



# BID

Banco Interamericano  
de Desarrollo

## Almacenamiento y Recuperación de Agua en Acuíferos

Mejoramiento de la Seguridad en el  
Abastecimiento de Agua en el Caribe  
Oportunidades y Desafíos

Anthony Daus

División de Agua y Saneamiento

DOCUMENTO PARA  
DISCUSIÓN N°  
IDB-DP-00712

Junio 2019

# Almacenamiento y Recuperación de Agua en Acuíferos

Mejoramiento de la Seguridad en el Abastecimiento de Agua  
en el Caribe  
Oportunidades y Desafíos

Anthony Daus

Junio 2019

<http://www.iadb.org>


Copyright © 2019 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no-comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas.

Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.





# **Almacenamiento y Recuperación de Agua en Acuíferos: Mejoramiento de la Seguridad en el Abastecimiento de Agua en el Caribe Oportunidades y Desafíos**

**Coordinadores y Editores:**

**David Wilk, INE/WSA  
y  
Yvon Mellinger, INO/IEN**

**Autor:**

**Anthony Daus  
GSI Environmental, Inc.**

**Junio 2019**

# PREFACIO

*Como parte de las recomendaciones emanadas de la Asociación de Aguas y Aguas Residuales del Caribe (CWWA, por sus siglas en inglés), se ha destacado la importancia de preservar y restaurar los acuíferos subterráneos y se ha identificado como una intervención prioritaria del Caribe.*

El cambio climático está afectando el régimen hídrico en América Latina y el Caribe (ALC), lo que ha generado que muchos países sufran sequías e inundaciones de gravedad, tanto por su frecuencia como por su duración. En las últimas décadas, los peligros de la sequía se han incrementado significativamente, impactando a más de 60 millones de personas. El aumento del nivel del mar, aunado al cambio climático, también está incrementando la salinidad de los acuíferos costeros; mientras que la urbanización ha reducido el volumen de infiltración del agua de lluvia, generando un mayor impacto asociado con inundaciones, degradación de la calidad del agua superficial, pérdida de hábitat ecológico y limitada recarga de acuíferos que suelen estar ya agotados debido a su sobreexplotación.

El almacenamiento y la recuperación de acuíferos (ARA) es un método para incrementar el suministro de agua por medio del uso de embalses subterráneos. La reposición de las aguas subterráneas o el aumento del agua subterránea almacenada en acuíferos durante períodos húmedos puede contribuir a mejorar la seguridad y la sostenibilidad del suministro de agua. El agua recuperada puede ser utilizada para el abastecimiento de agua potable, riego y proyectos de restauración de ecosistemas, con lo que se suele completar el abastecimiento de agua superficial. Económicamente, el método ARA puede ser considerablemente más barato y más fácil de implementar que otros métodos de almacenamiento, además de ser muy rentable en comparación con el desarrollo de fuentes alternativas de agua necesarias para el desarrollo.

La División de Agua y Saneamiento del BID (WSA), reconociendo los beneficios potenciales del ARA, ha contratado a un grupo de expertos técnicos para analizar diversos métodos, ventajas y desventajas del uso del ARA, especialmente en los países que enfrentan sequías multianuales. En el Caribe, un préstamo del BID en Jamaica ha incorporado un análisis técnico sobre ARA, y el concepto ha recibido atención en todo el Caribe. El Marco Regional para la Inversión del Agua y la Resiliencia Climática del Caribe exige un compromiso regional para abordar los impactos de las sequías como parte de su objetivo más amplio: “Apoyar a las empresas encargadas del agua en su labor de gestionar

los eventos de sequías y reducir la interrupción de los servicios esenciales” (GWP-C, 2017). Como parte de las recomendaciones emanadas de la Asociación de Aguas y Aguas Residuales del Caribe (CWWA, por sus siglas en inglés), se ha destacado la importancia de preservar y restaurar los acuíferos subterráneos y se ha identificado como una intervención prioritaria del Caribe.<sup>2</sup> Esta acción es especialmente relevante cuando la fuente principal de agua proviene de métodos de desalinización muy costosos..

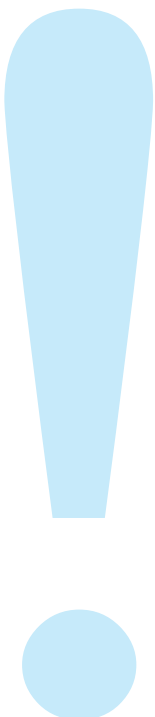
Este documento es el resultado de una consultoría técnica que tiene dos objetivos principales: a) revisar las dimensiones técnicas y socioeconómicas de las aplicaciones del método ARA, utilizando ejemplos concretos de todo el mundo y en ALC, documentando los costos y beneficios de los proyectos ARA y evaluando las condiciones críticas para la implementación, como son la planificación y gestión locales, restricciones económicas y financieras, y los factores sociales y ambientales; y b) desarrollar un conjunto de pautas estratégicas-prácticas y criterios de evaluación para ayudar al personal del Banco y las contrapartes nacionales y subnacionales y las partes interesadas a considerar e incorporar el ARA en su política de agua.

Los resultados finales de esta consultoría se presentaron y discutieron en un taller del Banco celebrado en diciembre de 2018, en donde se dieron a conocer las conclusiones del análisis y se presentaron los estudios de caso de Jamaica, el Sur de California y Barcelona. Extendemos nuestra gratitud al Sector de Conocimientos, Innovaciones y Comunicaciones (KIC) del BID por su apoyo a este producto y a la facilitación y realización del taller.

La División de Agua y Saneamiento (INE/WSA).

---

2 “Documento Ejecutivo” sobre Gobernanza y resiliencia climática en el sector del agua del Caribe (Governance and Climate Resilience in the Water Sector in the Caribbean) preparado por James Fletcher para el 13o Foro de Alto Nivel de la 26o Conferencia de la CWWA).



# ÍNDICE

<b>LISTA DE ACRÓNIMOS</b>	<b>1</b>
<b>RESUMEN EJECUTIVO</b>	<b>3</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>4</b>
1.1    Objetivos del proyecto y organización del informe	7
<b>2. RECURSOS HÍDRICOS DEL CARIBE</b>	<b>9</b>
<b>3. PROYECTOS ARA / GRA EXITOSOS</b>	<b>11</b>
3.1    Técnica	12
3.2    Construcción y operación del proyecto	18
3.3    Financiamiento y Economía	20
3.4    Estructuras institucionales	23
3.5    Participación de las partes interesados	24
3.6    Fortalecimiento de la capacidad organizacional	24
<b>4. ESQUEMAS DE ARA / GRA</b>	<b>25</b>
4.1    Desarrollo de bajo impacto (DBI)	25
4.2    Gestión de la recarga del acuífero por inundación (Flood-MAR)	26
4.3    Filtración inducida en las margenes del río	28
4.4    Infiltración o embalses de recarga	29
4.5    Pozos secos	30
4.6    Pozos de inyección y GRA	31
4.7    Modificación del lecho del cauce	34
<b>5. HERRAMIENTA PARA LA TOMA DE DECISIONES EN LOS PROYECTOS ARA/GRA</b>	<b>36</b>
5.1    Factibilidad hidrogeológica	38
5.2    Factibilidad de ingeniería y financiera	40
5.3    Cambio climático	41
<b>6. ESTUDIOS DE CASO</b>	<b>43</b>
6.1    Jamaica - AGRS Innswood (construcción financiado por el BID)	43
6.2    Sonora, México: GRA con aguas residuales municipales tratadas	45
6.3    Kings County, California, USA: Bancos de agua utilizando flujos de corriente en exceso	48
6.4    Hilton Head Island, Carolina del Sur, Estados Unidos: GRA y control de intrusión marina	50
6.5    Kings County, California: Flood-GRA en Terranova Ranch	51
6.6    Orange County, California: GRA y Control de la intrusión de agua de GRA utilizando aguas residuales recicladas	52
6.7    Barcelona, España: Acuífero de Llobregat, embalse de infiltración e inyección de pozo profundo	53
6.8    Los Ángeles, California: Distrito de reposición de agua (DRA)	55
6.9    Puerto Rico, GRA del Acuífero de Salinas	56
6.10   Estados Unidos, Inglaterra, Australia, India y África: Lecciones aprendidas en GRA	57
<b>7. DOCUMENTOS DE PAUTAS ARA/GRA</b>	<b>59</b>
<b>8. CONCLUSIONES</b>	<b>62</b>

<b>Referencias</b> .....	64
<b>Apéndice A:</b> Resumen del abastecimiento de agua subterránea en la región del Caribe .....	69
<b>Apéndice B:</b> Agua en US dólares/Metro cúbico entregado .....	73

## Lista de cuadros

Tabla 1 : Costos promedio del esquema GRA (Ross y Adnain, 2018) .....	21
---	----

## Lista de Figuras

Figura 1 : La región del Caribe (Wikipedia, 2018) .....	4
Figura 2 : Embalse de recarga en la margen del río .....	13
Figura 3 : Instalación de pozo de recarga .....	18
Figura 4 : Infiltración de Agua de Tormentas - Swale, City of Paso Robles .....	25
Figura 5 : Proyecto de gestión de recuperación de acuíferos por inundaciones en California Central (Kings Basin) .....	27
Figura 6 : Filtración de río (Farnsworth, 2011) .....	28
Figura 7 : Recarga (embalses) (California Department of Water Resources, 2016) .....	29
Figura 8 : Diseño típico de un pozo seco (Edwards, 2016) .....	30
Figura 9 : Pozos de inyección y extracción separados (California Department of Water Resources, 2016) --	32
Figura 10 : Pozos GRA (Ciudad de Tualatin, 2018) .....	33
Figura 11 : Dique de goma completamente inflado (OCWD, 2015) .....	34
Figura 12 : Recarga de aguas subterráneas (Albuquerque Bernalillo County Water Utility Authority) ----	35
Figura 13 : Diagrama de flujo de toma de decisiones .....	37
Figura 14 : Factibilidad hidrogeológica y selección de sistema GRA .....	38
Figura 15 : Viabilidad de la ingeniería .....	40
Figura 16 : Predicción de incertidumbre por el cambio climático .....	41
Figura 17 : AGSR, Innswood, Jamaica (Google Earth) .....	44
Figura 18 : Prueba piloto de tasas de infiltración: aguas residuales tratadas .....	46
Figura 19 : Corteza terrestre .....	47
Figura 20 : Pozo de recuperación y construcción de tubería de conducción .....	48
Figura 21 : Hilton Head Island .....	50
Figura 22 : Pruebas piloto .....	51
Figura 23 : Embalses de recarga, Orange County California (OCWD) .....	53
Figura 24 : Elementos GAR en el Río Llobregat y su delta (Martin-Alonso, 2016) .....	54
Figura 25 : Planta de tratamiento terciario de aguas residuales, embalse de recarga y estructura hidráulica Inlet .....	55
Figura 26 : Área de servicio de distrito de reposición de agua y características GRA .....	56



