiendo que el agua penetre a través de una zona no saturada hasta alcanzar el acuífero no confinado más abajo.	Requiere una mayor superficie que los métodos de inyección por pozos, tienen altas tasas de crecimiento de algas en comparación con las galerías subterráneas y puede ser más difícil de manejar para la obstrucción en comparación con el método de recarga SAT. Uno de los métodos de recarga más baratos y utilizados.
Tratamiento de suelo-acuífero (SAT)	Técnica de tratamiento de suelo-acuífero (soil aquifer treatment): El efluente de aguas residuales tratadas se filtra de forma intermitente a través de piscinas de infiltración para facilitar la eliminación de nutrientes y patógenos en su paso por la zona no saturada, para ser recuperada por pozos después de residir en el acuífero no confinado.	Similar a las piscinas de infiltración, pero requiere un mayor manejo para mantener las tasas de infiltración. El secado de las piscinas de recarga SAT permite un mejor manejo de las tasas de infiltración y puede evitar la obstrucción excesiva.
Descarga de agua de represa	Las represas en los ríos intermitentes se utilizan para detener el agua de crecidas, la que puede utilizarse liberando lentamente el flujo en el río aguas abajo, lo que mejora significativamente la recarga en los acuíferos.	Descarga controlada de agua de represa, que permite el uso conjunto del almacenamiento de aguas subterráneas y superficiales.

Los métodos de inyección directa dependen del tipo de acuífero en la zona donde se quiere recargar; si el acuífero es confinado, entonces la inyección directa es mejor, por el contrario, si el acuífero es no confinado, la selección depende de la profundidad del agua subterránea. Con respecto a acuíferos no confinados, el costo del método de recarga de inyección directa está vinculado intrínsecamente a la profundidad del agua subterránea, es decir, cuando la profundidad aumenta, el costo de implementar este método de recarga también aumenta. Así entonces, hay un valor crítico de la profundidad de agua subterránea (generalmente varía de 100 a 201 m) que determina el método de recarga a aplicar (US EPA, 2012). La inyección directa es preferible cuando la profundidad del agua subterránea es menor que el valor crítico, de lo contrario, un tercer criterio debería ser considerado.

Por otra parte, en general, si la turbidez o la concentración de nutrientes de la fuente de agua es alta o variable, es posible que los métodos de inyección de pozo deriven rápidamente en obstrucciones. En esta situación, se prefieren las piscinas de infiltración que puedan limpiarse y retirar la capa de sedimentos con retroexcavadora de forma periódica. Si se requieren niveles de tratamiento más altos, se deben considerar los pozos de flujo inverso (back-flushing) que permiten la limpieza de sedimentos y biomasa o para la descarga o reciclaje de subproductos del tratamiento de agua.

Las características del subsuelo tienen una relación directa con la calidad del agua. Durante el almacenaje en el subsuelo, diferentes reacciones físico-químicas y biológicas pueden cambiar la calidad del agua (Essandoh

et al., 2011). Existen métodos que han demostrado reducir ciertos contaminantes, tales como: la precipitación y remoción de hierro; degradación biológica; reacciones de reducción-oxidación (redox); la filtración y adsorción (Bouwer, 1996; Cha et al., 2006; Essandoh et al., 2011). Sin embargo, otros procesos en el acuífero aumentan la concentración de algunas sustancias en el agua subterránea. Por ejemplo, durante el almacenamiento de agua en acuíferos, las sales en el suelo o el material del acuífero pueden disolverse en el agua y las reacciones geoquímicas pueden llevar a la movilización de arsénico en algunos acuíferos, ello debido a las diferencias entre la calidad de la fuente de agua de recarga y la calidad del agua subterránea nativa (Vanderzalm et al., 2010).

El diseño y operación de sistemas RAG se ven impactados, en gran medida, por la calidad del agua. La fuente de agua de mala calidad es más propensa a obstruir áreas de recarga, tales como piscinas o pozos de infiltración y puede llevar a una reducción en las tasas de infiltración. Los parámetros típicos de calidad del agua como la turbidez, nutrientes, índice de densidad de sedimentos (silt density index o SDI) y el índice de ensuciamiento (modified fouling index o MFI) se definen para caracterizar el potencial que tiene la fuente de agua para provocar obstrucciones (US EPA, 2012). A fin de lograr una implementación exitosa de sistemas RAG, las características hidrogeológicas y geomecánicas del sitio deben ser adecuadas para mantener o mejorar la calidad del agua que se desplaza bajo tierra, mientras que una buena calidad de la fuente de agua es importante para mantener la matriz del acuífero a fin de poder sostener con éxito las futuras tasas de infiltración. Normalmente, la mejor calidad de la fuente de agua requiere de un menor tiempo de retención bajo superficie y, por ende, la distancia entre el agua infiltrada y el agua recuperada puede ser menor (Bouwer, 1996). A fin de maximizar la infiltración, es posible implementar estrategias operativas, tales como pretratamiento de agua, redesarrollo de pozos o raspado de piscinas para remover las capas de obstrucción o el uso de ciclos de humectación/secado de piscinas de infiltración durante la operación del sistema (Bouwer, 2002).

2.3.1.- Uso de aguas tratadas en la recarga de acuíferos gestionada

La RAG también puede jugar un papel importante en el uso de agua recuperada (efluentes de aguas servidas tratadas o aguas pluviales). Muchas ciudades alrededor del mundo infiltran agua recuperada a los acuíferos a través de piscinas de infiltración o pozos y luego reutilizan esta agua en el suministro de agua potable o de riego. En la ciudad de Mount Gambier en el Sur de Australia, pozos de drenaje han abastecido un acuífero por 120 años sin deterioro notable en la calidad del agua potable (Dillon, 2005). Por otra parte, existen experiencias en las que, a pesar de que no se han observado efectos adversos en la salud, efluentes de aguas servidas escapan de piscinas de almacenamiento o sistemas de riego involuntariamente, abasteciendo acuíferos utilizados para el suministro de agua potable. De todos modos, se requiere más investigación para respaldar estas afirmaciones (Cisneros y Ordonez, 1999).

La experiencia sugiere que los acuíferos tienen una capacidad para tratar agua hasta un cierto grado, además, hay abundante evidencia sobre el funcionamiento de biorremediación pasiva de acuíferos contaminados (Dillon, 2005). Por esta razón, se han utilizado acuíferos como medio de tratamiento de agua cuando ocurre una recarga difusa. Además, hay creciente confianza en la sustentabilidad de los procesos de tratamiento en la recarga de acuíferos gestionada en centros urbanos con escasez hídrica, particularmente, con respecto a los siguientes métodos de recarga anteriormente discutidos: i) bancos filtrantes; ii) almacenamiento en acuíferos con recuperación (ASR); iii) almacenamiento, transferencia y recuperación en acuíferos (ASTR) y iv) tratamiento de suelo-acuífero (SAT).

Guías basadas en la ciencia son claves para el uso de acuíferos en el tratamiento y almacenaje de agua. Durante muchos años, la industria de alimentación ha utilizado un enfoque de gestión de riesgos denominado HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Points), el cual ha sido adoptado en las guías para el agua potable en Australia y las guías de reúso de agua de la OMS. El objetivo de este enfoque es identificar los potenciales peligros de un proyecto y abordarlos con medidas verificables, proporcionando una garantía de calidad apropiada de agua, desde la cuenca al uso final. Este enfoque llama a la necesidad de tener mejor conocimiento sobre procesos de atenuación de contaminantes en la hidrogeología, así como la movilidad de contaminantes y sus tiempos de residencia en acuíferos. La selección del tratamiento de aguas servidas para su uso en un proyecto RAG es particularmente importante, por ejemplo, la desnitrificación para reducir los niveles altos de nitrógeno a fin de manejar las obstrucciones en la operación del sistema. Procesos complementarios de tratamiento, como, por

ejemplo, el tratamiento pasivo a través de humedales, también pueden ser utilizados en combinación con el método de ASTR para asegurar que el agua pueda ser restaurada a la calidad de agua potable, si este es su uso final.

A pesar de que el uso de aguas tratadas en la RAG tiene una aplicación muy relevante y muchos beneficios, se escapa del enfoque de esta Guía en el marco del presente proyecto, el cual tiene por objetivo proporcionar un procedimiento accesible para proyectos RAG de bajo riesgo en el sector agrícola en Chile. Proyectos que utilicen aguas tratadas como fuente de agua requieren un proceso de tratamiento mucho más riguroso, lo cual significa mayores costos de inversión y mantención. En este contexto, se hace necesaria la elaboración de una guía por separado que aborde la reutilización de agua, como la desarrollado en Australia o por la OMS.

2.3.2.- Métodos relevantes a esta guía

Esta Guía se centra en técnicas basadas en infiltración para recargar acuíferos no confinados con agua superficial. El tipo de acuífero es normalmente la primera consideración en la selección del método de recarga, ya que los acuíferos confinados generalmente requieren la inyección directa a través de pozos. Recargar acuíferos confinados tiene riesgos adicionales en la operación del sistema y para la salud. La introducción de agua que contiene oxígeno disuelto en acuíferos anóxicos confinados puede causar reacciones geoquímicas que pueden provocar riesgos para la seguridad del agua, como, por ejemplo, movilizar arsénico, o causar obstrucción, por ejemplo, a través de la precipitación de hierro. La gestión de estos riesgos está más allá del alcance de esta Guía y se recomienda consultar las Guías australianas de RAG (NRMMC-EPHC-NHMRC, 2009) para obtener más información sobre cómo se gestionan estos riesgos en Australia.

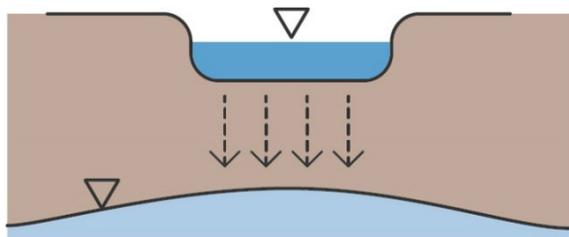
Es posible aplicar un rango de técnicas de infiltración para realizar RAG en acuíferos superficiales (acuíferos pocos profundos usualmente de menos de 15 metros de espesor) dependiendo de las características del sitio local. Por lo general, estas se agrupan en métodos denominados “dentro del cauce” (in-stream) o “fuera del cauce” (off-stream). Los métodos son aplicables en diferentes situaciones de acuerdo con varios factores, algunos de los cuales se pueden usar en conjunto con otros y también con gestión de almacenaje convencional en la superficie.

Para esta Guía se ha identificado tres grupos de métodos basados en infiltración para recargar acuíferos no confinados:

- 1) Fuera del cauce
- 2) Dentro del cauce
- 3) Pozos secos

A continuación, se describen los principales métodos de cada grupo que se consideran relevante para el sector agrícola y que se encuentren abordados por esta Guía, basados en Dillon (2005).

1) Fuera del cauce

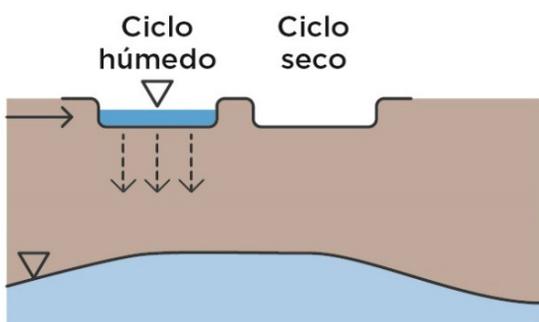


Piscina de infiltración

Las **piscinas de infiltración** generalmente se construyen fuera del cauce donde se desvía el agua superficial, ya sea por gravedad o por bombeo, y se recolecta en una o más piscinas de poca profundidad y de gran área de superficie. El agua se infiltra a través de la zona no saturada hacia el acuífero no confinado. Este método requiere una superficie suficiente para ubicar las estructuras de las piscinas que generalmente ocupan áreas de unas pocas hectáreas para esquemas que recargan alrededor de 1 hm³^a de agua por año, hasta decenas

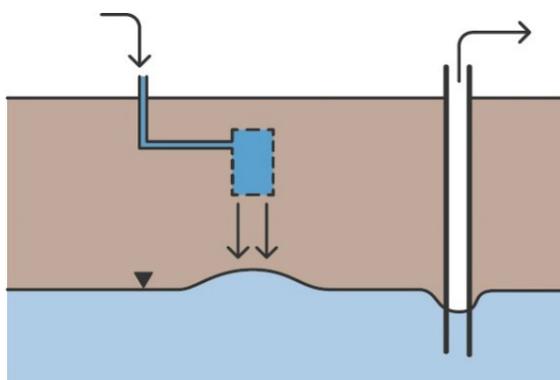
a El hectómetro cúbico (o hm³) es una unidad de volumen que representa un millón de metros cúbicos.

o cientos de hectáreas para esquemas más grandes que recargan alrededor de 100 hm³ o 1000 hm³ de agua por año. La permeabilidad requerida es típicamente ≥ 0.5 m/día, pero depende de los volúmenes requeridos, el tiempo disponible para la recarga y el área de la superficie de infiltración. Se necesita suficiente espacio de almacenamiento del acuífero para aceptar la recarga adicional.



Tratamiento suelo-acuífero (SAT)

El **tratamiento suelo-acuífero (SAT)** es una variación del método de la piscina de infiltración, que generalmente se aplica, pero no exclusivamente, a la recarga del efluente de aguas residuales tratadas. El agua se recarga de forma intermitente utilizando ciclos húmedos y secos para facilitar la eliminación de nutrientes y patógenos como resultado de las condiciones redox variables, cambiando entre ambientes óxicos y anóxicos. Igual que en el método de piscinas de infiltración, la permeabilidad del suelo es crítica para mantener las tasas de recarga y se requiere suficiente espacio de almacenamiento del acuífero para garantizar el transporte a través de una zona no saturada para el tratamiento y para mantener la eficiencia hidráulica.

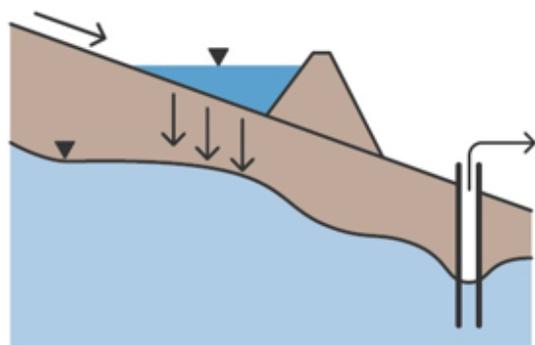


Galería de infiltración

Las **galerías de infiltración** son, esencialmente, zanjas de percolación cubiertas, que contienen un medio (material de suelo) o una estructura de soporte con espacios vacíos internos para facilitar la infiltración (Bekele et al. 2013). Este método ocupa menos espacio que las piscinas de infiltración y puede utilizar el espacio subterráneo, por ejemplo, debajo de parques, caminos, aceras y estacionamientos. Como no hay cuerpos de agua abiertos, se evitan algunos peligros, por ejemplo, crecimiento de algas, problemas de olor, plagas de insectos y problemas asociados a la seguridad pública.

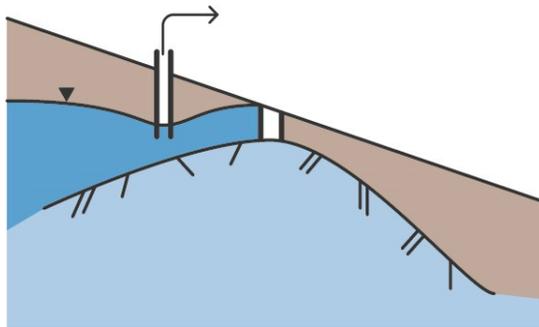
2) Dentro del cauce

Los métodos dentro del cauce se instalan en la ruta de drenaje del agua y utilizan la permeabilidad del lecho del río u obra para infiltrar agua en el acuífero no confinado. Hay una variedad de métodos comúnmente aplicados que son dependientes de las condiciones locales.



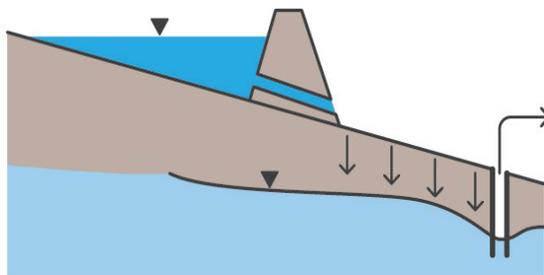
Estanque de percolación

Los **estanques de percolación** son construidos en ríos intermitentes donde el agua se detiene y se infiltra en el lecho para aumentar el almacenamiento en acuíferos no confinados, que luego puede ser extraída aguas abajo. Esta técnica es más efectiva cuando el curso del agua es relativamente estrecho y la topografía adyacente permite construir muros de represas. También se puede aplicar en serie en un mismo río para capturar y recargar agua en varios puntos a lo largo del flujo.



Represa subterránea

Las **represas subterráneas** se aplican en ríos intermitentes donde la roca madre crea restricciones de flujo de agua subterránea. Se construye una zanja a través del lecho del río y se excava en la roca madre que luego se rellena con material de baja permeabilidad para ayudar a retener los flujos en el material aluvial saturado. Los factores más importantes a considerar para esta técnica son: i) el perfil de la geología de la roca madre; ii) la presencia de un espesor adecuado de material aluvial; y iii) la hidrología de la superficie. Esta técnica es útil cuando los gradientes y las velocidades del agua subterránea (conductividad hidráulica) son altas, ya que la presa subterránea retiene el agua recargada en la zona para que las respuestas de la capa freática y los beneficios se obtengan localmente.

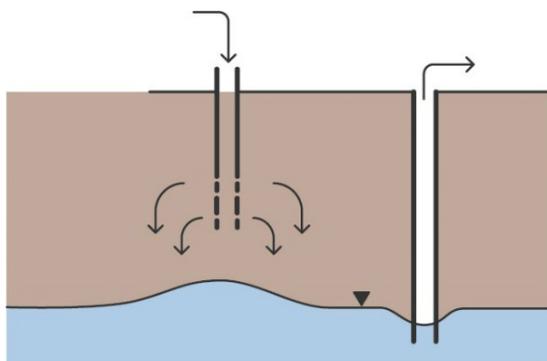


Descargas de agua de represas

El método de recarga de **descargas de aguas de represas** contempla la utilización de represas en ríos intermitentes para detener y liberar el agua lentamente aguas abajo, lo que coincide con la capacidad de infiltración a través del lecho del río al acuífero y, por ende, la recarga aumenta significativamente. De manera similar a los estanques de percolación, el acuífero debe tener suficiente permeabilidad para alcanzar la tasa de recarga objetiva y debe contener suficiente espacio de almacenamiento para aceptar la recarga adicional, sin perder agua que puede volver al río o crear problemas de anegamiento en la superficie.

La modificación del lecho del río para aumentar la recarga aguas abajo de los embalses puede hacer uso de la infraestructura existente para proporcionar capacidad de almacenamiento adicional y permitir que el almacenamiento en superficie se gestione de manera diferente, por ejemplo, contar con espacio adicional para fines de mitigación de inundaciones y para capturar flujos adicionales. La planificación de nuevas represas que toman en cuenta la capacidad de almacenamiento subterráneo (lograda mediante descargas de aguas de represas o a través de estanques de percolación), puede optimizar los costos de construcción, ya que una represa más pequeña utilizada en conjunto con RAG puede proporcionar la misma capacidad de almacenamiento que una represa más grande y cara.

3) Pozos



Pozo seco

Los **pozos secos**, también conocidos como pozos de la zona vadosa, pozos de gravedad o norias, son un ejemplo de una técnica de infiltración que usa pozos de gran diámetro para recargar un acuífero no confinado bajo gravedad. Este es un método útil para emplear cuando hay capas de suelos de baja permeabilidad (por ejemplo, ricos en arcilla) que están presentes debajo de la profundidad de excavación de las piscinas o galerías de infiltración. Los pozos secos también se pueden usar para recargar directamente a través de una zona profunda no saturada, de modo que el agua llegue a la zona saturada más rápidamente para observar una respuesta más inmediata de la capa freática. Los pozos secos requieren una fuente de agua con una calidad adecuada para reducir la incidencia de obstrucción.

Cuando se usa agua superficial, generalmente se requiere un proceso para reducir la turbidez, por ejemplo, tiempo de residencia en una piscina de decantación o humedal o la aplicación de filtración mecánica.

2.4.- Selección de método

El método elegido para la recarga depende de las condiciones específicas del sitio y no hay reglas definidas o soluciones únicas para cualquier escenario dado. En definitiva, la decisión sobre qué método aplicar implica un análisis entre una serie de factores que incluyen el costo, el suelo y las condiciones hidrogeológicas locales, la calidad de la fuente de agua y el área de tierra disponible, entre otros factores potenciales.

Es probable que el costo sea el criterio más relevante en la selección del método. Técnicas de infiltración que utilizan métodos de dispersión de agua en la superficie y sistemas dentro del cauce (por ejemplo, la modificación del cauce), son relativamente rentables en comparación con otros métodos. Ross y Hasnain (2018) informaron que los esquemas RAG que usan obras superficiales (por ejemplo, piscinas, canales etc.) para infiltración con agua no tratada tienden a ser más económicos, con costos nivelados^a de \$152 CLP/m³ recargado. En comparación, los esquemas RAG que usan pozos de recarga y que tienen un costo mayor en infraestructura, tienen costos nivelados de \$360 CLP/m³.

Por su parte, la presencia, el grosor y la profundidad de las capas de suelo de baja permeabilidad (por ejemplo, suelos ricos en arcilla) pueden influir en el tipo de método elegido. Para evitar la influencia de estas capas, la estructura de recarga necesita penetrar el suelo permeable. Las áreas en donde las capas de baja permeabilidad están poco profundas, por ejemplo, 0–2 m, cavar una piscina de infiltración o escarificar un lecho de río puede ser suficiente para permitir la recarga. La excavación de galerías de infiltración o zanjas a pocos metros de profundidad puede eliminar la capa de permeabilidad. En el caso en que las capas de permeabilidad estén a varios metros de profundidad, será poco rentable excavar grandes áreas y muy profundas, por lo tanto, resulta más adecuado hacer pozos secos (Tabla 4).

La calidad de la fuente de agua también puede jugar un papel en la selección del método (Tabla 4). En general, si la turbidez o la concentración de nutrientes de la fuente de agua es alta o variable, es probable que los métodos de inyección a través de pozos impliquen una colmatación u obstrucción rápida del pozo. En esta situación, se prefieren piscinas de infiltración que se pueden raspar o limpiar periódicamente. Las galerías de infiltración al ser subterráneas son más difíciles de limpiar que los sistemas de aguas abiertas, por lo que idealmente requieren agua de menor turbidez para evitar un mantenimiento costoso. Sin embargo, los pozos secos pueden ser la única alternativa factible si el espacio es limitado y/o las capas de baja permeabilidad se extienden más allá de las profundidades que pueden evitarse a través de cavar galerías o escarificar lechos de ríos. En este caso, se requieren niveles de tratamiento más altos, por ejemplo, usando filtros de arena o biofiltros, como también, se deben tomar medidas para limpiar periódicamente los pozos para eliminar los agentes de obstrucción.

La disponibilidad de terreno rentable también es importante puesto que los métodos fuera del cauce ocupan un área más grande, típicamente del orden de unas pocas hectáreas, en comparación con los métodos dentro del cauce contenidos dentro del curso del río y pozos, que requieren unos pocos metros cuadrados (Tabla 4). En las zonas urbanas, el terreno es relativamente más costosa que en zonas rurales, lo que favorece los métodos que utilizan el terreno de manera más eficiente. En las zonas rurales, donde los precios de los terrenos son generalmente más bajos, las técnicas de dispersión/distribución de agua (piscinas, zanjas, canales, riego, inundación controlada) en la superficie son generalmente las formas más rentables de recargar grandes volúmenes de agua.

a.- Los costos nivelados se definen como el nivel constante de ingresos necesarios cada año para recuperar la inversión, los gastos operativos y de mantenimiento, durante la vida útil del proyecto dividido por el volumen anual del suministro de agua. Ver Sección 5.1.2 para más detalles.

Tabla 4. Criterios de selección del método de recarga. Fuente: Elaboración propia.

Método de recarga	Costo de inversión	Baja permeabilidad de suelo	Requerimiento de calidad de agua	Superficie requerida
Fuera del cauce				
Piscinas de infiltración	*	X	**	***
Galerías de infiltración	***	✓	***	**
Tratamiento suelo-acuífero (SAT)	**	X	*	***
Canales de infiltración (existentes)	*	X	*	*
Zanjas de infiltración	*	X	*	**
Dentro del cauce				
Estanques de percolación	**	X	**	**
Escarificación del lecho del río	*	X	*	*
Represas subterráneas	***	X	*	**
Descarga de agua de represa	*	X	*	*
Pozos secos				
Pozos secos (de la zona vadosa)	***	✓✓	***	*

* Bajo; ** mediano; *** alto; X no adecuado para penetrar capas de baja permeabilidad; ✓ adecuado para penetrar capas poco profundas de baja permeabilidad; ✓✓ adecuado para penetrar capas profundas de baja permeabilidad.

La configuración y el tamaño de la obra dependerán de:

-  El método de recarga adoptado: en general, los métodos de recarga dentro del cauce son más baratos que los métodos de recarga fuera del cauce. Los métodos de recarga basados en pozos tienden a ser los más costosos.
-  La tasa de infiltración requerida: las tasas más grandes pueden requerir material con un mayor nivel de permeabilidad, trabajos de tierra más extensos y estructuras de recarga más grandes.
-  La necesidad de evitar las capas de baja permeabilidad: los costos de recarga generalmente aumentan con la profundidad. Si está disponible y es adecuado, el acuífero superficial tiende a ser más barato para recargar.
-  Área de infiltración: para infiltrar mayores volúmenes de agua generalmente necesitan una mayor superficie de infiltración; los métodos de recarga a través de pozos y métodos dentro del cauce tienden a requerir menos superficie.
-  Disponibilidad de terreno: las áreas urbanas tienden a tener costos más altos que las áreas rurales.

- Calidad de agua: algunos métodos de recarga son inherentemente más resistentes a la obstrucción; por ejemplo, los sistemas de tratamiento suelo-acuífero (SAT) son más fáciles de mantener y limpiar las capas de obstrucción que las galerías de infiltración. Los sistemas de recarga a través de pozos tienden a ser los más difíciles de manejar en términos de la colmatación y, por lo tanto, tienden a requerir una calidad de agua más alta.
- Facilidad de acceso: para la construcción, el mantenimiento y limpieza de las estructuras de recarga, con el objetivo de minimizar la colmatación.
- Necesidad de evitar las plagas de insectos (por ejemplo, la cría de mosquitos) o evitar la atracción de animales (por ejemplo, aves cerca de aeropuertos).

Algunos métodos de recarga dependen de características geomorfológicas específicas, por ejemplo:

- Dunas de arena y surcos (depresiones poco profundas que transportan agua principalmente durante tormentas de lluvia o deshielo).
- Represas subterráneas están mejor ubicadas donde hay diques o roca madre poco profunda debajo de ríos aluviales.
- Los estanques de percolación son más adecuados cuando hay restricciones en los valles de ríos aluviales.

Todos estos factores deben considerarse antes de seleccionar un método de recarga. La Tabla 4 puede ser utilizada como una guía aproximada. Los costos de investigación del sitio serán sustancialmente mayores para proyectos en áreas donde existe poca información y datos existentes sobre las características del subsuelo.

En algunos lugares donde existe más de un acuífero potencial (por ejemplo, geología en capas) puede haber más de una opción disponible para recargar y almacenar agua. Esto también podría incluir la posibilidad de transferir desde un acuífero poroso poco profundo que se llena estacionalmente, a un acuífero más profundo con la capacidad de almacenamiento estratégico a largo plazo para mitigar las condiciones de sequía. También puede ser deseable almacenar agua destinada a diferentes usos finales en acuíferos separados donde es más fácil para gestionar la calidad de agua.

Para obtener recomendaciones específicas de los criterios de diseño y construcción para los métodos de RAG mencionados, consulte las fichas descriptivas en la Guía Metodológica (CNR, 2020).

2.5.- Peligros potenciales

Esta sección entrega una visión general de algunos de los posibles peligros asociados con los métodos de RAG aplicables al uso de agua superficial para recargar acuíferos no confinados para usos de riego. Esta no es una evaluación exhaustiva, sino que sirve para ilustrar el nivel de riesgos asociados con este tipo de actividad RAG y entrega recomendaciones para las consideraciones de un marco de gestión apropiado. Se consideran y analizan por separado tres grupos generales de peligros asociados con las operaciones, salud humana y el medioambiente en las siguientes subsecciones.

2.5.1.- Peligros operacionales

Un proyecto RAG debe tomar en cuenta los posibles problemas operacionales para su sustentabilidad en el largo plazo. Estos peligros incluyen:

- obstrucciones de pozos o piscinas de inyección,
- pobre potencial de recuperación de aguas de recarga (disminuyendo la confiabilidad y continuidad del

suministro de la fuente de agua),

- 💧 interacciones con otros usuarios de agua subterránea, y
- 💧 gestión de residuos, tales como: agua de purga (agua de pozo estancada), material asociado a raspaduras de obras de recarga superficial y productos secundarios del tratamiento de agua.

Estos temas son de gran importancia para el éxito del esquema RAG, tanto para las partes interesadas como para los operadores, pero son de menor preocupación para los reguladores responsables de la protección de la salud humana y el medioambiente. En general, el mayor énfasis se aplica a las obstrucciones y la eficiencia de la recuperación del agua recargada, ya que estos resultan vitales para la viabilidad técnica y económica de los proyectos RAG y, por ende, para la viabilidad económica percibida de las investigaciones y pruebas.

A pesar de lo anterior, la operación de proyectos RAG debe tener en consideración la protección medioambiental, como, por ejemplo, barreras contra la intrusión de agua salina y la protección de los ecosistemas que dependen de agua subterránea. Las Guías Australianas de RAG contienen información detallada sobre estos temas, y también existen varios casos internacionales revisados en la última década, incluyendo la efectuada por el Grupo de Trabajo de Obstrucción para la Recarga de Acuíferos Gestionada (Managed Aquifer Recharge Clogging Working Group) de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (International Association of Hydrogeologists) (Martin, 2013).

2.5.2.- Peligros para la salud humana y el medioambiente

A fin de identificar y gestionar todos los peligros para la salud y el medioambiente, y los riesgos asociados con un sistema RAG, las partes interesadas deben tener un conocimiento profundo y documentado del sistema completo de RAG (ver Tabla 2 y Figura 8), desde las fuentes de agua recargada hasta los usos del agua recuperada y las implicaciones del agua recargada sobre el acuífero.

El primer paso en la evaluación de riesgo es la creación de un diagrama de proceso que indique claramente todos los componentes del sistema RAG. Esto debiera ser hecho por personas con un conocimiento detallado del sistema y los usuarios finales. Es necesario analizar la información acerca de la fuente de agua y la composición del agua subterránea nativa para buscar tendencias o peligros que puedan influir sobre la calidad final del agua recuperada. El análisis debiera incluir el posible efecto de potenciales eventos peligrosos sobre los sistemas de tratamiento que puedan afectar la salud humana y el medioambiente, como:

- 💧 tormentas
- 💧 desborde de alcantarillas
- 💧 cortes de energía
- 💧 disposición ilegal de contaminantes

El método utilizado para identificar y evaluar los peligros debe ser estructurado, consistente y exhaustivo. Generalmente, la identificación de peligros y las evaluaciones de riesgo implican los siguientes pasos que ayudan a clasificar el sistema RAG:

- 💧 identificación de peligros
- 💧 respuesta de dosis
- 💧 evaluación de exposición

caracterización de riesgo

Los tipos de peligro para la salud humana y el medioambiente, derivados de la fuente de agua o los procesos de tratamiento, se describen en mayor detalle a continuación en la Tabla 5.

Tabla 5. Resumen de peligros claves en la fuente del agua, agua subterránea y materiales de los acuíferos, para proyectos de recarga de acuíferos, con ejemplos de peligros específicos, riesgos y métodos preventivos. Fuente: modificado de NRMMC-EPHC-NHMRC (2009).

Peligros	Origen ¹	Ejemplos	Ejemplos de Riesgo	Medidas preventivas
Patógenos	F, (S)	Protozoos	Brote de enfermedad humana, ej: Criptosporidiosis	Un adecuado tiempo de residencia del acuífero
Químicos inorgánicos	S, A, F	Arsénico	Envenenamiento por arsénico	Control del Eh durante la recarga (evitar la movilización de metales pesados) ²
Salinidad y sodicidad	S, (F)	Salinidad	Efectos en la salud humana, como presión arterial alta y riesgo de enfermedades cardíacas	Aumentar el volumen de agua dulce recargada
Nutrientes	F, (S)	Nitrógeno	Eutrofización del ambiente	Pretratamiento del agua (ej: lodo activado)
Químicos orgánicos	F, (S)	Pesticidas	Efectos subletales en el ambiente	Excluir subcuencas propensas
Turbidez y partículas	F, (S)	Sólidos suspendidos	Desinfección ineficaz	Pretratamiento del agua (ej: humedal)
Radionucleidos	S, A, (F)	Radiación alfa	Intoxicación por radiación	Selección de acuíferos (evitar acuíferos)
Presión, caudales, volúmenes y niveles.	F	Anegamiento	Inundaciones de los sótanos en viviendas	Reducir la presión de inyección
Migración de contaminantes en rocas fracturadas y acuíferos kársticos	F, (S)	HAP ³	Acceso de forma rápida y directa a otro usuario	Pretratamiento o extensión de la zona de atenuación (exclusión)
Disolución de acuíferos y estabilidad de acuitardos y pozos.	F, A	Exceso de recuperación de arena	Colapso del pozo	Controlar el pH de la fuente de agua (evitar la disolución)
Impactos en los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas	F, A	Niveles fuera del rango histórico	Impactos ecológicos en los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas.	Evitar la proximidad a los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas
Gases de efecto invernadero	F	Uso excesivo de energía	Calentamiento global	Sustituir tratamientos pasivos por activos

¹ A = minerales del acuífero; S = agua subterránea; F = fuente de agua para recarga. Los paréntesis muestran una posible fuente secundaria.

² Eh = medición del potencial redox – la propensión a las reacciones de oxidación y reducción.

³ HAP = (Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos).

Los peligros pueden incluir:

- elementos que constituyen la fuente del agua o el agua subterránea,
- productos de reacciones entre la fuente del agua, el material del acuífero y el agua subterránea,
- peligros geotécnicos o hidrogeológicos, y
- elementos que constituyen los productos secundarios del tratamiento del agua y las operaciones de mantenimiento de RAG.

Por ejemplo, la recarga de agua aeróbica de un río a un acuífero anaeróbico podría oxidar la pirita, y por lo tanto, al restablecer las condiciones de reducción, desplazar concentraciones peligrosas de arsénico. La identificación de las causas o fuentes de todos los peligros permitirá realizar una selección informada de las medidas preventivas apropiadas. En el ejemplo anterior, una opción para reducir el riesgo es eliminar el oxígeno del elemento inyectado, a fin de inhibir la oxidación de la pirita. En caso de que niveles peligrosos de químicos emanaran desde un punto específico de la cuenca, una medida preventiva obvia sería controlar la fuente que provoca la contaminación, tales como el uso de pesticidas en cuencas rurales o la falla de una planta de tratamiento de aguas servidas, de manera de reducir o eliminar los eventos peligrosos de descarga y así predecir los plausibles cambios en las concentraciones de pesticidas u otros compuestos químicos peligrosos.

Debido a que muchos de estos peligros no tienen una relación entre la respuesta y la dosis establecida, se pueden aplicar métodos alternativos, por ejemplo, la determinación de valores de referencia de químicos orgánicos descritas en NRMCC-EPHC-NHMRC (2008). La caracterización del acuífero será necesaria para estimar las implicaciones del agua recargada y su potencial para afectar a otros usuarios del agua subterránea o de ecosistemas que dependen de agua subterránea. Es posible usar varios métodos cualitativos de priorización del riesgo para su caracterización. No obstante, las evaluaciones de riesgo cuantitativo se aceptan como método estándar para determinar los riesgos impuestos por los peligros microbianos cuando las relaciones entre la respuesta y la dosis están disponibles.

2.6.- Situaciones donde la recarga no es viable

La recarga de acuíferos gestionada solo es factible si hay un acuífero adecuado, es decir, que puede aceptar un volumen suficiente de agua a una tasa de recarga suficiente para que los beneficios justifiquen los costos de establecer el proyecto. Si no se detecta un acuífero adecuado dentro de la profundidad de perforación asequible y los estudios hidrogeológicos locales no revelan un acuífero adecuado cerca de la fuente o una demanda suficiente de agua para permitir su transferencia económica, entonces la RAG no es factible.

El volumen anual promedio de recarga adicional que se puede recuperar y el valor del uso del agua, determina cuánto se puede gastar en un proyecto de recarga viable. La buena calidad del agua, las altas tasas de infiltración y los altos rendimientos de los pozos generalmente favorecen los proyectos económicos de RAG.

No se recomienda la RAG si el riesgo ambiental no puede reducirse a un nivel aceptable mediante medidas preventivas económicamente viables, teniendo en cuenta todos los costos y beneficios del proyecto. Los proyectos marginalmente factibles, es decir, aquellos con solo pequeños beneficios netos para el ejecutor, es preferible no abordarlos en una primera etapa.

Deben evitarse las áreas de afloramiento de agua subterránea y las ubicaciones con una capa freática poco profunda, ya que es probable que la recarga adicional cause anegamiento, salinización o problemas geotécnicos para edificios u otras obras de infraestructura. A menos que el proyecto RAG sea una parte integral de una propuesta para una mayor extracción de agua, dichos sitios deben evitarse. Sin embargo, el manejo de estas

situaciones está muy limitado y es probable que las fluctuaciones de la capa freática excedan significativamente las que ocurren de forma natural.

Si la capacidad de almacenamiento disponible de un acuífero ya está totalmente comprometida con otras operaciones de RAG, entonces la recarga adicional de acuíferos es poco práctica y tendría un efecto negativo en el rendimiento de las operaciones existentes. Por otra parte, la RAG también requiere una fuente de agua de recarga durante el tiempo suficiente para garantizar que el volumen recuperable justifique los costos de establecimiento del proyecto.

Capítulo II

3.- Experiencia internacional

A fin de asegurar que la RAG siga generando los beneficios esperados y evitando fallas, es crucial comprender las oportunidades y limitaciones que conlleva. Esto se logra fijando políticas y guías con bases sólidas para asegurar que la RAG se implemente de tal modo que sea posible manejar los riesgos y el esquema opere en forma efectiva protegiendo la salud humana y el medioambiente.