# LISTA DE ACRÓNIMOS

<b>ACB</b>	Análisis costo beneficio
<b>AGSR</b>	Artificial Groundwater Storage and Recovery
<b>ARA</b>	Almacenamiento y recuperación de acuíferos
<b>ASCE</b>	American Society of Civil Engineers
<b>ASTM</b>	American Society of Testing and Materials
<b>BID</b>	Banco Interamericano de Desarrollo
<b>CDWR</b>	California Department of Water Resources
<b>CWWA</b>	Caribbean Water and Wastewater Association
<b>EPA</b>	Environmental Protection Agency
<b>FEMA</b>	Federal Emergency Management Agency
<b>Flood-MAR</b>	Flood-Managed Aquifer Recharge (gestión de la recarga del acuífero por inundación)
<b>GRA</b>	Gestión de recarga de acuíferos
<b>HLF</b>	High Level Forum (Foro de alto nivel)
<b>GRIRH o IRWM</b>	Gestión regional integrada de los recursos hídricos (Integrated Regional Water Management, IRWM)
<b>LID</b>	Low Impact Development
<b>m<sup>3</sup></b>	Metros cúbicos
<b>MIT</b>	Massachusetts Institute of Technology
<b>MPG</b>	Mejores prácticas de gestión
<b>O&amp;M</b>	Operaciones y mantenimiento
<b>OCWD</b>	Orange County Water District
<b>PTAR</b>	Planta de tratamiento de aguas residuales
<b>SEMARNAT</b>	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
<b>SLRC</b>	San Luis Río Colorado
<b>TDS</b>	Total Dissolved Solids (total de sólidos disueltos)
<b>USD</b>	US dólares
<b>USGS</b>	United States Geologic Survey
<b>WRD</b>	Water Replenishment District
<b>WSA</b>	Water and Sanitation Division

# Almacenamiento y Recuperación de Agua en Acuíferos: Mejoramiento de la Seguridad en el Abastecimiento de Agua en el Caribe Oportunidades y Desafíos



*“El agua es el recurso más crítico en nuestra vida y en la vida de nuestros hijos. La salud de nuestra agua es la principal medida de la manera cómo vivimos en la Tierra”: Luna Leopold.*

# RESUMEN EJECUTIVO

Con la expansión de las poblaciones y el impacto del cambio climático, la seguridad del abastecimiento de agua se está convirtiendo en un problema cada vez más crítico a nivel mundial. La región del Caribe está siendo particularmente susceptible a los desafíos del abastecimiento de agua potable debido al aumento del nivel del mar, el cambio de los patrones de precipitación y la degradación de la calidad del agua. El almacenamiento y la recuperación de acuíferos (ARA) y la gestión de recarga de acuíferos (GRA) ofrecen dos importantes instrumentos de trabajo para incrementar el almacenamiento del agua dulce a un costo nominal. Sin embargo, para que este tipo de proyectos tenga éxito, deben darse las condiciones físicas, sociales y económicas adecuadas. En este informe se presenta un resumen de varios esquemas ARA/GRA y se analizan los factores clave a considerar al evaluar la ubicación, el diseño y el financiamiento de este tipo de proyectos de abastecimiento de agua. Se ofrece un diagrama de toma de decisiones con un proceso paso a paso, el cual siempre ha de asistir al jefe de proyecto en la evaluación de la viabilidad de los proyectos específicos.

# 1. INTRODUCCIÓN

En octubre de 2012, se celebró un foro ministerial de alto nivel durante la 21a Conferencia y Exhibición Anual de la Asociación de Aguas y Saneamiento del Caribe (Caribbean Water and Wastewater Association, CWWA) en Nassau, Bahamas (figura 1). En la reunión, se identificaron las principales inquietudes de los participantes. Entre estas, figuran “los impactos del cambio climático, las tarifas y la sostenibilidad financiera de la prestación del servicio, la necesidad de actualizar la infraestructura hidráulica existente y de mejorar la eficiencia del uso de los recursos, la prevención de la contaminación de las fuentes de agua y la gestión de los recursos y prestación de servicios ante desastres naturales” (Cashman, 2014). En el ámbito del agua, los líderes del Caribe “estuvieron de acuerdo en siete (7) inquietudes críticas para alcanzar la seguridad hídrica nacional y regional. Las áreas acordadas incluyen el agua como recurso para el desarrollo nacional; la gestión integrada de recursos hídricos (GIRH)<sup>3</sup>, el cambio climático y el agua; aguas



Figura 1: Región del Caribe (Wikipedia, 2018)

3 “GIRH es un proceso que promueve el desarrollo coordinado y la gestión del agua, suelo y recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico resultante de manera equitativa sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales” (UNEP-DHI Centre for Water and Environment, 2009, Gestión integrada de los recursos hídricos en acción, WWAP).

**ARA es una herramienta de gestión de recursos hídricos que se está aplicando ampliamente en el planeta, en especial en las zonas con fragilidad crucial en el suministro de agua.**

residuales; cooperación regional; fortalecimiento de capacidades; y la conciencia pública”. (Asociación Mundial para el Agua [GWP], por sus siglas en inglés, y CWWA, 2012).

Más recientemente, en su documento de 2018, Taylor et al. han declarado que el cambio climático es una importante amenaza para la región del Caribe por su extrema “sensibilidad debida a (entre otros factores): 1) el tamaño pequeño de los países; 2) la casi exclusiva dependencia de las actividades económicas sensibles al clima como la agricultura y el turismo; 3) la dependencia abrumadora de la precipitación para el [abastecimiento de] agua; 4) el alto nivel de la deuda pública; y 5) la limitada capacidad para pronosticar riesgos”. La precariedad del abastecimiento de agua de calidad segura es evidente y de interés estratégico en toda la región. El almacenamiento y la recuperación de agua en acuíferos (ARA), en donde es aplicable, es uno de los métodos probados para mejorar el abastecimiento y la calidad del agua.

ARA es una herramienta de gestión de recursos hídricos que se está aplicando ampliamente en el planeta, en especial en las zonas con fragilidad crucial en el suministro de agua. En el presente informe, se define ARA como el proceso de almacenamiento de suministros de agua superficial en acuíferos cuando el agua es abundante y de la extracción de agua en épocas de necesidad o de demanda máxima<sup>4</sup>. Esta definición de ARA ha sido ampliada a fin de incluir otros tipos de esquemas de gestión de recarga de acuíferos (GRA), que pueden ser útiles para mantener o mejorar los suministros de agua dulce o mitigar la baja calidad del agua superficial. ARA/ GRA son herramientas comunes para la gestión integrada del agua. La gestión integrada es “la coordinación y la utilización y la gestión coordinada de recursos tanto de aguas superficiales como subterráneas para maximizar la disponibilidad y confiabilidad del suministro de agua en una región, con el propósito de lograr diversos objetivos de gestión del agua” (California Department of Water).

Las tecnologías ARA/GRA suelen ser un elemento fundamental de cualquier GIRH y ofrecen a los administradores del agua un importante conjunto de instrumentos de trabajo para el tratamiento de la seguridad del abastecimiento de agua en un ámbito de incertidumbre por el cambio climático.

---

4 La ARA suele definirse como el esquema mediante el cual se inyecta agua potable en el acuífero por medio de pozos. Estos mismos pozos se utilizan para extraer un volumen significativo de agua cuando es necesario. El acuífero en el que se inyecta el agua potable puede ser de menor calidad de agua, creando un reservorio de agua de mayor calidad alrededor del pozo ARA (Brown, 2006).

Estas técnicas se han empleado para atender una variedad de propósitos. entre los que destacan, pero no están limitados a, los siguientes:

- Cobertura del abastecimiento de agua contra cambios climáticos y el consiguiente clima extremo (FEMA, 2015).
- Recarga de acuíferos agotados (Departamento de Recursos Hídricos de California, 2016)
- Reducción del impacto de las inundaciones (Departamento de Recursos Hídricos de California, 2016)
- Incremento eficiente en función de costos de abastecimiento de agua de forma eficiente (Maliva, 2014)
- Mitigación del efecto de la intrusión de agua salada en acuíferos costeros y la salinización de los suministros de agua salobres (Pyne, R. D., 2014; Hartog, N., et al, 2017)
- Inversión en salinización de aguas salobres que se utilizan para la desalinización (Hartog, 2017; Scalley, 2012)
- Mejoramiento de las aguas superficiales y de la calidad del agua costera ([https://www.waterboards.ca.gov/water\\_issues/programs/stormwater/](https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/stormwater/); Scalley, 2012)

En la región del Caribe, así como a lo largo de América Latina, los métodos ARA/GRA pueden ofrecer beneficios similares en donde las condiciones propicias se prestan y la tecnología se implementa y gestiona adecuadamente. Los métodos y medios de trabajo que se presentan en este informe tienen una amplia aplicación en casi todos los países que encaran desafíos de seguridad del abastecimiento de agua.

# 1.1 OBJETIVOS DEL PROYECTO Y ORGANIZACIÓN DEL INFORME

El presente proyecto tiene como objetivos ofrecer un marco de trabajo que el Banco Interamericano de Desarrollo (BID o el Banco) podrá utilizar para evaluar 1) la ejecución y el financiamiento potencial de proyectos independientes de ARA/GRA y 2) la incorporación de sistemas ARA/GRA en futuros proyectos financiados por el Banco.

Los resultados del proyecto se presentan en el presente informe, el cual está dividido en cuatro partes. La primera parte del documento presenta una revisión analítica de las técnicas y tecnologías ARA y MAR, la manera cómo se aplican, consideraciones normativas y de gestión, y los costos estándares de ejecución y su limitación con énfasis en aplicaciones relacionadas con el Caribe.

La segunda parte del informe se refiere al desarrollo de un documento de pautas de alto nivel y un instrumento de trabajo para la toma de decisiones que puede ser empleado por el Banco en la evaluación de posibles aplicaciones de las tecnologías de ARA/GRA. También se identifican y se resumen referencias útiles. Las pautas y el instrumento de trabajo para la toma de decisiones pueden ser utilizados para ayudar en:

- **Evaluar proyectos ARA/GRA.**
- **Evaluar si resulta adecuado utilizar tecnologías de ARA/GRA en proyectos existentes.**
- **Proporcionar una guía sobre las consideraciones en la selección de tecnología.**
- **Identificar factores clave para la exitosa implementación de ARA/GRA.**
- **Evaluar la posible incorporación de ARA/GRA en futuros préstamos de la División de Agua y Saneamiento del BID (WAS).**

En la tercera parte del informe se presentan estudios de caso seleccionados en donde se destaca la aplicación de diferentes tecnologías de ARA/GRA y, cuando es apropiado, las lecciones aprendidas. Se ofrecen estudios de caso para proyectos que representan un espectro o tamaños y aplicaciones.

En la cuarta parte del informe se resume brevemente una selección de documentos clave que puede darle al analista información adicional sobre la evaluación o desarrollo de proyectos ARA/GRA.

Finalmente, se presenta una lista de los materiales de referencia revisados que describen o resaltan aplicaciones ARA/GRA o mejores prácticas de gestión (MPG).





## 2. RECURSOS HÍDRICOS DEL CARIBE

**El cambio climático agrava los problemas asociados con las fuentes de agua dulce en la medida en que se afectan los patrones de precipitación, las temperaturas aumentan, las sequías se han vuelto cada vez más largas y más intensas y el nivel del mar se eleva (Calle, 2017).**

La región del Caribe presenta desafíos especiales en cuanto al desarrollo de un enfoque integrado para la gestión de recursos hídricos debido al cambio climático y al papel que juega la elevación del nivel del mar, la distribución y naturaleza de los recursos de agua dulce y las condiciones geológicas/hidrológicas. En muchas islas, el turismo se ha convertido en el sector económico primario, aunado a la agricultura, centrándose en los mercados nacionales. Esto obliga a que se efectúe un cambio hacia fuentes de agua de mayor calidad. Dados estos factores y el pequeño tamaño de la mayoría de las islas del Caribe, es adecuado y necesario adoptar un enfoque holístico e integrado en el manejo los recursos hídricos.

La gestión de los recursos hídricos (tanto del abastecimiento de agua dulce y de la calidad del agua marina en las playas y cercana a los litorales) es fundamental para el crecimiento económico, en virtud de la alta dependencia del turismo y la relativa escasez de agua dulce prevaeciente en muchos países del Caribe (GWP, 2010; Scalley, 2012). El cambio climático agrava los problemas asociados con las fuentes de agua dulce en la medida en que se afectan los patrones de precipitación, las temperaturas aumentan, las sequías se han vuelto cada vez más largas y más intensas y el nivel del mar se eleva (Calle, 2017). Al combinarse con la degradación de la calidad del agua derivada del tratamiento inadecuado del saneamiento y de la escorrentía agrícola y la intrusión marina, la necesidad de una gestión del agua integral e integrada resulta imperante.

Por lo general, la fuente natural más sostenible de agua dulce en el Caribe es el agua subterránea, ya que los recursos hídricos de la superficie suelen ser limitados debido a 1) patrones que han originado marcadas temporadas secas y lluviosas; 2) la distribución de las precipitaciones en las islas, que suele ser desigual debido a efectos orogénicos (partes secas y húmedas de las islas) y 3) la naturaleza “repentina” de la escorrentía en la mayoría de los arroyos y ríos (GWP, 2010; Calle, 2017)<sup>5</sup>. La

<sup>5</sup> La escorrentía repentina se caracteriza por ser típicamente de corta duración con un alto volumen de flujo. Este tipo de flujo resulta normalmente difícil de manejar con respecto al suministro de agua.

escorrentía suele acarrear al océano contaminantes como sólidos en suspensión y nutrientes que afectan la calidad del agua de playa y los recursos biológicos como los arrecifes de coral. La captación y el almacenamiento de escorrentía para uso posterior ofrecen una forma cuantificable para mejorar el suministro y mitigar la calidad degradada del agua superficial. Sin embargo, en muchas islas la capacidad de almacenamiento del agua en presas suele ser problemática debido a las limitadas áreas geográficas propicias para construir presas de aguas superficiales (Scalley, 2012; Calle, 2017) y el costo de construcción (Choi, 2018), lo que hace que el almacenamiento de agua subterránea se vuelva una opción atractiva. En las situaciones donde las condiciones hidrológicas y del subsuelo son convenientes, el almacenamiento en acuíferos vía ARA/GRA ofrece una alternativa menos costosa que el almacenamiento superficial (Choi, 2018).

El éxito de los sistemas ARA/GRA depende en gran medida de las condiciones hidrogeológicas locales, que deben evaluarse al efectuarse los análisis de viabilidad. Las condiciones hidrogeológicas varían ampliamente en todo el Caribe reflejando la historia geológica de las islas y cómo estas se han desarrollado con el paso de los años. Los acuíferos del Caribe abarcan desde aquellos de piedra caliza porosa y sustrato rocoso fracturado volcánico e ígneo, hasta acuíferos sedimentarios que consisten en capas de arena y arcilla. La salinidad varía desde fresca (menos de 1000 mg/L total de sólidos disueltos o TDS en inglés) a salobre (entre 1000 y 15.000 mg/L TDS) con intrusión de agua salada, que es común cuando los acuíferos son sobreexplotados (la extracción supera al reabastecimiento).

Según indica en la revisión realizada para este informe sobre los recursos hídricos del Caribe, históricamente muchas islas en algún momento tenían un suministro de agua fresca superficial viable, pero estos suministros se fueron deteriorando con el paso del tiempo debido a la intrusión marina, el sobreuso y/o por negligencia. En el *apéndice A* se presenta un resumen de las condiciones de suministros de agua superficial identificadas en varias islas del Caribe y otros países.

# 3. PROYECTOS ARA/GRA EXITOSOS

El éxito de un proyecto ARA o GRA depende de numerosos factores, muchos de los cuales son específicos del sitio. Estos pueden dividirse en la viabilidad del proyecto y el desarrollo del proyecto. ARA presenta además la complejidad de que requiere que el agua de recarga pueda ser recuperada con eficacia más adelante, en tanto que el método GRA puede implantarse y ser operado con fines distintos a la recuperación como, por ejemplo, la gestión de la mitigación de la intrusión de agua salada y la mitigación ambiental.

Con ese fin, cada proyecto necesita ser evaluado por separado respecto a factores técnicos, institucionales y económicos, así como en función de los objetivos generales del proyecto. Sin embargo, hay ciertas características generales que pueden resumirse en varias categorías amplias, a saber:

- **Técnica**
- **Construcción y operación del proyecto**
- **Financiación de la construcción y la administración**
- **Estructuras institucionales**
- **Participación de los interesados**
- **Y capacidad de organización**

Cada una de las categorías se describen en mayor detalle a continuación.

## 3.1 TÉCNICA

La importancia que para los administradores del agua tiene la gestión ARA/GRA en el manejo sustentable de los recursos de agua dulce del planeta es creciente. Recientemente, el Estado de California promulgó una legislación que exige que todas las cuencas de agua subterránea sean administradas de forma sostenible<sup>6</sup>. Los proyectos de uso conjunto como los ARA/GRA han sido identificados por California como una de las claves para la sostenibilidad de los acuíferos. Otros estados, en particular los del sur de Estados Unidos, como Arizona, Texas y Florida, han implementado con agresividad programas de manejo del agua similares con el propósito de aumentar y garantizar suministros futuros de agua. Las agencias encargadas del abastecimiento y los servicios de agua, así como organizaciones profesionales de Estados Unidos e internacionales han preparado varios documentos en donde se resumen las consideraciones técnicas, de planificación y de ejecución de los proyectos ARA/GRA (California Department of Water Resources, 2016; Texas Water Development Board, 2015; Federal Emergency Management Agency, FEMA, 2015; GWP, 2010; American Society of Civil Engineers, 2001). En la preparación de las consideraciones técnicas que se resumen brevemente a continuación se utilizaron elementos principales de los documentos anteriores.

**DISPONIBILIDAD DE TIERRAS APTAS:** Los proyectos ARA/GRA suelen implicar la adquisición de la propiedad de parcelas, particularmente en las inmediaciones de la infraestructura de agua existente (canales, colectores, instalaciones de tratamiento de agua o tuberías para el suministro de agua a recargar), sistemas de distribución de agua (entrega de aguas subterráneas recuperadas) y características de aguas superficiales naturales, tales como barrancos, escurrimientos y arroyos en áreas con condiciones hidrogeológicas adecuadas (suelos superficiales, por ejemplo, almacenamiento subterráneo disponible y condiciones permeables subsuperficiales). La adquisición de terrenos, en particular en las áreas urbanizadas, puede ser uno de los costos de capital más elevados relacionados con el proyecto, en particular si la ARA/GRA presenta características de escala más grande, como en el caso de los embalses de recarga.

---

6 La ley de California se conoce como la “Sustainable Groundwater Management Act of 2014”, ley de gestión sostenible de aguas subterráneas de 2014, o SGMA. SGMA requiere que los gobiernos y agencias responsables del agua lleven el abastecimiento de aguas subterráneas sensibles a niveles de bombeo y recarga equilibrados.

**Punto clave:** Los sitios ideales incluyen las parcelas de suelo no urbanizable junto a la infraestructura de agua existente que tienen condiciones hidrogeológicas (factibilidad hidrológica).

**FACTIBILIDAD HIDROGEOLÓGICA:** La factibilidad hidrogeológica se determina a partir de la evaluación de las características del suelo (por ejemplo, tasas de percolación en los embalses de recarga), características del subsuelo como porosidad y permeabilidad, capas subsuperficiales, calidad del agua y agua subterránea superficial e interconexión de la zona de recarga y la zona de extracción, de ser este el objetivo, para asegurar que el agua de recargado pueda ser recuperada adecuadamente.

Este análisis requiere generalmente de un estudio de viabilidad inicial con el que se documente que las condiciones hidrogeológicas están presentes en el subsuelo para cumplir con el propósito previsto y a veces es conocido como Modelo Hidrogeológico Conceptual (California Department of Water Resources 2016, GWP Consultants, 2010). Durante la preparación del análisis de factibilidad hidrogeológico, las tareas típicas a desarrollar incluyen la recolección y el análisis del suelo existente, datos geológicos, hidrogeológicos e hidrológicos, pruebas de tasas de filtración, perforación en el suelo para evaluar condiciones geológicas subsuperficiales (espesores de arena y arcilla y profundidad del agua subterránea), capacidad de almacenamiento de agua subterránea, permeabilidad de los estratos geológicos subsuperficiales y calidad del agua de fondo.