Un primer paso clave es la reducción de las incertidumbres que rodean la evaluación, diseño y operación del esquema, en particular con respecto de la formulación de una evaluación de riesgo y un marco de gestión apropiados. Una correcta metodología para lograr la mejor caracterización y cuantificación de los riesgos asociados con los esquemas RAG antes de la puesta en marcha, se propone la construcción de un esquema piloto, que reduce las incertidumbres y los costos de investigación y facilita el rol de las agencias regulatorias. Este estudio revisa los modelos de gestión internacionales para comparar, contrastar y criticar sus aplicaciones de RAG, a fin de seleccionar los mejores elementos aplicables a la realidad chilena.

Cabe aclarar que este estudio se refiere tanto a la evaluación como a la gestión de riesgo. La evaluación de riesgo es un proceso para estimar la presencia y severidad de éste, mientras que la gestión incorpora la comprensión, evaluación y priorización del riesgo y la aplicación de estrategias apropiadas para reducirlo (Deere et al., 2001). La noción de gestión proporcional con el riesgo y el concepto del agua adecuada para el propósito, son importantes de reconocer. Para los proyectos RAG simples y de riesgo bajo, los costos y complejidades de los sistemas de gestión deben minimizarse. En el caso de los proyectos de riesgo más alto y con una mayor incertidumbre, como el relacionado con agua potable, se requiere de sistemas de gestión más acabados, incluyendo tratamiento para hacer que el agua sea adecuada en su propósito. Los costos más altos asociados con estos sistemas RAG se justifican cuando los costos de las alternativas de suministro de agua también son más altos.

En las siguientes secciones, se discuten los enfoques de gestión sobre una base de país a país. En la mayoría de los países no existen guías específicas para la RAG disponibles y el enfoque por defecto es la adopción de los métodos de planes de seguridad hídrica que propone la Organización Mundial de la Salud (OMS) (WHO, 2006). Cuando es posible, se evalúan las guías de RAG específicas para un país en términos de lo apropiadas que resultan, considerando los tipos de riesgos implicados, es decir, estratégicos, operacionales, medioambientales, regulatorios y para la salud humana, y el nivel de sostenibilidad para entregar guías específicas para la gestión de riesgos asociados con la RAG.

3.1.- Comparación de guías internacionales para la recarga de acuíferos

Aunque se han establecido guías para reusar agua en todo el mundo, pocas tienen requerimientos específicos relacionados con la RAG. En el trabajo realizado por Dillon et al. (2018) se compiló una comparación global del uso internacional de RAG. Observaron que los volúmenes de recarga de RAG informados ("mejores estimaciones"), están sujetos a una incertidumbre considerable. Una razón que contribuye a esto es la falta de regulación clara, de monitoreo y reporte en varios países donde se ha adoptado la RAG como técnica de gestión para aguas subterráneas. A nivel internacional, las guías existentes para consideraciones específicas de RAG tienen los siguientes aspectos:

- 1.- requerimientos de calidad de agua de recarga (en especial si deriva de agua reciclada),
- 2.- diseño, operación y mantenimiento de RAG, y
- 3.- usos de agua recuperada (y niveles requeridos de tratamiento para la protección de la salud humana).

Se observaron que es evidente que los marcos de gobernanza necesitan atención en varios países para asegurar que la RAG sea sostenible y proteja la calidad del agua subterránea. El monitoreo de las operaciones existentes y

el mantenimiento de un sistema de información público que recolecte información en terreno, reportes y datos, es un punto de partida fundamental para asegurar las operaciones efectivas y el desarrollo de la información que respalde la aplicación futura de RAG, incluyendo investigación y gobernanza.

A fin de comprender las actuales guías de mejores prácticas de RAG, se discuten tres enfoques; internacional, australiano y estadounidense; los que contienen criterios e información de RAG más detallados en las siguientes subsecciones.

3.1.1.- Internacional

Los enfoques internacionales para gestionar la RAG han surgido de la gestión del agua relacionada con los procesos de alimentación y han sido abordados por la Organización Mundial de la Salud (OMS). La OMS ha producido tres ediciones de guías para reusar agua (WHO, 2006) que son relevantes para la RAG. Estas producciones incluyen el informe de vanguardia sobre riesgos para la salud en recarga de acuíferos que usan agua reciclada (Health Risks in Aquifer Recharge using Reclaimed Water, (WHO, 2003)). En particular, la OMS reconoció que los enfoques basados en riesgo que ya estaban bien desarrollados en la industria de los alimentos, tras aplicar el sistema Análisis de Peligros y Punto de Control Crítico (Hazard Analysis and Critical Control Point, o HACCP), eran necesarios en la industria hídrica y en especial donde se realizara reciclaje de aguas servidas mediante acuíferos.

El método HACCP entrega un enfoque sistémico para analizar riesgos en una cadena de procesos, por ejemplo, la captura, tratamiento y entrega de agua para los clientes, con la implementación de las medidas necesarias para evitar peligros o reducirlos a un nivel aceptable. Un componente clave para la gestión de dichos sistemas es el establecimiento de puntos de control crítico. Un Punto de Control Crítico (CCP) se define como “una actividad, procedimiento o proceso donde se puede aplicar un control y que es esencial para prevenir los peligros que implican riesgos altos o para reducirlos a niveles aceptables” (NRMMC-EPHC-AHMC, 2006). Los CCP requieren que los límites para los parámetros operacionales definan la eficiencia del desempeño de un sistema que pueda monitorearse con una frecuencia suficiente para asegurar que las fallas no resulten en una transferencia de riesgos al usuario final, mediante procedimientos definidos para acciones correctivas. Esto es diferente de los puntos de monitoreo operacional y de calidad, donde el objetivo es verificar el desempeño de los procedimientos y procesos y cumplir con los criterios de objetivos de calidad de agua, respectivamente (NRMMC-EPHC-AHMC, 2006).

Aunque HACCP entrega una estructura genérica sólida para la gestión de riesgo, existen algunas diferencias importantes entre el contexto dentro del cual se desarrollaron los protocolos originales. Estas disparidades limitan la aplicación potencial de HACCP a los esquemas RAG. Por ejemplo, existen oportunidades limitadas dentro de un sistema RAG para implementar las herramientas estratégicas claves de un HACCP, que son la asignación de CCP y los límites cruciales asociados. Dichos controles son aplicables principalmente a los procesos de tratamiento, lo cual es una limitación para la gestión del riesgo según diferentes autores, como por ejemplo, Hellier (2000). Un CCP común usado en la RAG basado en inyección con pozos, es el cierre automático de las bombas de inyección, una vez que se ha excedido cierta presión. Esto no solo previene un daño a las bombas y/o a la infraestructura, sino que además protege tanto, a los usuarios cercanos al pozo de los impactos hidráulicos, como la integridad de la matriz del acuífero (Gonzalez et al., 2014).

Otra limitación del enfoque HACCP es la tendencia a centrarse en un solo punto de control. En los esquemas RAG existen varias fuentes de peligro y varias etapas en el esquema durante las cuales se puede introducir un peligro (ver Tabla 2), por lo que un enfoque con una sola barrera de control resulta inapropiado. La idea de identificar un solo CCP en perjuicio de un rango de medidas preventivas aplicables en otras etapas puede producir un plan de gestión de riesgo que subvalore las medidas de control alternativas. Esto es especialmente importante ya que, por lo general, existe un rango de controles implementables para evitar riesgos, por ejemplo, minimización de exposición. El mismo almacenaje en acuíferos puede ser una excelente barrera para varios riesgos, tales como los patógenos y químicos orgánicos, pero a la fecha es difícil validarlo. Por ende, el sistema HACCP por sí solo es ineficaz y el enfoque con barreras múltiples es más apropiado para los sistemas RAG.

Por su parte, Swierc y otros autores (2005) Storage, Transfer and Recovery (ASTR) demostraron la manera en que HACCP podría ser aplicado a un esquema RAG de aguas lluvias, para ser usado, principalmente, para riego municipal. Los componentes del esquema que requerían medidas de control, pero no pudieron clasificarse como CCP, se clasificaron finalmente como puntos de control de calidad (Quality Control Points, QCP). En estos puntos, las medidas preventivas podrían implementarse y monitorearse, permitiendo un enfoque de barrera múltiple. No obstante, cabe destacar que no se encontró una pauta específica para ayudar a operadores nuevos o menos experimentados que pudiese designarse como QCP. Gonzalez et al. (2014) mostraron un estudio de caso donde los CCP y los QCP se desarrollaron para un esquema urbano de almacenaje y recuperación en acuífero de aguas lluvias recuperadas, en donde se fijaron niveles de activación por salinidad y un indicador de patógeno. El reporte demostró un método transferible para fijar límites de activación de calidad de agua. Otros parámetros de calidad de agua podrían seguir los mismos principios.

El HACCP ha sido aplicado a varios esquemas RAG en diferentes países (por ejemplo, Swierc et al. (2005) Storage, Transfer and Recovery (ASTR y Gonzalez et al. (2014)), demostrando que cuando se usan en conjunto con un enfoque de barrera múltiple, es posible generar un marco robusto de gestión de riesgo.

La OMS también desarrolló el enfoque HACCP por medio del Plan de Seguridad Hídrica. Ahí se reconoce la consideración de un rango más amplio de medidas preventivas y de control. También considera el concepto de "riesgo" en vez del "peligro desde el origen" y, por ende, incorpora características de respaldo al marco de gestión de riesgo usando un enfoque de barrera múltiple.

Dominguez-Chicas y Scrimshaw (2010) realizaron una evaluación de riesgo usando el enfoque WSP para un esquema RAG al identificar y evaluar el peligro, caracterizar el riesgo para el peligro, y ofrecer recomendaciones para su monitoreo. Dicha evaluación siguió los primeros tres pasos del proceso WSP y generó datos respecto del nivel de complejidad del proyecto con respecto de los peligros potenciales, las incertidumbres que rodean su ocurrencia o severidad, y los posibles requerimientos de monitoreo. Descubrieron que, si bien WSP entrega una gestión sistemática, efectiva y un marco de monitoreo, el enfoque precautorio requerido por las guías puede resultar en una gran proporción de parámetros tratados como de alto riesgo, ello debido a la incertidumbre respecto de la frecuencia y severidad de los eventos peligrosos y la eficacia de la mitigación. Las incertidumbres que rodean a la RAG son por lo general más altas que para otros esquemas de suministro de agua, por lo que la adopción de un enfoque basado en WSP puede entregar un sistema de gestión de riesgo demasiado conservador y complicado. Finalmente, igual que HACCP, el enfoque WSP solo considera los riesgos para la salud humana, es decir, la calidad del agua, mientras que los riesgos operacionales y medioambientales no se consideran en forma explícita. En la Sección 2.4, se discute los principales peligros.

3.1.2.- Australia

Actualmente, las Guías Australianas para la RAG (NRMHC-EPHC-NHMRC, 2009) son las únicas guías basadas en gestión de riesgo que siguen el enfoque WSP de la OMS y aseguran la protección de la salud humana y el medioambiente, además de considerar los riesgos operacionales. Las guías de RAG australianas recomiendan una evaluación simplificada de los proyectos a escala pequeña con riesgos inherentes bajos. Las evaluaciones simplificadas son necesarias porque el monitoreo puede ser un componente de costo relevante para los proyectos pequeños y porque un diseño efectivo puede manejar riesgos en casos particulares, sin la necesidad de depender de operadores capacitados para proteger la salud humana y el medioambiente. En estos casos, el compromiso con el uso responsable y la gestión de la calidad del agua reciclada queda en manos del regulador local, en vez que solo en el proponente del proyecto. Es necesario incorporar medidas preventivas al sitio de la recarga y el diseño del proyecto para asegurar una protección sostenida, por ejemplo, permitiendo cambios en la pertenencia de la propiedad. Para ser elegible a la evaluación simplificada, un proyecto de recarga artificial de acuífero debería cumplir con los siguientes criterios:

- El agua fuente proviene aguas de escorrentía del techo de una sola vivienda.

- 💧 El agua recuperada se usa para riego u otro uso no potable especificado por la autoridad local.
- 💧 El acuífero:
 - está capacitado para almacenar agua adicional,
 - no haber sido identificado como afectado por contaminación industrial o agrícola en la medida en que prevenga su uso,
 - no sea usado, ni sea posible de ser usado, para el suministro de agua potable en la localidad cercana, y
 - está confinado y si no está confinado debe tener una napa de agua de más de 4 m de profundidad en áreas rurales o 8 m de profundidad en áreas urbanas o según lo haya especificado la autoridad local.

Por ejemplo, las capturas en techos de casas pueden usarse para generar suministro de agua no potable en acuíferos con características prescritas, al incorporar características de diseño que compensen los niveles bajos asumidos de la competencia del operador. Esta disposición reconoce que los costos de monitoreo de los proyectos de pequeña escala pueden ser prohibitivos. Se requiere que una agencia de recursos hídricos u otro regulador o grupo de usuarios de agua subterránea se haga responsable por monitorear los efectos acumulativos, como, por ejemplo, subida excesiva de la napa de agua, que resulten de operaciones pequeñas múltiples y que implemente medidas preventivas si fueran necesarias.

Para todos los otros esquemas RAG, existen cuatro etapas de evaluación:

- 💧 Evaluación de Nivel de Entrada: implica la recolección de información, que, por lo general, se encuentra disponible sin problemas dentro del sitio del proyecto, y realizar una evaluación básica de documentos para determinar si el proyecto es viable y el grado probable de dificultad. Esto indica la medida de las investigaciones en terreno requeridas para el paso 2. Los Anexos 2.1 y 2.2 contienen un ejemplo de la evaluación simplificada y la evaluación de nivel de entrada, respectivamente.
- 💧 Evaluación de Riesgo Máximo: implica las investigaciones de línea base y los datos específicos de sitio que revelan los riesgos inherentes asociados con una lista de verificación de peligros claves (Tabla 5). Esta evaluación revelará si se requieren medidas preventivas.
- 💧 Evaluación de Riesgo Residual (antes de la puesta en marcha): identifica las medidas preventivas propuestas y los procedimientos operacionales que asegurarán los riesgos residuales aceptablemente bajos para la salud humana y el medioambiente, a partir de la construcción y la puesta en marcha del proyecto. Esta evaluación también informa de los peligros o aspectos que requieren monitoreo de validación durante las pruebas de la puesta en marcha.
- 💧 Evaluación de Riesgo Residual (operacional): se basa en los resultados de las pruebas de puesta en marcha y determina si la operación actual del proyecto tiene riesgos residuales aceptablemente bajos para la salud humana y el medioambiente. Esta evaluación también informa el plan de gestión de riesgo, incluyendo tipos y niveles de verificación y el monitoreo para la operación en curso del proyecto.

Una Evaluación de Riesgo Máximo evalúa el riesgo ante la ausencia de alguna medida preventiva, mientras que una Evaluación de Riesgo Residual evalúa el riesgo con la presencia de dichas medidas. Es posible que las Evaluaciones de Riesgo Residuales también se apliquen a las actividades de recarga que ya están en operaciones, pero que aún no han sido evaluadas. Debido a que identifican las medidas de prevención ya existentes y los procedimientos operacionales, es posible que se evalúen los datos de monitoreo de verificación para determinar si demuestran una protección suficiente de la salud humana y el medioambiente.

Las Guías Australianas para la RAG están estructuradas alrededor de 12 riesgos o peligros identificados en los esquemas RAG y entregan sugerencias para la manera de prevenir o minimizar su ocurrencia a un nivel aceptable. Los primeros 7 riesgos se refieren a peligros relacionados con la calidad del agua (ver Tabla 5).

Estos peligros incluyen: patógenos, químicos inorgánicos, salinidad y sodicidad; nutrientes (nitrógeno, fósforo y carbono orgánico), químicos orgánicos, turbidez y partículas, así como radionucleidos.

Las guías de RAG australianas difieren del enfoque WSP de las OMS, ya que también abordan peligros específicos para la RAG asociados con presión, tasas de flujo, volúmenes y niveles de agua subterránea, migración de contaminantes en roca fracturada y acuíferos cársticos, disolución de acuíferos y estabilidad de pozos y acuitardos, ecosistemas dependientes de acuíferos y aguas subterráneas, y consideraciones de energía y gases de efecto invernadero (ver Tabla 5).

Cada uno de estos riesgos para la salud humana y el medioambiente, incluyendo el acuífero receptor, pueden ocurrir dentro de cada componente del sistema RAG. Finalmente, estas evaluaciones de riesgo se usan para el desarrollo de un plan de gestión de riesgo para la RAG que implica 12 elementos fundamentales (Figura 9). Aunque los 12 elementos no son necesariamente secuenciales, deben analizarse en su totalidad para asegurar que el plan final de gestión de riesgo de RAG sea acabado.

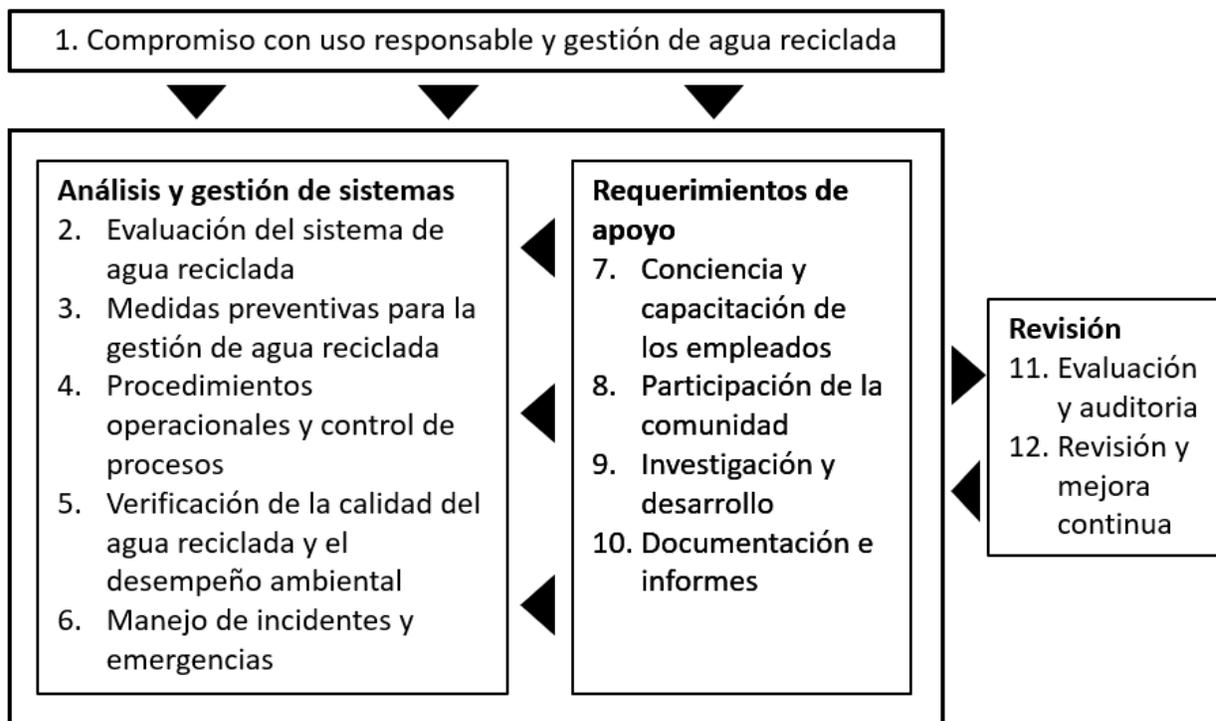


Figura 9. Marco de gestión de calidad del agua Fuente: NRMCC-EPHC-NHMRC (2009).

Se ha trabajado con las guías de RAG australianas durante una década y están bien documentadas. Por ejemplo, Page et al. (2009; 2010b; 2010a) groundwater quality from nearby existing wells and catchment characteristics. The second assessment by Page et al. (2008) aplicaron las guías de RAG australianas a un sitio RAG urbano con aguas lluvias en el sur de Australia para identificar los peligros prioritarios más altos y evaluar los riesgos generados por los doce tipos de peligro. La evaluación de riesgo consideró la fuente del agua, el tratamiento, los posibles cambios durante el almacenaje en el acuífero y las etapas finales de tratamiento, mientras que el marco se usó con éxito para entregar un enfoque de etapas para evaluar y manejar los riesgos.

Las Guías Australianas entregan una dirección científica para el desarrollo de proyectos RAG y dan a las partes interesadas una opinión respecto del alcance del trabajo requerido para que el esquema sea exitoso. En tal sentido, ayudan a asegurar que las decisiones respecto a dónde enfocar el esfuerzo se basen en una comprensión informada del siguiente nivel de investigación necesario, ya que el costo aumenta a medida que avanza la

investigación. Las guías incluyen una evaluación de entrada donde se analiza el tipo y la extensión del esquema, la existencia de una fuente de agua y un acuífero adecuado, el posible uso final, los valores medioambientales, la capacidad de gestión y la compatibilidad con los planes de gestión de agua subterránea. Esta etapa es única para este marco y entrega información importante acerca del posible nivel de dificultad de un proyecto antes de comenzar un trabajo más detallado. Esto es importante, pues permite un desarrollo en etapas y separa estas guías de los marcos HACCP y WSP más generales, puesto que permite abandonar el proyecto, si fuese necesario, en una etapa temprana, lo que ahorra costos y recursos.

3.1.3.- India

India es un líder internacional en la recarga artificial (4 km³/año, CGWB (2005)) para rellenar las napas de agua subterránea y sostener los suministros de agua esenciales. La aceptación de la mejora de recarga ha sido extraordinariamente exitosa en términos volumétricos y ha respaldado gran parte de la producción agrícola y a muchas comunidades que de otro modo no serían sostenibles. Las oportunidades son abundantes y se han identificado 85 km³/año de escorrentía excedente para aumentar la recarga de agua subterránea en la versión revisada del Plan Maestro para Recarga Artificial de Agua Subterránea en India (CGWB, 2013).

El manual del gobierno de la India para la recarga artificial (CGWB, 2007) especifica la manera de planificar, diseñar, monitorear niveles y calidad del agua, y evaluar los aspectos económicos del aumento de la recarga, pero se limita a las estructuras de recarga de lecho de río y la recolección de aguas lluvia urbana. Debido al considerable déficit de datos y las limitaciones para su recolección, se desarrolló un enfoque simplificado para mejorar los esquemas en India. Las guías acabadas, basadas en matrices de riesgo requieren de datos sustanciales, por lo que se generó una guía 'base' para gestionar la calidad del agua para la RAG en India, producida específicamente para las fuentes de agua. La guía se basó en observaciones en terreno fáciles de aplicar y en mediciones dentro de un marco agua-seguridad-planificación aplicado a nivel de villa (Dillon et al., 2014). El documento es un paso hacia suministros de agua más seguros y una mayor protección para el agua subterránea que la ofrecida por las prácticas actuales, pero sin el rigor de la adquisición de datos para respaldar una evaluación de riesgo necesaria para garantizar la seguridad y no es posible confirmar que el agua recuperada será segura para sus usos deseados, en especial para beber, sin más tratamientos.

Los esfuerzos iniciales en la aplicación de las guías de RAG australianas para evaluar el riesgo en los proyectos de recarga artificial en India (y China, México, Sudáfrica y Jordania) por parte de hidrogeólogos con un profundo conocimiento de los proyectos locales, encontraron que los componentes de la evaluación de entrada de las Guías Australianas (Anexo 2.2) eran útiles y entregaban un camino sistemático para identificar los problemas claves que se debían abordar (Dillon et al., 2010). No obstante, se determinó que la evaluación de riesgo cuantitativa necesitaba demasiados datos y que los datos de calidad del agua necesarios para completar la evaluación no estaban disponibles en el contexto indio, en especial para los patógenos microbianos. Al desarrollar las guías para India se decidió en una etapa temprana adaptar la evaluación de entrada australiana, la que consiste en una evaluación de viabilidad y una evaluación de grado de dificultad. Sin embargo, por sí sola, ésta no analiza las causas de los problemas con la calidad del agua fuente para recarga, por lo que no es posible sugerir medidas protectoras. El estudio sanitario de la OMS o el enfoque de inspección es útil para la identificación sistemática de posibles peligros y eventos peligrosos y complementa el monitoreo de la calidad del agua para la protección de la calidad del agua potable (WHO, 2012). Se incorporó el enfoque del estudio sanitario de la OMS con la evaluación de entrada australiana a fin de producir un plan de seguridad hídrica proporcional con las guías de agua potable de la OMS (WHO, 2011), ello según se aplican a sistemas de pequeña escala (Davison et al., 2005; WHO, 2012).

Este enfoque integrado (Dillon et al., 2013) se aplicó a varios proyectos RAG en India para determinar la relevancia del método. Sin embargo, ante la ausencia de datos de calidad del agua, no se puede indicar que el enfoque haya sido validado y que su aplicación garantizará la seguridad, pero sí es posible aseverar con confianza, que la aplicación de estas guías, que requieren solo de información básica fácilmente observable, hizo más segura la recarga.

Dillon et al. (2014) desarrollaron este enfoque basándose en las guías de RAG australianas para entregar pasos que pudieran aplicar personas sin conocimientos especializados en RAG en villas de la India, a fin de mejorar la protección de su acuífero de la contaminación que surge de las operaciones de recarga. Estas guías siguen el enfoque WSP de la OMS y usan una lista de verificación simple para hacer el agua subterránea lo más segura posible, basándose en observaciones sencillas. Estas guías no son apropiadas para sistemas con mayores riesgos que usan agua de calidad cuestionable o para usos de exposición humana, como el agua potable; esto requiere que el análisis de la calidad del agua incluya una evaluación de riesgo e implemente una gestión acorde, incluyendo la selección de cursos de tratamiento de agua para garantizar la seguridad del agua. Los pasos involucrados en la aplicación de las guías se entregan en la Figura 1. El Anexo 2.4 incluye guías diagramáticas y tabulares para una evaluación simple, una evaluación de viabilidad, estudios sanitarios y evaluación de acuífero.

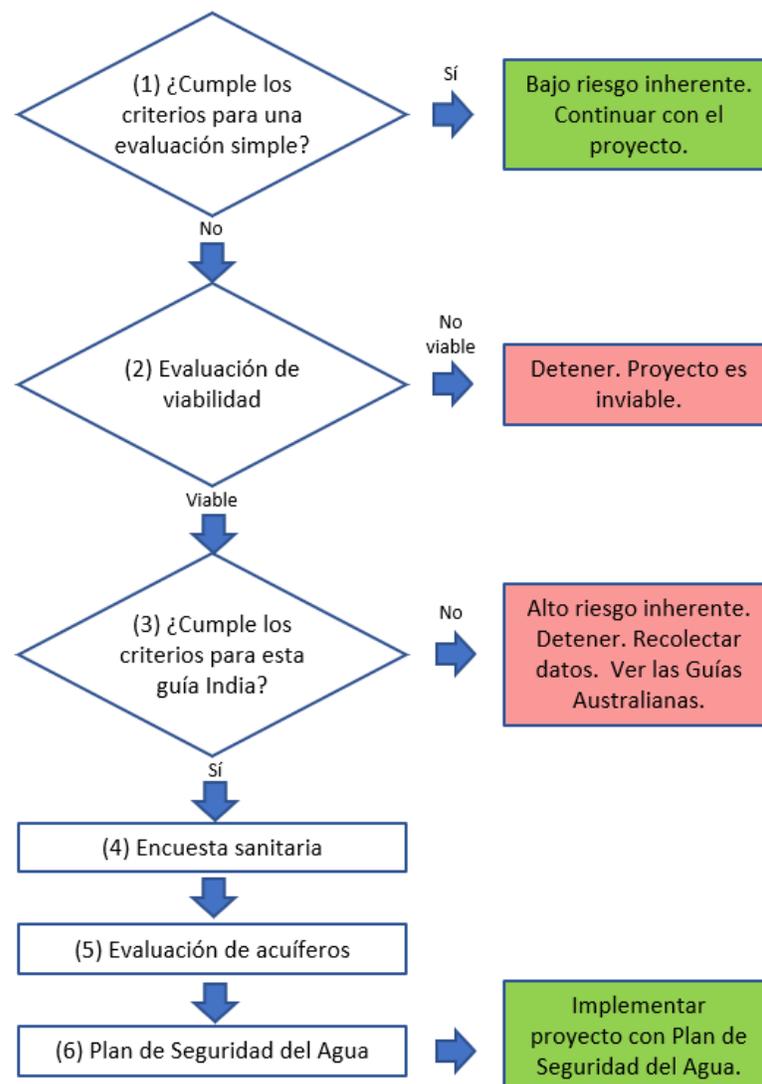


Figura 10. Diagrama de los pasos incluidos en la aplicación de guías India para la RAG, incluyendo implementación de plan de seguridad de agua. Fuente: Dillon et al. (2014).

1.3.4.- California

En el estado de California, se ha practicado la RAG desde el año 1865, sin embargo, estos esfuerzos han sido insuficientes para satisfacer la creciente demanda de agua, principalmente la demanda del sector agrícola. Durante los períodos de sequías, las extensas áreas agrícolas del centro de California dependen del agua subterránea para su riego. Entonces, es en estas regiones, donde la acumulación de agua en los acuíferos, a través del almacenamiento subterráneo, debe ser una parte esencial de la práctica de la gestión del agua (Sandoval-Solis et al., 2010).

El agua de los acuíferos es un componente importante en el abastecimiento de agua en California, sin embargo, este ha sido históricamente deficiente en su manejo y medición a nivel estatal. El uso de aguas subterráneas alcanza alrededor del 38% del total de agua utilizada en California, tanto en comunidades como zonas agrícolas. En 2013, el 20% del agua destinada a agricultura provenía de los acuíferos (Bruno, 2017).

El agua de los acuíferos también juega un rol importante en la reducción del riesgo a la sequía, ya que actúa como amortiguador de las variables climáticas que provocan variaciones en el abastecimiento de agua superficial. En el valle central, el agua superficial tiene su origen en el deshielo de nieves en la Sierra Nevada y es transportada a través de la infraestructura existente. En años donde existe una disminución de las nevadas, también disminuyen las aguas superficiales en el valle y subsecuentemente el agua subterránea se bombea a una mayor tasa que la recarga para suplementar o mantener la producción agrícola. Esto incrementa el riesgo de disponibilidad del recurso a futuro, los costos de bombeo, subsidencia del suelo, baja calidad de agua, entre otras problemáticas. Bajo este escenario, urge una necesidad por mayor regulación sobre su uso y una definición más precisa sobre los derechos de uso de las aguas subterráneas.

Es así como en el año 2014, después de algunos años de sequía, se aprueba la Ley de Gestión Sostenible de Aguas Subterráneas (SGMA) por la legislatura de California con el fin de otorgar un marco de referencia al manejo de aguas subterráneas a nivel estatal para las agencias involucradas y a nivel de cuencas, para coordinar la gestión de la información (Beganskas y Fisher, 2017) mitigating the negative consequences of persistent groundwater overdraft. Distributed stormwater collection (DSC. Específicamente, la SGMA tiene como objetivo volver las aguas subterráneas a su equilibrio, es decir, rendimiento sostenible para 2040. Con el fin de terminar con el sobreuso del agua subterránea, la SGMA organiza los planes de gestión de cuencas e identifica aquellas que presentan prioridad de recuperación debido a su sobreuso, para que alcancen los objetivos de sostenibilidad más rápidamente. Con la ayuda de SGMA, las interacciones entre el agua superficial y el agua subterránea y la necesidad de administrar ambos recursos de manera integrada, se han comprendido y abarcado en una escala más amplia.

SGMA también mandata la creación de nuevas estructuras de gobernanza, llamadas Groundwater Sustainability Agencies (GSAs)^a, en cada cuenca para que determinen los niveles de uso e implementen sus propios planes de manejo de cuencas, llamados Groundwater Sustainable Plans (GSPs). SGMA fue diseñada para ser una forma de regulación descentralizada, otorgando flexibilidad entre las agencias locales.

Con respecto a la RAG más específicamente, a nivel federal, existen Guías Estándares para la Recarga Artificial de Agua Subterránea (Standard Guidelines for Artificial Recharge of Ground Water) proporcionada por la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE), la cual describe los pasos requeridos para la planificación, diseño, construcción, mantención, operación y cierre de un proyecto RAG en los EEUU (ASCE, 2001). La guía también detalla las consideraciones económicas, ambientales y legales de los proyectos, incluyendo aspectos relevantes sobre derechos de agua, leyes y regulaciones. Al mismo tiempo, incluye información relevante sobre la investigación en terreno y procedimientos de prueba que pueden ser aplicables a diferentes tipos de proyectos.

Por otra parte, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de EEUU desarrolló una guía para el reúso del agua, que es utilizada para guiar regulaciones y planificación de programas a nivel Estatal y local (US EPA, 2012). En California,

a.- Un total de 293 GSA se han establecido con planes de manejo de cuencas al mes de Junio 2019 (<https://sgma.water.ca.gov/webgis/index.jsp?appid=gas-master&rz=true>).

también existen regulaciones de salud pública relacionados con el agua reciclada (CDPH, 2014). Mientras estas guías y regulaciones enfocan específicamente en el uso de agua reciclada, no existen programas, reglamentos o leyes específicas para la evaluación y aprobación de proyectos RAG en el estado de California. Sin embargo, existen algunos programas que proveen guías metodológicas para la selección, diseño e implementación de proyectos RAG en California, que son relevantes a esta Guía para Chile: i) MAR-Ag; y ii) Flood-MAR.

El primer concepto (MAR-Ag) refiere a la RAG en tierras agrícolas con el objetivo de capitalizar el exceso de agua superficial durante años húmedos para recargar activamente el agua subterránea, para que los acuíferos vuelvan a ser sostenibles. La aplicación refiere a la gestión del agua mediante la desviación del exceso de agua superficial a campos agrícolas para recargar el acuífero subyacente y utilizarla para más tarde en tiempos de sequía (Dahlke et al., 2018). California tiene más de 7 millones de hectáreas de terrenos agrícolas con un extenso sistema de entrega y transporte de agua que podría ser utilizado para transferir el exceso a los campos de cultivo. En comparación a los costos de construcción y mantenimiento de las piscinas de infiltración y los pozos secos, la utilización de los terrenos agrícolas para la recarga de acuíferos se presenta como una oportunidad para la RAG por sus bajos costos. Sin embargo, hay que considerar que la factibilidad de MAR-Ag depende de muchos factores interrelacionados y específicos del sitio, como la disponibilidad de agua para recargar, infraestructura para transportar aguas superficiales a campos, costos económicos asociados a estos, leyes y permisos del agua, las propiedades físicas y químicas del suelo, la tolerancia de los cultivos a la inundación, la capacidad del acuífero para almacenar y recuperar el agua recargada, y el efecto de la práctica sobre calidad del agua subterránea (ver Anexo 2.5).

El siguiente concepto (Flood-MAR) refiere a una estrategia de gestión de recursos integrada y voluntaria que utiliza el agua de inundación resultante de lluvia o deshielo para la recarga de agua subterránea en tierras agrícolas y paisajes, incluyendo a refugios, llanuras de inundación y desvíos de inundaciones (DWR, 2018). En el Anexo 2.5, se presenta información detallada sobre el criterio de factibilidad de MAR-Ag, los factores de implementación de Flood-MAR y algunas experiencias importantes de RAG en California.

Con respecto a la selección del método RAG en California, en general utilizan el diagrama de flujo general propuesto por Yuan et al. (2016). Sin embargo, debido al sistema descentralizado de manejo de agua en California, se tienen que buscar permisos y fondos en distintas instituciones, lo que hace sentir que es un costoso proceso burocrático y con pasos no muy claros para implementar proyectos RAG en este Estado. Por ejemplo, la RAG no se considera como uso benéfico, así que los proyectos RAG son aprobados si el fin último es mejorar la calidad de agua o mejorar el abastecimiento del agua, pero no se considera como uso benéfico el incremento del agua en el acuífero. En comparación, no existen derechos de agua sola para almacenar agua en represas, lo que existe son derechos de agua para agricultura que almacenan su agua en represas, los bancos de agua y acuíferos son un caso similar. En este momento existen oportunidades institucionales para mejorar estos problemas burocráticos. El organismo estatal de agua que concede derechos de agua (California State Water Resources Control Board) está desarrollando guías para solicitar derechos de agua para la RAG con usos benéficos de mejorar la calidad y el abastecimiento de agua.

Finalmente, la iniciativa voluntaria de Flood-MAR es una iniciativa impulsada desde el Gobierno Estatal para incentivar los proyectos RAG utilizando aguas excedentes durante el invierno. Esta iniciativa buscaba conseguir fondos estatales en diciembre del 2019 para implementar un programa de financiamiento de proyectos RAG. Es decir, el gobierno del estado de California destinaría fondos económicos para la implementación de proyectos RAG en colaboración con agencias de agua locales y distritos de riego. Estos fondos son concursados y cofinanciados por las diferentes agencias y distritos de riego; el gobierno de California solo financia el porcentaje de la inversión que genere beneficios públicos (ambientales o a comunidades en desventaja), el porcentaje restante que genera beneficios a los particulares tiene que ser financiado por estos.

3.1.5.- Europa

Por lo general, los países europeos adoptaron el enfoque basado en WSP de OMS, pero están obligados por legislación específica con respecto de la RAG. Capone y Bonfanti (2015) revisaron la legislación europea en relación con la política hídrica y la protección de la calidad del agua subterránea relevante para la RAG. Actualmente no hay documentos a nivel de Unión Europea que se relacionen específicamente con la RAG. No obstante, en términos generales la Directiva de Marco Hídrico (Water Framework Directive, WFD, 2000/60/EC) considera a la RAG como una de las herramientas de gestión que pueden ser usadas por los Estados Miembros de la UE para lograr el estatus de agua subterránea de buena calidad. La RAG es una de las medidas básicas que deben considerar los Estados Miembro en sus Planes de Gestión de Cuenca de Río; el Artículo 11(3)(f) de la Directiva requiere el establecimiento de “controles, incluyendo el requerimiento para la autorización previa de recarga artificial o aumento de flujos de agua subterránea”. Esto con el fin de asegurar que los controles regulatorios necesarios estén habilitados para garantizar que dichas prácticas se realicen en forma segura y que no “comprometa el logro de los objetivos medioambientales establecidos para la fuente o la masa de agua subterránea recargada o aumentada”. Las disposiciones de la WFD en este contexto se dirigen a garantizar que los controles necesarios estén habilitados para eliminar la posibilidad de la aplicación incorrecta del esquema RAG, derivando en una degradación en el estatus cualitativo de la masa de agua subterránea receptora.