**Figura 2: Embalse de recarga en la margen del río  
(del acervo del autor)**

Una de las tareas clave consiste en desarrollar el presupuesto preliminar del agua o un balance de agua preliminar para el proyecto. El agua de riego se actualizará a medida que se vayan generando los datos del proyecto<sup>7</sup>. DEMAU (2016) identificó 10 características esenciales de los acuíferos que deben ser tomadas en cuenta como parte del análisis de factibilidad hidrogeológica. Estas incluyen el tipo de acuífero (confinado o no confinado), la permeabilidad del acuífero, el espesor del acuífero, la profundidad del agua (almacenamiento disponible), el tipo de poro acuífero (aluvión poroso, fracturado, karst), la uniformidad del acuífero, estado redox de las aguas subterráneas (aerobia o anaerobia) y la química del agua subterránea nativa. Un modelo numérico suele ser útil para evaluar el proyecto ARA/GRA en el área de la confiabilidad del suministro de agua.

Una de las tareas claves es la elaboración de un presupuesto del agua preliminar o un balance del agua para el proyecto. Este presupuesto se irá actualizando a medida que se desarrollan los datos del proyecto<sup>8</sup>. Esto debe incluir una evaluación del destino de la recarga de agua y su impacto en la elevación del agua subterránea. Por ejemplo, la altura y el alcance de montaje en un embalse de recarga pueden ser estimados utilizando las ecuaciones presentadas por Bower (2002) o una sencilla hoja de cálculo USGS (USGS, 2010).

**Punto clave:** La factibilidad hidrogeológica es primordial para el desarrollo de un proyecto ARA/GRA exitoso. A no ser que el agua pueda ser efectivamente recargada, almacenada y, en la mayoría de los casos, recuperada, el proyecto ARA/GRA no es factible.

**CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE AGUA SUBTERRÁNEA DISPONIBLE:** La capacidad de agua disponible es la cantidad de almacenamiento del agua subterránea que está disponible para almacenar agua de recarga. En términos simples, el

---

7 Un paso rentable es reunir los estudios existentes y otros datos sobre las condiciones subsuperficiales. Esto puede incluir informes geotécnicos, los registros históricos sobre el uso del agua subterránea y la investigación de publicaciones y académico.

8 Un presupuesto de agua es similar al presupuesto de contabilidad financiera que da seguimiento de la cantidad de agua subterránea almacenada, el cambio en el almacenamiento de agua subterránea y la entrada de los flujos de agua subterránea (recarga) y los flujos de salida (descarga). El agua superficial es comparable a una “cuenta de cheques” debido a su naturaleza transitoria mientras que las aguas subterráneas son consideradas como una cuenta de ahorro de agua. Un presupuesto del agua es un instrumento de trabajo para la gestión del agua fundamental que ampliamente se utiliza en muchos países.

almacenamiento sin usar es el volumen de tierra no saturada entre el nivel freático y la superficie del terreno. A menudo toda la zona no saturada no puede llenarse en su totalidad, por lo que se establece una profundidad objetivo. Esta capacidad disponible puede ser artificial o natural. Por ejemplo, en muchos proyectos ARA/GRA el almacenamiento adicional puede ser generado por bombeo bajo el nivel freático a fin de permitir la recarga durante la temporada de lluvias. En algunas aplicaciones de la gestión GRA en acuíferos confinados, el almacenaje suele ser significativamente menor y precisa de que el acuífero sea presurizado.

**Punto clave:** La capacidad de almacenamiento en ciertos acuíferos no confinados se puede aumentar por medio de bombeo, disminuyendo la capa freática.

**FUENTES DE AGUA:** Una fuente de agua de recarga debe estar asegurada y puede incluir la escorrentía local, aguas de lluvia, agua de GRA desalinizada, tratamiento de aguas residuales (secundario, terciario o avanzado), agua potable y el agua importada (del exterior de la cuenca hidrológica) (DWP, 2016; Hartog, 2017). Dependiendo de la fuente de agua, el análisis de ingeniería (volumen de agua disponible para la recarga o si el tratamiento previo es necesario antes de la recarga), los permisos y trámites (las desviaciones a menudo se rigen por las leyes locales de agua superficial) y los acuerdos legales pueden ser necesarios para garantizar el suministro de los proyectos ARA/GRA.

**Punto clave:** La baja calidad de la fuente de agua puede necesitar un tratamiento extenso antes de la recarga a un costo considerable. Para muchos proyectos, la mezcla del agua de recarga con el agua natural y la interacción entre el agua de recarga y los sedimentos del acuífero también puede generar la degradación o la obstrucción no intencional de la calidad de las aguas subterráneas de los pozos de recarga o de los medios geológicos.

**PRUEBAS PILOTO:** Antes de finalizar un proyecto ARA/GRA deben realizarse pruebas piloto para evaluar la factibilidad, el tiempo, el costo y las mejoras al diseño ingenieril preliminar, previo a implantar la aplicación a gran escala. Con frecuencia, las condiciones adversas no identificadas que no fueron previstas o subestimadas (por ejemplo, barreras subsuperficiales a la infiltración profunda) pueden identificarse durante la prueba piloto y mitigarse en el diseño final.

**Punto clave:** Incluso con el beneficio de la prueba piloto, se recomienda tener en cuenta cierta flexibilidad en el diseño final con el fin de acomodar modificaciones potenciales al sistema ARA/ GRA, para incorporar condiciones subsuperficiales inesperadas, en particular, en las condiciones subterráneas.

**CONDUCCIÓN:** La conducción suele ser necesaria para transportar el agua de la fuente a las instalaciones de recarga y para entregar las aguas subterráneas recobradas hasta el punto de demanda. Las instalaciones típicas de conducción del agua son las tuberías y los canales (con y sin recubrimiento), pero pueden también incluir arroyos y cauces de agua naturales.

**INSTALACIONES DE RECARGA Y RECUPERACIÓN:** Las instalaciones de recarga pueden incluir pozos de inyección, extensión de aguas superficiales y embalses de recarga, barbecho de los campos agrícolas, cavidades cársticas en acuíferos de piedra caliza y otros elementos naturales o hechos por el hombre que permiten el aumento del suministro de aguas subterráneas subyacentes. El equipo concomitante puede incluir canales y vertederos, medidores de flujo, bombas y equipo de monitoreo. Las instalaciones de recuperación por lo general disponen de pozos de bombeo. En algunos casos, la recarga no se hace para almacenar agua, sino más bien para tratar una condición ambiental como la calidad del agua superficial o para inhibir la intrusión marina.

**Punto clave:** La medición y contabilidad del agua con precisión (ingresos, egresos y almacenamiento) es fundamental para el éxito de un proyecto.

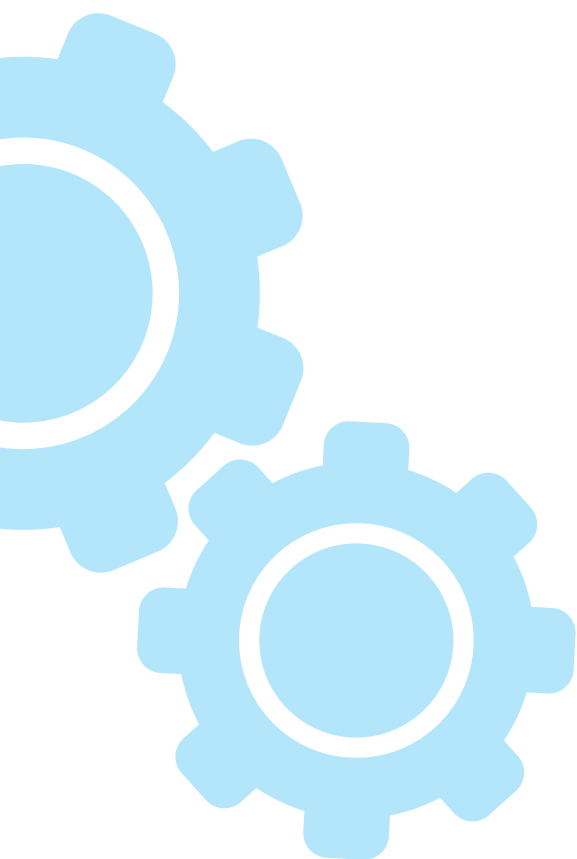
**OBRAS DE TRATAMIENTO DE AGUA:** Las obras para el tratamiento del agua se requerirán en caso de presentarse un alto contenido total de sólidos suspendidos o contaminantes químicos en el agua de recarga, los cuales deberán eliminarse antes de la infiltración. En algunos casos, el tratamiento previo del agua puede hacerse con una metodología de tratamiento pasivo (por ejemplo, estanques de sedimentación y humedales construidos). Estudios recientes han demostrado que los contaminantes de la superficie más comunes, ya sean disueltos o suspendidos, se eliminan con eficacia mediante el proceso de infiltración (Consejo de Los Ángeles y la Cuenca Hidrológica de San Gabriel, 2008).



Puede ser que se requiera un tratamiento posterior del agua antes de realizar la entrega, hasta el punto de uso. Estas acciones típicamente son necesarias para cumplir con las normas de calidad del agua vigentes. Por ejemplo, la recarga de agua con un contenido bajo en sólidos disueltos totales o que está agotada en ciertos aniones o los cationes pueden movilizar contaminantes, como el arsénico, presentes en el acuífero en forma de sólido (Fakhreddine, S., et al, 2015).

**Punto clave:** La necesidad de tratamiento previo y posterior de aguas normalmente está determinada por la calidad de la fuente del agua, la calidad del agua subterránea nativa, el uso final del agua producida y las regulaciones de la calidad de agua locales.

- **Informes:** Informes: Los informes se preparan para las diferentes fases de la selección, factibilidad y diseño de los proyectos. Ciertos informes pueden combinarse en un solo documento. Los informes típicos que son comunes en muchos proyectos ARA/GRA son los siguientes:
- **Selección preliminar del sitio:** Típicamente se prepara un documento que incluye un resumen de los atributos de los sitios considerados para la ubicación de las instalaciones de ARA/GRA. Este informe incluye una discusión de la fuente del agua (por ejemplo, el exceso de corrientes o aguas residuales tratadas), la disponibilidad de terrenos, la infraestructura local y el análisis preliminar de las condiciones hidrogeológicas (basado en informes existentes). En este informe se identificarán las lagunas de datos y los pasos a seguir.
- **Informe de factibilidad hidrogeológica:** Un informe de factibilidad hidrogeológica incluye una discusión detallada de las condiciones subsuperficiales, incluidas las condiciones del suelo, estratos geológicos, profundidad al agua subterránea, parámetros hidrogeológicos (porosidad, conductividad hidráulica, calidad del agua), hidrología y superficie de agua, datos meteorológicos y un balance hídrico del proyecto. Algunas veces es referido como un *modelo conceptual hidrogeológico*. Si se realiza una prueba piloto, se puede incluir una descripción de la prueba y los resultados. Se ofrece un análisis de la sostenibilidad del sitio previsto para el uso de ARA/GRA. Si el proyecto no es factible hidrogeológicamente, por lo general no es considerado.