De forma similar, el Artículo 4(1)(b)(i) de la WFD requiere que los Estados Miembro de la UE implementen las medidas necesarias para prevenir o limitar la entrada de contaminantes y para evitar el deterioro del estatus de todas las masas de agua subterráneas. La Directiva de Agua Subterránea presenta las disposiciones necesarias para hacer operacionales los objetivos de ‘prevenir o limitar’ de la WFD. De acuerdo con el Documento Guía CIS No 171, dentro de la Directiva de Agua Subterránea, las sustancias cuya entrada al agua subterránea deban evitarse son aquellas que han sido identificadas por los Estados Miembros como peligrosas. De este modo, es posible considerar que las sustancias que deben limitarse dentro del agua subterránea para que no ocurra contaminación, son todos los contaminantes.

Por ende, la Directiva de Agua Subterránea (2006/118/EC) reconoce que no es técnicamente factible detener la entrada de todas las sustancias peligrosas al agua subterránea, en particular las cantidades pequeñas que son ambientalmente insignificantes y que, por ende, no presentan un riesgo para el agua subterránea. En estos casos, la Directiva de Agua Subterránea, según el Artículo 6(3)(d) presenta una serie de exenciones y la RAG se considera dentro de estas exenciones. El Documento Guía CIS 17 entrega una interpretación de este concepto de prevención y limitación. De acuerdo con este Documento Guía de la UE, la prevención de la entrada al agua subterránea significa tomar todas las medidas que se consideren necesarias y razonables para a) evitar la entrada de sustancias peligrosas al agua subterránea y para b) evitar todo aumento en la concentración en el agua subterránea, incluso a escala local. Se entiende que estas medidas pueden incluir la calidad del agua fuente y las medidas preventivas de control de flujo y el tratamiento río arriba del agua fuente de recarga.

En este sentido, sigue destacándose que las condiciones para prevenir y limitar las recargas también son un requerimiento de la WFD bajo el Artículo 4(1)(b)(i). Por ende, aunque la Directiva de Agua Subterránea bajo el Artículo 6(3)(d) presente una extensión para los esquemas de recarga artificial permitida según el Artículo 11 de la WFD a partir de los requerimientos de prevención y limitación según el Artículo 6(1) de la directiva; el hecho de que el Artículo 6(3)(d) de la GWD requiera de un permiso emitido según la WFD implica que el permiso ya debiera considerar debidamente los objetivos de prevención y limitación de la WFD. Esta es un área poco clara entre las dos Directivas, que puede derivar en conflictos de interpretación.

Capone y Bonfanti (2015) sugieren que es necesario un nuevo sistema de respaldo de decisión para evaluar la elegibilidad de las nuevas actividades con los requerimientos de la WFD. Debido a que el Artículo 6 de la Directiva de Agua Subterránea considera la recarga artificial y la RAG bajo sus exenciones, el esquema desarrollado según el Documento Guía CIS de WFD puede efectivamente reducirse a un solo punto de decisión para esquemas RAG permitidos según el Artículo 11(3)(f) de la WFD. Consideramos que esta interpretación puede llevar a situaciones que no derivarán en el establecimiento del nivel necesario de protección para asegurar que los esquemas RAG no afecten el estatus cualitativo del cuerpo de agua subterránea receptor.

3.1.6.- Latinoamérica

El uso del agua subterránea en los países de Latinoamérica es alto, estimado en ~311 Mm³/año (en 2015) (Dillon et al., 2018). Pero a la fecha, la RAG no ha sido bien establecida en la región, con muy pocos sitios documentados, lo que sugiere grandes oportunidades para la RAG en los países de Latinoamérica. Bonilla Valverde et al. (2018) revisaron los esquemas RAG disponibles que han sido documentados e informados. En total, 144 proyectos RAG se recolectaron de 71 publicaciones.

Dado lo anterior, Latinoamérica sería la cuarta región en el mundo en términos del número de proyectos RAG identificados de acuerdo con el inventario global de esquemas RAG (Stefan y Ansems, 2018). LATAM tiene un poco más de la mitad de los estudios de caso de RAG identificados para Norteamérica (EEUU y Canadá), Asia o Europa.

De los países latinoamericanos, la mayor parte de los sitios RAG se encuentran en Brasil, principalmente mediante modificaciones en canales y estanques de percolación (Bonilla Valverde et al., 2018). Se reconoce que la mayoría de estos sitios, aunque creados intencionalmente para mejorar la infiltración, no son gestionados en términos de volúmenes o calidad, por lo que no pueden definirse como sitios RAG. Han sido implementados en momentos distintos durante el siglo pasado como política de varios gobiernos diferentes y han proliferado en especial durante las dos últimas décadas debido a la acción pública intensificada para erradicar el hambre y la pobreza. El uso de estanques de percolación en la región semi árida de Brasil apunta a almacenar agua para la producción de alimentos a escala de villas. El marco legal para la regulación de las actividades RAG a nivel de Estado y Federación en Brasil es escaso y poco definido (Da Silva et al., 2019). Existen numerosas referencias a RAG dentro de la legislación, pero ninguna sirve para fomentar la implementación. Lo más avanzado proviene del Distrito Federal donde el tratamiento de recuperación posterior se considera como algo necesario para el consumo final, pero no especifica algún parámetro o entrega más detalles (Da Silva et al., 2019). El marco legal relacionado con la RAG en Brasil está actualmente bajo revisión y desarrollo usando sitios de demostración en colaboración con los reguladores (S. da Silva, comunicación personal).

Bonilla Valverde et al. (2018) observaron que Colombia tiene una pauta metodológica para la gestión medioambiental de acuíferos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014), donde la RAG se considera, pero no se entregan detalles específicos. Por otra parte, informaron que México está entre los pocos países latinoamericanos que tiene regulaciones para el desarrollo e implementación de proyectos RAG. El Artículo 7 de la Regulación Nacional de Aguas (1992) identifica los problemas relacionados con el agua considerados de interés público, incluyendo, pero sin limitarse, a la protección, conservación y mejora de cuencas, acuíferos, lechos de ríos, cuerpos de agua confinados y otros cuerpos de agua de propiedad nacional, y la restauración del equilibrio hidrológico entre el agua de superficie y el agua subterránea. Según la Ley de Aguas de la Nación (LAN), existen dos Normas Oficiales Mexicanas (NOM) principales que ayudan a asegurar que el proyecto RAG apropiado utilice NOM-014-CONAGUA-2007—requerimientos para la recarga artificial de acuíferos con aguas servidas tratadas (SEMARNAT, 2009a) y NOM-015-CONAGUA-2007—Infiltración artificial de agua en acuíferos con agua lluvia recolectada (SEMARNAT, 2009b).

3.1.7.- Otros países

En Asia, países como China, Singapur, Japón y Corea han establecido regulaciones para reutilizar agua, principalmente para fines de agricultura, acuicultura, municipales e industriales (Jiménez y Asano, 2008). En otros países, notablemente en Sudáfrica, también se publicó la Estrategia de Recarga Artificial (Murray et al., 2007). Sin embargo, la mayoría de los países sigue las guías de reutilización de agua impuestas por la OMS (Jiménez y Asano, 2008; Adewumi et al., 2010). Recomendaciones para la Guía en Chile (CNR)

3.2.- Recomendaciones para la guía en Chile

Idealmente, se requiere de un enfoque unificado y estructurado para evaluar e implementar los esquemas RAG. Los enfoques WSP de la OMS y HACCP entregan un proceso en etapas para manejar los riesgos en forma efectiva en los esquemas de reciclaje de agua. No obstante, su principal limitación, en el contexto de la aplicación de RAG, es que se relacionan principalmente con el riesgo para la salud humana y no incorporan explícitamente riesgos para el acuífero, las operaciones (aspectos económicos) y el medioambiente. Esto se debe a que HACCP fue desarrollado para identificar y minimizar la contaminación microbiana y la WSP fue desarrollado para minimizar la contaminación microbiana y química del agua potable. Estos marcos funcionan muy bien para las opciones de suministro de agua convencional, ya que en estas el riesgo medioambiental está mitigado por estándares regulatorios, tales como los que aplican a la descarga de agua servida al entorno. No obstante, al evaluar el riesgo asociado con los esquemas RAG, existen fuentes adicionales de riesgo relacionado con el almacenaje en el acuífero y el impacto de las presiones de recarga y recuperación sobre el acuífero y otros entornos conectados. Estos son únicos para los esquemas RAG y los riesgos medioambientales y operacionales deben incluirse si se quiere considerar estos elementos en forma apropiada, según lo requerido por los organismos regulatorios en Chile.

La mezcla con el agua subterránea nativa puede reducir la calidad del agua recargada, movilizandolos metales, aumentando concentraciones de elementos y minerales no deseados. Sin embargo, la calidad del agua también puede mejorar durante su almacenaje debido a la absorción dentro de la matriz del acuífero, potencialmente reduciendo la turbidez, carbono orgánico, compuestos orgánicos, compuestos inorgánicos y patógenos. Por el contrario, la adsorción puede bloquear la matriz del acuífero lo que reduce las tasas de recarga y finalmente la viabilidad económica del esquema. Esto demuestra la manera en que algunos procesos del acuífero pueden tener un impacto positivo sobre la calidad del agua mientras que otros podrían tener un impacto negativo. También ilustra la complejidad de las reacciones y los riesgos asociados con ellas.

Los esquemas RAG pueden ser complejos, con varios riesgos que pueden interactuar de acuerdo con las condiciones del sitio. Obtener orientación respecto a la manera en que estos riesgos se manejan mejoraría la eficiencia de las evaluaciones, desde la viabilidad inicial a la implementación, operación y verificación del esquema y, además, agregar confianza en sus resultados. Una orientación apropiada acelera el desarrollo de esquemas viables y limita el esfuerzo para investigar proyectos inviables.

Las Guías Australianas para la RAG fueron desarrolladas a partir de los principios de las guías de agua potable de Australia y abordan esta necesidad por una metodología de gestión de riesgo formada específicamente para la RAG. Estas guías entregan una metodología que permite una evaluación de los riesgos durante el almacenaje en un acuífero con un nivel de detalle similar al que se aplica en tratamientos de ingeniería. Constituyen el único marco que se considera en este estudio que incluye el riesgo para el medioambiente y la salud humana, así como el riesgo para el negocio (riesgo operacional). Cabe destacar que estas guías fueron desarrolladas específicamente para la RAG en Australia y que, de tal modo, están acondicionadas a los requerimientos regulatorios e industriales propios de dicho país. Además, incluyen específicamente la opción de una evaluación simplificada para esquemas RAG de pequeña escala. La estructura de la industria hídrica y el entorno medioambiental regulatorio de Chile difieren de los de Australia. Asimismo, las normas societales, los estándares y las visiones acerca de lo que es aceptable también entregan una referencia respecto de la significancia de un peligro en una evaluación de riesgo, los que varían en diferentes países.

Las Guías Australianas para la RAG fomentan la modelación antes de la puesta en marcha de un proyecto para verificar la efectividad de las medidas preventivas identificadas. Posteriormente, estos resultados se validan durante la operación. El fomento de este enfoque iterativo antes de la construcción del sitio piloto es importante, ya que se puede realizar una evaluación de riesgo más completa durante la etapa de estudio preliminar, lo que puede validarse durante un estudio piloto.

El enfoque australiano se centra en la gestión basada en riesgo, por lo que requiere de muchos datos y resulta apropiada para una escala comercial, para recarga en acuíferos confinados y no confinados, con todo tipo de

fuentes de agua y cualquier uso final (Figura 2). Considerando que en el marco de este proyecto la aplicación deseada para la RAG se limita al respaldo del riego para agricultura mediante la recarga de acuíferos no confinados con agua superficial natural, proveniente de zonas mayormente rurales, los riesgos inherentes podrían considerarse lo suficientemente bajos, justificando un enfoque de guía simplificado. Debido a que los acuíferos objetivo están altamente conectados con la fuente del agua deseada, en este caso, se considera que la RAG es una mejora frente a un proceso natural. Como se describió anteriormente, lo más probable es que los principales riesgos asociados con el tipo de RAG propuesto se relacionen con obstrucciones, impactos hidráulicos para los usuarios de agua subterránea cercanos y el terreno sujeto a saturación de agua. Los cambios en la hidrología del agua superficial y subterránea como resultado de la RAG pueden tener algunos impactos sobre los ecosistemas conectados, los que se esperan sean menores a menos que los esquemas estén destinados para una escala relativamente grande, por ejemplo, utiliza más que 10% del caudal total de un río. Es probable que los peligros para la salud humana se limiten mediante una falta de exposición, ya que el agua producida no se usaría para beber, asumiendo que exista una separación suficiente entre las actividades de RAG y los pozos que se usan para agua potable.

La aplicación de métodos de evaluación simples, de acuerdo con las Guías Australianas (ver Anexo 1.2), se limita a los esquemas a escala doméstica, por ejemplo, infiltración del agua de escorrentía del techo de viviendas separadas, por lo que serían inadecuados para la gestión de riesgos asociados con las aplicaciones deseadas en Chile. Esto genera la posibilidad de desarrollar una guía que, en términos de la complejidad y el costo de la gestión de riesgo, se ubique entre la encuesta sanitaria, el enfoque de WSP y los métodos australianos basados en riesgos (Figura 2). Esta Guía debe garantizar agua segura y apropiada para el uso, mediante la gestión de riesgos para las operaciones, la salud humana y el medioambiente.

3.3.- Plataformas y herramientas de recarga de acuíferos

La existencia de plataformas y herramientas para apoyar la toma de decisiones en la implementación de proyectos RAG han sido construidas utilizando distintas variables y bajo diferentes objetivos. Se han identificado seis herramientas/plataformas que permiten visualizar información de proyectos existentes, evaluar la factibilidad de un proyecto particular, conocer el sector dónde es más factible la implementación de proyectos de recarga según estudios previos o realizar un análisis para un nuevo sector. El detalle de cada uno de ellos se menciona a continuación.

3.3.1.- SAGBI – Soil Agricultural Groundwater Banking Index

El índice de suelo agrícola y banco de agua subterránea (Soil Agricultural Groundwater Banking Index o SAGBI)^a es un índice de idoneidad de recarga de agua subterránea para terrenos agrícolas, que consiste en una página web que permite visualizar e interactuar con un mapa de California, indicando el valor global del índice SAGBI y permite consultar los valores de cada uno de los factores involucrados. Se basa en cinco factores que son críticos para el éxito del almacenamiento de agua subterránea para agricultura: percolación profunda, tiempo de residencia en la zona radical (raíces), topografía, limitaciones químicas y condiciones de la superficie del suelo.

La percolación profunda^b se deriva del horizonte de suelo con el valor de conductividad hidráulica saturada más bajo. La conductividad hidráulica saturada es una medida de permeabilidad de suelo cuando se encuentra saturado. El tiempo de residencia en la zona radical (raíces) estima la probabilidad de mantener buenas condiciones de drenaje dentro de la zona de las raíces, inmediatamente después de la aplicación de riego, debido a que duraciones prolongadas de condiciones saturadas o cercanas a saturadas pueden causar daño a cultivos perennes. Este rating se basa en la media armónica de la conductividad hidráulica saturada de todos los horizontes del perfil del suelo, clase de drenaje del suelo y propiedades de contracción-expansión. El factor de limitación química se cuantifica usando la conductividad eléctrica (EC) del suelo, que es una medida

a.- <https://casoilresource.lawr.ucdavis.edu/sagbi/>

b.- Agua que se infiltra por debajo de la zona de raíces y susceptible de alcanzar la capa freática. UNESCO/WMO Glosario Internacional de Hidrología (2nd revised ed., 1992)

de la salinidad del suelo, debido a que la salinidad es una amenaza a la sustentabilidad de la agricultura y agua subterránea en California. La topografía se aborda desde la perspectiva que el almacenamiento de agua subterránea en agricultura será idealmente implementado mediante dispersión de agua a través de terrenos. Los sitios planos son más adecuados para mantener agua en el paisaje y, por consecuencia, permiten infiltrar a lo largo de grandes áreas, reduciendo el estancamiento y minimizando la erosión y escorrentía superficial. Finalmente, la condición de superficie considera que el almacenamiento de agua subterránea por inundación pueda llevar a cambios en las condiciones físicas de la superficie del suelo. Dependiendo de la calidad del agua y su profundidad, el agua estancada puede llevar a la destrucción de los agregados, la formación de costras en los suelos y su compactación, las cuales limitan la infiltración. Dos propiedades del suelo son usadas para diagnosticar las condiciones de superficie: la tasa de adsorción de sodio (SAR) es usado para identificar suelos propensos a encostrar, y el factor de erosión de suelos es utilizado para estimar el potencial del suelo susceptible a erosión, desagregación y formación de costras.

3.3.2.- Managed Aquifer Recharge Portal

El portal de recarga de acuíferos gestionada (Managed Aquifer Recharge Portal)^c es una página web que permite consultar la ubicación y características de distintos proyectos RAG, cuya información haya sido publicada previamente, pudiendo consultar el tipo de recarga principal (método de esparcimiento, filtración de banco inducida, perforación y pozos, modificaciones en el canal y recolección de agua de lluvia y escorrentía), tipo de recarga específica, principal objetivo de la recarga, la fuente de agua más influyente y el uso final de la obra.

Adicionalmente, el portal alberga información de mapas de idoneidad de recarga artificial de acuíferos para diferentes sectores del mundo (Costa Rica, España, Sudáfrica, entre otros), aunque no existe información respecto a idoneidad de recarga para Chile.

3.3.3.- Database for GIS Based Suitability Mapping

El base de datos para el mapeo de idoneidad basado en SIG (Database for GIS Based Suitability Mapping)^d corresponde a una herramienta de consulta para evaluar y visualizar los diferentes componentes que han sido utilizados en la selección de sitios idóneos para implementación de la RAG basados en SIG y análisis de decisión multicriterio. Funciona de forma similar a una tabla dinámica de Excel e incluye la información que está presente en el portal del inventario Global MAR.

3.3.4.- GIS Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA)

El enfoque de Análisis de Decisiones Multi-criterio SIG (GIS Multi-Criteria Decision Analysis o GIS-MCDA)^e permite evaluar la idoneidad de sitios de manera flexible a través de diferentes métodos dependiendo de la información que se posea y el nivel de conocimiento de quien realice el análisis. Además, se requiere determinar qué factores deben ser considerados en el análisis y la importancia relativa de los distintos factores, para que a través de criterios ponderados y datos espaciales se obtenga un mapa de idoneidad para proyectos de recarga de acuíferos gestionada. INOWAS ha implementado una herramienta web para realizar análisis GIS-MCDA permitiendo la determinación de Idoneidad de proyectos de recarga de acuíferos gestionada a través de cuatro métodos basados en ponderaciones.

Los enfoques de GIS-MCDA se aplican ampliamente a nivel internacional para identificar oportunidades de RAG (Pedrero et al., 2011; Escalante et al., 2014; Gdoura et al., 2015; Russo et al., 2015; Bonilla Valverde et al., 2016; Tsangaratos et al., 2017). El mapeo de sustentabilidad de RAG se centra en donde, desde una perspectiva técnica, RAG resulta más factible basado en factores tales como la topografía, geología, hidrogeología, hidrología, suelos, etc. La evaluación de factores económicos y de gestión que afectan la viabilidad de los esquemas RAG, por ejemplo, los costos para acceder al agua fuente, el espacio disponible para capturar y tratar el agua, la demanda por el agua, los costos de distribución, la compatibilidad con los planes de gestión de agua, etc., cuando se

d.- <https://inowas.com/tools/t04a-database-for-gis-based-suitability-mapping/>

e.- <https://inowas.com/tools/t05-gis-mcda/>

combinan con la suficiencia técnica, podrían considerarse como la evaluación del potencial para la RAG. El mapeo de oportunidades de RAG es un término más general usado en el presente para describir cada aspecto.

Un flujo de trabajo GIS-MCDA por lo general implica 7 pasos (Malczewski, 1999):

1. Definición del problema: específicamente la definición del problema para identificar las condiciones sobre las cuales es necesario tomar decisiones.
2. Criterios de evaluación: definición de un conjunto de objetivos y atributos que abordan la definición del problema. Los objetivos reflejan las preocupaciones relevantes para el problema definido, los atributos son medidas para evaluar dichos objetivos y pueden ser determinísticos, estocásticos o lingüísticos.
3. Alternativas: son muy pocos los problemas que necesitan solución en el mundo real que pueden considerarse sin incluir las limitaciones. A fin de determinar un conjunto de alternativas factibles, se deben imponer limitaciones para el espacio de decisión.
4. Ponderaciones de criterio: se relaciona con las preferencias de quien toma las decisiones y refleja la importancia percibida de algunos criterios sobre otros. Existen varios métodos para determinar la ponderación que van desde clasificaciones o listados simples hasta métodos jerárquicos, de influencia múltiple o por pares.
5. Reglas de decisión: método para sumar los resultados de los pasos anteriores a fin de generar una o más alternativas factibles. Integra datos espaciales, preferencias e incertidumbres para entregar una evaluación general. Los ejemplos comunes son funciones de adición simple que usan una combinación lineal ponderada.
6. Análisis de sensibilidad: determina la manera en que se ven afectadas las alternativas resultantes por los cambios a los datos que se usan para cuantificar los impactos posibles de la incertidumbre relacionada con las ponderaciones de criterios, los valores de atributos y los errores espaciales. Entrega información más acabada respecto de la manera en que los elementos de decisión interactúan en el espacio del problema y las implicaciones para determinar las alternativas preferidas.
7. Recomendaciones: es el paso final y consiste en llegar a una alternativa o a un conjunto acordado de alternativas sobre las cuales basar las recomendaciones para la acción futura, se fundamenta en la priorización de alternativas y es informada por el análisis de sensibilidad.

Los aspectos técnicos de la manera en que se deben aplicar los métodos GIS-MCDA se describen en detalle en las referencias provistas en esta sección. Brevemente, implican la definición de problemas, definición de objetivos y atributos y, por lo general, son análisis que se realizan en conjunto con el descubrimiento y la estandarización de datos, mapeo de limitaciones para eliminar áreas inapropiadas, determinación de ponderaciones de criterios y la aplicación de una regla de decisión para generar una o más alternativas factibles, a fin de determinar sensibilidades (ponderaciones y atributos cuando resulte apropiado) y, finalmente, entregar recomendaciones sobre la acción futura.

4.- Recarga de acuíferos en Chile

En los últimos años en Chile, se ha experimentado un creciente interés en el uso de RAG, como técnica alternativa o complementaria a sistemas tradicionales de almacenamiento de agua, particularmente en la agricultura. Desde el año 2012, se puede apreciar un aumento de interés en el tema, especialmente por parte de algunas autoridades públicas, las cuales realizaron giras internacionales para mejorar su entendimiento respecto a las buenas prácticas de RAG en el mundo, con el objetivo de traer las buenas experiencias a Chile. A pesar de existir aplicaciones de RAG en el sector privado anterior a esta fecha, fueron relativamente desconocidas y no regularizadas. El interés entonces desde el sector público impulsó el tema más ampliamente en Chile, ilustrado a través del rápido desarrollo de varios estudios, proyectos piloto, proyectos operacionales y seminarios de difusión, algunos de los cuales serán mencionados en el presente documento.

En gran parte, el impulso de RAG en Chile por el sector público ha originado de la Comisión Nacional de Riego (CNR) del Ministerio de Agricultura, lo cual puede ser explicado por la importancia del sector agrícola en el país, siendo el mayor usuario de agua, con un consumo equivalente a 82% (DGA, 2016a).

En la última década se ha mostrado un descenso fuerte en cuanto al agua disponible, atribuido en gran parte por una disminución prolongada de las precipitaciones, de una magnitud de un entre 25 y 45%^f (Garreaud et al., 2019). El descenso ha sido aún más notable en la zona central de Chile, donde se concentra la mayoría de la actividad agrícola del país, registrando un descenso de aproximadamente 80% de precipitación durante 2019 (Agromet, 2019). Tradicionalmente, como en muchos países en el mundo, Chile ha mirado hacia la construcción de embalses para resolver sus problemas con respecto a la disponibilidad y uso de agua. Aunque hasta un cierto grado esta posición se mantiene, en los últimos años hay discusiones a nivel del país para incorporar soluciones más holísticas e integradas para gestionar los recursos hídricos en Chile, incluyendo un aumento de RAG.

A partir de 2018 se estableció una mesa del sector público enfocada en el desarrollo de RAG en Chile, impulsado por la CNR y con participación de representantes de la Dirección General de Aguas (DGA), Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP) y Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). En general la mesa se reúne cada 2 meses y tiene por objetivo principal alinear las iniciativas en desarrollo y propuestas para mejorar la coordinación y eficiencia de las entidades públicas en el ámbito de RAG.

En esta sección se presenta el contexto local sobre el estado de arte de RAG en Chile hasta la fecha. En primer lugar, se describe la interacción con actores claves realizado en el marco del presente proyecto. Luego, se revisan los proyectos y pilotos RAG en Chile. Finalmente, se describe la localización de oportunidades de RAG en Chile a partir de estudios previos realizados. En los Anexos 3.1 y 3.2, se encuentran información detallada sobre las notas completas de las entrevistas con los actores y fichas detalladas sobre los proyectos revisados.

4.1.- Interacción con actores claves

La interacción con actores claves durante este proyecto complementa los resultados de la revisión de literatura nacional e internacional. El objetivo principal es involucrar a los actores claves del proyecto para incorporar su conocimiento local y experiencia en esta Guía de RAG. Esto permite que la Guía se adapte a las necesidades y requisitos locales e incorporaran sus comentarios, dudas e incertidumbres.

Esta actividad también apunta a mejorar el conocimiento de los proyectos RAG (formales e informales) existentes y pasados en Chile, particularmente en las cuatro regiones seleccionadas (Atacama, Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins), que demuestran una variedad de experiencias diferentes.

En primer lugar, se realizaron entrevistas con actores claves, con dos objetivos principales: i) Entender mejor sobre proyectos RAG en Chile; y ii) Entender que se requiere de una guía de RAG en Chile. Más abajo se describe el proceso de las entrevistas y resume los mensajes claves. Se puede encontrar la nota completa de cada entrevista realizada en el Anexo 3.1.

f.- En comparación con la precipitación promedio del período 1981-2010.

Con el fin de ayudar con este proceso, se estableció un Comité Asesor, compuesto de representantes del sector público, privado y académico en Chile con experiencia relevante a la RAG o a la implementación de la Guía. Dicho Comité tuvo por objetivo acompañar al desarrollo del proyecto para orientar sus resultados y ayudar para que sean más útiles para los usuarios finales de la Guía. Se realizaron 3 reuniones durante el proyecto para compartir los principales avances.

Por otra parte, se realizó un taller el 29 de agosto de 2019 para presentar los avances del desarrollo de la Guía con una selección de actores más amplia. En esta instancia se presentó algunos de los resultados de la revisión bibliográfica internacional y nacional y se presentó una propuesta borrador de la estructura y contenidos de la Guía. Finalmente, se terminó con una intensa sesión de discusión, donde todos los asistentes fueron invitados a dar su opinión y sugerencias para seguir avanzando en el desarrollo de la Guía.

4.1.1.- Entrevistas

Se realizaron entrevistas semiestructuradas que comenzaron en abril de 2019. En primer lugar, el equipo del proyecto compartió el enfoque y el objetivo del proyecto y luego se centró en la recopilación de información sobre las experiencias de RAG y la necesidad de contar con una guía. Específicamente, se buscó respuestas a las siguientes preguntas principales:

Sobre proyectos específicos (en el caso que el entrevistado tiene experiencia relevante):

1. ¿Cuándo comenzó el proyecto, dónde se ejecutó?
2. ¿En qué consistió el proyecto? Tipo de infraestructura, duración, fuente de agua utilizado.
3. ¿Cuál fue la motivación para el proyecto?
4. ¿Qué funcionó bien?
5. ¿Cuáles fueron las principales dificultades o desafíos?
6. ¿Hubo otras instituciones involucradas en el proyecto? ¿Si es así cuáles?
7. ¿Hay más información sobre el proyecto que puede enviarnos?

Sobre MAR en general:

1. ¿Cuáles son las principales motivaciones (drivers) para MAR en Chile actualmente?
2. ¿Cuáles son las barreras principales para la implementación de proyectos de MAR?
3. ¿Cuáles son los temas claves de sensibilización, capacitación o educación que deben abordarse para avanzar en MAR en Chile?
4. ¿Qué espera de la guía en la que estamos trabajando? ¿Qué falta actualmente para apoyar los proyectos MAR en Chile?

Dichas preguntas fueron desarrolladas para guiar la discusión en general con los entrevistados, sin embargo, cada entrevista fue contemplada para la institución en cuestión, es decir, se agregó u omitió preguntas específicas dependiendo del rol de cada institución. Durante el proyecto se realizaron 14 entrevistas con representantes de diferentes instituciones públicas, privadas (incluyendo usuarios de agua) y académicas:

1. Comisión Nacional de Riego (CNR) - Comité Asesor
2. Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería (CRHIAM), Universidad de Concepción
3. Dirección General de Aguas (DGA)
 - a. División de Planificación y Estudios - Comité Asesor
 - b. Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos
4. Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) - Comité Asesor
5. Federación de Juntas de Vigilancia de la Sexta Región (FJVSR) - Comité Asesor

6. Junta de Vigilancia de la Tercera Sección del río Aconcagua - Comité Asesor
7. Universidad de Talca - Comité Asesor
8. Dirección de Obras Hidráulicas (DOH)
9. Asociación Latinoamericana de Hidrología Subterránea para el Desarrollo (Alhsud) - Comité Asesor
10. Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP)
11. Confederación de Canalistas de Chile (CONCA)
12. Sociedad del Canal de Maipo (SCM)
13. Ministerio de Medio Ambiente (MMA)
14. Comunidad de Agua Subterránea (CASUB) Copiapó - Piedra Colgada - Desembocadura

Las entrevistas fueron realizadas con actores que tienen una variedad de experiencias diferentes con respecto a la RAG en Chile, desde la implementación de proyectos piloto u operacionales, hasta los entes reguladores encargados de su evaluación, académicos y potenciales usuarios de esta Guía. A continuación, se resumen las principales motivaciones, barreras y recomendaciones expuestas durante las entrevistas.

Las entrevistas mostraron claramente que la motivación principal para la realización de RAG en Chile está relacionada con la disminución en la disponibilidad de agua y urge la necesidad de almacenar los excedentes o una proporción de estos en el invierno que escurren hacia el mar. Hay pequeñas variaciones en las respuestas de los actores, dependiendo de su sector y punto de vista. Por ejemplo, algunos actores culpan principalmente al clima (sea cambio climático o la sequía) por la falta de disponibilidad, mientras otros reconocen que existe una sobre explotación del recurso debido a la falta de un manejo sustentable. Algunos actores tienen como objetivo recargar durante invierno para complementar el agua utilizada en verano, pero otros actores tienen una visión más a largo plazo, entendiendo que hay que crear reservas de agua para períodos extremos de escasez o emergencias. Por otra parte, se menciona la oportunidad de poder almacenar agua en los acuíferos como reemplazo o complemento a los embalses, particularmente dado a que los proyectos RAG demandan mucho menos tiempo de implementación, tienen menor impacto ambiental, son una alternativa más económica y no “pierden” agua por concepto de evaporación. En algunos casos en particular del norte de Chile, en sectores donde no escurre agua superficial habitualmente, hay una necesidad importante de poder almacenar el agua cuando ocurren periodos de lluvia extrema (cada 5-10 años aproximadamente).

Mientras las motivaciones son generalmente claras, las barreras son mucho más complejas. En primer lugar, la barrera que se planteó una y otra vez fue relacionada con la normativa que rodea a la RAG en Chile. Se discute que el marco legal es muy poco claro y extremadamente burocrático, lo cual sirve como un desincentivo importante para entrar al proceso de revisión del proyecto con la DGA. Además, se levantó varias experiencias donde el proponente entregó la información solicitada por parte de la DGA, con el fin de regularizar obras de recarga ya en ejecución, sin embargo, destacan que no recibieron respuestas durante años de la DGA con respecto a la evaluación. Otra barrera está relacionada con la confianza en el funcionamiento de sistemas RAG, dado a que no se ve el agua almacenada en los acuíferos, en comparación con un embalse, por ejemplo. Además, se hace difícil vislumbrar los beneficios de una recarga si no pueden extraer el agua infiltrada. Anteriormente se resumió el procedimiento de la DGA que aplica a proyectos que requieren nuevos Derechos de Aprovechamiento de Aguas (DAA), sin embargo, dado a su complejidad, fue destacado que es poco probable que sea utilizada ampliamente, menos aún por el sector agrícola. Esta barrera es una limitación en cuanto al tipo de proyectos que se pueden realizar, es decir, finalmente es más factible implementar proyectos RAG que no requieren nuevos DAA y que tienen como objetivo aumentar la seguridad hídrica de los actores con derechos de agua subterránea existentes. Por otra parte, la incertidumbre alrededor de la calidad de agua y potencial contaminación del acuífero fue mencionada varias veces.

Los proyectos piloto implementados por los organismos del Estado enfrentaron desafíos con respecto a encontrar un sitio adecuado y disponible para utilizar. Más aún, en varios casos tenían restricciones con respecto a la cantidad de agua que podrían infiltrar, dado a que no tenían agua disponible para utilizar. En estos casos,

tuvieron que depender de las Organizaciones de Usuarios del Agua (OUAs) respectivas, las cuales proporcionaron agua al Estado cuando hubo disponibilidad. Sin embargo, particularmente en el caso de DOH, dado a que se realizaron las obras durante una sequía, las OUAs no tenían mucha agua para compartir y no fue constante en el tiempo.

Por otra parte, muchos actores levantaron su preocupación con respecto a la falta de información y conocimiento sobre los acuíferos y la necesidad de monitorear correctamente los acuíferos en el tiempo. Además, el hecho que en algunas partes no hay una delimitación oficial del río causó problemas, dado a que no se pidió autorización para realizar modificaciones en el cauce, situación que se sucedió en al menos un caso. Se mencionó que el desafío es que cada región o cuenca es muy diferente y entonces lo que puede funcionar bien en una zona, podría funcionar mal en otra. Se hace ejemplo de la cuenca del río Aconcagua, donde encontraron que el método de recarga a través de pozos de infiltración fue inadecuado debido a la muy fuerte pendiente que presenta el sector.

Otras barreras importantes levantadas son relacionadas con la institucionalidad relevante a la RAG en Chile. En particular, se menciona que falta una definición clara de los roles y obligaciones de los actores involucrados. Por otra parte, hay preocupación sobre quién será el responsable de la operación y mantenimiento del sistema RAG una vez que está implementado. Además, se ha mencionado que la DGA no tiene capacidad o recursos para realizar una fiscalización efectiva de los sistemas RAG.

Se proporcionaron una variedad de recomendaciones para esta Guía y sobre la ejecución de proyectos RAG. Se destacó una y otra vez la importancia de realizar a RAG en conjunto con las OUAs que son las responsables de la administración de los recursos hídricos, siendo especialmente relevante en un futuro realizar estos proyectos de forma comunal para aumentar el nivel del agua subterránea para todos. En algunos casos, se manifestó la opinión que las OUAs deberían autogestionarse y la DGA debería involucrarse solamente como ente de apoyo y fiscalización. Sin embargo, para otros actores este escenario es preocupante, dado las grandes diferencias entre las facultades y capacidades de gestión de las OUAs en Chile y el desconocimiento general para poder controlar sistemas RAG adecuadamente.

Por otra parte, hay consenso de que hay que simplificar el procedimiento de evaluación de proyectos de recarga actual de la DGA. Se manifiesta que debería existir un rango de diferentes procedimientos, de acuerdo con el tipo y nivel de proyecto que se propone a ejecutar (tamaño de la obra, fuente de agua, ubicación, etc.), para que el proceso sea razonable y adecuado a su propósito. La guía debería incluir los requisitos mínimos a cumplir para cada procedimiento. Por otra parte, hay necesidad de mejorar significativamente los tiempos de evaluación para que los proyectos sean viables. Con respecto al último punto, se recomendó generar una agenda u hoja de ruta dentro de la DGA para facilitar la RAG y su proceso de evaluación y para que sea consenso entre los diferentes departamentos de la DGA involucrados.

Se mencionó la necesidad de realizar estudios sobre zonas potenciales de recarga en paralelo con los requerimientos de oferta y demanda de agua para poder priorizar zonas específicas. Se agregó que, en general, el cauce es el mejor lugar para realizar MAR y entonces, debería ser facilitada para este caso. Por otra parte, se manifestó interés de ver una propuesta en la guía para el manejo de los canales u otros sistemas de riego (intrapredial o extrapredial) para facilitar la recarga durante los meses de invierno, sin dejar de lado los potenciales efectos que esto podría traer, por ejemplo, en el drenaje natural.

Fue mencionado que el monitoreo debería ser incorporado en cada proyecto realizado, agregando que hay buenas experiencias, pero no tienen mediciones, solo estimaciones. Hay interés de estandarizar toda la información común y generar una base de datos para que pueda trabajar de forma más efectiva y coordinada entre diferentes instituciones. Se sugirió realizar la RAG donde tenemos información confiable y donde hay una necesidad real.

Carlos Araya de la CASUB: Copiapó - Piedra Colgada - Desembocadura, propuso una idea interesante sobre la

generación de un Decreto de Abundancia para poder utilizar excedentes de agua, particularmente enfocado en áreas del país que sufren de escasez hídrica extrema y que experimentan eventos de precipitación muy esporádicos. En dichos casos, cuando ocurre un evento (cuando se tiene un caudal definido en el río), se podría postular a un permiso especial para recargar a través del Decreto.

Finalmente, se destacó la importancia de realizar una campaña publicitaria y comunicacional fuerte para que la sociedad civil entienda la necesidad de RAG y para que trascienda más allá de cada administración de gobierno.

4.2.- Descripción de proyectos de recarga de acuíferos en Chile

Durante los últimos años se han desarrollado diversos proyectos y pilotos de la RAG en Chile, algunos de los cuales se desarrollaron a partir de estudios levantados previamente. La primera iniciativa formal orientada a la RAG impulsada por la DGA se desarrolló en el año 2012, en las cuencas del Choapa y Quilimarí (DGA, 2012). Esta tuvo por objetivo identificar zonas relevantes para recarga e implementar obras para la RAG, evaluando la capacidad de infiltración de diversos sectores y el comportamiento del flujo subterráneo a través de su modelación. En este contexto, se evaluaron dos alternativas de entre seis sitios identificados con mayor potencial de recarga, concluyendo que los proyectos no eran rentables ni económicamente ni socialmente.

Del mismo modo, la CNR y el GORE de Atacama (2012) realizaron un estudio analizando alternativas de obras de infiltración para su uso en riego, a nivel de prefactibilidad y a lo largo de la cuenca del río Copiapó. Este estudio contempló análisis de condiciones hidrogeológicas, factibilidad de la ubicación física de obras y un análisis de costos, entregando recomendaciones de obras de recarga en distintos sectores. Se terminó con la modelación hidrogeológica que permitió un diseño preliminar de obras para los sectores 4 y 5, mencionando la necesidad de evaluar coeficientes de infiltración a través de proyectos piloto.

A partir de estos resultados, la CASUB Copiapó - Piedra Colgada - Desembocadura (2017) ejecutó un proyecto de tres piscinas de infiltración entre las localidades de Toledo y San Francisco, utilizando aproximadamente 12,6 hectáreas totales y contando con un serpentín decantador para disminuir la turbidez del agua para recargar. La CASUB menciona que este proyecto utilizó los excedentes del agua generados producto de los eventos extremos de precipitación en Copiapó durante 2017. De manera similar, la Junta de Vigilancia del Río Copiapó (JVRC, 2018) utilizó tres piscinas de infiltración, de 3,8 hectáreas totales, para infiltrar agua en la localidad de Cerrillos utilizando los mismos excedentes mencionados anteriormente.

Adicionalmente, la CASUB se encuentra desarrollando otro estudio en el sector, contando con apoyo de la Universidad de California, Davis (UC DAVIS) como contraparte técnica y financiado por CORFO (~CLP\$30.000.000), que tiene por objetivo evaluar la factibilidad hidráulica de un prototipo de tres pozos de infiltración para la recarga de la napa subterránea a través de excedentes de riego. Este proyecto tenía fecha tentativa de término a fines de 2019, por consecuencia, no hay más antecedentes al respecto. Sin embargo, la CASUB sigue en búsqueda de otros sitios apropiados, particularmente para realizar pequeños proyectos RAG en sitios privados.

Siguiendo en el norte de Chile, el Instituto Nacional de Hidráulica (INH) (2014) realizó una caracterización de la cuenca del río San José, región de Arica y Parinacota, en busca de implementar programas RAG, donde se recopiló y levantó información hidrogeológica del sector, que sirvió para la realización de un análisis ponderado entre permeabilidad, uso de suelo y profundidad del nivel estático. Concluyendo que el sector debiese considerar 9 pozos de infiltración para la inyección de 50 L/s por un costo aproximado de \$400.000.000 CLP, sin considerar los costos asociados a una planta elevadora para la utilización de agua servida desde Chinchorro Norte.

Por otra parte, la DOH (2012b) realizó dos estudios en la cuenca del Aconcagua, región de Valparaíso. El primero para conocer los requisitos para desarrollar distintos tipos de proyectos RAG y evaluar la disponibilidad de recursos hídricos para la realización de este tipo de proyectos, destacando que para desarrollar un proyecto a gran escala es necesario hacer una modelación hidrogeológica para determinar mejores sectores donde recargar y luego implementar pilotos para monitorear parámetros del proceso de recarga y así tomar medidas

correctivas previo a la construcción de una obra definitiva.

El segundo estudio (DOH, 2012a) buscó analizar la factibilidad hidrogeológica para realizar proyectos RAG en la primera y tercera sección del río Aconcagua utilizando el modelo de simulación de acuíferos del valle del río Aconcagua (Visual Modflow ACN), concluyendo que la primera sección es más apta para obras de recarga. Como consecuencia DOH generó una obra RAG en la primera sección del valle del Aconcagua, específicamente en la localidad de Curimón (DOH, 2016), utilizando dos piscinas de infiltración de 4.316 m² y un decantador de 4.500 m². Así mismo, la CNR ejecutó un proyecto piloto en la tercera sección del valle, en la localidad de La Palma (CNR, 2015b), utilizando inyección por pozo con 54 m de profundidad.

Siguiendo esta línea, la CNR (2013c) realizó un estudio de prefactibilidad para un proyecto de mejoramiento de aguas subterráneas para riego apuntando a las cuencas de los ríos Ligua y Petorca. Se seleccionaron cuatro sitios, los cuales fueron evaluados económicamente, resultando en dos proyectos con rentabilidades negativas para precios de mercado y la totalidad de los proyectos con rentabilidades positivas para precios sociales, siendo los proyectos de La Ligua los mejores evaluados. Posteriormente, se efectuó un proyecto piloto en la localidad de Bartolillo, La Ligua (CNR, 2013a), el que consistió en tres piscinas de infiltración de 250 m² cada una.

La CNR ejecutó proyectos piloto de RAG entre las regiones de Valparaíso y Maule, los cuales tenían como objetivo obtener experiencia respecto de obras RAG, documentando tanto aspectos técnicos de la recarga (caudales de entrada, niveles en pozos de monitoreo, calidad de aguas, entre otros) como los problemas enfrentados (errores de diseño, disponibilidad de agua, variables no consideradas, entre otras). Los proyectos piloto se realizaron en La Palma, La Ligua, Chacabuco-Polpaico, Popeta, Marchigue y Lontué, donde se utilizaron piscinas, pozos e intervenciones en ríos.

El piloto de Chacabuco-Polpaico (CNR, 2015a), ubicado en la zona norte de la región Metropolitana, consistió en la inyección por un pozo de 40 m de profundidad. Del mismo modo, el piloto de Popeta (CNR, 2015d), al extremo sur de la región Metropolitana, consistió en un pozo de infiltración de 36 m de profundidad. Por otro lado, el piloto de Marchigue (CNR, 2014b), región del Libertador General Bernardo O'Higgins, consistió en un dique de 25 m de ancho y 1 m de altura, que aumentaba el tiempo de residencia de las aguas del estero Las Cadenas. Finalmente, el piloto de Lontué (CNR, 2015c), región del Maule, consistió en una piscina de infiltración de 450 m² totales. Además, la CNR realizó un estudio de factibilidad para implementar proyectos de recarga en cuencas del secano del Maule (CNR, 2014a), evaluando 10 sectores, de los cuales todos obtuvieron indicadores económicos negativos y solo Purapel obtuvo un VAN social positivo.

Por otra parte, La Junta de Vigilancia del Río Diguillín y sus afluentes, ubicado en la región de Ñuble, tiene una larga experiencia en cuánto a la RAG utilizando los canales de distribución en su territorio durante 8 años. Mediante un acuerdo entre la DOH y la Junta de Vigilancia se lleva a cabo la unión de canales operativos y abandonados (15 Km, los cuales actualmente se deben mantener con agua todo el año) para permitir una recarga (caudal infiltrado) de aproximadamente 6-7 m³/s a través de captaciones rústicas y con compuerta. Al reabrir las bocatomas se recuperan las napas, abasteciendo los pozos cercanos. Esto ha sido posible gracias al trabajo conjunto de la comunidad que participa activamente y ayuda con el cierre controlado de aguas cuando llueve.

Muchos de estos pilotos se ejecutaron posterior al estudio de la CNR (2013b), donde se identificaron zonas potenciales para la RAG desde Arica y Parinacota hasta la región del Maule. Este estudio contempló la realización de un focus group con actores relevantes, y un análisis de idoneidad de sitio para la RAG en 14 cuencas del país. Algunos temas destacados a través del focus group fueron:

- Se requiere conocer con precisión el funcionamiento de los acuíferos para conocer la factibilidad técnica real de la recarga.
- Uno de los objetivos de hacer pilotos es conocer el efecto de la recarga sobre la napa, su propagación sobre el acuífero, los tiempos de respuesta y la duración del efecto de la RAG.

La normativa actual es exigente respecto a la calidad de las aguas, estimando que aguas con la calidad exigida para riego sería suficiente.

Por otra parte, la metodología para seleccionar sectores idóneos para obras RAG utilizó un criterio ponderado, cuyas variables fueron el límite de los rellenos sedimentarios, la permeabilidad del acuífero y la profundidad a la que se encuentran los niveles estáticos de pozos. Los resultados indicaron que, de 38 sectores, se preseleccionaron 15, desde los cuales se mantuvieron 3 como prioritarios con diseños de RAG a través de pozos de infiltración y la estimación de los costos de las obras diseñadas. Estos sectores fueron:

- Subcuenca Mapocho y Subcuenca Norte del Maipo (Región Metropolitana)
- Subcuenca Chacabuco-Polpaico (Región Metropolitana)
- Sector Pan de Azúcar, aguas abajo de El Peñón (Región de Coquimbo)

Posteriormente, la revista AIDIS (Cabrera Fajardo, 2014) entregó información de las posibilidades técnicas para la RAG en 18 cuencas de Chile, basado principalmente en los resultados del estudio recién mencionado. Destacando que los requisitos para hacer factible un proyecto RAG son: una napa con un nivel estático o piezométrico profundo, poco conectado con los cauces superficiales del entorno, y una alta permeabilidad del relleno por el que se infiltrará el agua. Además, se menciona que el impacto económico de un proyecto será mayor si se realiza en un acuífero que está siendo sobreexplotado y que existen otras complicaciones técnicas a tener en cuenta. Por ejemplo, que el acuífero presenta pendientes provocando que el agua recargada se mueva hacia otro sector, impidiendo recuperar el agua donde interesa o que la utilización de embalses en las cuencas permite la liberación de agua en periodos de escasez, los que infiltran agua al ser transportados por canales o ríos, recargando el acuífero en el mismo periodo en el que se pretende utilizar el agua, lo que podría ser más eficiente incluso que un proyecto de recarga que infiltre aguas sobrantes de invierno para ser aprovechadas en otra época.

Por otra parte, existen obras RAG que han sido documentadas y registradas en plataformas. Sin embargo, la mayor parte de estos no fueron enfocados en el monitoreo de la cantidad de agua recargada al acuífero, sino en otras variables de interés de los estudios. La plataforma Global MAR⁸ registra un total de nueve proyectos RAG, de los cuales solo tres presentan unas cuantificaciones de variables de interés (caudal de entrada, niveles de pozos, entre otros).

Los tres proyectos registrados y que se conoce que tienen registros asociados a la RAG están documentados como "Valle de Aconcagua", "La Ligua" y "Valle de Santiago/Río del Maipo". Estos proyectos están ubicados en las localidades de Curimón (DOH, 2016), Bartolillo - La Ligua (CNR, 2013a), y Campus Antumapu de la Universidad de Chile (SCM, 2013) respectivamente. Sin embargo, existen otros seis proyectos que no presentan datos adecuados respecto a la cuantificación de la RAG.

El estudio desarrollado por Pizarro Tapia et al., (2008) entre 2002 y 2004 en distintas localidades (Hidango, Name, Llohué y Manzanares, las cuatro registradas en Global MAR), evaluó la efectividad del diseño de zanjas de infiltración y su influencia en el crecimiento de *Pinus radiata*, debido a la captura de humedad proveniente del océano y a la retención de agua lluvia, lo que permitiría una mejor infiltración. Sin embargo, sus resultados son expresados en producción de biomasa, siendo inapropiado para concluir respecto a la RAG.

El Valle del Peumo también está registrado en la plataforma de Global MAR, donde Arumí et al., (2009) cuantificaron la recarga de canales de regadío durante 2003-2006. Documentando que durante el periodo de invierno los canales permanecen cerrados e interceptan la escorrentía producto de precipitaciones, llevándolas rápidamente al río y, por ende, el nivel freático disminuye hasta el periodo de apertura de los canales de regadío, desde donde se registra un aumento paulatino producto de la filtración de agua de los canales al acuífero, registrando un nuevo descenso del nivel freático unas semanas posteriores producto de demanda por

g.- <https://apps.geodan.nl/igrac/ggis-viewer/viewer/globalmar/public/default>

evapotranspiración. Luego, el nivel del agua subterránea se mantiene estable durante la temporada de verano. Se menciona que el 52% de la RAG es producto de la filtración de canales de regadío. Sin embargo, la recarga se menciona como un aumento en el nivel freático más que en un volumen recargado.

La planta de tratamiento de agua potable Las Vegas, también está registrado dentro de la plataforma, la cual utiliza lagunas de infiltración para aumentar el caudal de entrada al Dren Las Vegas, ubicado 40 m bajo la superficie, esto mediante la utilización de agua sobrante de la bocatoma. De este modo, el estudio realizado por Tobar (2009) consideró la modelación hidrogeológica del funcionamiento del Dren Las Vegas, para establecer tasas de recarga en sectores donde podrían emplazarse nuevas lagunas de infiltración, utilizando información de estudios de terreno efectuado al momento de la construcción del dren y modelos hidrogeológicos de la cuenca del río Aconcagua encargados por la DGA. Este proyecto ha sido mencionado en múltiples documentos de RAG en Chile (DGA, 2013a; Bonilla Valverde et al., 2018), pero no se cuenta con mayor información del funcionamiento de las lagunas de infiltración existentes.

Los proyectos aquí mencionados se encuentran presente en la Figura y aquellos que han mencionado la cuantificación de la recarga efectuada han sido compilados en la Tabla 6, presentando un resumen de información relevante respecto a los proyectos y obras piloto identificadas (para más información revisar Anexo 3.2). Se identificó diez proyectos RAG, donde seis utilizaron piscinas de infiltración, cuatro utilizan pozos de infiltración (un proyecto utiliza ambos) y un proyecto utiliza infiltración en el río. La mitad de los proyectos utilizaron decantadores para reducir la turbidez de las aguas a infiltrar, siete proyectos midieron la infiltración previamente a través de pruebas de doble anillo o similares y tres documentan haber realizado pruebas de bombeo. Respecto al monitoreo, nueve han utilizado pozos de observación, ocho documentan el caudal de entrada, seis monitorean el nivel de agua alcanzado en la obra/pozo de infiltración, cinco monitorean la calidad del agua de entrada y del acuífero y tres monitorean turbidez. De este modo, son siete los proyectos que documentan una estimación del volumen total recargado. Respecto a aspectos económicos, son siete los proyectos que mencionan el costo de inversión efectuado, cuatro mencionan costos de monitoreo y solo dos mencionan costos de operación de la obra.

Los proyectos mencionados en la Tabla 6, junto con los proyectos mencionados en la plataforma Global MAR, se observan en la Figura 11.

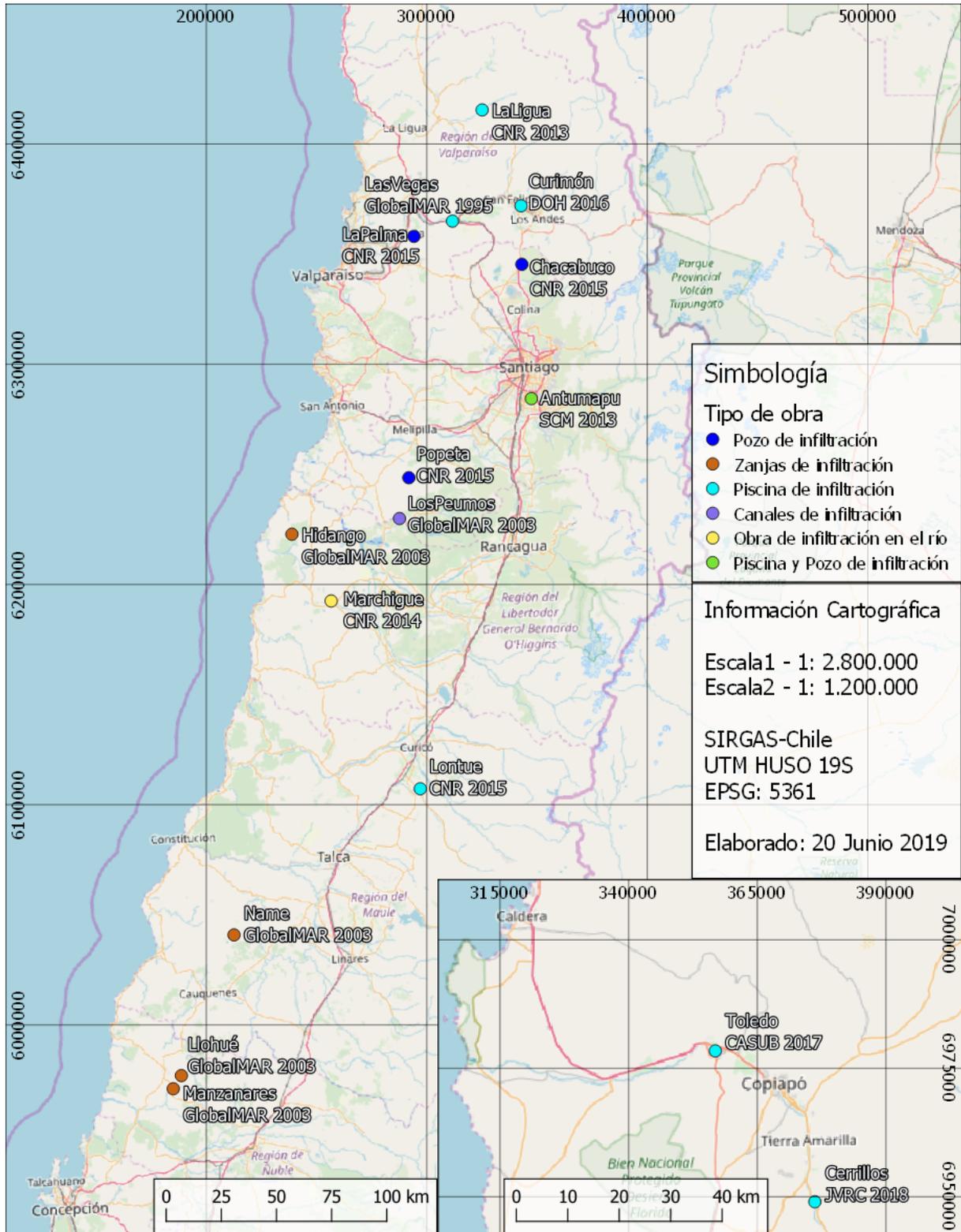


Figura 11. Proyectos de recarga de acuíferos reportados en Chile. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6. Experiencias de recarga de acuíferos en Chile (con suficiente información disponible). Fuente: Elaboración Propia según información entregada por cada proyecto.

COD	Propo- nente	Locali- zación (Cuencas DARH DGA)	Escala	Estado	Periodo inicio	Pe- riodo térmi- no	Tipo de recar- ga	Fuente de agua	Calidad de la fuente de agua	Dimen- siones	Compo- nentes	Tasa de recarga
LaLigua- CNR-2013	Comisión Nacional de Riego	Río Ligua	Piloto	No opera- tivo	11-06- 2013	13-07- 2013	Pisci- nas de infil- tración	Canal Alicahue	Física	3 piscinas de 250 m2 c/u	-	min: 6,0 m/d max: 11,8 m/d prom: -10,0 m/d
LaPalma- CNR-2015	Comisión Nacional de Riego	Río Acon- cagua	Piloto	No opera- tivo	16-10- 2014	22-11- 2014	Pozos de infil- tración	Canal UCV	Física; Química	Pozo 6" diámetro y 54 m profundi- dad	1 pozos de observación de 36 m, un Aforo con malla (para decanatar)	max: 0,25 L/s
Curimón- DOH-2016	Dirección de Obras Hidráulicas	Río Acon- cagua entre río Colorado y río Pu- taendo	Piloto	En manten- ción	05-07- 2014	30-08- 2015	Pisci- nas de infil- tración	Canal DOH	Física; Química; Baterio- lógica	2 Balsas: 2.113 m2 y 2.203 m2	Decantador: 4.500 m2; 5 Aforos	min: 1,6 m/d max: 16,1 m/d prom: 6,2 m/d otros: 30 y 50 L/s /ha
Chacabuco- CNR-2015	Comisión Nacional de Riego	Estero Cha- cabuco	Piloto	No opera- tivo	28-08- 2014	09-10- 2014	Pozos de infil- tración	Canal Chaca- buco	Física; Química	Pozo 6" de dia- metro y 40 m de profundi- dad	2 pozos de observación de 39 y 38 m de profun- didad y 6" de dia- metro; Dec- antador de 20 m2 y 1.1 m de profun- didad; Aforo; Cámara de infiltración	max: 3,5 L/s
Popeta- CNR-2015	Comisión Nacional de Riego	Estero Popeta	Piloto	No opera- tivo	14-08- 2014	18-09- 2014	Pozos de infil- tración	Agua subte- rránea	Física; Química	Pozo de 6" de diámetro y 36 m de profundi- dad	2 pozos de monitoreo con 6" de diámetro y 30 m de profun- didad; Decan- tador de 20 m2 y 1.3m de profundidad; Aforo; Camara de infiltración	max: 4,5 L/s
Marchigue- CNR-2014	Comisión Nacional de Riego	Estero Las Cadenas	Piloto	Desmante- lado	13-07- 2014	17-11- 2014	Obra de infil- tración en río	Estero Las Ca- denas	-	Dique con 1 m de altura y 25 m de ancho, superficie efectiva de 37.000 m2	5 pozos de monitoreo nuevos de 6" y 12 m de profundidad; 5 pozos de monitoreo preexistentes; 3 sensores de presión hidrostática	prom: 15,0 L/s
Lontue- CNR-2015	Comisión Nacional de Riego	Río Mata- quito	Piloto	No opera- tivo	05-10- 2014	30-10- 2014	Pisci- nas de infil- tración	Canal Calleu- que	Física; Química	Balsa: 17 m ancho, 26,5 m largo y 1,7 m profundi- dad	Decantador de 22m2 y 1,1m de profundidad; Aforador; 2 pozos de monitoreo de 6", con 15 y 25 m de profundidad	prom: 10,8 L/s

COD	Propo- nente	Locali- zación (Cuencas DARH DGA)	Escala	Estado	Periodo inicio	Pe- riodo térmi- no	Tipo de recar- ga	Fuente de agua	Calidad de la fuente de agua	Dimen- siones	Compo- nentes	Tasa de recarga
Antumapu- SCM-2016	Sociedad del Canal de Maipo	Río Mapo- cho	Proyecto	Operativo, pero sujeto a disponi- bilidad de agua	29-02-16	Vigente	Pisci- nas de infil- tración; Pozos de infil- tración	Canal Antuma- pu	Física; Química	2 piscinas de 3200 m ² c/ + 2 pozos de infiltra- ción 4" diámetro con 62 m y 73 m de profundi- dad	16 decan- tadores de 185 m ² + 1 decantador de 1.800m ² + 4 pozos de observación (1 de 180 m, resto de 33 m de profundi- dad)	Prom piscinas: 0,35 m ³ / día o 0,004 L/s Prom pozos: no se cuen- ta con informa- ción
Cerrillos- JVRC-2018	Junta de Vigilancia del Río Copiapó	Río Copiapó	Proyecto	Operativo	-	Vigente	Pisci- nas de infil- tración	Canal Com- puertas Negras	No me- dida	3 piscinas de 0,84, 1,25 y 1,69 ha	-	prom: -60 L/s (entrada a la piscina)
Toledo- CASUB-2017	Comu- nidad de Aguas Subte- rráneas Copiapó	Río Copiapó	Proyecto	Operativo, sin recarga	Jun-2017	Sep- 2018	Pisci- nas de infil- tración	Río Copiapó	No me- dida	3 piscinas de 5,24, 4,63, 2,72 ha	Serpentín decantador	prom: ~320 L/s

COD	Evaluación hidro- geológica	Calidad de agua subterránea	Programa de monitoreo	Volumen recar- gado (m ³)	Economico	Principales problemas técnicos	Principales prob- lemas de gobernanza
Chacabuco- CNR-2015	Permeabilidad	Física; Química	Caudal de entrada, turbidez ³ , pozo de observación ³ , pozo de infiltración ³ , calidad de entra- da ^{4,h} , calidad del acuífero ^{4,6} .	3.217	Inversión: \$44.353.392 Instrumenta- ción: \$9.393.034	-	-
Popeta- CNR-2015	Permeabilidad; Bombeo	Física; Química	Caudal de entrada ³ , pozo de observa- ción ³ , pozo de infil- tración ³ , calidad de entrada ^{4,6} , calidad del acuífero ^{4,6} .	-	Inversión: \$52.140.633 Instru- mentación: \$4.710.063	-	Costos de bombeo; Dis- ponibilidad de derechos de agua superficial
Marchigue- CNR-2014	Permeabilidad	-	Caudal de entrada ³ , nivel en la obra ³ , pozo de observa- ción ¹	46.550	No mencionado	Monitoreo	
Lontue- CNR-2015	Permeabilidad; Bombeo	Física; Química	Caudal de entrada ³ , turbidez ³ , pozo de observación ³ , calidad de entrada ^{4,6} , calidad del acuí- fero ^{4,6} .	23.000	Inversión: 26.868.949 Instru- mentación: \$9.493.034	-	-
Antumapu- SCM-2016	Permeabilidad; Bombeo	Física; Química	Pozo de obser- vación ¹	>2.000.000	Inversión total: 600.000.000	Disponibili- dad de agua, colmatación en las pisci- nas debido a sedimentos.	Aprobación en DGA
Cerrillos- JVRC-2018	No posee	No medida	Caudal de entrada ¹	-1.866.240	Inversión: \$8.375.000+IVA	-	-
Toledo- CA- SUB-2017	Estudio CNR-GORE 2012	No medida, pero 2km aguas abajo Aguas Chañar mide parámetros Física; Química en sus pozos de agua potable.	Caudal de entrada y salida de las piscinas (3 veces al día), Pozos de observación del nivel freático ¹	-11.826.000	Inversión: \$36.775.000 Operación: \$10.500.000 (año)	Crecimiento de algas, raíces, turbidez.	Hubo cuestionamientos por parte de la DOH sobre el emplazamiento de la obra por falta de claridad sobre la delimitación del río

Se han desarrollado otros tipos de estudios relacionados a la RAG. La DGA (2015) buscó delimitar y definir sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común en las cuencas altas de la región Metropolitana para obtener valores preliminares de recarga y dar resolución a las solicitudes de DAAs subterráneas, presentando una carencia de estudios previos. La metodología utilizada permite generar estudios preliminares en sectores acuíferos sin información de volúmenes de recarga y con demanda de DAAs subterráneas. Para estimar la recarga se utilizó la precipitación media anual, el área de las cuencas y un coeficiente de infiltración constante del 1% para toda el área de estudio. Los resultados se consideraron conservadores por parte de los autores e indican que no pueden proveer derechos debido a que existen derechos de terceros que se verían comprometidos en el valle del Maipo.

Posteriormente, Bonilla Valverde et al., (2018) buscó compilar información de esquemas RAG con el objetivo de guiar la planificación e implementación de nuevos proyectos. Los casos de estudios fueron recopilados desde publicaciones científicas disponibles gratuitamente. Se menciona que las publicaciones de reportes científicos gratuitos son escasos y que no se debe a la baja cantidad de proyectos RAG, sino a la insuficiente motivación en compartir experiencias con la comunidad científica internacional. En este artículo, Chile está categorizado como el tercer país con más estudios identificados, sin embargo, la mayoría de estos expresan sus resultados como aumento de altura de agua en pozos (Arumí et al., 2009), producción de biomasa (Pizarro Tapia et al., 2008) o estimaciones de la recarga potencial (Törey, 2014), pero sin mención la cantidad de agua efectivamente recargada.

Otro tipo de estudio, realizado recientemente por Sandoval et al., (2018) en la cuenca de Punitaqui, Región de Coquimbo, comparó dos métodos para estimar la recarga de aguas subterráneas, Thornthwaite-Mather Modificado (MTM, por sus siglas en inglés) y Análisis de Recesión de Descarga (DRA, por sus siglas en inglés). Los resultados indican una tasa de recarga de entre 1 y 4% respecto a la precipitación promedio anual y que el método MTM estima una recarga promedio consistentemente mayor respecto de DRA. Además, la descarga de agua medida en la parte baja de la cuenca tienen un desfase de aproximadamente un mes con respecto a las precipitaciones y en periodos secos aún se registra un caudal base que se infiere que es alimentado por el agua subterránea que fue recargada por las precipitaciones en épocas de lluvias.

Los estudios que tuvieron por finalidad efectuar proyectos o pilotos de RAG en Chile han seguido un proceso que, generalmente, incluye revisión de la información existente del sector en estudio, modelación hidrogeológica y posteriormente la implementación de estudios piloto. Estos pasos se fundamentan en la alta variabilidad local de las características de los suelos y rocas, haciendo que lugares próximos puedan presentar características estratigráficas diferentes. Por consecuencia, es de gran importancia ejecutar pilotos y explorar las características del terreno a través de calicatas, pozos, pruebas de infiltración y geofísica, a modo de reducir el riesgo en la inversión de un proyecto de recarga en un sitio inadecuado.

Las experiencias obtenidas en Chile demuestran que el principal problema consiste en obtener derechos de agua superficial para la realización de obras de infiltración. Además, a pesar de que los proyectos de infiltración por piscinas sean menos costosos que los pozos, no siempre es posible la realización de piscinas debido a la disponibilidad de terreno, características de suelo adecuadas, costos del suelo en determinados sectores (como en la región Metropolitana), entre otros. Adicionalmente, se menciona en los proyectos piloto de la CNR que no debiesen realizarse diseños de recarga previos a un estudio local de estratigrafía, pues donde se pretendía realizar piscinas de infiltración se debieron implementar pozos por presencia de suelos poco permeables en el terreno.

Del mismo modo, se menciona que el proceso de aprobación para operar una obra RAG es demoroso y que la DGA no cuenta en la actualidad con la capacidad para gestionar estas solicitudes, incluso luego de la realización de una guía metodológica para presentar proyectos RAG que, entre otros objetivos, permitiría que la institución contara con información para revisar y dar respuesta a las solicitudes. Es más, incluso se menciona que la Sociedad del Canal de Maipo aún no consigue respuesta a una solicitud para regularizar la obra después de su implementación, razón por la cual algunos proyectos han decidido catalogarse como "obras de infiltración" sin

mencionar recarga de acuíferos, evitando así tener que presentar su proyecto a la DGA.

Por otra parte, los proyectos piloto de la CNR y la DOH mencionan que el objetivo del piloto es obtener información para corregir el diseño de proyectos a gran escala, con el objetivo de que el proyecto a gran escala recargarse agua en épocas con mayor disponibilidad y pudiesen extraerse en épocas de escasez. Sin embargo, los pilotos no realizarían extracción de agua, solo recarga. Del mismo modo, los proyectos de la Sociedad del Canal de Maipo, la JVRC y la CASUB buscan infiltrar agua al acuífero para dar mayor seguridad a personas que ya cuentan con derechos y no buscan solicitar nuevos DAAs subterráneas, por ende, ninguno de estos proyectos debió pasar finalmente por la aprobación de la DGA según la normativa vigente.

Finalmente, existen otros proyectos RAG (humedales artificiales, recargas por parte de minería, lagunas artificiales, canales de riego no revestidos, entre otros), los cuales no fueron mencionados en este estudio debido a no disponer con documentos que cuantifiquen las recargas y describan las obras.

4.3.- Localización de oportunidades para la recarga de acuíferos

Esta sección entrega una descripción hidrogeológica de cuatro regiones de Chile, correspondientes a Atacama, Valparaíso, Metropolitana y Libertador General Bernardo O'Higgins. Además, provee una evaluación preliminar de idoneidad de sitio para la RAG, mediante la incorporación de un criterio de priorización a los resultados obtenidos por la CNR durante el año 2013. Finalmente, se menciona la información espacial generada y recopilada durante el transcurso del proyecto.

4.3.1.- Zonificación hidrogeológica de acuíferos

Conocer las características geológicas del subsuelo permite entender el comportamiento del agua subterránea en profundidad y su interacción con el agua superficial. La caracterización hidrogeológica de las diferentes regiones de interés se ha realizado a través de información espacial proveniente de la DGA, a partir del Mapa hidrogeológico de Chile (DGA, 1989), específicamente del archivo "ocurrencia de aguas subterráneas" proporcionado por la DGA en su Mapotecaⁱ. Este presenta la delimitación de las características hidrogeológicas a una escala gruesa (1:1.000.000) a nivel nacional. Además, esta información hidrogeológica permite relacionar las características generales de la roca/suelo presente en cada sector y su importancia hidrogeológica desde el punto de vista de las unidades geológicas que favorecen en diferente grado la ocurrencia de las aguas subterráneas, siendo una característica esencial la permeabilidad al acuífero.

La zonificación hidrogeológica de la región de Atacama puede observarse en la Figura 9, el resto de las regiones de interés pueden observarse en el Anexo 3.3, donde los depósitos no consolidados (rellenos) presentan una permeabilidad alta a media, mientras que las rocas metamórficas y sedimentarias y rocas plutónicas e hipabisales tienen permeabilidad nula, y las rocas sedimentarias y mixtas sedimentarias volcánicas y rocas volcánicas presentan una permeabilidad muy baja. En general, el mayor potencial hidrogeológico se presenta en secuencias que conforman el relleno sedimentario de los valles o cuencas principales.

i.- ver GuiasGRA_AnexoDigital\Cap4.4\2. Datos Recopilados\3. MapotecaDGA

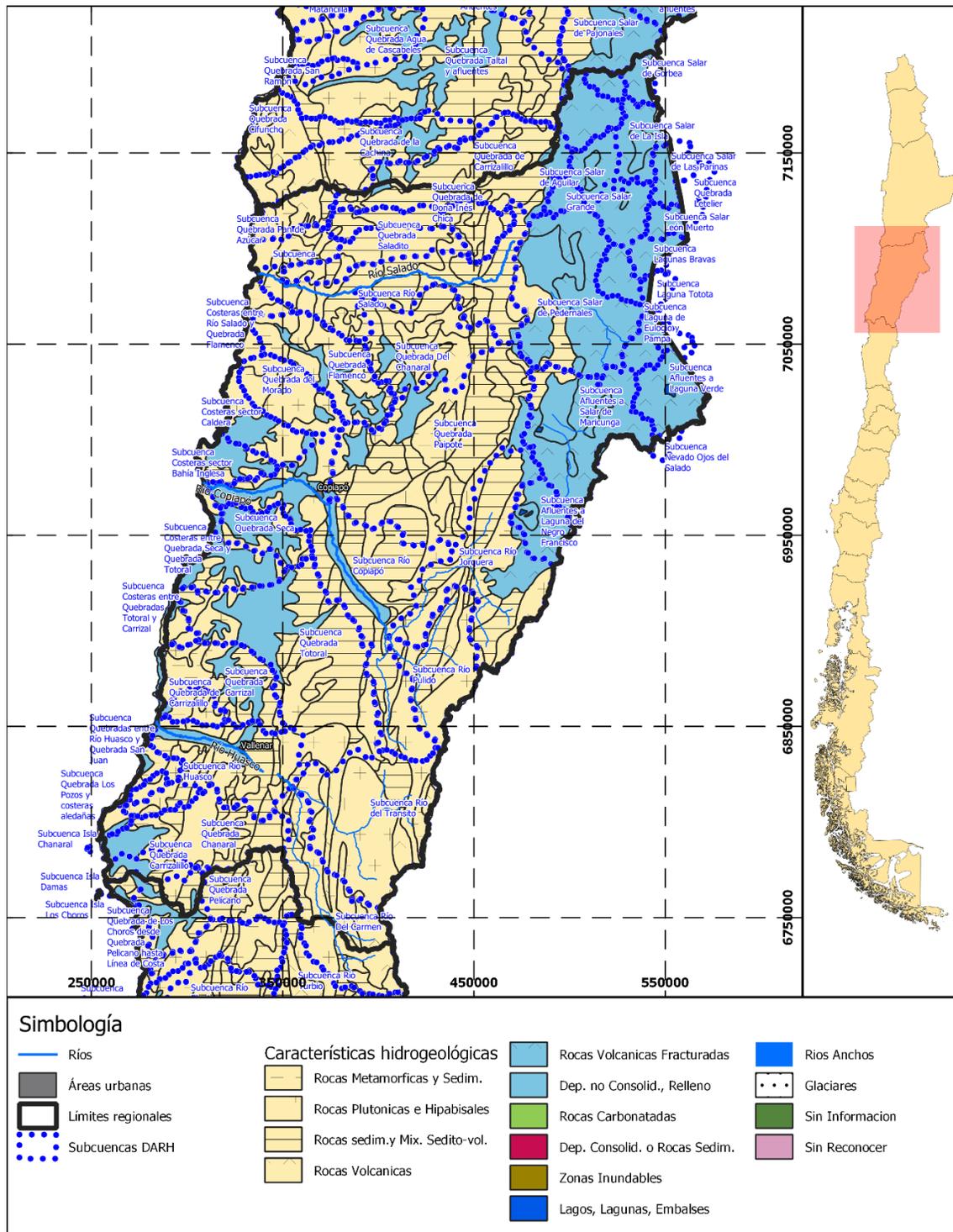


Figura 12. Zonificación hidrogeológica de la región de Atacama. Fuente: Elaboración propia, con datos de la DGA (1989).

En la región de Atacama, es posible reconocer que la ocurrencia de aguas subterráneas se concentra en las cuencas del valle del río Copiapó, del valle del río Huasco, Costeras y Altiplánicas (ver Figura 9). En general, éste se presenta en secuencias que conforman el relleno sedimentario de los valles o cuencas principales. Para el caso de las cuencas altiplánicas, este potencial se presenta en ambientes de roca fracturada, donde para el caso de las cuencas cerradas, el agua subterránea presenta una elevada salinidad en ambientes de salar. Con un potencial hidrogeológico menor, se presentan las unidades de roca de diverso origen que constituyen los relieves rocosos que conforman las laderas de los valles principales y secundarios. Por tanto, a escala regional, las principales cuencas o de mayor relevancia para proyectos de recarga artificial, corresponden a las cuencas de los valles del río Copiapó y del río Huasco y a las cuencas Costeras de esta región.

Para la región de Valparaíso, es posible reconocer que la ocurrencia de las aguas subterráneas se concentra en las cuencas de los valles de los ríos Aconcagua-Putaendo, La Ligua, Petorca y del estero Casablanca y, en menor medida, también en las cuencas Costeras de esta región. De igual modo, es posible reconocer que la ocurrencia de aguas subterráneas en la Región Metropolitana se concentra en las cuencas de los valles de los ríos Maipo, Colina, estero Puangue y en sectores puntuales de las cuencas Costeras de esta región. Finalmente, en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, es posible reconocer que la ocurrencia de aguas subterráneas se concentra en las cuencas de los valles de los ríos Cachapoal, Tinguiririca, Rapel, estero El Yali, estero Puangue y en sectores puntuales de las cuencas Costeras de esta región.

Se debe destacar que en las zonas urbanas de estas regiones: Copiapó, Los Andes, San Felipe, Quillota, La Calera, Valparaíso, Viña del Mar, Santiago, Melipilla, Peñaflor, Rancagua, Rengo, San Fernando y otros sectores con amplia cobertura urbana, los proyectos de recarga se ven limitados por espacio disponible de acceso al acuífero.