- **Estudio de factibilidad del proyecto:** Normalmente se prepara un informe de la viabilidad del proyecto si el informe hidrogeológico de base indica que el sitio posee los atributos de subsuelo adecuados. El informe de factibilidad debe incluir una discusión de atributos positivos y negativos del proyecto y los pasos que pueden ser necesarios para obtener un proyecto exitoso, tomando en cuenta los objetivos. Se estimará una orden de magnitud burda de los costos del diseño, construcción y operación del proyecto con un nivel apropiado de incertidumbre.

## 3.2 CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DEL PROYECTO

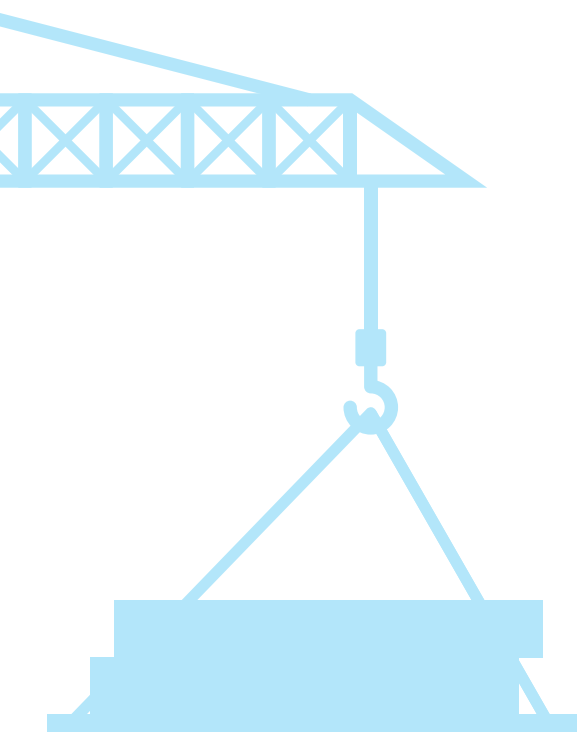
La construcción y la operación del proyecto pueden incluir la construcción y operación de instalaciones de tratamiento, instalaciones de conducción o embalses, así como también la instalación y operación de pozos de supervisión, producción e inyección y la perforación de pozos de prueba. En algunos países del Caribe ciertas capacidades de construcción pueden estar limitadas o ser costosas de importar. Por ejemplo, los pozos de inyección o de recuperación de gran diámetro pueden requerir de personal capacitado y perforadoras especializadas para la instalación que pueden resultarle costosas de movilizar al proyecto (figura 3).



Figura 3: Instalación de pozo de recarga (del acervo del autor)

Dos de los retos más significativos asociados con la operación de proyectos ARA/GRA son: 1) el taponamiento físico del espacio de poro en o alrededor de los embalses o pozos ARA y 2) el tratamiento del agua de recarga o recobrada.

El taponamiento de los espacios porosos puede realizarse por medio de la colocación de recipientes u otras tecnologías de tratamiento de aguas antes de la recarga. El programa de operación y mantenimiento debe diseñarse con el objeto de medir la velocidad de infiltración y sistemáticamente restablecer la capacidad de infiltración mediante la eliminación de desechos, partículas de grano fino, mineralización y acumulación biológica (algas y fangos biológicos suelen formarse durante la recarga). La mezcla del agua de recarga y el agua natural puede dar como resultado reacciones químicas como la formación de precipitados o lixiviación de metales traza que son perjudiciales para el éxito general del proyecto. Estos pueden identificarse a priori a través de pruebas de referencia de la calidad del agua. Si bien estudios recientes han demostrado que la infiltración de agua superficial sirve para mejorar la calidad general del agua de muchas fuentes, pueden existir aún obstáculos políticos y regulatorios en cuanto a permitir la recarga directa en el acuífero con base en la calidad del agua superficial.



## 3.3 FINANCIAMIENTO Y ECONOMÍA

El análisis financiero de los proyectos ARA/GRA debe realizarse usando una base de análisis costo-beneficio (ACB) o una evaluación similar. Los costos por lo general se presentan en dos categorías: 1) los costos de capital para el análisis, obtención de permisos y construcción del proyecto, y 2) los costos de operación y mantenimiento de largo plazo.

En muchos distritos de agua de EE. UU., los costos de capital pueden ser una barrera significativa para implementar un proyecto ARA/GRA. Las subvenciones de los gobiernos pueden utilizarse para reducir las barreras de diseño y construcción el proyecto. El financiamiento a largo plazo para las operaciones y mantenimiento (O&M) del proyecto, por lo general, está apoyado por el aumento del agua disponible para fines de riego y potable y la capacidad de cobro al usuario por esta agua. Esto puede requerir que se aplique una cuota o un impuesto a esta nueva fuente de agua. Además, la imposición de un impuesto o tarifa a la nueva fuente de agua<sup>9</sup>. Los proyectos relacionados con puntos finales de alto valor, como el abastecimiento de agua potable, tienden a ser económicamente factibles siempre y cuando las condiciones hidrogeológicas locales sean favorables. Los proyectos en los países en desarrollo pueden ser económicamente viables, pero con frecuencia se requiere de apoyo externo debido a los limitados recursos financieros locales (Maliva, 2014).

Ross y Hasnain (2018) evaluaron 21 diferentes esquemas GRA en los Países Bajos, Estados Unidos, Australia y Nueva Zelanda, que incluían diferentes tipos de fuentes de agua, métodos de infiltración y objetivos del proyecto (seguridad del agua, suministros de irrigación, agua potable y beneficios ecológicos). Los proyectos fueron segregados en uno de los cuatro esquemas ARA/GRA: pozos de recarga que utilizan agua reciclada (tratada); estanques (o cuencas) de infiltración que utilizan también agua reciclada, pozos de recarga que utilizan agua natural y estanques de infiltración que utilizan agua natural. Se compilaron los costos de capital y de operación y mantenimiento (O&M), y se desarrollaron costos “nivelados” para cada esquema. Los costos nivelados son el nivel constante de ingresos que se necesita cada año para financiar los costos de capital y operación a lo largo de



<sup>9</sup> Los sistemas de gestión de aguas pluviales en los Estados Unidos y Europa a menudo se financian por medio de un impuesto a la propiedad con base en el tamaño de la propiedad y la cobertura de suelo impermeable.

la vida del proyecto dividido por el volumen anual del suministro de agua. El costo en dólares de Estados Unidos (USD) por metro cúbico (m<sup>3</sup>) de agua recargada por año para cada esquema de GRA se presenta en el cuadro 1 y, en este informe, se utilizaron como una métrica de costo. Si bien el número de proyectos incluidos en el análisis es relativamente pequeño (21), los datos brindan una información adecuada de referencia contra la cual se pueden comparar los costos de los proyectos citados por otros autores.

<b>Esquema GRA / Fuente de agua. (proyectos por esquema)</b>	<b>Costo de capital/m3. Recarga de agua</b>	<b>O&amp;M Costo/ m3. Agua recargada</b>	<b>Costo nivelado/m3. Agua recargada</b>
Recarga de pozos/agua reciclada (5)	\$10.33	\$0.65	\$1.46
Estanques de infiltración/ agua reciclada (2)	\$7.44	\$0.92	\$1.50
Recarga de pozos/agua natural (5)	\$3.29	\$0.19	\$0.45
Cuencas de infiltración/ agua natural (8) <sup>10</sup>	\$0.77	\$0.13	\$0.19

**Cuadro 1: Costos promedio del esquema GRA (Ross & Adnain, 2018)**

Como era de esperar, los resultados de sus análisis indicaron que las cuencas de infiltración que utilizan agua natural resultaron ser el plan menos costoso por un amplio margen, mientras que la recarga que utiliza agua reciclada fue la más cara. El mayor costo de la recarga con agua reciclada utilizando cuencas de infiltración en lugar de pozos de recarga puede reflejar la pequeña población de proyectos de ejemplo, bajo la categoría de agua de cuencas de infiltración/agua reciclada.

<sup>10</sup> Los costos de capital están concordancia con los citados por Scanlon, et al (2016). En el presente documento, los costos de capital típicos para sistemas de GRA con agua natural varían entre \$0,07 y \$ 0,80/m<sup>3</sup> según aplicaciones de subvenciones en California.

En su revisión de 50 proyectos de pozos GRA en cuatro continentes, Brown (2006) informa que los costos en USD para el agua recargada y recuperada oscilaron entre \$0,34 y \$9,27/m<sup>3</sup>. Los costos para recuperar el agua de los acuíferos salobres por lo general fueron más del doble que los de los acuíferos no salobres. Esto generalmente refleja los mayores costos de operación y mantenimiento asociados con los proyectos GRA de acuíferos salobres. Cuando se compara con los costos típicos de desalinización, el valor de ARA y GRA suele ser significativamente más bajo, aunque el costo de la desalinización va en disminución gracias a los avances y la escala de la tecnología. En Israel, el proyecto Sorek, la planta de desalinización más grande del mundo, entró en línea en 2013 y está produciendo agua potable y vendiéndola a un costo de \$0,58/m<sup>3</sup>, mientras que el costo que por lo general se cita para la desalinización se sitúa en unos \$0,80/m<sup>3</sup> (Talbot, 2015). Esta planta de gran escala también requiere de menos energía que las operaciones de desalinización tradicionales. Sin embargo, el tamaño del proyecto (627.000 m<sup>3</sup>/día), la demanda de energía que exige y el gran costo de capital asociado (\$500 millones) hacen que este tipo de proyectos a gran escala, que son eficientes para la desalinización, sean imprácticos en muchas de las comunidades caribeñas.

En un cuadro que compara los costos del agua potable medida y entregada a los usuarios de destino final domésticos y comerciales en el Caribe se muestra la variabilidad del precio del agua potable entregada (ver apéndice B). El costo por metro cúbico de agua potable para el usuario final doméstico o comercial oscila entre menos de \$1 y aproximadamente \$12 para servicios domésticos, y entre aproximadamente \$2 y un poco más de \$20 para fines comerciales. Esto también da una indicación de dónde ARA/GRA puede ser más atractivo (cuanto mayor sea el costo del agua, por lo general, se correlaciona con un mayor incentivo local para invertir en proyectos ARA/GRA). Si bien el capital real y los costos de operación y mantenimiento serán específicos al proyecto y sensibles a las condiciones del sitio, esta sencilla comparación sugiere que los esquemas GRA pueden resultar económicos en la mayoría de las comunidades del Caribe.