4.3.2.- Idoneidad de recarga de acuíferos

La exploración de sitios idóneos para la recarga de acuíferos a nivel nacional ha sido escasa, siendo el estudio desarrollado por la CNR (2013b) el único que ha considerado una escala plurirregional. Sin embargo, podría ser insuficiente para determinar sectores donde implementar proyectos de recarga de acuíferos gestionada.

Un sitio que presenta una alta idoneidad de recarga de contar con un suministro de agua de calidad y cantidad suficiente disponible, y las condiciones superficiales y subsuperficiales favorables para desarrollar un proyecto de recarga de acuíferos gestionada (Russo et al., 2015). La plataforma SAGBI, que utiliza el índice del mismo nombre (O'Geen et al., 2015), permite una evaluación sitio-específica de la idoneidad basada en productos grillados utilizando una resolución adecuada. Mientras que el análisis efectuado por la CNR utilizó productos vectorizados con polígonos de gran extensión, lo que lleva a homogeneizar las características de distintos sectores dentro de cada macro-sitio y, por consecuencia, los resultados indican los macro-sitios en los cuales es más factible desarrollar recarga, pero no dónde implementarla específicamente.

Otro aspecto a considerar corresponde a la metodología empleada. La estandarización utilizada para variables, como la profundidad del nivel freático, lleva los valores mínimos y máximos observados en pozos a valores entre cero y uno, lo que lleva por consecuencia a que un nivel freático de 100 metros de profundidad sea aproximadamente el doble de idóneo que uno de 50 metros de profundidad (esto dependiendo de las ponderaciones adoptadas en las variables), pudiendo resultar excesivo considerando que ambos casos representan un potencial de recarga adecuado bajo circunstancias de buena porosidad, disponibilidad de agua para recargar, entre otros.

Por otra parte, es importante identificar si el análisis debiese enfocarse en el beneficiario, por ejemplo, si está orientado en los agricultores debiese considerarse una recarga tal que aumente el nivel del acuífero al alcance de sus pozos. También se requiere identificar la necesidad de distintos sectores ante la implementación de un proyecto de recarga de acuíferos gestionada, debido a que proyectos con mayor demanda y menor disponibilidad del recurso hídrico debiese ser priorizado por sobre aquel proyecto que posea un mismo índice de idoneidad, es decir, sólo idóneos a partir de sus características hidrogeológicas, pero sin problemas del recurso.

Es posible incorporar la necesidad de implementar proyectos de recarga artificial de acuíferos como una nueva variable a la metodología empleado por la CNR, a través del uso de la delimitación de las zonas de prohibición de aguas subterráneas y las áreas de restricción de aguas subterráneas decretadas por la DGA. Una breve descripción de estas declaraciones es presentada a continuación:

Áreas de restricción de aguas subterráneas: La declaración de área de restricción de aguas subterráneas es un instrumento utilizado por la DGA para proteger Sectores Hidrológicos de Aprovechamiento Común (SHAC) donde exista grave riesgo de descenso en los niveles de agua con el consiguiente perjuicio a los derechos de terceros establecidos en él o bien, cuando los informes técnicos emitidos por el Servicio demuestren que está en peligro la sustentabilidad del acuífero. Una vez emitida esta declaración, la DGA sólo podrá otorgar derechos de aprovechamiento con carácter provisional.

Zonas de prohibición de aguas subterráneas: La declaración de zona de prohibición es un mecanismo mediante el cual la DGA protege la sustentabilidad de un acuífero. Esta declaración, a diferencia del área de restricción, se produce cuando la disponibilidad del recurso hídrico se encuentra totalmente comprometida tanto en carácter de definitivo como provisional, por lo que no es posible constituir nuevos derechos de aprovechamiento.

Las zonas de prohibición y restricción de la DGA se utilizaron como un ponderador del índice de idoneidad de sitios del estudio de la CNR, utilizando los siguientes valores:

-  1,0 si el sector se ubica dentro de una zona de prohibición de aguas subterráneas, por consecuencia, se mantiene su valor de idoneidad.
-  0,7 si el sector se ubica en un área con restricción de aguas subterráneas, por ende, se disminuye levemente el valor de idoneidad respecto de los resultados de la CNR.
-  0,4 en caso contrario a las condiciones de las ponderaciones anteriores, evidenciando escaso conflicto hídrico, llevando a una gran disminución del índice de idoneidad, lo que resulta en una menor priorización.

Este análisis fue efectuado en las regiones de Atacama, Valparaíso, Metropolitana y del Libertador General Bernardo O'Higgins, y sus resultados se pueden visualizar en el Anexo 3.4. A continuación, se describe los resultados observados y se presenta la Figura 10 asociada a la región de Atacama como ejemplo.

La región de Atacama presenta un fuerte conflicto hídrico en la cuenca del río Copiapó, evidenciado en la declaración de prohibición de aguas subterráneas desde la ciudad de Copiapó hacia aguas arriba y por la presencia de una declaración de restricción desde la ciudad de Copiapó hacia aguas abajo. Se evidencia que el sector con mejores características para recarga de acuíferos en la cuenca corresponde al sector de Tierra Amarilla hacia aguas arriba (índice de 25,1). Sin embargo, se destaca que el sector de Copiapó-Paipote posee un valor cercano (18,7), incluso superior al de aguas abajo a la ciudad de Copiapó (13,1). A pesar de lo anterior, la gruesa escala del análisis agrupado en macro-sectores impide identificar la idoneidad de sectores que han declarado alta infiltración, como las piscinas de CASUB en el sector de Toledo, donde se encuentra uno de los índices más bajos de toda la cuenca (13,1).

Además, los cambios generados por el índice de idoneidad modificado corresponden a una disminución del índice en la parte alta de la quebrada de Paipote desde 18,7 a 7,5. Mientras el sector de río debajo de la ciudad de Copiapó disminuyó su priorización desde 18,7 a 13,1, manteniendo así los valores de las cercanías de la ciudad de Copiapó (18,7) y de tierra amarilla hacia aguas arriba (25,1).

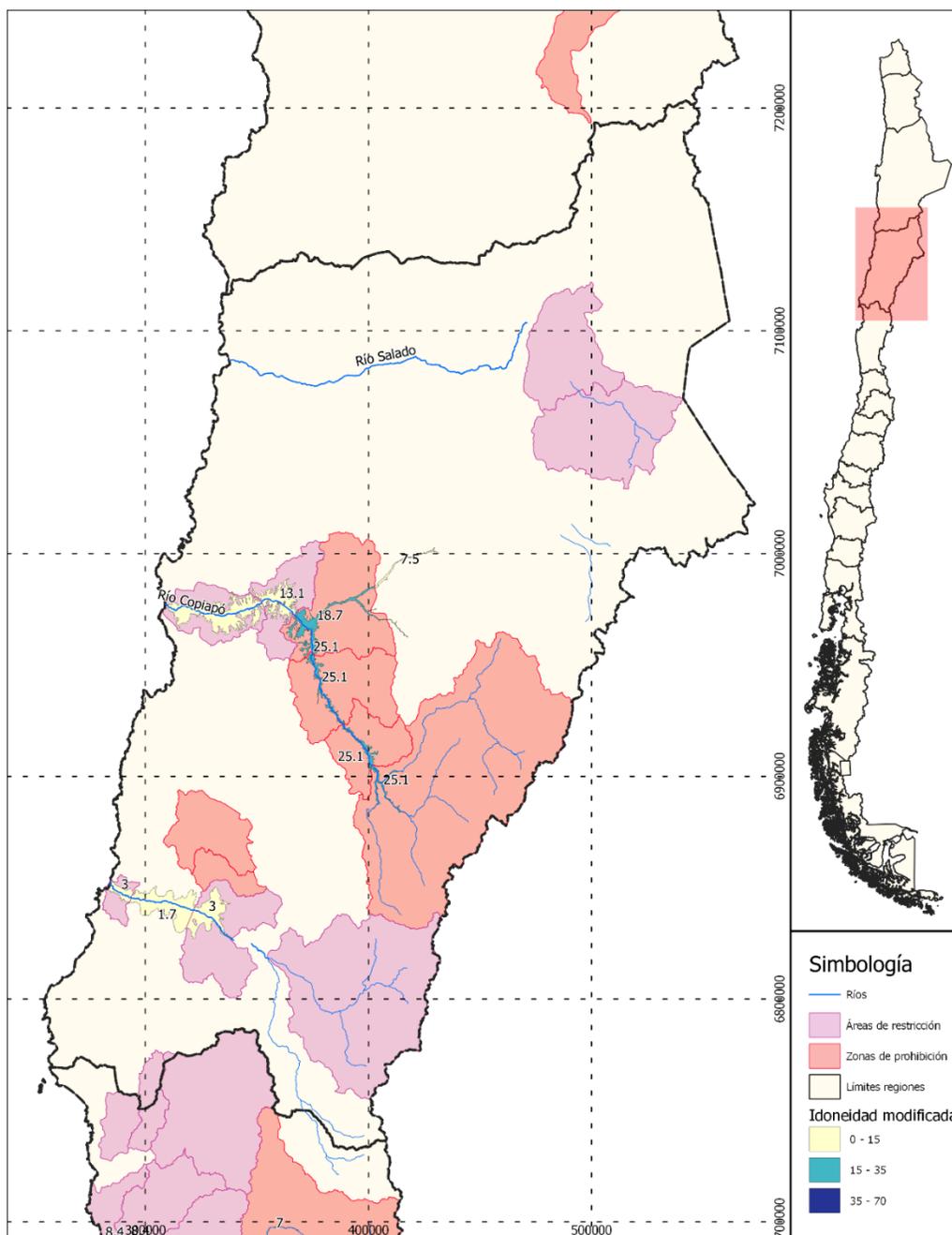


Figura 13. Idoneidad de sitios para recarga de acuíferos con un criterio de priorización en la región de Atacama.
Fuente: Elaboración Propia, con datos de la CNR (2013b) y la DGA (varios).

Por otro lado, la región de Valparaíso se encuentra casi completamente cubierta por sectores con declaraciones de restricción, mientras que la cuenca de los ríos Petorca y La Ligua se encuentran con declaración de prohibición. Sin embargo, y pese a la incorporación de una priorización diferenciada entre las distintas declaraciones presente en la región, los resultados indican que las cuencas del río Petorca y La Ligua presentan una baja idoneidad de recarga pese a la necesidad presente en ellas. En cambio, la cuenca del río Aconcagua presenta una alta idoneidad en la primera sección, aguas arriba de la localidad de San Felipe (46,5), así como también el valle del río Putaendo (70,0), muy superior a cualquier otro sector dentro de la región.

De manera similar, la región Metropolitana cuenta con declaraciones de restricción en la mayor parte de la región bajo la precordillera y cuenta con una declaración de prohibición en el sector sudeste de Paine. Es importante notar los patrones de idoneidad identificados en la región, donde los sectores que son parte de la cordillera de la costa tienen una baja idoneidad (<15,0). Los sectores norte (cuena del estero Colina) y sur (cuena del río Maipo al sector sur del río) de Santiago presentan una idoneidad media y el sector de Santiago presenta la mayor idoneidad de la región Metropolitana, en la cuena del río Maipo entre el río Maipo y el río Mapocho, incluyendo parte del estero Tiltil por el norte (38,1).

Finalmente, la región del Libertador General Bernardo O'Higgins muestra un patrón similar a la región Metropolitana respecto a las declaraciones de restricción de aguas subterráneas, donde se puede observar una gran proporción de la región bajo esta categoría de declaración, excluyendo la precordillera y sectores de mayor altitud. De este modo, se identifica la cuena del río Cachapoal (parte intermedia) como aquella que presenta una mejor idoneidad con respecto a la del río Tinguiririca.

A partir de estos resultados de priorización preliminar se pueden evidenciar algunos aspectos. La priorización por zonas de restricción y prohibición ayudó a reducir los macro-sitios del estudio previo, gracias a la incorporación de zonas que subdividían estos sectores. Sin embargo, esta priorización no fue suficiente para abordar los problemas hídricos de las distintas regiones. Se muestran algunos casos donde el aumento de idoneidad de sitios en prohibición de nuevos derechos de extracción no es suficiente con respecto a sus vecinos (sector de Paine en la región Metropolitana o La Ligua en Valparaíso), además, sigue imperando la caracterización de macro-sitio discutida anteriormente, lo que no permite determinar pequeños sectores que en la práctica tienen un gran potencial de recarga, como Toledo en la región de Atacama.

Se recomienda utilizar la priorización a través de un balance hídrico, priorizando en mayor medida aquellos sectores donde haya mayor escasez de agua y donde se identifique claramente el posible aporte de la implementación de obras de recarga de acuíferos a través del aumento de la seguridad hídrica de los distintos usuarios del agua, lo que además permitirá diferenciar qué cuencas son más prioritarias a través de la diferencia entre los derechos entregados (superficiales y subterráneos) y el balance hídrico elaborado.

Por otro lado, los proyectos piloto que han sido implementados buscaron evaluar la idoneidad del sitio para recarga de acuíferos gestionada, por lo que se hace necesario continuar realizando estudios enfocados en localizar sitios donde ejecutar las obras bajo diferentes tipos de acuíferos, incluso aquellos que se definan más complejos, como los acuíferos fracturados limitados por barrera impermeables, los cuales podrían presentar condiciones adecuadas para el almacenamiento de las aguas subterráneas, aun cuando sus características son muy poco conocidas en Chile, salvo para la gran minería. De este modo, es de gran importancia continuar realizando estudios hidrogeológicos para mejorar la información requerida para detectar sitios idóneos de recarga y se considera relevante incluir aspectos tales como: descripción y características geológicas e hidrogeológicas del sector de la recarga, incluyendo la zona no saturada, describiendo la distribución espacial de parámetros de permeabilidad, almacenamiento y geometría del sector; niveles piezométricos del o de los acuíferos; calidad de aguas del acuífero, grados de confinamiento del acuífero o de los acuíferos; y calidad y características de las aguas que se infiltrarán y relación con aguas superficiales del acuífero. Relevante es incorporar un análisis de vulnerabilidad y riesgo a la contaminación de los acuíferos, un plan de monitoreo y de acción ante emergencias por eventuales contaminaciones.

4.3.3.- Descripción de datos generados y recopilados

La información espacial generada durante el transcurso de este proyecto corresponde a dos archivos principales; la ubicación de proyectos piloto de recarga de acuíferos en Chile^j que han sido documentados y están descritos en diferentes secciones de este documento, y los resultados del análisis de priorización de idoneidad de recarga^k, descrito en el capítulo anterior.

j.- Ver archivo "PilotosMAR_EPSG-32719.shp" en GuíasGRA_AnexoDigital\Cap4.4\1. Datos Generados\1. ProyectosPilotos_Chile

k.- Ver archivo "Idoneidad.shp" en GuíasGRA_AnexoDigital\Cap4.4\1. Datos Generados\2. IdoneidadPriorizada

El primero, corresponde a un archivo de puntos que contiene información del tipo de obra, los objetivos, la institución a cargo, su estado y si corresponde a un estudio o un piloto. El segundo, contiene los valores de permeabilidad, profundidad del nivel freático, los valores estandarizados de estas variables y el índice global. Además, contiene el índice global modificado (Ind.Glob.M) resultante del análisis realizado con anterioridad.

Por otra parte, la información recopilada corresponde a los datos de entradas y salidas del estudio de la CNR (2013b) respecto a idoneidad de sitios^l. Además de la exploración de la información espacial disponible en la web de la CNR^m e información presente en la Mapoteca de la DGAⁿ.

Los datos del estudio de la CNR (2013b) se encuentran a una escala casi nacional e incluyen los niveles freáticos de distintos pozos a través de un archivo de puntos, un polígono con la permeabilidad de los acuíferos obtenida mediante la recopilación de múltiples estudios y modelos, un polígono con la delimitación del relleno sedimentario dentro del cual se ubican los acuíferos y los resultados del estudio mediante un polígono que incluye la información de las variables de entrada previas a la estandarización, las variables de entrada estandarizadas y el resultado global del índice de idoneidad posterior a la ponderación.

Además, se revisó la información del Sistema de información integral de riego de la CNR^o, observando la presencia de distintos archivos espaciales, incluyendo: ubicación de sitios Ramsar, Vegas protegidas de la I, II, y XV región, Ley de fomento al riego, pozos de riego, pozos con otros usos, ubicación, tipo y estado de las bocatomas, nombre y tipo de cauces naturales, canales, subcuencas hidrográficas, principales embalses y su capacidad, acuíferos y sus coeficiente de almacenamiento, descarga anual espesor, oferta potencial, entre otros. Acuíferos protegidos de la I, II y XV región, Zonas de restricción y prohibición a agosto de 2015, zonas de reserva de caudales, zonas de declaración de agotamiento a Julio de 2011, y suelos con su clasificación de potencial productivo, erosión, pendiente, profundidad y serie.

Por otra parte, se obtuvo la mapoteca de la DGA, donde se manejan las capas de interés de esta institución. La información allí contenida se puede clasificar en seis grandes grupos: Cuencas, zonas con decretos, monitoreo, hidrogeología, balance hídrico y otros.

El primer grupo correspondiente a cuencas mantiene distintos niveles de profundidad en la clasificación de cuencas e incluye las cuencas delimitadas por DARH y por la BNA. Las cuencas DARH están recomendadas por la institución para la realización de estudios científicos, debido a que las cuencas BNA son imprecisas desde el punto de vista hidrológico, pero fueron utilizadas para el otorgamiento de derechos de aguas, por lo que aún se utilizan administrativa y legalmente.

El segundo grupo contiene información de las zonas de prohibición, áreas de restricción, decretos de escasez y reservas de caudales. Si bien la CNR maneja esta información en su portal web, es conveniente utilizar la información de la DGA debido a que puede contener actualizaciones.

El tercer grupo corresponde a monitoreo y agrupa las características y ubicación de estaciones de calidad de aguas, fluviométricas, sedimentométricas, meteorológicas y niveles freáticos de pozos.

El cuarto grupo corresponde a información hidrogeológica útil para cartografías, aquí se agrupan datos de pozos, perfiles hidrogeológicos, datos hidrogeográficos, productividad de pozos, tipo de rocas, ubicación de fallas, importancia hidrogeológica en permeabilidad, entre otros.

El grupo de balance hídrico mantiene información general de meteorología de Chile, encontrándose capas de escorrentía, evaporación estimada por tanques, evapotranspiración real, isotermas, isoyectas, entre otros.

l.- Ver GuíasGRA_AnexoDigital\Cap4.4\2. Datos Recopilados\1. DatosIdoneidadCNR2013

m.- Ver GuíasGRA_AnexoDigital\Cap4.4\2. Datos Recopilados\2. Datos_esiirCNR

n.- Ver GuíasGRA_AnexoDigital\Cap4.4\2. Datos Recopilados\3. MapotecaDGA

o.- <https://esiir.cnr.gob.cl/>

Por último, el grupo de otras capas posee información de embalses, canales de la CNR, ubicación de obras de Agua Potable Rural, plantas desaladoras, principales embalses, lagos, entre otros.

La información espacial de importancia hidrogeológica y/o asociada a la RAG se presenta adjunta junto con este informe. Por otra parte, es de importancia señalar que la información espacial de la CNR sigue guías respecto a los nombres y unidades que manejan los atributos, que, si bien la DGA presenta mucha información con criterios similares, no presentan una pauta respecto a su información espacial. Sin embargo, la consulta respecto a la información espacial a la DGA derivó en que ellos se encuentran trabajando en la implementación de una pauta similar a la que utiliza la CNR para gestionar de mejor forma sus datos.

5.- Aspectos financieros y económicos de la recarga de acuíferos

El agua ha sido reconocida como un bien económico, pero su precio casi nunca se fija por un mercado libre. Muchos de los proyectos que involucran la RAG no son evaluados necesariamente solo sobre la base de la rentabilidad para el propietario y operador del sistema. Por ejemplo, las empresas de servicios sanitarios a menudo tienen mandatos para proveer niveles específicos de servicios independientes de la rentabilidad de cada componente del sistema individual. El agua tiene valores sociales y medioambientales como elemento necesario para la vida, pero son difíciles de cuantificar en términos monetarios. Por ende, frecuentemente se provee agua a las comunidades más vulnerables o para beneficios ambientales, incluso si los beneficios no cubren los costos. Los proyectos gubernamentales también son a menudo financiados, en su mayoría o en parte, por ingresos generales en vez de completamente con ingresos de la venta del agua, con el objetivo de alcanzar beneficios sociales. Por ende, es posible que los proyectos RAG se evalúen en términos económicos comparándolos con escenarios no gestionados (por ejemplo, evitar costos de daños en la Tabla 7) o con otras opciones de gestión o tratamiento de agua para alcanzar los mismos objetivos (por ejemplo, método de costo alternativo en la Tabla 7).

La sostenibilidad de los proyectos RAG también depende de la factibilidad financiera, que aborda si el financiamiento está disponible para un proyecto y la manera en que éste se pagará. En los países en desarrollo, existen proyectos RAG disponibles que podrían ser económicamente factibles, es decir, sus beneficios superan los costos, y podrían mejorar considerablemente la calidad de vida de las personas, pero los recursos financieros no están disponibles. Los proyectos hídricos a menudo deben competir por recursos financieros limitados contra otros tipos de proyectos, como, por ejemplo, salud o transporte, que también entregan beneficios sociales. Por otra parte, el valor del agua también varía enormemente dependiendo de las circunstancias locales.

Debido a que el agua es crucial para la vida, puede llegar a ser invaluable durante periodos de escasez extrema. Por el contrario, durante los períodos de suministro abundante, el valor de mercado del agua puede ser muy bajo y en caso de aluviones se transforma en un pasivo con alto riesgo y otros costos asociados, es decir, tiene valor neto negativo.

Maliva (2014) en su libro *Economía de la Recarga de Acuíferos Gestionada (Economics of Managed Aquifer Recharge)* presenta un método generalizado para analizar los aspectos económicos de RAG. Los procedimientos para el análisis de los beneficios económicos del agua subterránea presentados por Bergstrom et al., (1996) y el National Research Council (1997) entregan un marco básico para evaluar los aspectos económicos de los sistemas RAG. El primer paso en la evaluación es un análisis de los cambios en la calidad y cantidad del agua subterránea que resultan de la implementación de un proyecto RAG. Dichos cambios se evalúan en relación con un estado de referencia, que generalmente serían las condiciones actuales o normales. Posteriormente se evalúan los cambios en los servicios de agua subterránea que resultan de la modificación en la cantidad y calidad del agua subterránea. Finalmente, se evalúa el valor económico del cambio en los servicios de agua subterránea.

El principal riesgo e incertidumbre asociados con los sistemas RAG es que pueden no cumplir con los objetivos

de desempeño. El rendimiento del sistema depende de las condiciones hidrogeológicas locales, que pueden resultar desfavorables para lograr los objetivos del sistema. Algunos de los resultados adversos incluyen (modificado del artículo Maliva (2014): Economía de la Gestión de la Recarga de Acuíferos):

- La recarga no puede resultar en cambios anticipados en los niveles freáticos
- Baja eficiencia de recuperación (volúmenes o tiempo)
- Peligros inesperados de la calidad del agua introducidos a través de reacciones geoquímicas (por ejemplo, movilización de arsénico, precipitación de hierro, inestabilidad de la matriz del acuífero)
- Problemas de rendimiento de recarga (por ejemplo, capacidades de pozos o permeabilidad del suelo o acuífero inferior al esperado)
- Obstrucción excesiva de la infraestructura de recarga (por ejemplo, pozos, piscinas de infiltración)
- No se alcanzan los objetivos de calidad del agua
- Impactos hidráulicos inesperados (por ejemplo, anegamiento)
- No se alcanza la demanda o no genera los beneficios previstos

La incertidumbre puede reducirse mediante la recopilación de datos específicos del sitio. A medida que se desarrolla un proyecto RAG, es prudente realizar investigaciones proporcionales al gasto para aumentar la confianza de la inversión.

Además de la incertidumbre del rendimiento, otros factores que deben considerarse incluyen:

- Acceso a la fuente del agua; seguridad del suministro; suficientes derechos de aprovechamiento de aguas (DAA)
- Demanda futura de agua recuperada, incluidos los posibles cambios en la demanda
- Riesgos de la calidad del agua para el acuífero, los usuarios finales u otros usuarios de aguas subterráneas, incluida la contaminación del sitio asociada con el uso histórico, actual o futuro de la tierra en la cuenca
- Disponibilidad de profesionales técnicos calificados
- Estructura de gobernanza (finanzas y gestión continuas)
- Marcos regulatorios y legales
- Responsabilidad, garantías y seguros
- Percepción/aceptación pública
- Aumento de costos del proyecto, plazos de tiempo
- Seguridad pública

Para la evaluación económica de proyectos RAG se recomienda aplicar dos métodos: un análisis de costo-beneficio del proyecto y un costo nivelado del suministro de agua. A continuación, se ofrece una breve explicación de cada uno de ellos y se anima al lector a seguir desarrollando sus conocimientos con las referencias citadas.

5.1.- Análisis de costo-beneficio

Análisis de costo-beneficio (ACB), es un enfoque sistemático para estimar las fortalezas y debilidades de las alternativas, utilizada para determinar las opciones que proporcionan el mejor enfoque para lograr los beneficios. Se utiliza un ACB para comparar proyectos potenciales o para estimar (o evaluar) el valor contra el costo de un proyecto. ACB tiene dos aplicaciones principales:

- 1.- Para determinar si una inversión es sólida, verifique si sus beneficios superan sus costos y en qué medida.
- 2.- Para proporcionar una base para comparar inversiones, comparando el costo total esperado de cada opción con sus beneficios totales esperados.

El grupo de trabajo económico de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos para la Recarga de Acuíferos Gestionada (International Association of Hydrogeologists Managed Aquifer Recharge) (IAH-MAR) recomienda la utilización del análisis de costo-beneficio para evaluar proyectos RAG. No existe un formato "estándar" para realizar un ACB, sin embargo, hay ciertos elementos centrales que están presentes en casi todos los análisis. Las fases del diseño de un análisis de costo-beneficio son generalmente (Ruperez-Moreno et al., 2017):

1. Identificar y evaluar todos los costos y beneficios del proyecto RAG, en términos monetarios
2. Establecer el horizonte de tiempo de la evaluación; aproximadamente 30 años para un proyecto RAG
3. Fijar la tasa de descuento, generalmente establecida por la tesorería en cada país
4. Seleccionar indicadores de rentabilidad
5. Analizar las variables más inciertas

Los costos de los proyectos RAG incluyen la inversión inicial, operación, mantenimiento y también pueden incluir costos financieros (servicio de préstamos). Ejemplos de costos de inversión inicial para proyectos RAG son (Maliva, 2014):

- Terreno
- Costos de prueba, análisis de factibilidad
- Servicios de consultoría para el diseño, permisos y supervisión de la construcción
- Costos de construcción (por ejemplo, caminos, tuberías, instrumentación, controles y sistemas de pretratamiento)
- Requisitos de pruebas regulatorias durante la construcción y pruebas operacionales

Ejemplos de costos de operación y mantenimiento del proyecto RAG incluyen (Maliva, 2014):

- Costos laborales (operación del sistema, requisitos regulatorios, administración)
- Electricidad
- Servicios de consultoría
- Requisitos de pruebas regulatorias (por ejemplo, pruebas de calidad del agua)
- Costos de mantenimiento (por ejemplo, reemplazo de piezas, rehabilitación de pozos y piscinas)

- 💧 Costos de pretratamiento (tratamiento adicional antes de la recarga)
- 💧 Costos post tratamiento (por ejemplo, cloración)
- 💧 Costos de agua sin tratar

La Tabla 7 describe una variedad de opciones disponibles para cuantificar los beneficios del proyecto RAG (modificado de Maliva, 2014). La selección del método más apropiado depende de factores específicos del sitio relacionados con los objetivos del proyecto RAG.

Tabla 7. Métodos para cuantificar los beneficios de los proyectos RAG. Fuente: modificado de Maliva (2014).

Método	Descripción
Precios de mercado	Valor del agua determinado por los precios reales establecidos por compradores y vendedores en un mercado competitivo.
Costo alternativo	El valor del almacenamiento o tratamiento del agua se determina a partir del costo de la alternativa menos costosa que proporciona beneficios comparables.
Valor del producto marginal	El valor del agua se cuantifica a partir de la productividad marginal del agua, es decir, el valor adicional de la producción que se puede obtener de aplicaciones adicionales de agua.
Valor contingente	Métodos basados en encuestas para determinar la disposición a pagar de un individuo o la disposición a aceptar una compensación por un bien o servicio.
Valor de propiedad hedónica	El valor del agua se infiere de las transacciones de mercado (por ejemplo, ventas de bienes raíces) que están vinculadas al valor del agua.
Comportamiento defensivo	El valor de un suministro de agua seguro y confiable se puede estimar a partir de los gastos para evitar la exposición al agua no segura.
Costo de daño	El valor del agua se estima a partir de los costos de daños evitados, como los impactos en la salud o los daños por sequía.
Valor de agua subterránea in situ.	El valor del sistema RAG se calcula a partir de los costos evitados que resultan de tener agua subterránea adicional en un lugar específico, como los costos de bombeo y hundimiento de la tierra.

Una vez realizado, un ACB tendrá resultados concretos que se pueden utilizar para desarrollar conclusiones razonables sobre la viabilidad y/o conveniencia de la decisión del proyecto RAG.

Existe una herramienta gratuita de evaluación económica del agua reciclada (Recycled Water Economic Assessment Tool^P) que es implementada en Excel y que permite a los usuarios realizar análisis costo-beneficio para cuantificar un rango de beneficios económicos, sociales y ambientales, y el costo de los proyectos de reciclaje de aguas. La herramienta fue diseñada como un sistema de uso sencillo para evaluar alternativas de reciclaje de agua, principalmente para propósitos no-potables. Eventualmente, se podría desarrollar una herramienta similar para evaluar proyectos RAG.

En Chile, proyectos que requieren una relativamente grande inversión por el Estado tienen que ser evaluados por su impacto social que generan. Dado el aumento sustantivo de montos existentes en la Ley 18.450, el Estado ha establecido nuevos requisitos para postular un proyecto mayor que 15.000 UF, éstos son: evaluación social y posibles permisos medio ambientales cuando proceda⁹.

1) Evaluación social

Los proyectos cuyo costo supere las 15.000 UF, deberán presentar su evaluación social al Sistema Nacional de Inversiones (SNI) y contar con la recomendación favorable del Ministerio de Desarrollo Social (MIDESO). El plazo para pronunciarse respecto de la recomendación será de 60 días corridos, contado desde la fecha de ingreso de la respectiva solicitud ante el mencionado Ministerio. El interesado podrá invocar el silencio administrativo positivo en caso de no existir pronunciamiento de la autoridad dentro del plazo antes señalado^r.

2) Tipos de obras

Dadas las características y magnitud de las obras que podrán presentarse a concurso, deberá tenerse presente que el Artículo 294 del Código de Aguas^s establece que requerirán de la aprobación del Director General de Aguas la construcción de las siguientes obras:

- a) Los embalses de capacidad superior a 50.000 m³ o cuyo muro tenga más de 5 metros de altura.
- b) Acueductos que conduzcan más de 2 m³/s.
- c) Acueductos que conduzcan más de 0,5 m³/s, que se proyecten próximos a zonas urbanas, y cuya distancia al extremo más cercano del límite urbano sea inferior a 1 km y la cota de fondo sea superior a 10 m sobre la cota de dicho límite.
- d) Sifones y canoas que crucen cauces naturales.

3) Recepción e inspecciones de obras

- a) En los proyectos de un costo hasta UF 30.000, las inspecciones y recepción de obras se realizarán a través de la DOH.
- b) La contratación de la inspección y recepción técnica de obras de proyectos de más de 30.000 UF serán responsabilidad del mandante, deberán llevarse a cabo por personas o empresas inscritas en el Registro Público Nacional de Consultores de la CNR para Obras Medianas y verificadas por un supervisor de obras de la propia CNR^t.

El MIDESO ha desarrollado Metodologías y Precios Sociales que constituyen documentos oficiales para la formulación y evaluación social de iniciativas de inversión pública en el marco del Sistema Nacional de Inversiones (SNI) de Chile^u. Para obras de riego se utiliza la "Metodología, Formulación y Evaluación De Proyectos De Riego". El objetivo de esta metodología es apoyar la formulación y evaluación de iniciativas sobre los "Recursos Hídricos" que son postuladas al SNI e incluye la evaluación social del proyecto, la que permite determinar en qué medida un proyecto de inversión tendrá un efecto sobre la sociedad, en términos económicos y de bienestar a través de los beneficios y costos sociales. Las iniciativas de inversión son presentadas por la CNR a etapa de prefactibilidad, con el fin de potenciar la competitividad de los agricultores y las OUs. Por su parte, la DOH presenta la etapa de factibilidad y las sucesivas, que define la construcción de las obras hidráulicas para el uso y disposición eficiente de los recursos hídricos, lo cual se complementa con acciones de conservación, explotación y administración de dichas obras o servicios.

En el SNI se utilizan dos enfoques de evaluación:

1. Análisis costo-beneficio: este tipo de análisis permite identificar, entre un conjunto de alternativas de iniciativas de inversión, cuál es la que genera el mayor beneficio neto para la sociedad. Requiere identificar, cuantificar y valorizar todos los beneficios y costos del proyecto, en precios sociales y obtener indicadores como el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) que permitan concluir sobre la rentabilidad económica del proyecto.

r.- Ley 18.450, Art 1. <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=29855>

s.- Código de Aguas, Art 294. <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=5605>

t.- Ley 18.450, Art 7 bis. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=29855>

u.- Ministerio de Desarrollo Social. Metodología Recursos Hídricos, para obras de Riego. <http://sni.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/download/obras-de-riego/?wpdmdl=2214>

2. Análisis costo-eficiencia: asume que los beneficios son deseados por la sociedad por lo que no se calcula un valor monetario de los beneficios. El objetivo de este enfoque es evaluar alternativas que permitan obtener el beneficio buscado, utilizando la menor cantidad de recursos. Para ello, se debe realizar una completa identificación, cuantificación y valoración de los costos asociados al proyecto, expresados en precios sociales, para construir posteriormente indicadores como el Valor Actual de Costos (VAC) y el Costo Anual Equivalente (CAE). Las iniciativas de inversión de proyectos de riego se evalúan con un enfoque costo beneficio.

5.2.- Costo nivelado del suministro de agua

Además del ACB que se usa comúnmente, el grupo de trabajo económico de la IAH-MAR también recomienda el uso de costos nivelados como el más adecuado para proyectos RAG. El costo nivelado de un proyecto RAG se define como el nivel constante de ingresos necesarios cada año para recuperar la inversión, los gastos operativos y de mantenimiento, durante la vida útil del proyecto dividido por el volumen anual del suministro de agua. Los costos nivelados entregan un medio efectivo para comparar los costos del agua con proyectos alternativos (Dillon et al., 2009).

Ross y Hasnain (2018) recolectaron información sobre los costos asociados a 21 proyectos en varias partes del mundo. Una parte importante de su contribución es el establecimiento de un marco de trabajo pragmático que permita la evaluación consistente de los costos apropiados para el suministro de agua o para bancos de agua (denominado Water Banks en inglés, con el objetivo de guardar agua para un uso o usuario futuro).

Los costos de esquemas RAG varían sustancialmente. A pesar de que los esquemas RAG revisados fueron altamente heterogéneos, fue posible obtener algunas conclusiones respecto a los factores que afectan los costos del almacenamiento de agua de forma subterránea y de la recuperación para su uso.

Ross y Hasnain (2018) informaron que los esquemas RAG que usan obras superficiales (por ejemplo, piscinas, canales etc.) para infiltración con una fuente de agua natural (por ejemplo, agua de lluvia o caudal de los ríos) son relativamente baratos, con costos nivelados de \$152 CLP/m³ recargado (costo de inversión fue \$616 CLP/m³ y costos de operación y mantenimiento fueron \$104 CLP/m³). En comparación, los esquemas RAG que usan pozos de recarga relativamente costosas (\$360 CLP/m³). Así mismo, cuando se requiere de tratamiento avanzado, por ejemplo, al utilizar agua servida reciclada, se producen costos adicionales, con costos nivelados promedio de \$1200 CLP/m³.

Otros factores claves que afectan los costos de esquemas RAG incluyen el rango de objetivos que deben cumplirse, frecuencia de uso del esquema, condiciones hidrogeológicas que afectan las tasas de infiltración y el rendimiento de los pozos, la fuente de agua y uso final del agua almacenada de forma subterránea.

Cuando las obras de infiltración utilizan una fuente de agua natural, los costos del terreno y la construcción de la obra serán los factores que más contribuyen a los costos de estos esquemas. Los esquemas más caros incluyen el costo de la tierra, mientras que los esquemas más baratos obtienen el terreno en forma gratuita de las autoridades locales. El tamaño del terreno, la profundidad de la obra y las tasas de recarga de agua también influyen sobre los costos relativos de estos esquemas. El agua y la electricidad son elementos importantes de los costos operacionales, los esquemas basados en gravedad son más baratos que aquellos donde se requiere bombeo eléctrico. El costo de la limpieza de las obras, que incluye el impacto de paralizar la recarga de manera temporal mientras se limpia y seca, también es considerable. Para más información respecto a costos de proyectos RAG a nivel internacional, ver el Anexo 4.

Respecto a la experiencia nacional, los proyectos RAG que han sido implementados (y descritos en la sección 4.3), han permitido caracterizar levemente los costos asociados a este tipo de proyectos facilitando observar una tendencia general de los costos de RAG en Chile. Sin embargo, estos costos están reportados como la inversión y operación dividida en la cantidad de agua recargada dividida en el tiempo de operación del piloto

(\$/L/s) y dado que los periodos de recarga son relativamente cortos en la mayoría de los pilotos efectuados (3-4 meses aproximadamente), el costo por cantidad de agua recargada resulta poco preciso, puesto que en proyectos más largos el costo de inversión se divide en el tiempo de vida útil del proyecto y a que los pilotos no sean comparables entre sí sin el uso de una estandarización adecuada.

La metodología empleada para comparar el costo de los proyectos en Chile se basó, principalmente, en el cálculo de los costos nivelados de Ross y Husnain (2018), que determina el costo anual por metro cúbico de agua recargada considerando una duración de proyecto de diez y treinta años. Esta estandarización requiere conocer el rendimiento de la recarga y los costos incurridos (inversión, instrumentación y operación anual). A partir de la información recopilada y mencionada anteriormente en la Tabla 6, se observa que solo siete de los diez proyectos registrados mencionan tanto costos como rendimientos en la recarga. De estos siete proyectos, tres corresponden a pozos de infiltración (liderados por la CNR) y cuatro corresponden a piscinas de infiltración (CNR, DOH, JVRC y CASUB: Copiapó - Piedra Colgada - Desembocadura). Sin embargo, solo dos de ellos mencionan los costos operacionales de la gestión, ya sea a nivel anual (CASUB en Toledo) o mensual (DOH en Curimón).

La comparación de los costos de obras con distintas fechas de construcción requiere de una nivelación de precios que considere la variación de los precios entre estos periodos, para esto, se reajustaron los costos en pesos (CLP) de los distintos proyectos a través de la UF (Unidad de Fomento) –unidad financiera reajutable de acuerdo con la inflación (medida según el IPC)– esto se realizó mediante la transformación de la moneda al valor UF del año de construcción de la obra, utilizando el mes de julio como referencia anual (ver ecuación 1 y Tabla 8). Luego, los costos nivelados (CN) [UF/m³] fueron obtenidos siguiendo la ecuación 2, donde los costos de inversión (inv), de instrumentación (ins), y operación anual (opa) se encuentran en UF, mientras que la recarga promedio anual (rpa) se encuentra en m³. El factor de recuperación de capital (FRC) fue obtenido siguiendo la ecuación 3, donde n corresponde al número de años de operación del proyecto, y r a la tasa de descuento, equivalente a 6,67%, basado en Ross y Husnain (2018). Finalmente, el costo nivelado para cada proyecto RAG fue transformado a pesos chilenos a la fecha 1 de Julio 2019 (UF = \$27.908,86). Los costos de instrumentación no informados fueron estimados como el 20% del costo de inversión, mientras que los costos de operación no informados fueron estimados como el 10% del costo inicial (inversión e instrumentación).

$$\text{Costo UF} = \text{costo CLP}_{\text{año}=i} / \text{valor UF}_1 \text{ de Julio año}=i \quad (1)$$

$$CN_{UF} = \frac{[(inv + ins) * FRC] + opa}{rpa} \quad (2)$$

$$FRC = \frac{[r(1 + r)^n]}{[(1 + r)^n - 1]} \quad (3)$$

Tabla 8 muestra los costos nivelados de los proyectos RAG ya transformados a pesos chilenos (2019) a diez y treinta años de operación. En ambos casos las diferencias entre los proyectos se mantienen, por consecuencia, se tomará como base de comparación el caso de 10 años de operación. Para piscinas de infiltración se reporta un valor mínimo de \$2 CLP/m³ hasta un máximo de \$48 CLP/m³, mientras el método de inyección por pozos reporta un mínimo de \$112 CLP/m³ y un máximo de \$1.728 CLP/m³. Esto refleja que los costos de recarga en métodos superficiales son menores a los costos asociados a pozos, lo que está en línea con lo mencionado por Ross y Husnain (2018). A pesar de lo anterior, se puede asumir que el caso de mayor costo (La Palma) no es muy representativo dado a que se presentó un rendimiento de recarga muy bajo (infiltración máxima de 0,25 L/s), lo cual elevó el valor del costo total de la recarga. Lo anterior es resultado de seleccionar un sitio específico que presentó pocos estratos de suelo de buena permeabilidad, a pesar de que el sector en general presentó tasas de recarga aceptables durante las investigaciones preliminares, mostrando la importancia de la elección adecuada

del sitio dónde se llevará a cabo la recarga.

Por otra parte, es importante destacar que estos proyectos no consideran el costo de la tierra (comprar o arrendar un terreno para realizar la RAG), ni la utilización de técnicas avanzadas de tratamiento de agua, las que podrían encarecer aún más los valores aquí mencionados. Adicionalmente, estos proyectos no consideran el costo de estudios relevantes que se desarrollaron previamente en el sector, por ejemplo, CASUB: Copiapó - Piedra Colgada - Desembocadura instaló una obra de recarga gracias a los resultados y análisis derivados del estudio desarrollado por la CNR y el Gobierno Regional de Atacama (2012), sin los cuales no hubiese sido posible identificar este sitio. Sin embargo, los costos incurridos por ese estudio no son considerados dentro de los costos del proyecto.

Tabla 8. Costos de proyectos de recarga de acuíferos gestionada en Chile. Fuente: Elaboración propia según información entregada por cada proyecto.

Método de recarga	Proyecto	Año construcción	Recarga promedio (m ³ /año)	Costo de inversión (\$)	Costo de instrumentación (\$)	Costo de operación (\$/año)	Valor UF al año de construcción a julio	Costos nivelados (\$/m ³) - 10 años operación	Costos nivelados (\$/m ³) - 30 años operación
Pozos	LaPalma-CNR-2015	2014	7.884	39.624.536	9.198.810	4.882.335	24.026	1.728	1.280
	Chacabuco-CNR-2015	2014	110.376	44.353.392	9.493.034	5.384.643	24.026	136	101
	Popeta-CNR-2015	2014	141.912	52.140.633	4.710.063	5.685.070	24.026	112	83
Piscinas	Curimón-DOH-2016	2014	1.103.760	198.451.597	5.225.826	17.278.800	24.026	48	35
	Lontue-CNR-2015	2014	340.588,80	26.868.949	9.493.034	4.882.335	24.026	34	26
	Cerrillos-JVRC-2018	2018	1.892.160	9.966.250	1.993.250	1.195.950	27.161	2	1
	Toledo-CASUB-2017	2017	9.460.800	36.775.000	7.355.000	10.500.000	26.666	2	2

Capítulo III

6.- Marco de desarrollo y gestión de proyectos

Esta sección tiene por objetivo proporcionar un marco de desarrollo y gestión metodológica para el desarrollo de proyectos RAG en Chile en el sector agrícola. Esta Guía tiene un enfoque de desarrollo por fases, lo que tiene dos principales ventajas:

- i) Inicialmente se requiere un bajo nivel de esfuerzo, inversión y complejidad que aumenta gradualmente a medida que el proyecto avanza por las fases de desarrollo;
- ii) Los riesgos financieros se minimizan al brindar una oportunidad más temprana de detener los proyectos que se revelan como no viables.

La Figura 11 ilustra la secuencia a seguir para el desarrollo de un proyecto RAG, según tipo de proyecto a realizar (método, riesgo, fuente de agua, etc.). En primer lugar, se evalúa si la Guía es aplicable al tipo de proyecto que se está considerando. La Guía no aplica cuando el proyecto está considerado de alto riesgo y no da la seguridad requerida para la salud humana y el medio ambiente. Si se considera que la Guía es aplicable al proyecto se procede a la definición de la escala. Esta definición ayudará entender el nivel de orientación requerida para el desarrollo del proyecto.

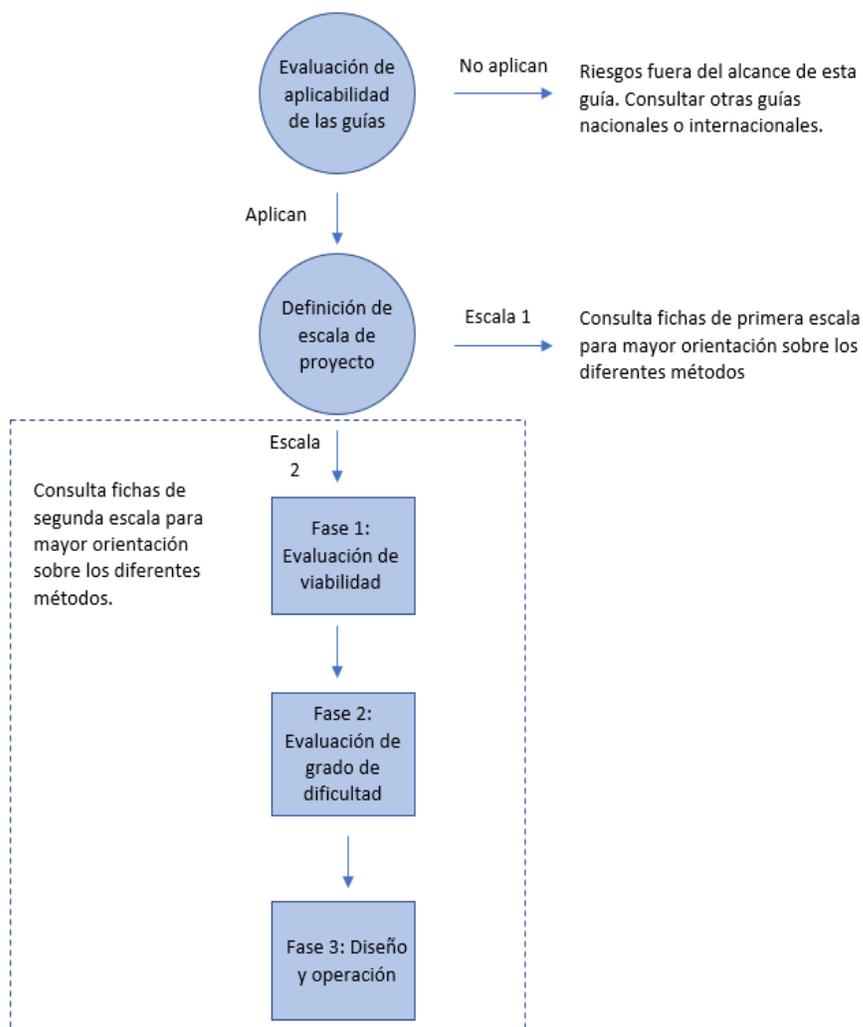


Figura 14. Flujo de trabajo de desarrollo de proyectos para la aplicación de esta Guía. Fuente: Elaboración propia.

Proyectos de primera escala son aquellos que son más sencillos (técnica y económicamente) o son de menor riesgo y solo requerían una orientación menor por parte de la Guía. Más adelante se sugiere los tipos de proyectos que se entiende como la primera escala. Proyectos de segunda escala son aquellos que requieren una mayor orientación y por ende se recomienda seguir las siguientes fases de desarrollo:

- 💧 La Fase 1 evalúa la viabilidad del proyecto RAG propuesto, incluyendo una evaluación económica preliminar.
- 💧 La Fase 2 evalúa el grado de dificultad del proyecto RAG propuesto, incluyendo la realización de una encuesta sanitaria para evaluar los peligros potenciales para la salud pública que probablemente surjan. Una evaluación económica revisada determina si el proyecto garantiza una mayor inversión, ya sea como un estudio piloto o como un esquema operacional.
- 💧 La Fase 3 implica el diseño y operación del proyecto RAG. Se recomienda realizar un piloto o al menos pruebas de recarga en el sitio elegido antes de su operación final, particularmente si es un esquema relativamente grande, permitiendo un escalamiento más controlado. Durante esta fase se desarrolla un plan de seguridad hídrica para el esquema de recarga, diseñado para abordar los riesgos identificados en la encuesta sanitaria. La evaluación económica de la Fase 2 puede ser mejorada para determinar si el esquema valdría la inversión de su eventual escalamiento. Finalmente se requiere el desarrollo del plan de gestión operacional final que aborde específicamente las complejidades y/o incertidumbres identificadas para su escalamiento.

Durante todas las fases (1 - 3) se recomienda la preparación de evaluaciones económicas para demostrar el valor del proyecto. Esto permite el ejecutor y/o la agencia de financiación tomar decisiones y priorizar proyectos potenciales para su desarrollo.

Para ambos la primera y la segunda escalas se han proporcionado fichas descriptivas para diferentes métodos de recarga que se consideran relevantes para el sector agrícola.

6.1- Evaluación de aplicabilidad

Es importante determinar si esta Guía es aplicable al proyecto en consideración, ya que este documento tiene un alcance de cobertura restringido. Los tipos de proyectos que son aplicables deben cumplir con los siguientes criterios:

- 💧 Disponer de Derechos de Aprovechamiento de Aguas (DAAs) superficiales posibles de infiltrar.
- 💧 La fuente de agua se restringe a agua superficial sin mayor intervención previa, es decir, agua de lluvia o de ríos.
- 💧 Los acuíferos objetivo son no confinados o libres y con zona no saturada.
- 💧 El uso final del agua recuperada se restringe al respaldo para la agricultura de riego.

Los proyectos que no cumplen estos criterios son considerados más riesgosos y esta guía no daría las protecciones suficientes para la salud humana y el medio ambiente, por ejemplo: el uso de aguas residuales o escorrentías urbanas, la recarga de acuíferos confinados, la recuperación para el suministro de agua potable, el potencial de afectar los suministros públicos de agua. La guía está considerada no aplicable a estos tipos de proyectos mencionados.

6.2.- Definición de escala

Según el alcance y tamaño del proyecto aplicable, se decide el nivel de orientación requerida para su desarrollo. Proyectos de infiltración de primera escala cumplen con los criterios anteriormente descritos, pero que son más sencillos (técnica y económicamente) o son de menos riesgo y solo requerían una orientación menor por parte de la Guía. Para esta Guía se sugiere que los proyectos de primera escala sean:

- i) Sistemas de captación e infiltración de agua lluvia in situ
- ii) Canales de infiltración
- iii) Zanjas de infiltración

Para estos tipos de proyectos se debería seguir la evaluación simple de proyectos de primera escala, proporcionada en la Tabla 9, para verificar que cumplen con los criterios establecidos. Si se cumplen todos los criterios, el proyecto de recarga se considera apropiado y se puede utilizar las fichas descriptivas^v de los métodos mencionados para apoyar el desarrollo del proyecto.

Si el método de recarga deseado es diferente a los mencionados anteriormente, pero cumple con la evaluación de aplicabilidad, los proyectos son considerados de segunda escala y se debe continuar a la Fase 1 del desarrollo del proyecto.

Tabla 9. Evaluación de proyectos de primera escala. Fuente: Elaboración propia.

Atributo para identificar/ evaluar	¿Porque es necesario?
Fuente de agua	
El agua que se recarga no contiene aguas residuales, escorrentía urbana o aguas residuales industriales. Identificar donde viene la fuente de agua a recargar (ej. agua de lluvia, del río).	Es importante demostrar que la fuente de agua es segura para los métodos de recarga simples.
Sitio de recarga	
El área alrededor del sitio de recarga nunca está inundada. Definir si el sitio alrededor de la recarga propuesta ha experimentado inundación.	Si ha observado inundación cercana al sitio propuesto de recarga, es probable que un aumento de infiltración empeoraría este fenómeno, afectando las viviendas o personas alrededor.
El acuífero	
El acuífero no suministra agua potable cerca de la obra de recarga propuesta. Evaluar la distancia de la obra propuesta a la fuente de agua potable más cercano.	La recarga puede tener un efecto negativo en el agua potable.
El acuífero es no confinado (libre) y tiene un nivel freático > 4m en áreas rurales o >8m en áreas urbanas.	Si aumenta la recarga donde el nivel freático se encuentra muy cerca de la superficie, o es un acuífero confinado, es probable que esto conlleve inundación afectando las viviendas o personas alrededor.
El acuífero no ha sido identificado como afectado por la contaminación industrial o agrícola en un grado que impida su uso. Verificar si hay conocimiento o evidencia de contaminación.	Es importante recargar agua que puede ser almacenada en un acuífero donde en un futuro pueda ser reutilizada.

Se reconoce que los impactos acumulativos de múltiples proyectos de primera escala en el mismo acuífero o la infiltración de alto volumen a través de canales de riego pueden conducir a un riesgo mayor al aceptable. Los riesgos acumulativos, por ejemplo, incluyen elevar el nivel freático local y provocar la acumulación de agua y la conexión hidráulica intermitente con letrinas de pozo o tanques sépticos. En estos casos, las agencias gubernamentales relevantes son las responsables de gestionar los riesgos acumulativos mediante el inicio de un sistema de supervisión y gestión adecuado donde se realizan estas actividades.

6.3.- Fase 1: Evaluación de viabilidad

La evaluación de viabilidad estudia la factibilidad aparente de una propuesta de proyecto de recarga utilizando datos e información existentes. Su objetivo es informar a los ejecutores de cualquier defecto determinante en el proyecto previsto. En esta fase, se espera que el ejecutor tenga una comprensión básica del tipo de proyecto de recarga que se está considerando, por ejemplo, fuente de agua, tipo de acuífero y objetivo de recarga y/o uso final del agua. También se requiere una comprensión de los tipos de métodos de recarga posibles y factibles.

6.3.1.- Selección del método de recarga

Para la Fase 1, el método de recarga no puede limitarse a una sola técnica definida, ya que la nueva información recopilada en las fases posteriores probablemente refine la técnica específica seleccionada e informe el diseño del esquema. Sin embargo, el ejecutor debe conocer el método general de la Tabla 3, ya sea en la modificación del canal, la infiltración o el uso de pozos. En preparación para la Fase 1, el ejecutor debería revisar los factores relevantes a la selección de métodos descrito en la Sección 2.4. Las incertidumbres y suposiciones hechas en la Fase 1 se abordarán en la evaluación de la Fase 2.

6.3.2.- Evaluación de viabilidad

Los requisitos que deben demostrarse para satisfacer la evaluación de viabilidad se encuentran en la Tabla 10.

Tabla 10. Evaluación de viabilidad. Fuente: Elaboración propia.

Atributo	Método	Ejemplo de fuentes de datos
Demanda de agua		
Demuestre que existe una demanda local continua por agua recuperada y/o beneficios ambientales definidos (ej. un determinado aumento en la capa freática), para determinar el tamaño del esquema RAG para que sea viable.	Evaluar el volumen de agua requerido para satisfacer la demanda adicional o para restaurar o mantener el nivel freático al nivel deseado.	Tendencias temporales de la capa freática (disminución); estimaciones de la demanda creciente futura relacionada con la expansión agrícola; estimaciones de disminuciones futuras en la recarga natural (ej. como resultado del cambio climático).
Disponibilidad de una fuente de agua		
Demstrar que hay disponible una fuente de agua adecuada para la recarga. Para ser compatible con la asignación local de agua y sus derechos de aprovechamiento de agua (DAA) existentes. Si no hay suficiente agua para recargar, el proyecto no es viable.	Evaluar el volumen de agua disponible para la recarga en la época del año requerida. En casos de recarga no continua (para utilizar agua de abundancia) estimar disponibilidad de agua potencial para años húmedos.	Series de tiempo de datos pluviométricos (al menos mensualmente durante 5 años).

Atributo	Método	Ejemplo de fuentes de datos
Evaluación hidrogeológica		
Demuestre que hay al menos un acuífero en el sitio de la RAG propuesto capaz de recibir y almacenar agua adicional y que no hay restricciones (ej. ambientales) en dicho acuífero. Si no hay espacio disponible en el acuífero en el momento de la recarga, el proyecto no es viable.	Evalúe la hidrogeología del área de recarga prevista y proporcione evidencia de que las tasas de recarga y el espacio de almacenamiento sean adecuados.	Mapas de geología de superficie o de hidrogeología a escala regional; mapas de suelos; rangos de propiedades hidráulicas para diferentes tipos de suelos y acuíferos; series de tiempo de la capa freática; resultados de pruebas de permeabilidad.
Espacio para captura y tratar el agua		
Demuestre que hay suficiente tierra disponible para captar la escorrentía del río y tratar el agua antes de recargarla (ej. decantación de sólidos). Dependiendo del método de recarga seleccionado, la permeabilidad del esquema y los volúmenes deseados puede afectar el espacio requerido.	Evaluar que haya suficiente espacio dentro del terreno disponible, a una distancia factible del agua fuente para la infraestructura de captura y pretratamiento e infiltración.	Información de tenencia del terreno (terreno público o terreno disponible para uso o adquisición).
Capacidad y experiencia		
Demuestre que hay capacidad disponible para diseñar, construir, operar y mantener el proyecto RAG. Los esquemas RAG fallan con frecuencia cuando los operadores no tienen suficiente experiencia y respaldo financiero para ser sostenibles en el tiempo.	Averiguar si la parte interesada tiene experiencia relevante. De lo contrario, es posible que sea necesario contar con personal que posea habilidades adicionales para garantizar la viabilidad.	Evidencia de experiencia previa en la implementación de proyectos RAG; certificación o títulos de ingeniería; asistencia a cursos de formación de RAG.
Gobernanza y sostenibilidad económica		
Identificar el modelo de gobernanza del esquema para su construcción, operación y mantención para asegurar su sostenibilidad en el tiempo.	Definir las fuentes de financiamiento suficientes para la inversión inicial, la operación y mantención del esquema. Definir quién estará a cargo de la obra cuando la inversión inicial se acabe.	Demostrar suficiente inversión de financiamiento. Por ejemplo, inversión inicial puede ser obtenida de concursos públicos (ej. Ley de Riego 18.450) o de inversión privada (ej. asociaciones de regantes, agricultores privados).

Como complemento a la Tabla 10, los factores clave para determinar la viabilidad de los esquemas RAG son:

Fuente de agua disponible y derecho de acceso: Debe estar garantizado el derecho al agua que se utilizará para la recarga. En una cuenca ya sobre asignada, es posible que no existan nuevos derechos de agua superficial, por lo tanto, debe contar con ellos con anterioridad.

Volumen de agua de recarga suficiente: El volumen medio anual de recarga debe exceder el volumen anual promedio requerido a ser recuperado (en el caso que el agua recargada quiera ser recuperada para diversos usos), con un excedente suficiente para construir un almacenamiento intermedio que cumpla con los requisitos de confiabilidad y calidad.

Almacenamiento superficial: Para los métodos de recarga fuera del cauce y de pozo se necesitará una presa, humedal, piscina, canal o estanque fuera del cauce para retener suficiente agua para alcanzar el volumen de recarga objetivo. Del mismo modo, es necesario disponer de espacio si se requiere un pretratamiento antes de la recarga. Las estructuras de almacenamiento y tratamiento pueden ser las mismas, por ejemplo, estanques de retención para la captación de agua que permiten la retención de sedimentos antes de la recarga. El almacenamiento también puede incorporarse a la estructura de infiltración, si la capacidad de diseño lo permite, por ejemplo, una piscina de infiltración. Otros sistemas, como la modificación del lecho del río, no requieren este almacenamiento adicional.

Almacenamiento del acuífero: La presencia de un acuífero adecuado con la capacidad de almacenar el agua es crítica para la RAG. Ese acuífero debe tener una tasa adecuada de recarga y una capacidad de almacenamiento suficiente, también debe ser capaz de retener el agua para su recuperación. Esta evaluación se puede apoyar con mapas regionales hidrogeológicos que muestran el potencial de los acuíferos como almacenamientos para la RAG. En los acuíferos sobre asignados, los administradores del agua, por ejemplo, las juntas de vigilancia o la DGA, pueden tener limitaciones adicionales sobre la proporción de recarga que puede recuperarse.

Volumen de agua recuperada: La demanda continua para un volumen de agua recuperada debería ser suficiente para garantizar la inversión en el proyecto propuesto, de no ser así, debe haber un beneficio medioambiental claramente definido, por ejemplo, recuperar los niveles de agua subterránea. Cualquiera de estos criterios es esencial para la RAG.

Capacidad y experiencia del operador: La experiencia técnica y financiera continua es esencial para las operaciones sostenibles del esquema RAG. El desarrollo de un plan de gestión operacional de RAG (y potencialmente un plan de seguridad hídrica donde la calidad está comprometida) es clave para la viabilidad continua del esquema.

Gobernanza y sostenibilidad económica: Los modelos de gobernanza y de finanzas del esquema RAG (para la construcción, operación y mantenimiento) deben ser identificados desde el principio para garantizar su sostenibilidad. Existen mecanismos gubernamentales que entregan apoyo financiero para la inversión inicial de proyectos RAG en el sector agrícola, pero se deben considerar todos los costos de vida del esquema. Por otra parte, el usuario final del esquema RAG debe estar claramente definido (por ejemplo, Organizaciones de Usuarios de Aguas, empresas agrícolas, u otros).

Una vez que se completa la evaluación de viabilidad y el proyecto parece viable, se puede proceder a preparar la evaluación económica de nivel de entrada.

6.3.3.- Evaluación económica de nivel de entrada

Se han presentado algunas guías básicas para la evaluación económica en la Sección 5, incluido el marco generalizado de análisis de costo-beneficio (ACB) y el cálculo de los costos nivelados para proyectos RAG. Las evaluaciones económicas se realizan de forma secuencial, antes de la realización de un gasto importante y tienen por objeto justificar (o no) ese gasto.

Idealmente, la evaluación económica es más que la simple viabilidad financiera del proyecto RAG y debe incorporar otros factores claves, incluyendo consideraciones ambientales y sociales. Como mínimo, debería realizarse una evaluación cualitativa de los factores no financieros.

La evaluación de la Fase 1 probablemente implicará muchos supuestos e información de costos aproximados y contendrá un alto nivel de incertidumbre. Esta incertidumbre se puede minimizar mediante la recopilación de datos pertinentes y la comparación con esquemas similares a nivel nacional e internacional. El nivel de certeza y especificidad de la evaluación económica aumentará durante las fases subsiguientes de la evaluación, que incluye una encuesta sanitaria y potencialmente implicará investigaciones en terreno en el sitio propuesto.

6.4.- Fase 2: Grado de dificultad y evaluación sanitaria

6.4.1.- Evaluación del grado de dificultad

La Fase 2 evalúa aspectos técnicos con resultados de investigaciones en terreno que serán programadas en función de los resultados del estudio de información existente de la Fase 1, la evaluación económica y la valoración de la viabilidad asociada. Estas actividades centrarán las investigaciones en las áreas de mayor riesgo e incertidumbre. Los estudios en terreno típicos durante la Fase 2 pueden incluir las siguientes investigaciones:

- 💧 Prueba de bombeo de acuíferos para determinar las propiedades de las aguas subterráneas.
- 💧 Ensayo de permeabilidad.
- 💧 Programa de muestreo de agua subterránea en pozos para determinar la química del agua.
- 💧 Muestreo del suelo, acuífero/acuitardo para pruebas físicas y mineralógicas.
- 💧 Registro geofísico de los pozos construidos para clarificar la litología.
- 💧 Identificación de los puntos de descarga del acuífero y de los posibles ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas.
- 💧 Muestreo de la fuente de agua para permitir una caracterización adecuada de la calidad del agua. Un conjunto completo de datos sobre la calidad del agua de recarga añade un grado significativo de certeza a la evaluación de riesgos de la Fase 2, en particular para las fuentes de agua con una alta variabilidad inherente (por ejemplo, agua de río contaminada con vertidos agrícolas).

Las tasas potenciales de infiltración pueden determinarse en terreno a través de diferentes técnicas que permitan calcular el tiempo que requiere una cantidad determinada de agua (por área de superficie) para permear el suelo. Las técnicas pueden variar desde mediciones de muestras en el laboratorio, ensayos puntuales in situ, o pruebas de inundación de las estructuras de recarga. Las tasas de infiltración determinadas por inundación en grandes áreas se consideran más confiables, pero el alto costo generalmente dicta que inicialmente se usen ensayos puntuales en múltiples ubicaciones del sitio elegido. A continuación, se describe brevemente las principales técnicas usadas para estimar las tasas de infiltración de una obra de recarga, además de algunas técnicas para determinar las propiedades de los acuíferos. En base a los resultados medidos, se puede calcular la tasa de infiltración utilizando la ley de Darcy, ampliamente utilizada para analizar el flujo de agua a través

de un acuífero^w. También se pueden utilizar modelos analíticos y numéricos realizados por hidrogeólogos, pedólogos o ingenieros debidamente capacitados.

Muestras en el laboratorio para determinar la permeabilidad

Se puede estimar la permeabilidad de los suelos mediante la determinación de relaciones empíricas establecidas entre la muestra y alguna característica del suelo, generalmente su granulometría (tamaño de grano y distribución granulométrica). En general, se asume que a menor tamaño de grano (por ejemplo, arcillas y limos), se experimenta un menor grado de permeabilidad. En cambio, para un tamaño mayor de grano y distribución granulométrica (por ejemplo, arenas y gravas), la permeabilidad es mayor. Se puede realizar una clasificación de la granulometría del suelo en el laboratorio, empleando una serie de cedazos y mallas de distintas aperturas (para partículas de tamaño mayor a 0,08 mm) o mediante la realización de una sedimentometría (para partículas menores a 0,08 mm).^x

Otra opción en el laboratorio es utilizar un permeámetro para determinar el coeficiente de permeabilidad de una muestra del suelo. Se utiliza una muestra recompactada para representar las condiciones del terreno a evaluar, sobre la cual se satura induciendo un flujo a través del material. Generalmente se emplean dos métodos, según el tipo de suelo utilizado: i) permeámetro de nivel constante (para suelos granulares); y ii) permeámetro de nivel variable (para suelos con textura fina).^y

Ensayos de permeabilidad puntuales in situ

El Infiltrómetro de Doble Anillo (Figura 12) es una técnica que se emplea in situ en múltiples ubicaciones dentro del área determinada para obtener una mejor representación espacial de los suelos. Como indica el nombre, se utilizan dos anillos concéntricos de unos 40 cm aproximadamente de altura que se insertan a igual profundidad bajo el suelo hasta un máximo de 15 cm. Se satura el suelo limitado por los dos anillos y se mide la variación del nivel del agua en el cilindro interior. Se debe intentar mantener el mismo nivel del agua en el interior de ambos anillos y el llenado inicial no debe sobrepasar los 10 cm, ni descender a menos de 5 cm. Es importante no terminar la medición si aún no se alcanza una tasa de infiltración constante. Para identificar cuándo la tasa de infiltración permanece constante, se debe medir a intervalos regulares, ya sea el descenso del nivel de agua a lo largo del tiempo o reponiendo el volumen de agua inicial de manera constante. Preferiblemente se utiliza un anillo externo con un diámetro de > 0,5 m, mientras que el anillo interno normalmente mide alrededor de 0,3 m de diámetro. Se recomienda antes y después del ensayo realizar un muestreo de la humedad del suelo a diferentes profundidades para una interpretación más confiable de los resultados. Se requieren múltiples mediciones para intentar capturar la varianza espacial (Ibañez, et al., 2010).

w.- Para más información, se refiere el lector a la siguiente fuente: http://hidrologia.usal.es/temas/Ley_Darcy.pdf

x.- Para más información, se refiere el lector a la siguiente fuente: <http://www.estudiosgeotecnicos.info/index.php/descriptores-geotecnicos-3-granulometria-y-parametros-derivados/>

y.- Para más información, se refiere el lector a la siguiente fuente: <http://www.estudiosgeotecnicos.info/index.php/permeabilidad-de-los-suelos/>



Figura 15. Infiltrómetro de Doble Anillo. Fuente: ©UDSuelos-Universitat Politècnica de València (2010).

El permeámetro de Guelph (Figura 13) es un instrumento fácil de utilizar para realizar una medición de la conductividad hidráulica in situ de manera rápida y precisa. Se debe emplear en múltiples ubicaciones para obtener una mejor representación espacial de los suelos. Consiste en un Mariotte construido con dos tubos que mantiene la carga hidráulica constante en agujeros cilíndricos en el suelo. Las mediciones se pueden hacer en el rango de 15 a 75 cm por debajo de la superficie del suelo. Este método determina el caudal de infiltración requerido para mantener el nivel constante, hasta alcanzar una condición de flujo cuasi-permanente. De acuerdo con Prieto, et al. (2006) este método requiere menor número de pruebas para llegar a resultados representativos de un área de terreno en comparación con el Infiltrómetro de Doble Anillo. Además, requiere menos tiempo para realizar las pruebas y un menor número de operarios (Alvarado y Barahona-Palomo, 2017). Se requieren múltiples mediciones para intentar capturar la varianza espacial.

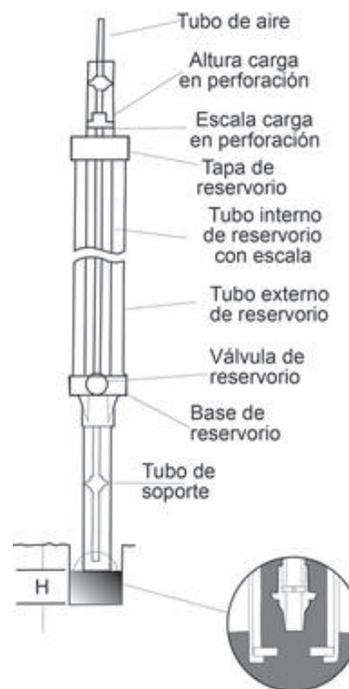


Figura 16. Permeámetro de Guelph. Fuente: Macías, et al. (2018).

Ensayos en calicatas e inundación de áreas o estructuras de recarga

Las tasas de infiltración determinadas por la acumulación de agua en grandes áreas se consideran más confiables.

Las calicatas son excavaciones en el suelo de profundidad pequeña a media. Las dimensiones dependerán de las características de cada sitio, pero generalmente son alrededor de 1 m x 1 m y 1 m de profundidad. Mediante el llenado de agua, se mide su descenso en el tiempo o se mantiene un caudal hasta que el nivel de agua se mantiene constante en el tiempo (Portal Frutícola, 2016). Este método puede combinarse con otros métodos puntuales in situ previamente descritos.

El método más confiable para determinar las tasas de infiltración es a través de la inundación de una obra piloto de recarga y la medición de su respuesta. Dado el costo requerido por un piloto, generalmente se comienza con pruebas puntuales de infiltración y/o calicatas en múltiples ubicaciones del sitio elegido. Alternativamente, se puede inundar áreas grandes de terreno, en la escala de la obra de recarga deseada, para obtener una estimación de la permeabilidad más promediada espacialmente. Esto se basa en encontrar una depresión natural en la superficie de la tierra en un lugar que sea representativo de dónde se ubicaría el sistema RAG (sin tener que escavar mucho en lo posible).

Ensayos de bombeo

Los ensayos de bombeo pueden determinar las características hidráulicas del acuífero o de capas de suelo que transportan agua, de este modo, entregando información sobre el flujo del agua en el suelo. Utilizando un pozo existente circundante al sitio de interés, se bombea agua durante un tiempo determinado con un cierto caudal. Se mide el efecto que el bombeo produce sobre el nivel de agua freática en el mismo pozo y en algunos piezómetros situados en las cercanías. Los datos de respuesta de los ensayos de bombeo se utilizan para estimar no solo las propiedades hidráulicas de los acuíferos, sino también para evaluar el rendimiento del pozo e identificar los límites del acuífero. Las pruebas de bombeo pueden identificar y localizar barreras que limiten la extensión lateral de los acuíferos. Las pruebas de bombeo dan estimaciones más confiables que los Slugs Tests y son útiles para observar los efectos en una mayor extensión (bombeando por períodos más largos). Antes de ejecutar un ensayo de bombeo, se debe revisar la información disponible sobre las propiedades del acuífero (por ejemplo, la litología, el espesor del acuífero, etc.) (Kruseman y De Ridder 1975).

Slug tests

Cuando no es posible realizar ensayos de bombeos debido a su costo o porque simplemente no se encuentran pozos aledaños al mismo nivel del acuífero. Se pueden realizar los Slug tests en perforaciones de pocos metros. Slug tests se llevan a cabo subiendo o bajando en forma instantánea el nivel de agua en una perforación y midiendo la recuperación del nivel de aguas original (previo a la prueba) (Sánchez, 2011). Los ensayos más utilizados son los de Lefranc y Lugeon, y los métodos de Hvorslev (1951) y Bower y Rice (1976) para acuíferos libres.

Similarmente al infiltrómetro de Doble Anillo, se puede aplicar dos métodos:

- 🔹 Nivel constante: Se introduce un caudal determinado para mantener un nivel de agua constante dentro de la perforación. Una vez terminado el proceso, se puede calcular la permeabilidad a partir del caudal y de la longitud y diámetro de la perforación.
- 🔹 Nivel variable: Se introduce (o se extrae) súbitamente un volumen de agua en un sondeo, lo que provoca un ascenso (o descenso) instantáneo del nivel del agua dentro de la perforación. Se miden la relación entre los descensos y los tiempos a medida que se recupera el nivel de agua inicial. Normalmente el sondeo tiene un pequeño diámetro, de 5 a 10 cm. Si se desea ascender súbitamente el nivel del agua,

frecuentemente en lugar de inyectar agua, se introduce un lingote o peso que hace subir el nivel como si hubiéramos introducido un volumen de agua igual al del objeto sólido.

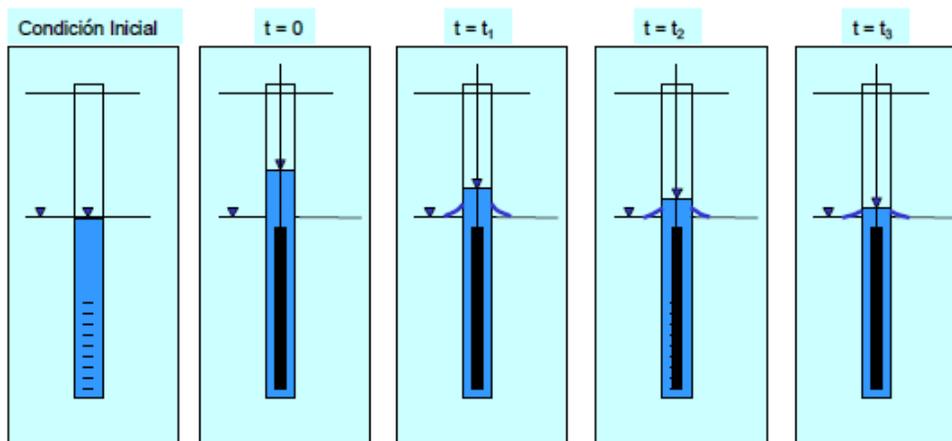


Figura 17. Ejemplo de funcionamiento de un Slug Test. Fuente: Universidad de Chile (2011).

Por lo tanto, para los sistemas RAG, se necesitan una serie de mediciones para estimar, en primer lugar, la permeabilidad (introducir el agua en el acuífero) y, en segundo lugar, las propiedades del acuífero a través de ensayos de bombeo (o slug tests) para determinar la transmisividad, la conductividad hidráulica (horizontal y vertical), el coeficiente de almacenamiento, e identificar y ubicar barreras que limiten la extensión lateral de los acuíferos. Siempre la replicabilidad y la estimación utilizando una variedad de métodos producirán resultados más confiables y ayudarán a manejar mejor la incertidumbre.

En las Guías Australianas de RAG (NRMMC - EPHC - NHMRC, 2009) hay ejemplos adicionales de información requerida para las investigaciones de la Fase 2 y se reproduce en este documento en el Anexo 1.2. Este trabajo de campo se utilizará para llevar a cabo varios tipos de evaluaciones como se describe en la Tabla 11.