El valor y el beneficio general de los proyectos ARA/GRA suelen incluir beneficios indirectos como el crecimiento económico, la mitigación de impactos ambientales, mejoras en la salud pública y mejor percepción pública de las organizaciones y organismos asociados con el proyecto. Estos beneficios indirectos pueden ser un reto y se pueden capturar y monetizar con métodos tradicionales de contabilidad. El análisis de toma de decisiones es una herramienta que puede ser útil para enmarcar los beneficios

del proyecto y cuantificar el valor global de un proyecto de ARA/ GRA. Cuando se estén considerando varios proyectos, se pueden utilizar para capturar y monetizar beneficios indirectos y priorizar los proyectos con respecto a los objetivos del proyecto.

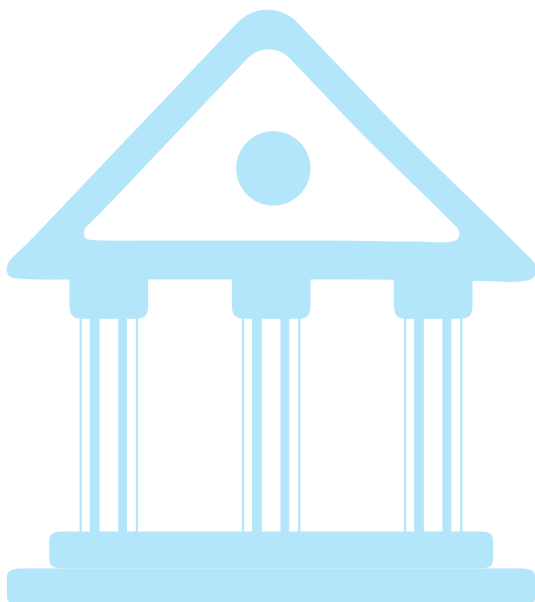
## 3.4 ESTRUCTURAS INSTITUCIONALES

Los proyectos de abastecimiento de agua, en particular los que se destinan para el agua potable, deben cumplir con las regulaciones locales y deben planearse y construirse de acuerdo con las costumbres locales, las autoridades reguladoras, los marcos legales y las utilidades (California Department of Water Resources, 2016). Por ejemplo, en algunas áreas puede ser necesario desarrollar una estructura de tarifas para financiar el capital y/o las operaciones y el mantenimiento de las instalaciones de ARA/ GRA y las actividades conexas. A veces esto se le conoce como un esquema de “pagar para bombear” y suele ser referido como tarifa de recarga de agua.

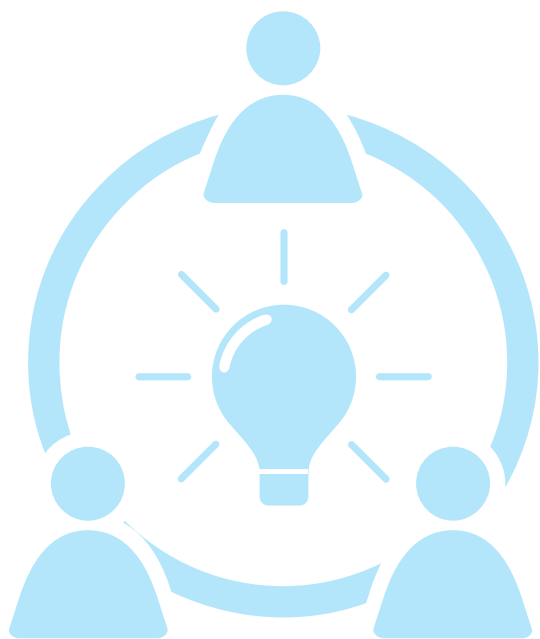
### Estructuras institucionales:

- Leyes, reglamentos y ordenanzas
- Contratos y convenios
- Apoyo político
- Asociaciones público-privadas
- Gobernanza

En muchos países las asociaciones público-privadas (APP) se han vuelto cada vez más atractivas al ser vistas como una manera de lograr proyectos específicos, como el desarrollo de una nueva fuente de agua o el aumento de la eficiencia en la entrega de agua, minimizando el riesgo que toma la agencia. Las tendencias actuales se centran más en la contratación basada en la actuación con sistemas de pago vinculados a indicadores medibles como la reducción del agua no contabilizada. Las APP pueden establecerse a la medida, a fin de satisfacer los desafíos de un país en particular y a menudo pueden ser estructuradas a modo de aumentar la transferencia de tecnología y mejorar la experiencia del sector público local.



## 3.5 PARTICIPACIÓN DE LOS ACTORES RELEVANTES



La importancia y convergencia que tienen la seguridad del agua, la protección del medio ambiente y el turismo en el Caribe exige que los programas de GIRH reúnan a grupos de interés aplicables. Debido a la importancia que los proyectos eficaces ARA/GRA tienen para los programas GIRH, la participación de los interesados debe comenzar temprano en el proyecto y continuar a lo largo de su implementación. Esta condición es particularmente crítica para los países que sufren de graves períodos de sequía, efectos del cambio climático severos, y tienen un suministro de agua frágil. Un sólido programa de alcance dirigido a las partes interesadas puede integrar a las entidades privadas y ministeriales que se beneficiarán directamente (por ejemplo, servicios públicos) e indirectamente (como la calidad del agua de playa y salud pública) de los proyectos ARA/GRA. Este enfoque integrado de gestión de los recursos hídricos contribuye a garantizar la cantidad y calidad del abastecimiento futuro de agua, proteger el medio ambiente, promover el crecimiento económico, promover el desarrollo agrícola sostenible, generar interés local en la gobernanza del abastecimiento del agua y promover la conciencia sobre el agua.

## 3.6 FORTALECIMIENTO DE LA CAPACIDAD ORGANIZACIONAL

La capacidad organizacional es el proceso de dotar a las entidades, por lo general organismos públicos, con ciertas destrezas o competencias, o mejoras de la capacidad de rendimiento mediante asistencia, financiación, recursos y entrenamiento. Esto es importante para la continuidad del funcionamiento y el éxito a largo plazo de los proyectos ARA/GRA.

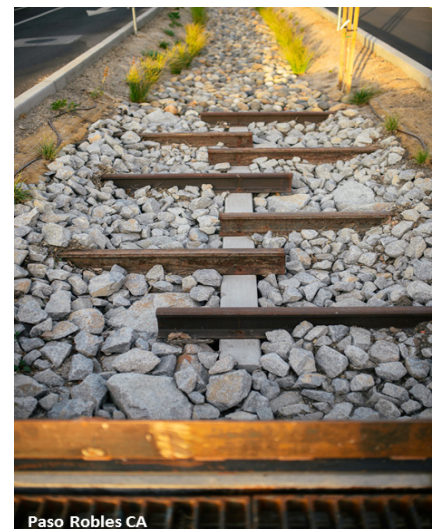


## 4. ESQUEMAS DE ARA/GRA

Existen varios esquemas de ARA/GRA, la mayoría de los cuales presentan características adecuadas para una aplicación en particular. Estos esquemas suelen ser tecnologías escalables que se pueden adaptar a varias tasas de caudales esperados. Si bien los proyectos de ARA/GRA pueden implementarse tanto a una vivienda unifamiliar como a escala de cuencas, los proyectos GRA normalmente se encuentran en escalas de subcuenca y cuencas hidrográficas mayores, a fin de dar cabida a los mayores costos asociados con estas obras. El enfoque de este análisis se centrará en las escalas de comunidad, subcuencas y cuenca, los proyectos de un tamaño de escala superior y que requieren una inversión más importante (GWP, 2010; Pacific Institute, 2010; California Department of Water, 2016; Bonilla Valverde, 2018).

### 4.1 DESARROLLO DE BAJO IMPACTO (DBI)

La recarga y colecta de aguas pluviales es vista como un elemento importante de la mejora del almacenamiento de las aguas subterráneas y de la calidad del agua de la superficie. En la ciudad de Los Ángeles, los planes son recargar más de 250.000.000 m<sup>3</sup>/año de aguas pluviales (New York Times, 2016). Los sistemas DBI son una parte integral de estos planes. De hecho, también Los Ángeles, el Departamento de Agua y Energía, el surtidor de agua primario, está prestando servicios de ingeniería gratis a propietarios de viviendas individuales que toman en cuenta la infiltración de aguas pluviales en su propiedad.



**Figura 4: Infiltración de agua de tormentas - Swale, City of Paso Robles (Paso Robles Daily News, 2014)**

El DBI puede usarse en escalas que van desde viviendas unifamiliares hasta en desarrollos de varias hectáreas más grandes y se utilizan con frecuencia cuando los proyectos incluyen una amplia zona de las superficies impermeables (por ejemplo, estacionamientos y carreteras). En total y cuando se aplican a un área grande que directamente recargue un acuífero no confinado, el DBI puede tener un efecto significativo en los recursos hídricos locales a través de la percolación de agua de la superficie deteriorada o limpia para aumentar el suministro de agua subterránea local. Entre las características típicas del DBI están, como se muestra en la figura 4, los cenagales (secos, grava o vegetación), pozos secos, sistemas de pavimento permeable, estanques de infiltración y zanjas de infiltración (ciudad de los Ángeles, 2016). Si bien el DBI no tiene típicamente un componente de extracción de agua subterránea, los beneficios para el total del abastecimiento de agua están bien establecidos donde la recarga directamente llega a un acuífero no confinado.

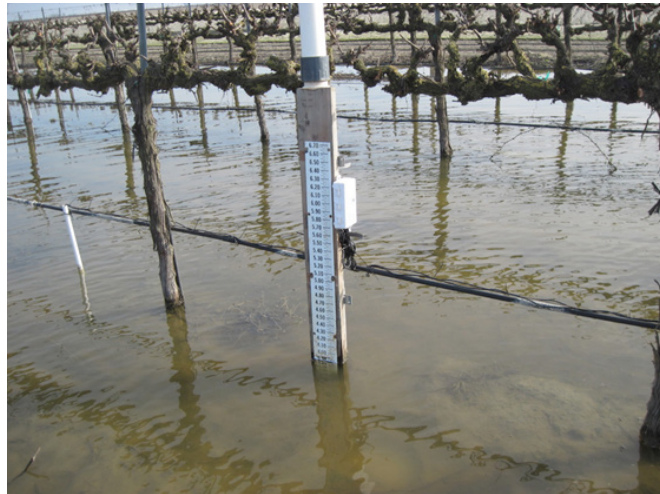
En Estados Unidos, los sistemas DBI se realizan normalmente por medio de procesos de permisos como parte de la construcción de un nuevo desarrollo, instalación o edificio. Si bien es importante reconocer la importancia del DBI en el programa de GIRH, el presente informe se centra principalmente en esquemas ARA/GRA mayores autónomos.