Tabla 11. Evaluación de grado de dificultad. Fuente: Elaboración propia.

Información específica requerida	Descripción de riesgo	Ejemplos de métodos de evaluación	Ejemplos de medidas planificadas para prevenir problemas
Calidad de la fuente de agua con respecto a la obstrucción (colmatación)			
Presentar los parámetros indicadores de obstrucción (colmatación) del agua fuente ej. turbidez, color (o hierro), contenido de algas, nutrientes.	La obstrucción puede ocurrir mecánicamente (partículas atrapadas en el suelo y la matriz del acuífero), biológicamente (crecimiento de biopelículas) y químicamente (reacción mineral ej. precipitación de hierro). El riesgo de obstrucción de las superficies de infiltración ej. lecho del río aguas arriba de una obra de retención, piscina de infiltración o pozo de gravedad.	Si no hay disponibilidad de datos existentes para el sitio, se recomienda a la parte interesada que realice una campaña de muestreo básica para recopilar al menos datos de turbidez. Si hay datos disponibles para un sitio o fuente de agua similar, estos valores podrían sustituirse. Las Guías Australianas de RAG sugieren sólidos suspendidos totales >10 mg/L indicativos de un alto riesgo de obstrucción (NRMMC-EPHC-NHMRC, 2009).	Trate el agua antes de recargar el acuífero para eliminar los agentes de obstrucción (ej. piscina de sedimentación, humedal). Planifique un mantenimiento regular para eliminar la capa obstructora. Monitorear las tasas de infiltración. La disminución de las tasas de infiltración requerirá un mantenimiento más frecuente.

Información específica requerida	Descripción de riesgo	Ejemplos de métodos de evaluación	Ejemplos de medidas planificadas para prevenir problemas
Capacidad de almacenamiento del acuífero			
Determine si el acuífero tiene suficiente espacio para almacenamiento.	Riesgo de inundación y sodicidad del suelo, impactos en la infraestructura superficial y subterránea.	Examine las series de tiempo del nivel del agua de los pozos cercanos, especialmente aguas abajo del sitio de recarga propuesto. El período crítico es cuando se espera que ocurra una recarga adicional.	Limite el volumen, el tiempo y/o la tasa de recarga para que coincida con la capacidad del acuífero.
Impactos en vecinos y ecosistemas			
Evaluar si otros usuarios de aguas subterráneas o ecosistemas conectados podrían verse perjudicados por una recarga adicional.	Riesgo de impactos adversos en otros usuarios de aguas subterráneas, ej. inundando pozos y propiedades aguas abajo o alterando los regímenes hidrológicos de ecosistemas sensibles dependientes de las aguas subterráneas.	Consulte los registros de pozos para obtener información sobre los usuarios de aguas subterráneas cercanos. Consulte a las agencias relevantes para obtener información sobre la presencia de ecosistemas sensibles dependientes de las aguas subterráneas.	Observe los cambios en los niveles de agua subterránea y la salud del ecosistema. Limite la tasa de recarga y recuperación para evitar impactos adversos.
Roca reactiva, roca fracturada o acuíferos kársticos ^z			
Determine si el acuífero contiene minerales reactivos (ej. fluoruro, pirita) o minerales solubles (ej. calcita, dolomita), o si el agua subterránea contiene arsénico. Determine si el acuífero está compuesto de roca fracturada o caliza kárstica o dolomita.	Potencial de movilización de metales peligrosos (ej. arsénico) o disolución de la matriz del acuífero que causa inestabilidad geotécnica. Migración rápida de agua de recarga a través de rutas de flujo preferenciales a pozos de extracción de agua potable.	Consulte las bases de datos relevantes para obtener datos sobre la calidad del agua y/o mida la calidad del agua subterránea para arsénico y hierro en los pozos cercanos. Determine la mineralogía del acuífero para piritas, calcitas, dolomitas a partir de registros hidro-estratigráficos y registros de perforación. En conjunto con la evaluación de los usuarios vecinos, consulte los registros hidro-estratigráficos de pozos para obtener información sobre la composición del acuífero.	<p>Cuando el arsénico está presente, se debe tener cuidado con la salud humana. Mida regularmente el arsénico y otras concentraciones de metales pesados en el acuífero utilizado. Detenga la recarga si la concentración excede los umbrales para usos locales. Estime la tasa de disolución por volúmenes y composiciones minerales en aguas y evalúe la estabilidad del pozo.</p> <p>Si utiliza el agua del mismo acuífero para beber, tiene que ser tratada antes de su suministro. Debería tratar el agua antes de recargarla.</p>
Aprobación de desarrollo			

z.- Un tipo de acuífero de roca fracturada (caliza, dolomita, magnesita) donde el agua en las fracturas ha disuelto la roca blanda, aumentando significativamente el tamaño de las fracturas (hasta decenas de metros de ancho) (Tasmanian Government, 2019).

Información específica requerida	Descripción de riesgo	Ejemplos de métodos de evaluación	Ejemplos de medidas planificadas para prevenir problemas
<p>Determine si el proyecto propuesto requiere alguna aprobación de desarrollo adicional. Evaluar la exposición a potenciales riesgos asociados.</p>	<p>Retrasos del proyecto y costos para recibir aprobaciones de desarrollo.</p> <p>Riesgos potenciales de seguridad asociados con el acceso público al sitio sin restricciones (ej. caerse o ahogarse). Molestias por ruido, polvo, olor o insectos (durante la construcción u operación). Potenciales impactos ambientales adversos (ej. de desecho de procesos de tratamiento como la eliminación de sedimentos).</p>	<p>Verifique con las autoridades relevantes qué leyes locales rigen la seguridad, la ingeniería y otras normas que el proyecto puede necesitar cumplir.</p>	<p>Obtenga las aprobaciones necesarias del gobierno regional cuando corresponda e implemente las medidas apropiadas para mitigar los riesgos legales, ambientales y de salud.</p>

Estas preguntas básicas ayudan a los ejecutores a apreciar los problemas que deben tener en cuenta y, cuando corresponda, a tomar las medidas necesarias para evitar problemas. Para obtener ayuda adicional, consulte los Capítulos 4 y 5 de las Guías Australianas de RAG (NRRMC-EPHC-NHMRC, 2009) para conocer los tipos de información que posteriormente se requerirán para lograr una recarga segura.

Los ejecutores de RAG deben desempeñar su papel en la protección del acuífero de una posible contaminación. Si se identifican problemas potenciales y no está claro si estos se materializarían, las medidas de protección deberían aplicarse y mantenerse vigentes hasta que el ejecutor haya monitoreado la calidad del agua y haya demostrado que el problema no está ocurriendo y que no ocurrirá.

6.4.2.- Encuesta sanitaria

Una encuesta sanitaria identifica los peligros y eventos peligrosos que puedan ocurrir en la cuenca que proporciona la fuente de agua para el esquema RAG y en la instalación de recarga, así como en cualquier lugar donde se recupere el agua. La encuesta deberá identificar cualquier deficiencia o falta de integridad en el sistema propuesto que pueda conducir a la contaminación. Una encuesta puede ser completada por un individuo capacitado observando los usos y actividades de la cuenca hidrográfica, en lugar de depender de la disponibilidad de análisis químicos y microbiológicos de muestras de agua para informar el desarrollo de planes de seguridad del agua para los sistemas de recarga. La presencia de heces humanas o animales, o aguas residuales, se considera indicativa de un peligro microbiológico que puede representar un riesgo potencial para la salud humana. La actividad industrial y agrícola evidente en la cuenca puede sugerir riesgos químicos particulares. Las clases de peligros para la calidad del agua se han enumerado como patógenos, productos químicos inorgánicos, salinidad y sodicidad, nutrientes, productos químicos orgánicos, turbidez y partículas y radionúclidos (NRRMC-EPHC-NAHMC, 2009).

Las evaluaciones del saneamiento se recomiendan en las Guías de la Organización Mundial de Salud (OMS) sobre agua potable como medio para garantizar el cumplimiento de los objetivos de calidad del agua previstos (OMS, 2011). La inspección sanitaria y el análisis de la calidad del agua son actividades complementarias, ya que la inspección identifica peligros potenciales, mientras que el análisis de la calidad del agua confirma la ocurrencia e intensidad de cualquier evento de contaminación.

En algunas situaciones, el monitoreo de la calidad del agua puede ser poco práctico debido a la distancia de los laboratorios acreditados confiables, la falta de equipo de muestreo adecuado, la falta de personal capacitado

para realizar el muestreo o la falta de fondos para pagar el muestreo y el análisis. En este caso, la encuesta sanitaria es la única fuente de información sobre la calidad probable de la fuente de agua para la recarga. En el contexto de esta Guía, la encuesta se utilizará principalmente para sugerir medidas preventivas que reduzcan o eliminen los peligros y, por lo tanto, también el riesgo de exposición de las personas que utilizan el agua del acuífero, incluidas aquellas para las que se desarrolló el proyecto.

Se debe utilizar un formulario general de inspección sanitaria o formularios específicos del sitio para identificar los peligros y la probabilidad de su impacto en la calidad del agua. Inicialmente, los formularios de inspección sanitaria podrían ser más genéricos, con una serie de preguntas sobre la seguridad del agua y la protección de la fuente, que luego podrían reducirse a preguntas claves para cada tipo de sistema RAG después de la revisión de los datos recopilados. En las Guías de la OMS sobre la calidad del agua potable (OMS, 2011) figuran ejemplos detallados de formularios de encuestas sanitarias. Los formularios de encuestas sanitarias contienen preguntas que podrían clasificarse en tres grupos (Howard, 2002):

- 💧 Fuentes potenciales de contaminación fecal o química que pueden representar un riesgo para el suministro de agua, como, por ejemplo, la proximidad de una letrina de pozo en relación con un pozo de recuperación.
- 💧 Rutas potenciales de los contaminantes que entran en la fuente de agua o en el acuífero, tal como fugas en las tuberías de alcantarillado.
- 💧 Factores que representan una falta de control para prevenir la contaminación, por ejemplo, la ausencia de tubería alrededor de un pozo de recarga puede aumentar el riesgo de contaminación en caso de inundación. La ausencia de estas barreras no conduce a la contaminación, sino que perjudica la capacidad de prevenir eventos de contaminación.

La Tabla 12 es un ejemplo de los tipos de preguntas que se hacen en una encuesta sanitaria.

Tabla 12. Encuesta sanitaria. Fuente: Elaboración propia, basado en OMS (2011).

Identificación del peligro	Ejemplos de vías de contaminación	Ejemplos de medidas preventivas y acciones correctivas
<p>Hay letrinas de pozo, alcantarillas abiertas o alcantarillas con fugas, heces humanas o animales:</p> <ol style="list-style-type: none"> ¿dentro de la cuenca donde proviene la fuente de recarga? ¿muy cerca de la estructura de recarga o de los pozos de los que se suministrará el agua recargada? 	<ul style="list-style-type: none"> La fuga de alcantarilla contamina el agua superficial utilizada para la recarga. La letrina de pozo contamina el agua subterránea cerca de la zona de recarga o del pozo de extracción. 	<ul style="list-style-type: none"> Elimine el peligro de la cuenca que proporciona la fuente de agua y/o la proximidad de las estructuras de recarga y extracción cuando sea posible. Aplique tratamiento antes de la recarga para evitar la contaminación del agua subterránea. Instale barreras alrededor de las estructuras de recarga y extracción. Aplique tratamiento del agua recargada (una vez extraída) para cumplir con los requisitos de calidad para el uso previsto. Emita avisos a otros usuarios de aguas subterráneas que usan el agua para beber y para uso doméstico, para advertirles que primero traten el agua. Implemente un plan de monitoreo y un sistema de alerta para la detección y acción para reducir los riesgos para la salud como parte de un plan de seguridad del agua.
<p>Existen actividades industriales, de transporte o agrícolas que generen desechos, vertederos ilegales, derrames o emisiones:</p> <ol style="list-style-type: none"> ¿alcanzando la superficie del área de captación del esquema de recarga? ¿muy cerca de la estructura de recarga o de los pozos de los que se suministrará el agua recargada? 	<ul style="list-style-type: none"> Las fugas o emisiones de sustancias peligrosas de instalaciones industriales contaminan el agua utilizada para la recarga. El uso intensivo de químicos agrícolas y/o fertilizantes contamina el agua utilizada para la recarga. 	<ul style="list-style-type: none"> Tratar usando filtración de carbono o ultrafiltración para contaminación química. Mover o agrupar industrias contaminantes, regular las descargas industriales y el uso agrícola de productos químicos. Excluya al ganado de las estructuras de recolección y extracción de agua del esquema, recolecte heces de animales y almacene en áreas secas con distancia de la infraestructura del agua. Implemente un plan de monitoreo y un sistema de alerta para la detección y acción para reducir los riesgos para la salud como parte de un plan de seguridad del agua.

Identificación del peligro	Ejemplos de vías de contaminación	Ejemplos de medidas preventivas y acciones correctivas
¿Existe la posibilidad que las barreras existentes fallen o que el tratamiento previo o posterior en el esquema de recarga pueda fracasar (factores indirectos)?	<ul style="list-style-type: none"> • Barrera física averiada, por ejemplo, atadura. • Taponamiento de filtros. • Fallos eléctricos y mecánicos. • Los productos químicos de tratamiento se agotan. 	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar y mantener las barreras regularmente. • Mantenga el filtro y cualquier otro tratamiento. Verifique que el sistema de alarma funcione correctamente. • Implemente un plan de monitoreo y un sistema de alerta para la detección y acción rápida para reducir los riesgos de salud como parte de un plan de seguridad del agua.

Más adelante se demostrará que la encuesta sanitaria es un insumo esencial para el Plan de Seguridad del Agua (PSA) y deberá repetirse y reforzarse periódicamente las barreras a medida que cambien las condiciones de captación. También vale la pena comprobar durante una tormenta intensa si las medidas preventivas están funcionando eficazmente.

Para cualquier proyecto existente o propuesto, las respuestas a la encuesta sanitaria y a la evaluación del acuífero ayudarán a proporcionar una base racional para determinar las medidas preventivas requeridas como parte de un PSA y los requisitos de mantenimiento para estas medidas.

Como se ha dicho anteriormente, este nivel de información sirve de guía básica y sin datos confiables sobre la calidad del agua no se puede afirmar que estas medidas sean suficientes para la seguridad, pero sin duda mejorarán la seguridad de las operaciones de recarga.

Un resumen de los resultados del estudio sanitario y de la evaluación del acuífero puede resultar útil para:

-  Identificar las prioridades para las medidas preventivas dentro de un mismo sitio, y la formación de un PSA.
-  Examinar una serie de sitios existentes para ayudar a centrar la atención en los sitios con mayor exposición a los peligros, a los que se asignará prioridad para la aplicación de medidas de protección.
-  Evaluar sitios candidatos para desarrollar nuevos proyectos de recarga para ayudar a seleccionar sitios donde será más fácil la gestión de la calidad del agua.

Este documento se centra en el PSA y medidas de protección. En las Guías Australianas de RAG (NRMMC-EPHC-NHMRC, 2009) se incluyen más detalles sobre las investigaciones en los sitios RAG y los planes completos de evaluación y gestión de riesgos. Ejemplos de aplicación de la evaluación del grado de dificultad para definir investigaciones que permitan evaluaciones de riesgos están proporcionados en Page et al. (2010).

6.4.3.- Evaluación económica detallada

Durante la Fase 2 se recomienda actualizar la evaluación económica realizada en la Fase 1, especialmente cuando la investigación RAG requiera un esquema piloto o pruebas de recarga, que podría implicar un gasto de capital significativo antes del escalamiento a una obra de recarga operacional. Cuando se realiza una evaluación económica de la Fase 2, la evaluación económica de la Fase 3 (para el esquema operacional) puede significar solo una actualización de esta, con datos más precisos obtenidos de las pruebas de recarga y/o esquema piloto.

Es probable que la evaluación económica de la Fase 2 se centre en la evaluación del rendimiento del acuífero

y los componentes del esquema RAG asociados, como las tasas de infiltración (evaluados en los estudios en terreno de la Fase 2). De este modo, se espera entregar un mayor nivel de confianza en los beneficios del sistema RAG propuesto. Se deben presentar, cuando sea posible, una representación estadística y confiable de los resultados de los análisis realizados. Cuando esto no sea factible, se debe realizar un análisis de sensibilidad para todos los supuestos claves. Cualquier evaluación comercial incorpora consideraciones económicas, sociales y ambientales, sin embargo, en esta fase es probable que sea una combinación de un análisis cuantitativo y cualitativo, reconociendo que algunos impactos del proyecto RAG no se miden o valoran fácilmente.

6.5.- Fase 3: Diseño y operación

En esta sección, se construye el esquema RAG y se desarrolla un plan operacional. Se recomienda realizar un piloto o al menos pruebas de recarga en el sitio elegido antes de su operación final, particularmente si es un esquema relativamente grande. De esta forma el escalamiento del esquema es más controlado en el tiempo y permite la mejoraría y mayor eficacia de la técnica a emplearse (en su diseño, construcción y operación) más adelante.

6.5.1.- Pruebas de recarga y esquemas piloto

Durante la Fase 3, las investigaciones en terreno típicas pueden incluir una prueba de recarga o un esquema piloto, que generalmente incluye múltiples fases de recarga y recuperación. El enfoque de las pruebas de recarga / el esquema piloto es recopilar suficientes datos de monitoreo para permitir la verificación de los riesgos estimados y la validación de cualquier medida preventiva asociada. La diferenciación entre una prueba de recarga y un esquema piloto no es clara. Por lo general, un esquema piloto es una prueba de recarga a largo plazo (6-18 meses) que utiliza la fuente de agua real que se utilizará en el esquema final. El piloto incluye la construcción y prueba del proceso de pretratamiento del agua a recargar. Un piloto normalmente considera la construcción de una parte del esquema RAG final, por ejemplo, en el caso de piscinas de infiltración, se podrá construir una porción de su extensión (ej. 1 ha de 5 ha) o una piscina de las tres consideradas en el esquema final. De este modo, permitirá ajustar el diseño y plan de operación, antes de ejecutar la inversión completa del esquema.

Una prueba de recarga generalmente usará la fuente de agua disponible para inyección más cercana que no necesariamente es el agua que se utilizará en el esquema final. En este caso, los resultados de la prueba de recarga se extrapolarán a la fuente de agua final propuesta. Generalmente las pruebas de recarga son de menor duración (semanas a meses) en comparación con un esquema piloto.

Después de una prueba de recarga o piloto exitosa, se podría escalar el esquema de recarga final con mucha más confianza con respecto a los aspectos de calidad del agua y los posibles problemas operativos que pueden llegar a afectar la viabilidad económica (por ejemplo, la obstrucción de la obra o el acuífero, o la eficiencia de recuperación del agua recargada).

Los datos recopilados en esta fase se utilizarán para realizar evaluaciones similares a las descritas anteriormente en la fase 2, por ejemplo: determinar la capacidad hidráulica del acuífero; entender el riesgo de obstrucción de la obra o el acuífero; evaluar la geoquímica del acuífero; determinar la eficiencia de recuperación del agua recargada; y evaluar la idoneidad del agua recuperada para su uso objetivo. Sin embargo, se involucrará un nivel de evaluación más detallado, con datos más confiables, particularmente en el caso de realizar un esquema piloto que recopila datos durante varias temporadas, y así se puede evaluar la respuesta del acuífero bajo diferentes condiciones.

En el Anexo 2.3 se proporciona ejemplos de los análisis realizados en la fase 3, durante la ejecución de un esquema piloto, modificado de las Guías Australianas (NRMMC-EPHC-NHMRC, 2009). Los ejemplos se proporcionan en base de peligros específicos. En el caso de esta guía, la cual está orientada a proyectos de relativamente bajo riesgo, se anticipa que los peligros más relevantes a considerar son: i) nutrientes; ii) turbidez y partículas; y iii) presión, niveles de agua subterránea y tasas de flujo.

A menudo los datos se usan para calibrar modelos (numéricos o geoquímicos) que luego se pueden usar para predecir riesgos sobre la operación del esquema RAG a largo plazo y completar la evaluación operacional de riesgo residual. Los resultados de las pruebas de recarga y/o el esquema piloto permitirán la formación de un plan de operación y mantenimiento para la ejecución del esquema a largo plazo, así como un plan de gestión de riesgos.

Ejemplo: Monitoreo de tasas de infiltración

El uso de sistemas de registro de datos automatizados es la mejor manera de recolectar buenos datos en series de tiempo para monitorear las tasas de recarga. Un medidor de caudal en la toma / entrada de la fuente de agua (por ejemplo, equipo de medición en el vertedero hidráulico) al sistema proporcionará volúmenes de entrada. La combinación de esto con las posibles mediciones de evaporación permitirá estimar la infiltración. También será necesario medir el caudal de salida para realizar el cálculo de infiltración, para los sistemas que tienen un flujo de salida aguas abajo (flujo continuo). Para calcular la tasa de recarga, se requiere un registrador de presión en la estructura de infiltración (por ejemplo, en la piscina de infiltración), con otro fuera del agua para la corrección de la presión ambiental. Esto proporcionará una serie temporal de profundidad, lo que permite calcular la tasa de recarga. Un registrador de presión en al menos 1 pozo de observación aguas abajo de la zona de recarga permitirá medir las respuestas del nivel del agua subterránea. Para los métodos de recarga dentro del cauce, se requiere la medición del caudal para diferenciar entre la recarga aumentada y la recarga natural del agua subterránea. También se recomiendan observaciones en terreno regulares para verificar los datos registrados y realizar la calibración del sensor de acuerdo con las especificaciones del fabricante.

6.5.2.- Diseño del esquema final

El diseño y la construcción generalmente representan la mayor parte de los gastos de un proyecto RAG, por lo que es importante tenerlos en consideración. Las fases de diseño se pueden dividir en diseño 'funcional' y diseño, detallado. Un diseño funcional debería permitir un cálculo de costos razonablemente preciso de la construcción del esquema final y, por lo tanto, es un insumo clave para la evaluación económica de la Fase 3. Si se considera a realizar un esquema piloto antes de su escalamiento, el diseño del esquema debería ser determinado antes. Luego, es posible ajustar el diseño según los resultados obtenidos del esquema piloto.

Un diseño funcional debe documentar lo siguiente:

- 💧 Investigación detallada de los requisitos funcionales del esquema, incluidos los caudales (oferta y demanda), calidad del agua, requisitos de tratamiento, confiabilidad, durabilidad, acceso, operación, mantenimiento, eliminación de desechos y una amplia consideración de los requisitos del sitio.
- 💧 Especificaciones de las tuberías (diámetro, material, etc.), longitud y alineación.
- 💧 Diseño de la estación de bombeo, que incluye los requisitos de espacio, recinto / edificio, acceso / mantenimiento.
- 💧 Nueva infraestructura requerida para energía / electricidad / control / comunicaciones.
- 💧 El diseño de la planta de tratamiento propuesta, incluida la consideración de espacio para el recinto / edificio, los requisitos de acceso / mantenimiento y la gestión de los desechos de tratamiento.
- 💧 La ubicación, número, diámetro y profundidad de los pozos de infiltración / recuperación (o el espacio requerido para la ubicación de la piscina de infiltración), incluida la consideración de espacio para acceso y mantenimiento.
- 💧 La ubicación, número, diámetro y profundidad de los pozos de observación, incluida la consideración de

espacio para acceso y mantenimiento.

- Requisitos generales de obras de sitio, tales como caminos de acceso, drenaje y cercas, y la identificación / gestión de restricciones existentes, tales como servicios enterrados, restricciones ambientales y culturales.
- Desarrollo de un plan de control preliminar.

Los costos de operación, mantenimiento y renovación deben determinarse para comprender el costo de toda la vida del esquema. Esto incluiría estimaciones del consumo de energía y materiales, requisitos de mano de obra y renovación periódica de infraestructura como bombas y otra infraestructura mecánica y eléctrica.

El diseño detallado implica el desarrollo del diseño funcional a un nivel adecuado para que los contratistas construyan el esquema. Esto incluiría la preparación de planos de diseño detallados, cronogramas y fichas técnicas, especificaciones técnicas y de desempeño, y plan de control.

La construcción y puesta en marcha^{aa} del esquema final incluye la instalación de todas las obras civiles, mecánicas y eléctricas, la red de tuberías (o canales de distribución) para entregar el agua recuperada a los nodos de demanda y el establecimiento del sistema de gestión de datos. Esto debería incorporar sistemas para la gestión de los datos generados por el equipo de monitoreo en línea. La fase de puesta en marcha puede llevar toda una temporada operativa, dependiendo de la complejidad del sistema y el proceso de tratamiento.

6.5.3.- Plan operacional preliminar

La operación continua del esquema implica garantizar que existan los niveles apropiados de monitoreo y gestión, incluida calibración anual de instrumentación en línea. La frecuencia de monitoreo, además de la instrumentación en línea, se define en el plan operacional. El monitoreo generalmente implica recolectar muestras para un análisis detallado de la calidad del agua según el volumen específico de infiltración. Para los esquemas de desviación de ríos, se prefiere un muestreo según la frecuencia volumétrica en lugar de una frecuencia de muestreo mensual o bimensual, debido a la variabilidad en la precipitación.

Las condiciones del esquema RAG generalmente especificarán un valor umbral, que una vez alcanzado o excedido, desencadena una respuesta de gestión. Los desencadenantes generalmente se establecen en el plan de gestión y monitoreo preparado en la Fase 3 y refinado durante la ejecución del esquema. El plan de monitoreo y gestión es un documento iterativo y es posible que sea necesario realizar cambios de procedimiento cuando se introduce un nuevo equipo en el esquema o se realiza cambios a los procedimientos operativos. Durante la vida temprana del esquema, puede ser necesario tomar muestras frecuentemente y para una amplia gama de análisis. Una vez que haya un conjunto de datos de series de tiempo suficientemente completo de la calidad del agua, habrá evidencia suficiente para modificar el plan operacional para reducir la frecuencia de monitoreo y el número de análisis^{ab} analizados.

El monitoreo de validación es necesario para todos los proyectos, pero debe adaptarse al nivel de riesgo o incertidumbre. Solo se requiere para procesos y parámetros relacionados con los peligros identificados en la evaluación de riesgo residual (realizada previa a la puesta en marcha) para los cuales existe incertidumbre sobre el nivel de riesgo residual.

Es probable que los proyectos en los que el monitoreo de validación sea intensivo para uno o más peligros (para demostrar un bajo riesgo residual) incluyan aquellos identificados con un alto grado de dificultad, por ejemplo:

- Involucrar acuíferos que incluyen el suministro de agua potable.

- 💧 Recargar más de 1,000,000 m³/año u ocupar una zona de almacenamiento de acuíferos más allá del límite de propiedad del ejecutor del proyecto.
- 💧 Sistemas con gran dependencia del tratamiento de acuíferos para lograr la calidad de agua requerida.
- 💧 Sistemas ubicados dentro o cerca de ecosistemas sensibles protegidos bajo decretos y acuerdos de patrimonio natural.
- 💧 Involucrar el tratamiento de suelo-acuífero.
- 💧 Tienen criterios desconocidos para el diseño u operación del sistema que necesitan definirse.

Es posible desarrollar una evaluación de riesgo residual para la operación de la RAG mediante el monitoreo de validación durante pruebas piloto y la puesta en marcha del proyecto. La evaluación proporciona los datos más confiables sobre los cuales basar las decisiones sobre la operación del proyecto a largo plazo.

El monitoreo de validación también proporciona información sobre los ajustes a los tratamientos y los sistemas de recarga y recuperación, para mejorar el rendimiento. En proyectos a escala operacional, se recomienda realizar la evaluación del riesgo residual de un sitio antes de replicar la operación, lo que generalmente resulta más eficiente, particularmente en caso de que surjan riesgos imprevistos o problemas operativos durante las pruebas.

6.5.4.- Evaluación económica para un esquema a escala operacional

El objetivo de la evaluación económica para el esquema a escala operacional (Fase 3) es decidir si proceder con la construcción del esquema RAG a escala operacional después de una esquema piloto o prueba de recarga. Los resultados de las pruebas de recarga y/o el esquema piloto y la evaluación de riesgos residuales asociados se utilizan para refinar el diseño funcional y el costo del esquema RAG. Este documento se basará en la evaluación económica de la Fase 1 o la Fase 2 y todos los elementos se desarrollarán con un mayor nivel de detalle y precisión.

6.5.5.- Gestión de proyecto a escala operacional

Una vez que el proyecto sea operacional, el monitoreo de validación se reemplaza por el monitoreo de verificación. La evaluación del riesgo residual permite definir el programa de monitoreo de verificación requerido para el proyecto operativo. En esta fase, se deberá finalizar el plan operacional para garantizar la sostenibilidad y la protección de la salud humana y el medio ambiente. Esto se puede lograr utilizando un marco de un plan de seguridad del agua (PSA) de la OMS.

Los planes de seguridad del agua (PSA) fueron desarrollados por la OMS para la seguridad del agua potable a través de un enfoque de evaluación y gestión de peligros y riesgos, que abarca todos los pasos en la cadena de suministro de agua, desde la cuenca hasta el consumidor (OMS, 2011). Los desarrollos más recientes incluyen la adopción de un PSA resistente al clima (OMS, 2017). El proceso del PSA ofrece un marco sistemático para gestionar los riesgos al considerar las implicaciones de la variabilidad del clima y el cambio climático. La PSA representa una evolución de la encuesta sanitaria y evaluación de vulnerabilidad, abarcando todo el sistema de suministro de agua de RAG. Se desarrolla un PSA a través de la interacción con la comunidad y la formación de un equipo. El PSA tiene tres componentes claves:

- 1.- Evaluación del sistema para determinar si toda la cadena de suministro de agua puede proporcionar una calidad de agua que cumpla con los objetivos basados en la salud. Este componente también incluye criterios de diseño y evaluación de nuevos sistemas RAG;

2.- Identificación de medidas de control que controlarán los riesgos identificados en los sistemas RAG y garantizarán que se cumplan los objetivos basados en la salud. Para cada una de las medidas de control identificadas, se debe definir un medio apropiado de monitoreo operativo que garantice la detección rápida de cualquier desviación del desempeño requerido;

3.- Planes de gestión y comunicación que resumen la evaluación del sistema y la acción detallada que se deben seguir durante la operación normal o las condiciones de un incidente. Esto también incluye planes de mejora del sistema, monitoreo y comunicación.

Para esta Guía, se desarrolló un plan de seguridad del agua (PSA) genérico (Tabla 13) basado en pequeños sistemas de suministro de agua (Denison et al., 2005). Otros ejemplos y planes se encuentran en la OMS (2014) que se centran en la seguridad del agua potable en pequeñas comunidades.

Tabla 13. Ejemplo de un plan de seguridad de agua (PSA) para la recarga de acuíferos gestionada. Fuente: Elaboración propia, basado en Denison et al., (2005) y OMS (2014).

Eventos peligrosos	Causa	Medida de control	Límites críticos				Verificación		
			Objetivos	Acciones	Qué	Monitoreo			
					Quién				
Arrastre de aguas residuales humanas en la fuente de agua.	Fugas en letrinas, alcantarillas abiertas, fugas en tuberías de alcantarilla, defecación al aire libre en la zona de captación y cerca de las instalaciones de recarga y pozos de recuperación	Más letrinas con un diseño mejorado, instalar un sistema de alcantarillado separado de los desagües de aguas pluviales, o solamente cosechar altos caudales de agua, mejorar la capacidad del alcantarillado y la respuesta a la colmatación y fugas.	Controle las fugas de aguas residuales, regulando los puntos de descarga de aguas residuales en la cuenca.	Identificar fugas de aguas residuales puntos de descarga de aguas residuales. Repare, reconstruya o implemente desviación de desbordamiento. Hervir agua potable.	Inspección Sanitaria	Mensualmente	Op	Elimine las fuentes contaminantes, mejore el diseño de saneamiento, reduzca la fuga de alcantarillado de la descarga de aguas residuales.	Examen microbiológico del agua.
Arrastre de materia fecal animal en la fuente de agua.	Acumulación de estiércol animal o pozos negros en la cuenca que se encuentran cerca del área de recarga y pozo de recuperación	Excluya al ganado de las estructuras de recolección y recuperación de agua, recolecte heces de animales y almacene en áreas secas con distancia de la infraestructura del agua.	No sobre-pastoreo de ganado en la cuenca, se respetan las distancias establecidas, almacenamiento seco de estiércol animal.	Controles sobre la cría de animales en la captación, reparación de las cercas, zonas de exclusión. Hervir agua potable.	Inspección Sanitaria	Mensualmente	Op	Retirar el ganado de la cuenca, reparar o erigir cercas, organizar la recolección y extracción de heces.	Examen microbiológico del agua.
Lixiviación de contaminantes microbianos en acuíferos.	Infiltración de agua que ha estado en contacto con desechos humanos y animales.	Proporcione distancias de retroceso adecuadas a los pozos de agua potable o manantiales.	No hay fuentes de material fecal dentro de la distancia de retroceso.	Cierre todas las letrinas y cierre o selle las alcantarillas abiertas dentro de la distancia de retroceso. Hervir agua potable.	Inspección Sanitaria	Mensualmente	Op	Elimine las fuentes de material fecal dentro de la distancia de retroceso, repare/levante la cerca, mejore el alcantarillado.	Examen microbiológico del agua.

Eventos peli- grosos	Causa	Medida de control	Límites críticos			Monitoreo		Acción correctiva	Verificación
			Objetivos	Acciones	Qué	Cuando	Quién		
Arrastre de aguas residuales humanas en la fuente de agua.	Fugas en letrinas, alcantarillas abiertas, fugas en tuberías de alcantarilla, defecación al aire libre en la zona de captación y cerca de las instalaciones de recarga y pozos de recuperación	Más letrinas con un diseño mejorado, instalar un sistema de alcantarillado separado de los desagües de aguas pluviales, o solamente cosechar altos caudales de agua, mejorar la capacidad del alcantarillado y la respuesta a la colmatación y fugas.	Controlar las fugas de aguas residuales, regule los puntos de descarga de aguas residuales en la cuenca.	Identificar fugas de aguas residuales puntos de descarga de aguas residuales. Repare, reconstruya o implente desviación de desbordamiento. Hervir agua potable.	Inspección Sanitaria	Mensualmente	Op	Elimine las fuentes contaminantes, mejor el diseño de saneamiento, reduzca la fuga de alcantarillado de la descarga de aguas residuales.	Examen microbiológico del agua.
Arrastre de materia fecal animal en la fuente de agua.	Acumulación de estiércol animal o pozos negros en la cuenca que se encuentran cerca del área de recarga y pozo de recuperación	Excluya al ganado de las estructuras de recolección y recuperación de agua, recolecte heces de animales y almacene en áreas secas con distancia de la infraestructura del agua.	No sobrepastoreo de ganado en la cuenca, se respetan las distancias establecidas, almacenamiento en seco de estiércol animal.	Controles sobre la cría de animales en la captación, reparación de las cercas, zonas de exclusión. Hervir agua potable.	Inspección Sanitaria	Mensualmente	Op	Retirar el ganado de la cuenca, reparar o erigir cercas, organizar la recolección y extracción de heces.	Examen microbiológico del agua.
Lixiviación de contaminantes microbianos en acuíferos.	Infiltración de agua que ha estado en contacto con desechos humanos y animales.	Proporcione distancias de retroceso adecuadas a los pozos de agua potable o manantiales.	No hay fuentes de material fecal dentro de la distancia de retroceso.	Cierre todas las letrinas y cierre o selle las alcantarillas abiertas dentro de la distancia de retroceso. Hervir agua potable.	Inspección Sanitaria	Mensualmente	Op	Elimine las fuentes de material fecal dentro de la distancia de retroceso, repare/levante la cerca, mejore el alcantarillado.	Examen microbiológico del agua.

Eventos peligrosos	Causa	Medida de control	Límites críticos		Monitoreo		Acción correctiva	Verificación	
			Objetivos	Acciones	Qué	Cuando			Quién
Arrastre de productos químicos en la fuente de agua para recarga.	Actividades industriales, de transporte y agrícolas que generan acopios, desechos, derrames y emisiones que llegan a la superficie de captación.	Regular las actividades industriales y agrícolas en la cuenca.	No hay fuentes no autorizadas de contaminación química en la cuenca. Todos los contaminantes en uso racional y con la gestión adecuada. Minimice los derrames a través de los estándares de la industria.	Eliminar los residuos de la captación. Instale ataduras alrededor de los sitios industriales para evitar la escorrentía al sistema de recarga.	Inspección Sanitaria	Mensualmente	Op	Mover o agrupar industrias contaminantes, regular la descarga industrial y el uso agrícola de productos químicos.	Inspección sanitaria. Análisis de las fuentes de agua y de la calidad de las aguas subterráneas para determinar la presencia de contaminantes.
Lixiviación de productos químicos en las aguas subterráneas.	Lixiviación de vertederos y descargas industriales.	Proporcionar una distancia de seguridad adecuada, regular las descargas industriales.	Ninguna fuente de productos químicos dentro de la distancia de seguridad.	Prevenir la descarga de contaminantes dentro de la distancia de seguridad.	Inspección Sanitaria	Mensualmente	Op	Mejorar la contención y mover o controlar las fuentes de contaminación	Inspección sanitaria. Análisis de las fuentes de agua y de la calidad de las aguas subterráneas para determinar la presencia de contaminante.
Evitar o fallar el pretratamiento en la instalación de recarga.	Cortocircuito en el flujo de recarga. La obstrucción de los filtros, fallas eléctricas y mecánicas, el tratamiento químico se agota.	Diseñe un tratamiento para evitar la entrada de agua no tratada en el pozo para cada uno de estos eventos peligrosos.	No recargar con agua no tratada	Mantener de forma regular el sistema de tratamiento. Instale un sistema para apagar la recarga cuando se active la alarma. Hervir agua potable.	Inspección Sanitaria	Mensualmente	Op	Mantener filtro y cualquier otro tratamiento. Verifique que el sistema de alarma funcione correctamente	Inspección sanitaria. Análisis de las fuentes de agua y de la calidad de las aguas subterráneas para determinar la presencia de contaminantes.
Derivación o fracaso del posttratamiento en el momento de la recuperación.	La obstrucción de los filtros, fallas eléctricas y mecánicas, el tratamiento químico se agota.	Diseñe un tratamiento para evitar admitir agua no tratada en el suministro de agua para cada uno de estos eventos peligrosos.	No distribuir el agua recuperada no tratada	Mantener de forma regular el sistema de tratamiento. Instale un sistema para apagar la recarga cuando se active la alarma. Hervir agua potable.	Inspección Sanitaria	Mensualmente	Op	Mantener filtro y cualquier otro tratamiento. Verifique que el sistema de alarma funcione correctamente	Inspección sanitaria. Análisis de las fuentes de agua y de la calidad de las aguas subterráneas para determinar la presencia de contaminantes.