**Punto clave:** DBI se ha vuelto una parte integral de los planes GIRH en EE. UU. así como en otros países para aumentar el suministro de agua subterránea como para mejorar la calidad del agua superficial.

## 4.2 GESTIÓN DE LA RECARGA DEL ACUÍFERO POR INUNDACIÓN (FLOOD-MAR)

Flood-MAR es una estrategia de gestión de agua que utiliza grandes caudales de temporada en ríos y arroyos para recargar acuíferos. Puede aplicarse a escalas que abarcan desde los agricultores individuales desviando una crecida con la infraestructura existente hasta la utilización de infraestructura existente de gestión de inundaciones (ver figura 5) (California Department of Water Resources, 2018). Este es un método relativamente nuevo que se utiliza para recargar acuíferos y ofrece una amplia gama de beneficios además de la reposición del acuífero y el mejoramiento del abastecimiento del agua. Entre los beneficios figuran la

reducción del riesgo de inundaciones, el mejoramiento de la calidad del agua y la adaptación al cambio climático. El uso de la infraestructura de conducción del agua existente para aprovechar los flujos altos de temporada puede constituir una alternativa de bajo costo de recarga. Con el tiempo la obstrucción del espacio de porosidad debido a repetidos eventos de percolación se puede paliar mediante el arado o la labranza de los campos.



**Figura 5: Proyecto de gestión de recuperación de acuíferos por inundaciones en California central (Banchard, et al, 2016)**

Algunas barreras que afectan la implementación se sitúan en la educación de los productores/propietarios, la coordinación entre servicios públicos y agentes privados, la factibilidad hidrogeológica (zonas poco profundas de arcilla impermeable) y la recuperación de agua de recarga (California Department of Water Resources, 2018). Los derechos para utilizar el agua de recargado deben también tomarse en cuenta durante la fase de factibilidad del proyecto.

**Punto clave:** Para ser efectiva, la Flood-MAR requiere de una sólida coordinación de la asociación pública-privada.

## 4.3 FILTRACIÓN INDUCIDA EN LAS MÁRGENES DE RÍO

La filtración inducida en márgenes de río describe la infiltración mejorada de agua superficial debido al bombeo de un pozo o galería de pozos cercanos (figura 6). Este tipo de esquema GRA se utiliza normalmente a lo largo de corrientes perennes o lagos como método para mejorar la calidad del agua potable entregada. A medida que el agua superficial se va infiltrando a través de los materiales del cauce y del acuífero, esta se somete a un grado de purificación mediante el proceso de filtrado (lo que se conoce a veces como geopurificación). Como resultado se obtiene una calidad de agua bombeada que es mejor que la de la fuente de agua superficial (DEMEAU, 2018). Esta técnica también puede mejorar la seguridad del agua reduciendo la presión sobre el bombeo en el acuífero subyacente, mientras el agua es extraída preferentemente de la fuente de agua superficial.

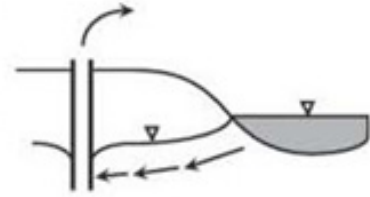


Figura 6: Filtración de río (Farnsworth, 2011)

Existen varios factores importantes a considerar al utilizarse la filtración inducida en márgenes de ríos.

- Tiene que haber una conexión directa entre el acuífero y el cuerpo de agua superficial para que pueda inducirse la infiltración.
- El cuerpo de agua superficial debe ser una corriente perenne (que fluye durante todo el año).
- El agua bombeada aún puede requerir de más tratamiento dependiendo de la calidad de la fuente de agua y el tiempo de residencia en el acuífero.

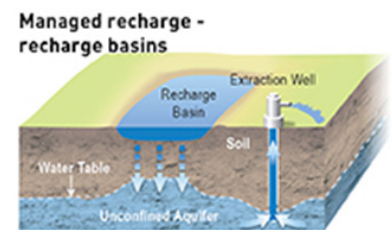
**Punto clave:** Puede ser que en el Caribe la aplicabilidad de la filtración inducida en márgenes de ríos sea limitada debido a la falta de lagos y arroyos perennes.

## 4.4 INFILTRACIÓN O EMBALSES DE RECARGA

La infiltración o los embalses de recarga son la forma más común de ARA/GRA y, durante décadas, se han usado en muchos países (figura 7). Como tales, se tiene buen conocimiento de las limitaciones de la tecnología, diseño, construcción y operación (Bower, 2002). Las fuentes de agua para los embalses de recarga pueden abarcar desde el almacenamiento rutinario de aguas pluviales a los grandes caudales de temporada de los arroyos y ríos y hasta el tratamiento de aguas residuales de la industria y los municipios. La geopurificación del agua superficial recargada suele realizarse durante el proceso de infiltración dependiendo del constituyente químico.

Los embalses de recarga son una tecnología relativamente baja, una opción de bajo costo. La operación y el mantenimiento de las cuencas de encharcamiento es relativamente sencilla, ya que por lo general implica mantener tasas de percolación relativamente altas, reduciendo la obstrucción de poros del suelo. Uno de los mayores obstáculos para la aplicación suele ser la disponibilidad de terrenos adecuados en áreas donde la tecnología es factible. Al igual que con los sistemas Flood-MAR, estos sistemas requieren normalmente de tasas de filtración adecuadas, de relativamente gruesas capas de sedimentos de grano grueso no saturados (almacenaje del acuífero no utilizados) y de acuíferos no confinados (sin capa de arcilla sobrepuesta sobre el acuífero para impedir la percolación).

**Punto clave:** El uso de infiltración o de los embalses de recarga como tecnología está bien establecida, pero requiere de terrenos de poca profundidad y un lecho de agua profundo (almacenamiento disponible) para tener un éxito óptimo.



**Figura 7: Recarga (embalses)**  
(California Department of Water Resources, 2016)

## 4.5 POZOS SECOS

Los pozos secos pueden formar parte de un sistema de taponamiento o pueden ser estructuras independientes para promover la recarga de acuíferos en áreas urbanas con espacio limitado. También pueden ser utilizados para promover la infiltración en zonas donde hay obstáculos cercanos a la superficie para la percolación (capas de arcilla o suelos de baja permeabilidad). Los pozos secos son pasivos en tanto que dependen de la gravedad más que de bombas para reponer el subsuelo y por lo general requieren de un mantenimiento mínimo. Como tales, presentan una huella de energía baja.

Ha surgido la preocupación con respecto al potencial de los pozos secos para actuar como conductos para permitir la migración de las aguas superficiales contaminadas a los acuíferos de agua potable subyacentes. La colocación y el diseño de los pozos secos, así como el control y tratamiento de los fluidos que entran en el pozo seco, pueden aliviar muchas de estas preocupaciones (Edwards, 2016). Esto incluye que en el diseño se incorpore una distancia de separación adecuada para permitir la geodepuración (figura 8).

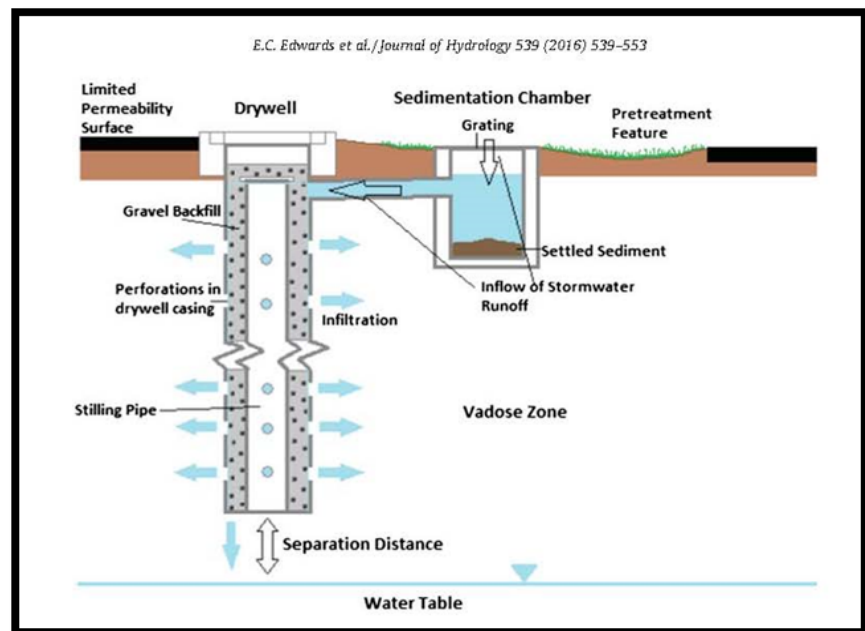


Figura 8: Diseño típico de un pozo seco (Edwards, 2016)

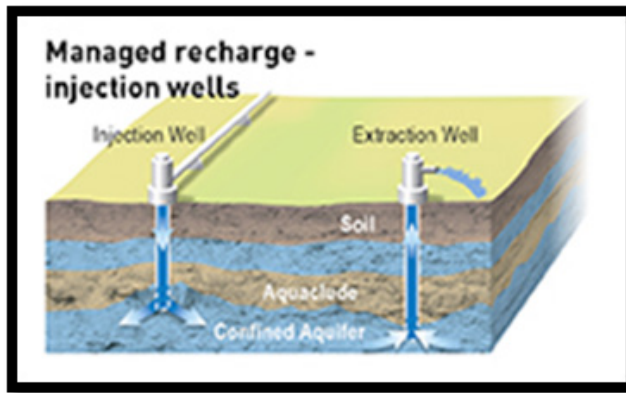
Un diseño típico de pozo seco consiste en una perforación de gran diámetro que se extiende hasta profundidades de 50 pies o más y termina por encima de capa freática. La perforación suele estar entubada o alineada de manera que permita el paso de agua lateralmente desde la perforación hacia la formación. Los pozos pueden ser taladrados mecánicamente o cavados a mano y normalmente se llenan con grava o roca triturada. El pretratamiento de aguas pluviales puede consistir en una fosa de sedimentación que permite que el sedimento en suspensión y el sedimento fino se instalen fuera del agua. Este proceso puede también eliminar metales u otros contaminantes que tienen una afinidad por los sólidos suspendidos de grano fino.