Op= Operador del esquema RAG

El PSA se basa en los peligros y sus causas, identificadas en la encuesta sanitaria y la evaluación de acuíferos, luego, para cada una de ellas, se identifica medidas preventivas, límites críticos, monitoreo, acciones correctivas y verificación.

Las medidas preventivas pueden incluir uno o más de los siguientes tipos de acciones:

- 💧 Eliminar las fuentes de contaminación de la cuenca que contribuye con la fuente de agua para la recarga del acuífero.
- 💧 Establecer barreras para evitar que el agua contaminada escape al sistema de recolección de agua.
- 💧 Implementar controles para desviar agua contaminada detectada de la estructura de recarga.
- 💧 Implementar monitoreo y liberación de agua contaminada desde la estructura de recarga donde sea posible.
- 💧 Introducir un tratamiento, como una piscina de decantación o un filtro de arena antes de la recarga.
- 💧 Introducir un tratamiento del agua recuperada (post tratamiento), como filtros cerámicos o cloración, u oxidación y filtración, para eliminar el exceso de concentración de metal en el agua recuperada antes de su uso para beber.
- 💧 Determinar el monitoreo de la calidad y cantidad de agua requerida para comprender los problemas.
- 💧 En los casos en que se determine que los riesgos son demasiado altos, se debería abandonar la recarga hasta que se puedan implementar medidas de control efectivas.

Se necesita capacitación de los operadores locales en el desarrollo e implementación del PSA para asegurar que se realicen revisiones frecuentes y acciones correctivas. Si bien la Tabla 13 indica la revisión mensual, esto debe adaptarse a la situación local. Se recomienda realizar un esfuerzo especial anualmente en preparación para la temporada principal de recarga y que se realice un seguimiento durante la temporada de recarga, ya que las condiciones de la cuenca pueden cambiar y las medidas de protección deben ser reforzadas o restablecidas. Las verificaciones ocasionales de las medidas de protección durante tormentas intensas informarán si dichas medidas están funcionando de manera efectiva y podrían resultar en mejoras en el diseño o en la operación del sistema para proteger mejor la calidad del agua.

Los documentos que reporten los resultados de las pruebas piloto o puesta en marcha deben hacerse públicos para ampliar el aprendizaje de la experiencia y la gestión de problemas. Esto aumentará la base de conocimiento nacional. Se recomienda contar con un sistema de información nacional para que el intercambio de información sea más eficiente y reducir continuamente los costos y las demoras de futuros proyectos. También puede servir como fuente de referencia para aquellos que evalúan proyectos RAG existentes.

6.6.- Uso de esta Guía como herramienta de evaluación

Se puede utilizar esta Guía para evaluar los proyectos RAG existentes, determinar los PSA y las medidas correctivas que deberían llevarse a cabo inmediatamente o, en algunos casos, antes de la próxima temporada de recarga. Las evaluaciones también se pueden usar para evaluar el grado de protección de los pozos de agua potable existentes cerca de los sitios candidatos para los proyectos de recarga propuestos.

Capítulo IV

7.- Reflexiones y recomendaciones

7.1.- Guía de recarga de acuíferos gestionada

Este documento elabora un marco operativo para el desarrollo y gestión de proyectos de Recarga de Acuíferos Gestionada (RAG) en el sector agrícola en Chile. La revisión de los enfoques regulatorios y las guías utilizadas internacionalmente en proyectos RAG y la comprensión sobre el estado de recarga de acuíferos en Chile permitió la elaboración de una guía robusta y flexible para el entorno local. La interacción con los actores relevantes a lo largo del estudio permitió la incorporación de conocimiento y experiencia local en la elaboración de esta Guía, adaptándola a la necesidades y requisitos locales.

Un paso clave para fomentar el desarrollo de proyectos RAG en Chile es la remoción de incertidumbres que rodean su diseño y operación. En esta línea, el uso de esta Guía permite conocer las distintas técnicas de RAG y los requerimientos técnicos, económicos y administrativos para implementar un proyecto de este tipo. También se espera que el marco presentado en esta Guía ayude a las partes interesadas y a los reguladores a evaluar y gestionar los potenciales riesgos asociados a proyectos RAG. Específicamente, se espera que su aplicación acelere el progreso de los proyectos de bajo riesgo, reduzca la incertidumbre y el estancamiento de los demás proyectos, y permita la exitosa materialización de proyectos de alto riesgo, evitando experiencias futuras poco satisfactorias.

Este documento es la primera versión de esta Guía, la que requerirá ir ajustándose a medida que se aplique de manera práctica. Así, se estima prudente aplicar esta Guía de modo preliminar en algunos proyectos o pilotos RAG en Chile (nuevos o existentes), entendiendo cómo los diferentes usuarios del agua y las autoridades evalúan el proceso de su aplicación y levantando las opiniones e inquietudes correspondientes. Durante los próximos años, se espera que esta valiosa experiencia pueda ser incorporada a una segunda versión de esta Guía, de modo que se aumente la implementación de proyectos RAG en Chile.

A su vez, se recomienda que la Guía se vaya ampliando hacia otros fines, y otras fuentes; por ejemplo, por medio de la incorporación del agua potable y el agua reciclada a proyectos RAG. Para que estas incorporaciones sean complementarias a esta Guía, es indispensable que sean consistentes con los contenidos de ésta y estén elaboradas con un enfoque metodológico similar. Esta recomendación se basa en la experiencia de las Guías Australianas, las que cubren todos los aspectos de la RAG.

7.2.- Promover la implementación de la Recarga de Acuíferos Gestionada

La implementación de proyectos RAG es parte de una serie de acciones requeridas para avanzar hacia la seguridad hídrica. En este sentido, y buscando el aprovechamiento del recurso hídrico de la manera más amplia, eficiente y sustentable posible, se recomienda complementar la gestión actual territorial con proyectos RAG. Para esto, se debe transitar desde una perspectiva del recurso hídrico con énfasis en lo individual y sectorial hacia un enfoque de gestión sistémica e integrada del recurso que reconoce la interdependencia entre los actores y persigue la seguridad hídrica a largo plazo para la población, los usos productivos y el medio ambiente. Más específicamente, este enfoque busca la integración del agua superficial y subterránea, de modo que se pueda gestionar de manera dinámica el nivel freático, y el balance hídrico en general, a través de las estaciones y de épocas que presenten patrones climáticos diferentes. Esto fomenta el uso sustentable del recurso, permitiendo extraer agua en momentos de escasez e infiltrar agua adicional en momentos de abundancia.

Para avanzar hacia una gestión más sustentable del recurso, y al mismo tiempo promover la adopción de proyectos RAG en Chile, se presentan tres recomendaciones claves:

- 1) incentivar proyectos que benefician a múltiples actores y fortalecen las Organizaciones de Usuarios de Aguas (OUAs);

- 2) fomentar el levantamiento, el intercambio y el análisis de información y datos relacionados con la RAG en Chile; y
- 3) generar confianza en las aplicaciones de proyectos RAG a través del desarrollo y difusión de proyectos exitosos.

7.2.1.- Incentivar proyectos que benefician a múltiples actores y fortalecen las Organizaciones de Usuarios de Aguas (OUAs)

En función de las entrevistas con los actores clave, es posible argumentar que en general las condiciones del territorio en Chile no facilitan proyectos RAG individuales; es decir, aquellos cuyo objetivo es la recarga y recuperación del agua en el mismo sector para un usuario en particular. Por esta razón, se recomienda promover proyectos colaborativos que benefician a múltiples actores dentro de una misma cuenca o subcuenca; por ejemplo, agricultores, agua potable rural, minería, sanitarias, etc. En otras palabras, se sugiere que los impactos de un proyecto RAG beneficien no sólo un sitio en particular, sino que permitan asegurar un nivel mínimo de agua subterránea en la cuenca o subcuenca para todos los actores.

Esto no es un desafío menor. El bajo nivel de confianza existente entre los diversos actores de una cuenca y la frecuente ausencia de legitimidad procedimental de las decisiones tomadas, impiden la colaboración en la gestión del recurso hídrico, el cual por su naturaleza levanta desafíos que ningún actor puede abordar por separado. En efecto, existe consenso en que la crisis del agua es principalmente una crisis de gobernanza (GWP, 2000; OCDE, 2011).

Así, para llevar a cabo este tipo de proyectos, es importante fortalecer las Organizaciones de Usuarios de Aguas (OUAs), las que tienen un rol clave en la administración y distribución del agua en el territorio. Una integración, o al menos una fuerte colaboración, entre los usuarios de aguas superficiales y subterráneas ayudaría a comprender los potenciales beneficios e impactos de carácter global y a impulsar una gestión integrada y adaptativa del agua frente a escenarios crecientemente variables (Rivera, 2016).

7.2.2.- Fomentar el levantamiento, el intercambio y el análisis de información y datos relacionados con la RAG en Chile

Para facilitar la implementación de proyectos RAG exitosos, es necesario mejorar el conocimiento sobre los sistemas de agua subterránea en Chile. Este conocimiento permite la evaluación de la factibilidad de la RAG a escala regional, identificando sectores con un alto potencial de recarga e informando las decisiones de planificación y política en el territorio. Los métodos para la creación de mapas de oportunidades de RAG deben ser robustos, consistentes y comparables dentro de Chile y aplicar las mejores prácticas basadas en la ciencia. Se recomienda desarrollar un marco de análisis de decisiones basados en SIG con múltiples criterios, que esté en línea con los métodos aplicados a nivel internacional.

Por otra parte, es común que los datos e información existentes sobre los recursos hídricos se encuentren dispersos en diversas bases de datos, publicaciones, archivos, etc. Esto lleva a una comprensión parcial de los sistemas hídricos y a una toma de decisiones desinformada, afectando negativamente la gestión de los recursos hídricos. De este modo, se recomienda el desarrollo de un Sistema de Apoyo a la Toma de Decisiones (SATD) para la RAG que permitirá monitorear, modelar y tomar decisiones, estableciendo tendencias y escenarios futuros de los recursos hídricos bajo diferentes condiciones tanto endógenas como exógenas al proceso de toma de decisiones. Debe estar basado en un sistema de información alimentado por datos, información y modelos científicos de los sistemas hídricos de alta calidad y accesibles en una interfaz fácil de usar.

Un sistema de estas características permite gestionar la información relacionada a los sistemas RAG, y recursos hídricos en general, de manera informada, transparente y planificada. Hace posible tomar decisiones en base a conocimiento y evidencia, pasando de una gestión del agua reactiva a una proactiva. Además, permite compartir experiencias de proyectos RAG para seguir avanzando y mejorando las prácticas actuales, fomentando a la vez la generación de confianza en su aplicación.

7.2.3.- Generar confianza en las aplicaciones de proyectos RAG a través del desarrollo y difusión de proyectos exitosos

La generación de confianza en la RAG es clave para permitir su aprobación en la comunidad y fomentar su amplia adopción en el territorio. El desarrollo de sitios de demostración de RAG locales es la mejor manera de acelerar su adopción, ayudando a que los posibles operadores se interesen y entusiasmen con la RAG. Los reguladores también deben estar involucrados en el desarrollo de sistemas piloto ya que ofrecen una oportunidad para desarrollar y refinar, en forma interactiva, las políticas y regulaciones para una gobernanza de RAG más efectiva y eficiente. También es una manera efectiva de abordar las incertidumbres específicas respecto de la operación de los esquemas RAG a largo plazo y sirve para incentivar la aceptación de la comunidad.

Las experiencias piloto también entregan experiencias visuales y prácticas para demostrar su potencial aplicación. Posibles operadores que pueden tener una mayor capacidad de aprender en forma visual o práctica a menudo necesitan ver un proyecto RAG en funcionamiento a fin de comprender su valor y potencial. La capacidad de ver, experimentar y hacer preguntas acerca del esquema RAG local es más atractivo que simplemente escuchar las presentaciones o leer la Guía acerca de su aplicación. Existe un gran valor en aprender de manera práctica y cuando todas las partes interesadas se involucran en el proceso.

Un sitio de demostración efectivo también sirve al propósito de generar una sensación de propiedad de RAG para la comunidad local. Los sitios de demostración permiten que los posibles operadores del esquema lo experimenten sin el riesgo de pagar por ello. Ayudar a que los operadores nuevos se conecten con este sentimiento de propiedad es un paso importante para aumentar la aceptación de RAG en Chile. Además, sirven para ofrecer evidencia tangible que respalde los resultados que se esperan obtener y ayudan a disipar ideas preconcebidas o incertidumbres que no son respaldadas por los hechos. Si una parte interesada o un regulador pone en duda afirmaciones claves o emite dudas respecto de un esquema RAG y sus capacidades de desempeño, un sitio de demostración puede aliviar dichas aprensiones.

Finalmente, las iniciativas RAG deberían ir acompañadas por una campaña comunicacional para la comunidad, con el fin de captar su interés y buscar su aceptación. La generación de capacidades locales asociadas a la RAG, particularmente entre los usuarios de aguas, ayudará a crear una mayor y mejor adopción de proyectos RAG en el territorio.

8.- Bibliografía

- Adewumi, J.R., Ilemobade, A.A., Van Zyl, J.E. (2010). Treated wastewater reuse in South Africa: Overview, potential and challenges. *Resources, Conservation and Recycling* 55: 221-231.
- Agromet (2019). Coyuntura Agroclimática Diciembre 2019, año 8 - número 12. Sección de Emergencias y Gestión de Riesgos Agrícolas Ministerio de Agricultura. Revisado el 15-01-20: <http://dgir.minagri.gob.cl/wp-content/uploads/2019/12/Coyuntura-Agroclimatica-dic-2019-vfinal-1.pdf>
- Alvarado, C. y Barajona-Palomo, M. (2017). Comparación de tres métodos de infiltración para calcular el balance hídrico del suelo, en la Cuenca del río Suquiapa, El Salvador. *Cuadernos de Investigación UNED* (ISSN: 1659-4266) Vol. 9(1): 23-33.
- Anderson J., Adin A., Crook J., Davis C., Hutquist R., Jimenez-Cisneros B., Kennedy W., Sheikh B. and van der Nerwe, B. (2000). Climbing the Ladder: A Step by Step Approach to International Guidelines for Water Recycling. Proc. 3rd International Symposium on Wastewater Reclamation Recycling and Reuse, Paris, July 2000.
- Arumí, J.L., Rivera, D., Holzzapfel, E., Boochs, P., Billib, M., Fernald, A. (2009). Effect of the Irrigation Canal Network on Surface and Groundwater Interactions in the Lower Valley of the Cachapoal River, Chile. *Chilean journal of agricultural research* 69: 12-20.
- ASCE (2001). Standard Guidelines for Artificial Recharge of Ground Water. EWRI/ASCE. American Society of Civil Engineers.
- Beganskas, S., Fisher, A.T. (2017). Coupling distributed stormwater collection and managed aquifer recharge: Field application and implications. *Journal of Environmental Management* 200: 366-379.
- Bekele, E., Toze, S., Patterson, B., Fegg, W., Shackleton, M., & Higginson, S. (2013). Evaluating two infiltration gallery designs for managed aquifer recharge using secondary treated wastewater. *Journal of environmental management*, 117, 115-120.
- Bergstrom, J., Boyle, K., A. Job, C., Kealy, M. (1996). Assessing the economic benefits of ground water for environmental policy decisions.
- Bonilla Valverde, J.P., Blank, C., Roidt, M., Schneider, L., Stefan, C. (2016). Application of a GIS multi-criteria decision analysis for the identification of intrinsic suitable sites in Costa Rica for the application of Managed Aquifer Recharge (MAR) through spreading methods. *Water (Switzerland)* 8: .
- Bonilla Valverde, J.P., Stefan, C., Palma Nava, A., Bernardo da Silva, E., Pivaral Vivar, H.L. (2018). Inventory of managed aquifer recharge schemes in Latin America and the Caribbean. *Sustainable Water Resources Management* 4: 163-178.
- Bouwer, H. (2002). Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. *Hydrogeology Journal* 10: 121-142.
- Bouwer, H. (1996). Issues in artificial recharge. *Water Science and Technology* 33: 381-390.
- Bower, H. y Rice, R.C. (1976). A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. *Water Resources Research*: 27, 3: 423-428
- Bruno, E. (2017). California's New Groundwater Law and the Implications for Groundwater Markets. *ARE Update* 20: 1-4.

- Cabrera Fajardo, G. (2014). Análisis desde Arica hasta el Maule: ¿Dónde hay Condiciones para la Recarga Artificial de Acuíferos en Chile? Revista AIDIS 47: 32-39.
- Capone, F., Bonfanti, M.E. (2015). Demonstrating Managed Aquifer Recharge as a Solution to Water Scarcity and Drought - Legislative Framework Review and Analysis. MARSOL project.
- CASUB (2017). Presentación de Comunidad de Aguas Subterráneas.
- CDPH (2014). Regulations Related to Recycled Water.
- Central Intelligence Agency (2003). The world factbook 2009. Government Printing Office.
- GWB (2007). Manual on artificial recharge of groundwater. New Delhi.
- CGWB (2013). Master plan for artificial recharge to ground water in India. New Delhi.
- CGWB (2005). Master plan for artificial recharge to groundwater in India. New Delhi.
- Cha, W., Kim, J., Choi, H. (2006). Evaluation of steel slag for organic and inorganic removals in soil aquifer treatment. Water Research 40: 1034-1042.
- Cisneros, B., Ordonez, J. (1999). The Mezquital valley aquifer recharge due to massive reuse of municipal wastewater for agricultural irrigation. En Proceedings of 9th Biennial Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, pp. 15-24. Tempe, AZ.
- CNR (2019). Bases Concurso Nacional de obras de acumulación e infiltración.
- CNR (2014^a). Diagnóstico de zonas de recarga en cuencas del secano Maule VII Región del Maule. Elaborado por: GCF Ingenieros Ltda.
- CNR. (2015^a). Estudio básico "Análisis de alternativas piloto de recarga artificial Chacabuco-Polpaico". Elaborado por: GeoHidrología Consultores.
- CNR. (2013^a). Estudio básico "análisis alternativas piloto recarga artificial Ligua - Petorca, V Región". Elaborado por: Aqualogy Medioambiente Chile S.A.
- CNR. (2014^b). Estudio básico análisis alternativas piloto recarga artificial Marchigüe, VI Región. Elaborado por: Con Potencial Consultores Ltda.
- CNR. (2015^b). Estudio básico «Análisis de alternativas piloto de recarga artificial 3 sección Aconcagua». Elaborado por: GeoHidrología Consultores.
- CNR. (2015^c). Estudio básico «Análisis de alternativas piloto de recarga artificial Lontue». Elaborado por: GeoHidrología Consultores.
- CNR. (2015^d). Estudio básico «Análisis de alternativas piloto de recarga artificial Popeta». Elaborado por: GeoHidrología Consultores.
- CNR. (2013^b). Estudio diagnóstico de zonas potenciales de recarga de acuíferos en las regiones de Arica y Parinacota a la región del Maule. Elaborado por: GCF Ingenieros Ltda.
- CNR (2020). Guía Metodológica: Marco Operativo para Proyectos de Recarga Artificial de Acuíferos. Disponible en: https://www.cnr.gob.cl/wp-content/uploads/2020/07/Guia-Metodologica-y-fichas-280720_ver_

final_3.pdf

- CNR. Ley de Riego 18.450. Disponible en: <https://www.cnr.gob.cl/atencion-ciudadana/preguntas-frecuentes/>.
- CNR. (2013c). Mejoramiento de Agua Subterránea para Riego Ligua y Petorca. Elaborado por: GCF Ingenieros Ltda.
- CNR, GORE Atacama. (2012). Estudio prefactibilidad «Mejoramiento del sistema de aguas subterráneas para su utilización en la cuenca del río Copiapó» Región de Atacama. Elaborado por: Jorquera Ingeniería. Santiago.
- Dahlke, H.E., LaHue, G.T., Mautner, M.R., Murphy, N.P., Patterson, N.K., Waterhouse, H., Yang, F., Foglia, L. (2018). Managed aquifer recharge as a tool to enhance sustainable groundwater management in California: examples from field and modeling studies. *Advances in chemical pollution, environmental management and protection* 3: 215-275.
- Davison, A., Howard, G., Stevens, M., Callan, P., Fewtrell, L., Deere, D., Bartram, J. (2005). *Water Safety Plans Managing drinking-water quality from catchment to consumer* Water, Sanitation and Health Protection and the Human Environment. World Health Organization, Geneva.
- Deere, D., Stevens, M., Davison, A., Helm, G., Dufour, A. (2001). Management strategies. En Bartram, J., Fewtrell, L. (eds.), *Water quality: guidelines, standards and health: assessment of risk and risk management for water related infectious disease*, WHO, pp. 257. IWA Publishing.
- Denison, A., Howard, G., Stevens, M., Callan, P., Fewtrell, L., Deere, D. and Bartram, J. (2005). *Water Safety Plans: Managing drinking-water quality from catchment to consumer*. World Health Organisation, Geneva. WHO/SDE/WSH/05.06. 235p
- Dirección General de Aguas (DGA) (2013). *Análisis y Síntesis Preliminar de Iniciativas Sobre Recarga Artificial en Chile*.
- Dirección General de Aguas (DGA) (2014). *Diagnóstico de metodología para la presentación y análisis de proyectos de recarga artificial de acuíferos*. Elaborado por: AMPHOS 21 Consulting Chile Ltda. Santaigo.
- Dirección General de Aguas (DGA) (2016a). *Guía Metodológica para Presentación de Proyectos de Recarga Artificial*.
- Dirección General de Aguas (DGA) (2016b). *Circular Dirección General de Aguas No4 2016*. 1-4.
- Dirección General de Aguas (DGA) (2016c). *Minuta Técnica para el PAS 158*. 1-23.
- Dirección General de Aguas (DGA) (2019a). *Circular Dirección General de Aguas No1 2019*.
- Dirección General de Aguas (DGA) (2019b). *Circular Dirección General de Aguas No2 2019*.
- Dillon, P., Vanderzalm, J., Page, D., Toze, S., Wolf, L., Pavelic, P., Cunliffe, D., Wang, W., Willardson, B., Tredoux, G., Jain R. and Raj, R. (2010). *Australian Guidelines for Managed Aquifer Recharge and their International Relevance*. Proc. ISMAR7, Abu Dhabi 9-13 Oct 2010. www.ismar7.org
- Dillon, P., Gale, I., Contreras, S., Pavelic, P., Evans, R., Ward, J. (2009). *Managing aquifer recharge and discharge to sustain irrigation livelihoods under water scarcity and climate change*. IAHS Publ. 330, 1-12.
- Dillon, P.J. (2005). *Future management of aquifer recharge*. *Hydrogeology Journal*, 13 (1) 313-316.

- DOH. (2012^a). Análisis de potencialidad de recarga artificial acuíferos primera y tercera sección valle del Aconcagua. Elaborado por: GeoHidrología. En Plan de alerta temprana pozos DOH Aconcagua y para análisis de potencialidad de recarga artificial, Santiago.
- DOH. (2016). Estudio e implementación de un plan piloto de recargas artificiales a los acuíferos del valle del Aconcagua: Elaborado por: GeoHidrología Consultores.
- DOH. (2012b). Estudio Recarga artificial de acuíferos en el valle de Aconcagua usando derechos eventuales del FISCO. Elaborado por: Ernesto Brown.
- Dominguez-Chicas, A., Scrimshaw, M.D. (2010). Hazard and risk assessment for indirect potable reuse schemes: An approach for use in developing Water Safety Plans. *Water Research* 44: 6115-6123.
- DWR. (2018). Flood-MAR - Using Flood Water for Managed Aquifer Recharge to Support Sustainable Water Resources.
- Escalante, E.F., Gil, R.C., Fraile, M.Á.S.M., Serrano, F.S. (2014). Economic assessment of opportunities for Managed Aquifer recharge techniques in Spain using an advanced geographic information system (GIS). *Water (Switzerland)* 6: 2021-2040.
- Essandoh, H.M.K., Tizaoui, C., Mohamed, M.H.A., Amy, G., Brdjanovic, D. (2011). Soil aquifer treatment of artificial wastewater under saturated conditions. *Water Research* 45: 4211-4226.
- Fundación Chile (2019). "Escenarios Hídricos 2030- EH2030. (2019). Transición Hídrica: El Futuro del Agua en Chile.
- Fernández et al., (2016). MARSOL. Demonstrating Managed Aquifer Recharge as a Solution to Water Scarcity and Drought. MAR design and construction criteria. MARSOL deliverable 13.3, versión 4, 31/10/2016.
- Garreaud, R., Boisier, J., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H., Veloso-Aguila, D. (2019). The Central Chile Mega Drought (2010-2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*; Revisado el 18-11-2019; <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/joc.6219>
- Gdoura, K., Anane, M., Jellali, S. (2015). Geospatial and AHP-multicriteria analyses to locate and rank suitable sites for groundwater recharge with reclaimed water. *Resources, Conservation and Recycling* 104: 19-30.
- Gonzalez, D., Page, D., Vanderzalm, J., Dillon, P. (2014). Setting Water Quality Trigger Levels for the Operation and Management of a MAR System in Parafield, South Australia. *Journal of Hydrologic Engineering* 20: B5014001.
- GWP (2000). Integrated Water Resources Management. Technical Advisory Committee Background Papers No, 4. GWP/Swedish International Development Agency: Stockholm, Sweden.
- Hellier, K. (2000). Hazard analysis and critical control points for water supplies. En 63rd annual water industry engineers and operators conference, pp. 101-109. Warrnambool.
- Hispagua. Sistema Español de Información sobre el agua. (2020). Hidrogeología. Revisado el 20-01-2020; <https://hispagua.cedex.es/datos/hidrogeologia>
- Howard, G. (2002). Water supply surveillance: a reference manual. WEDC, Loughborough University
- Hvorslev, M.J. (1951). Time lag and soil permeability in ground water observations. US Army Corps of Engineers Waterway Experimentation Station, Bull. 36

- Ibañez, A.S., Moreno R.H.; Gisbert B.J.M. (2010). Características del infiltrómetro de doble anillo. Revisado en: 28-02-2020 <http://hdl.handle.net/10251/7840>
- INH. (2014). Caracterización de la cuenca del río San José para la implementación de un programa de recarga artificial de acuíferos - Proyecto Innova CORFO COD. 12BPC2-13504.
- Jiménez, B., Asano, T. (2008). Water Reuse: An International Survey of current practice, issues and needs.
- JVRC (2018). Minuta: Área de recarga de acuífero sector Cerillos.
- Kruseman, G. P. y De Ridder, N. A. (1975). Análisis y evaluación de los datos de ensayos por bombeo. International Institute for Land Reclamation and Improvement Wageningen Holanda. Revisado el 06 de agosto 2020. Disponible en: <https://edepot.wur.nl/72327>
- Marcías, J., Vargas, A. y Arellano, F., (2018). Conductividad hidráulica en dos sitios del valle central de costa rica: análisis comparativo de tres metodologías de ensayo en la zona no saturada. Rev. Geol. Amér. Central n.59 San Pedro de Montes de Oca;
- <http://dx.doi.org/10.15517/rgac.v59i0.34160>
- Malczewski, J. (1999). GIS and Multicriteria decision analysis. John Wiley & Sons, New York.
- Maliva, R. (2014). Economics of managed aquifer recharge. Water, 6(5), 1257-1279.
- Martin, R. (2013). Clogging issues associated with managed aquifer recharge methods. IAH Commission on Managing Aquifer Recharge, Australia.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). Guía Metodológica para la Formulación de Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos. Bogota, Colombia.
- Murray, R., Tredoux, G., Ravenscroft, P., Botha, F. (2007). Artificial Recharge Strategy v1.3.
- NRMMC-EPHC-AHMC (2006). Australian Guidelines for Water Recycling: Managing Health and Environmental Risks (Phase 1), Natural Resources Ministerial Management Council, Environment Protection and Heritage Council and Australian Health Ministers' Conference, Canberra. www.ephc.gov.au/taxonomy/term/39
- NRMMC-EPHC-NHMRC. (2008). Australian Guidelines for Water Recycling: Managing Health and Environmental Risks (Phase 2) Augmentation of Drinking Water Supplies. Australia.
- NRMMC-EPHC-NHMRC (2009). Australian Guidelines for Water Recycling (Phase 2): Managed Aquifer Recharge. (Natural Resource Ministerial Management Council, Environment Protection and Heritage Council and National Health and Medical Research Council), Canberra, www.ephc.gov.au/taxonomy/term/39
- OCDE (2011). Water Governance in OECD Countries: A Multi-level Approach, OECD Studies on Water, OECD Publishing. doi:10.1787/9789264119284-en
- O'Geen, A.T., Saal, M.B.B., Dahlke, H., Doll, D., Elkins, R., Fulton, A., Fogg, G. et al. (2015). Soil suitability index identifies potential areas for groundwater banking on agricultural lands. California Agriculture 69: 75-84.
- Page, D., Dillon, P., Vanderzalm, J., Bekele, E., Barry, K., Miotlinski, K. and Levett, K. (2010). Managed aquifer recharge case study risk assessments. CSIRO: Water for a Healthy Country National Research Flagship Report, Dec 2010, 144p.

<http://www.clw.csiro.au/publications/waterforahealthycountry/2010/wfhc-MAR-case-study-risk-assessments.pdf>

- Page, D., Bekele, E., Vanderzalm, J., Sidhu, J. (2018). Managed aquifer recharge (MAR) in sustainable urban water management. *Water (Switzerland)* 10: 1-16.
- Page, D., Dillon, P., Toze, S., Bixio, D., Genthe, B., Jiménez Cisneros, B.E., Wintgens, T. (2010a). Valuing the subsurface pathogen treatment barrier in water recycling via aquifers for drinking supplies. *Water Research* 44: 1841-1852.
- Page, D., Dillon, P., Vanderzalm, J., Toze, S., Sidhu, J., Barry, K., Levett, K. et al. (2010b). Risk Assessment of Aquifer Storage Transfer and Recovery with Urban Stormwater for Producing Water of a Potable Quality. *Journal of Environment Quality* 39: 2029.
- Pedrero, F., Albuquerque, A., Marecos Do Monte, H., Cavaleiro, V., Alarcón, J.J. (2011). Application of GIS-based multi-criteria analysis for site selection of aquifer recharge with reclaimed water. *Resources, Conservation and Recycling* 56: 105-116.
- Pizarro Tapia, R., Flores Villanelo, J.P., Sangüesa Pool, C., Martínez Araya, E., León Gutiérrez, L. (2008). Diseño hidrológico de zanjas de infiltración en el secano costero e interior de las regiones semiáridas de Chile. *Bosque* 29: 136-145.
- Portal Frutícola (2016). Calicatas, toma de muestras, y descripción de suelos. Revisado el 7 de agosto 2020. Disponible en: <https://www.portalfruticola.com/noticias/2016/12/01/calicatas-toma-de-muestras-y-descripcion-de-suelos/>
- Prieto, B., Támara, R.E. y Peroza, J.A. (2006). Comparación de dos métodos de campo para la determinación de la conductividad hidráulica saturada en suelos del Sinú (Córdoba, Colombia). *Temas Agrarios*, 11(2):36-44.
- Ross, A., and Hasnain, S. (2018). Factors affecting the cost of managed aquifer recharge (MAR) schemes. *Sustainable Water Resources Management*, 4(2), 179-190.
- Rupérez-Moreno, C., Pérez-Sánchez, J., Senent-Aparicio, J., Flores-Asenjo, P., & Paz-Aparicio, C. (2017). Cost-benefit analysis of the managed aquifer recharge system for Irrigation under climate change conditions in southern Spain. *Water*, 9(5), 343.
- Russo, T.A., Fisher, A.T., Lockwood, B.S. (2015). Assessment of managed aquifer recharge site suitability using a GIS and modeling. *Groundwater* 53: 389-400.
- Sánchez, J. (2014). Conceptos Fundamentales de Hidrología; revisado el 15-01-2020; <https://docplayer.es/5767013-Conceptos-fundamentales-de-hidrogeologia.html>
- Sánchez, F.J. (2011). Medidas puntuales de permeabilidad ("slug tests"). Departamento de Geología-Universidad de Salamanca (España). Revisado 06-08-2020: http://hidrologia.usal.es/temas/Slug_tests.pdf
- Sandoval-Solis, S., McKinney, D.C., Teasley, R.L., Patino-Gomez, C. (2010). Groundwater Banking in the Rio Grande Basin. *Journal of Water Resources Planning and Management* 137: 62-71.
- Sandoval, E., Baldo, G., Núñez, J., Oyarzún, J., Fairley, J.P., Ajami, H., Arumí, J.L. et al. (2018). Groundwater recharge assessment in a rural, arid, mid-mountain basin in North-Central Chile. *Hydrological Sciences Journal* 63: 1873-1889.
- SCM. (2013). Proyecto Recarga de Acuífero de Santiago Sociedad del Canal de Maipo.

- SEMARNAT. (2009^a). Norma Oficial Mexicana NOM-014-CONAGUA-2003, Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada.
- SEMARNAT. (2009^b). Norma Oficial Mexicana NOM-015-CONAGUA-2007, Infiltración artificial de agua a los acuíferos. Características y especificaciones de las obras y del agua.
- Da Silva, S., Baptista, V., Coelho, V., Almeida, C. (2019). Managed aquifer recharge in Brazil: current state of the legal framework. En International Symposium on Managed Aquifer Recharge 10, Madrid, Spain, pp. 2014-2021. Madrid.
- Rivera, D. (2016). Gestión colectiva y conjunta de aguas: perspectiva jurídica de una deuda subterránea. Revista de Derecho de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, XLVI(1), 311-346.
- Stefan, C., Ansems, N. (2018). Web-based global inventory of managed aquifer recharge applications. Sustainable Water Resources Management 4: 153-162.
- Swierc, J., Page, D., Van Leeuwen, J., Dillon, P.J. (2005). Preliminary Hazard Analysis and Critical Control Points Plan (HACCP) - Salisbury Stormwater to Drinking Water Aquifer Storage Transfer and Recovery (ASTR) Project. Australia.
- Tasmanian Government. (2019). Karst Aquifers. Revisado 10-01-2020: <https://dpipwe.tas.gov.au/water/groundwater/aquifers/karst-aquifers>;
- Tobar, E. (2009). Modelación del efecto de la recarga artificial sobre la operación del Dren Las Vegas. Universidad de Chile.
- Törey, S. (2014). El lento camino en la recarga artificial de acuíferos. Revista AIDIS24-31.
- Tsangaratos, P., Kallioras, A., Pizpikis, T., Vasileiou, E., Ilia, I., Pliakas, F. (2017). Multi-criteria Decision Support System (DSS) for optimal locations of Soil Aquifer Treatment (SAT) facilities. Science of the Total Environment 603-604: 472-486.
- UNESCO/WMO. (2nd revised ed., 1992) Glosario Internacional de Hidrología
- Universidad de Chile (2011). Hidráulica de Aguas Subterráneas y su Aprovechamiento. Ley de Darcy "Slug Tests". Presentación Powerpoint. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil.
- US EPA. (2012). Guidelines for Water Reuse. Washington DC, USA.
- Vanderzalm, J.L., Page, D.W., Barry, K.E., Dillon, P.J. (2010). A comparison of the geochemical response to different managed aquifer recharge operations for injection of urban stormwater in a carbonate aquifer. Elsevier Ltd.
- WHO (2011). Guidelines for Drinking Water quality 4th edition. World Health Organisation, Geneva.
- WHO (2012). Water safety planning for small community water supplies: step-by-step risk management guidance for drinking-water supplies in small communities. World Health Organisation, Geneva.
- WHO (2014). Water safety plan: a field guide to improving drinking water safety in small communities (B. Rickett, O. Schmoll, A. Rinehold, E. Barrebborg). World Health Organisation, Regional Office for Europe, Copenhagen.
- WHO (2017). Potable reuse: guidance for producing safe drinking-water. World Health Organization.

Yuan, J., Van Dyke, M. I., & Huck, P. M. (2016). Water reuse through managed aquifer recharge (MAR): assessment of regulations/guidelines and case studies. *Water Quality Research Journal*, 51(4), 357-376.

9.- Agradecimientos

En primer lugar, se agradece a los miembros del Comité Asesor del proyecto, Jaime Yañez, de la Comisión Nacional de Riego, Pamela García y Carlos Flores, de la Dirección General de Aguas, Orlando Acosta, representante de CORFO y la Asociación Latinoamericana de Hidrología Subterránea para el Desarrollo (ALHSUD), Patricio Crespo y Graciela Correa, de la Federación de Juntas de Vigilancia de la Sexta Región (FJVSJ), Santiago Matta, de la Junta de Vigilancia de la Tercera Sección del Río Aconcagua y Roberto Pizarro, de la Universidad de Talca, quienes dieron su apoyo continuo durante la ejecución del proyecto, a través de compartir información y conocimiento relevante a su desarrollo, asistir a reuniones y revisar material de los informes del proyecto.

En segundo lugar, se agradece a Carlos Araya, de la Comunidad de Aguas Subterráneas (CASUB): Copiapó - Piedra Colgada - Desembocadura por llevar a unos miembros del equipo del proyecto a terreno y contar su valiosa experiencia con respecto a la recarga de acuíferos gestionada en la cuenca del río Copiapó.

Finalmente, se agradece a todas las instituciones y personas quienes dedicaron su tiempo en las entrevistas y quienes proporcionaron información durante el proceso, en especial al Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería (CRHIAM), Dirección de Obras Hidráulicas, Dirección General de Aguas, ALHSUD, Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP), Confederación de Canalistas de Chile, Sociedad del Canal del Maipo (SCM) y Ministerio del Medio Ambiente.

Elaborado por:

**Programa Agua y Territorio
Fundación CSIRO Chile Research**

Edmundo Claro

Ingeniero Civil Industrial, PhD

Director del proyecto

Gabriella Bennison

Ingeniera Civil, MEng

Coordinadora del proyecto

Constanza Burrull

Ingeniera Agrónoma

Investigadora

Mauricio Caroca

Ingeniero Agrónomo y Forestal, Msc

Investigador y Analista de datos

Programa Agua y Territorio CSIRO

Dennis Gonzalez

Biólogo Marino

Especialista

Declan Page

Químico, PhD

**Especialista University California
Davis**

Samuel Sandoval

Ingeniero Civil, PhD

Especialista

Paulina Rojas

Investigadora

Daisy Guitron

Investigadora

Sandra Gandolfo

Asesor estratégico

Consultor Independiente

Igor Aguirre

Hidrogeólogo, Msc

Especialista