**Punto clave:** Los pozos secos pueden ser usados para fortalecer la infiltración cuando los terrenos superficiales no permiten la percolación efectiva o cuando hay espacio insuficiente para acomodar la construcción de embalses de infiltración.

## 4.6 POZOS DE INYECCIÓN Y GRA

Un esquema GRA común es la instalación de pozos de inyección para la recarga de acuíferos en profundidad, a menudo abajo de arcillas de baja permeabilidad o suelos que limitan la filtración hacia abajo (figura 9). Estos pozos pueden ser utilizados en áreas donde hay un limitado espacio y pueden consistir en un pozo que inyecta y recupera agua inyectada (típicamente llamados pozos ARA) o un pozo de inyección independiente que se utiliza únicamente para recargar el acuífero a fin de evitar la intrusión marina. Se suelen usar los pozos GRA para inyectar agua potable a las aguas subterráneas nativas de mala calidad como el agua salobre a fin de crear una zona de agua almacenada, una parte significativa (no toda) de la cual pueda extraerse cuando sea necesario. Esto puede ser una fuente de agua importante durante emergencias o durante demanda de agua pico.

Los pozos de inyección y los pozos GRA para mejorar o proteger el suministro de agua son utilizados en lugares donde las condiciones geológicas o hidrogeológicas no permiten la infiltración superficial. Por ejemplo, en la figura 10, una capa confinante (típicamente un estrato de permeabilidad más baja como arcilla) prohíbe el uso de los embalses de recarga. Los pozos GRA superan este desafío por medio de la inyección de agua debajo de la capa de baja permeabilidad.



**Figura 9: Pozos de inyección y extracción separados**  
(California Department of Water Resources, 2016)

Los pozos de inyección, incluidos los pozos ARA, son susceptibles de sufrir obstrucciones y normalmente requieren de un seguimiento atento y una limpieza periódica para quitar partículas de materia (por ejemplo, arcillas y minerales de grano fino precipitados), biofilms microbianos y mineralización. Se tiene una buena comprensión de las razones de la obstrucción y los distintos métodos para rehabilitar los pozos tapados; el pretratamiento de la fuente de agua puede aliviar significativamente la severidad de la obstrucción. Estos métodos de rehabilitación incluyen la limpieza mecánica, el tratamiento químico y la desinfección aplicados a menudo en combinación. Antes de seleccionar un método de rehabilitación, es necesario hacer el diagnóstico correcto.

Las interacciones entre el agua inyectada y la matriz del acuífero pueden generar problemas en la calidad con el agua recuperada del agua. Marrón (2006) indica en su informe sobre proyectos de GRA que múltiples sitios han experimentado desafíos de calidad del agua que abarcan desde la formación de subproductos de desinfección (trihalometanos y ácidos haloacéticos) hasta la movilización de metales pesados (arsénico, manganeso y níquel).

Es importante establecer y mantener una zona de amortiguamiento entre el agua nativa y el agua almacenada (figura 10), con lo cual se reducen las operaciones y costos de mantenimiento, se mejora la eficiencia de la extracción y se reducen los costos de tratamiento de aguas. Para crear esta zona de amortiguamiento, se requiere por lo general de una sola adición de agua almacenada que se deja en el lugar (Pyne, 2015). Con el tiempo puede requerirse un aumento de la zona de amortiguamiento a medida que la



calidad del agua decline. Por último, es importante entender el movimiento lateral de las aguas subterráneas en la zona objetivo. Si el agua inyectada migra del pozo GRA durante el período de almacenamiento, el proyecto podría no ser factible.

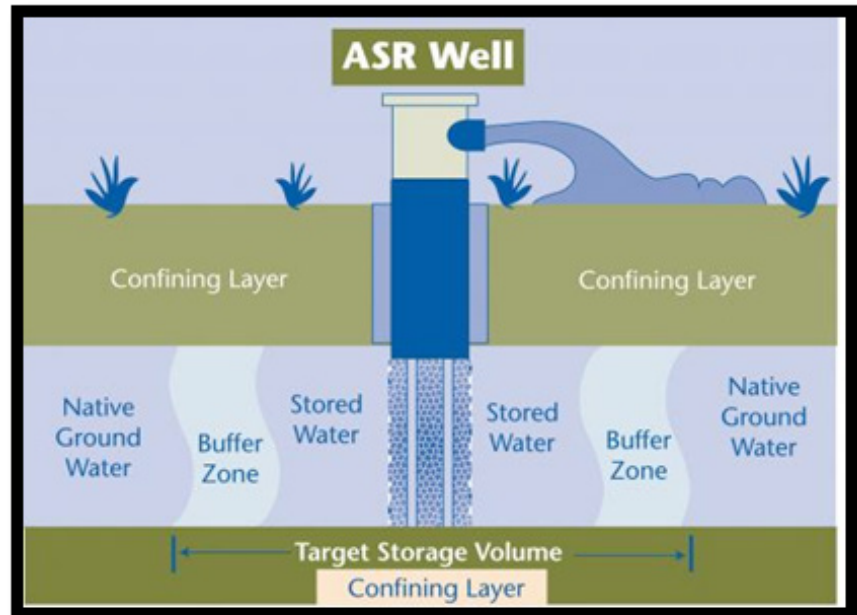


Figura 10: Pozos GRA (Ciudad de Tualatin, 2018)

Históricamente, se ha utilizado ampliamente GRA en las zonas costeras como en la Florida meridional, que es una región con condiciones hidrogeológicas similares a partes del Caribe (por ejemplo, acuíferos costeros de piedra caliza). Los pozos GRA se han utilizado para ofrecer una alternativa a los suministros de agua de la superficie y ayudar a restaurar el ecosistema de los Everglades y reducir la intrusión del agua salada (Reese, 2002). Del mismo modo, los pozos de inyección con aguas residuales muy depuradas han sido utilizados para limitar la intrusión marina, proteger las fuentes de agua dulce costeras y reponer los acuíferos agotados durante décadas en áreas como el sur de California y Barcelona (Orange County Water District, 2015; Water Replenishment District of Southern California 2016).

**Punto clave:** Los pozos ARA han tenido éxito al utilizarse para almacenar agua potable en acuíferos salobres. Sin embargo, requieren de una gestión cuidadosa para optimizar el beneficio y la eficiencia global (cociente del volumen abstraído sobre el volumen recargado).

## 4.7 MODIFICACIÓN DEL LECHO DEL CAUCE

La modificación del lecho del cauce incluye varias tecnologías que se emplean para promover la infiltración de aguas superficiales de los cauces de agua natural en el subsuelo, a fin de recargar el abastecimiento subterráneo. Estos métodos se dividen en dos categorías generales: 1) reguladores del volumen, retraso o control del flujo de agua superficial para promover el tiempo de residencia y mantener el frente húmedo de infiltración en la tierra; y 2) mejoramiento de las tasas de filtración de sedimento (California Department of Water Resources, 2016). Estos son unos de los métodos más antiguos que se utilizan para promover la recarga de agua subterránea y se han empleado en todo el mundo.

La regulación o el control del flujo de agua superficial puede lograrse utilizando varios métodos, entre los cuales están: 1) la regulación de los comunicados de presa para maximizar la infiltración y 2) la instalación y operación de presas de hule (figura 11), verificación de presas o vertederos para frenar y superficie de la reserva a lo largo de los cursos del río susceptibles de percolación (figura 12). Las tasas de filtración de sedimento son realizadas al quitarse de rutina los sedimentos de grano fino y la acumulación biológica de la corriente. Esto a veces suele ser referido como escarificación del cauce.



**Figura 11: Dique de goma completamente inflado (Orange County Water District, 2016)**



**Figura 12. Modificación de cauce en Nuevo México para promover recarga de aguas subterráneas (US Water Alliance, 2016).**

Las ventajas de este método incluyen el acceso a suministros de agua superficiales y la capacidad para infiltrar grandes cantidades de agua a un bajo costo de capital. Las desventajas incluyen la necesidad de raspado, limpieza y labranza del lecho para eliminar el material de grano fino, la acumulación biológica, problemas de aguas abajo de las partes interesadas y posibles impactos ambientales. Este método es más práctico cuando el acceso al lecho del río está rutinariamente disponible como en paisajes áridos con efímeros arroyos o cauces/canales que pueden vaciarse periódicamente y tasas de percolación restauradas.

**Punto clave:** La modificación de cauce con frecuencia puede ser el método más efectivo para infiltrar grandes volúmenes de agua superficial, pero exige extensos permisos y la participación de las partes interesadas.

## 5. HERRAMIENTA PARA LA TOMA DE DECISIONES EN LOS PROYECTOS ARA/GRA

La selección del sitio, viabilidad y desarrollo de los proyectos ARA/GRA requiere de la consideración de un gran número de elementos técnicos. Se ha desarrollado un diagrama de flujo para la toma de decisiones jerárquicas y sistemáticas para ayudar en este proceso (figura 13). La base para el diagrama de flujo ha sido desarrollada a partir de diagramas de flujo conceptuales de toma de decisiones publicados (GWP, 2010) y del marco de decisiones previstas en el código de práctica de los proyectos ARA (EPA, 2004), los cuales se fundamentan en el trabajo realizado por Dillon y Pavelic (1996). El diagrama de flujo identifica preguntas y puntos de decisión importantes que deberían abordarse durante la fase de planificación del proyecto y al revisarse un proyecto para su posible aprobación.

Esta herramienta de decisión no considera explícitamente las estructuras institucionales, la participación de los actores interesados ni el desarrollo de capacidades organizacionales. Estas estructuras pueden abordarse fuera del trabajo de análisis de decisión del proyecto. Por ejemplo, suele prepararse un plan de comunicación de las partes interesadas, a veces como un documento independiente. Puede incluir un proceso formal para la labor de alcance a interesados y la participación en la toma de decisiones.

Para facilitar la discusión, se ha dividido la figura 1 en dos partes. En la primera, figura 14, se presenta el diagrama de flujo para la toma de decisiones desde el inicio del proyecto (determinar la demanda de agua almacenada) a través de la selección de la tecnología de GRA, lo que se considera como la fase de factibilidad hidrogeológica. Los puntos de decisión clave del proyecto se indican en donde la viabilidad del proyecto no se puede asegurar (suspensión total) o donde se deben recabar datos adicionales y analizarse para evaluar la viabilidad (análisis de brechas de datos). En la segunda parte, la figura 15, se presenta el diagrama de flujo para la toma de decisiones a través de la fase de evaluación de ingeniería, y es considerada como la fase de factibilidad de ingeniería. El proyecto avanza hasta ahí solo si pasa la factibilidad hidrogeológica.

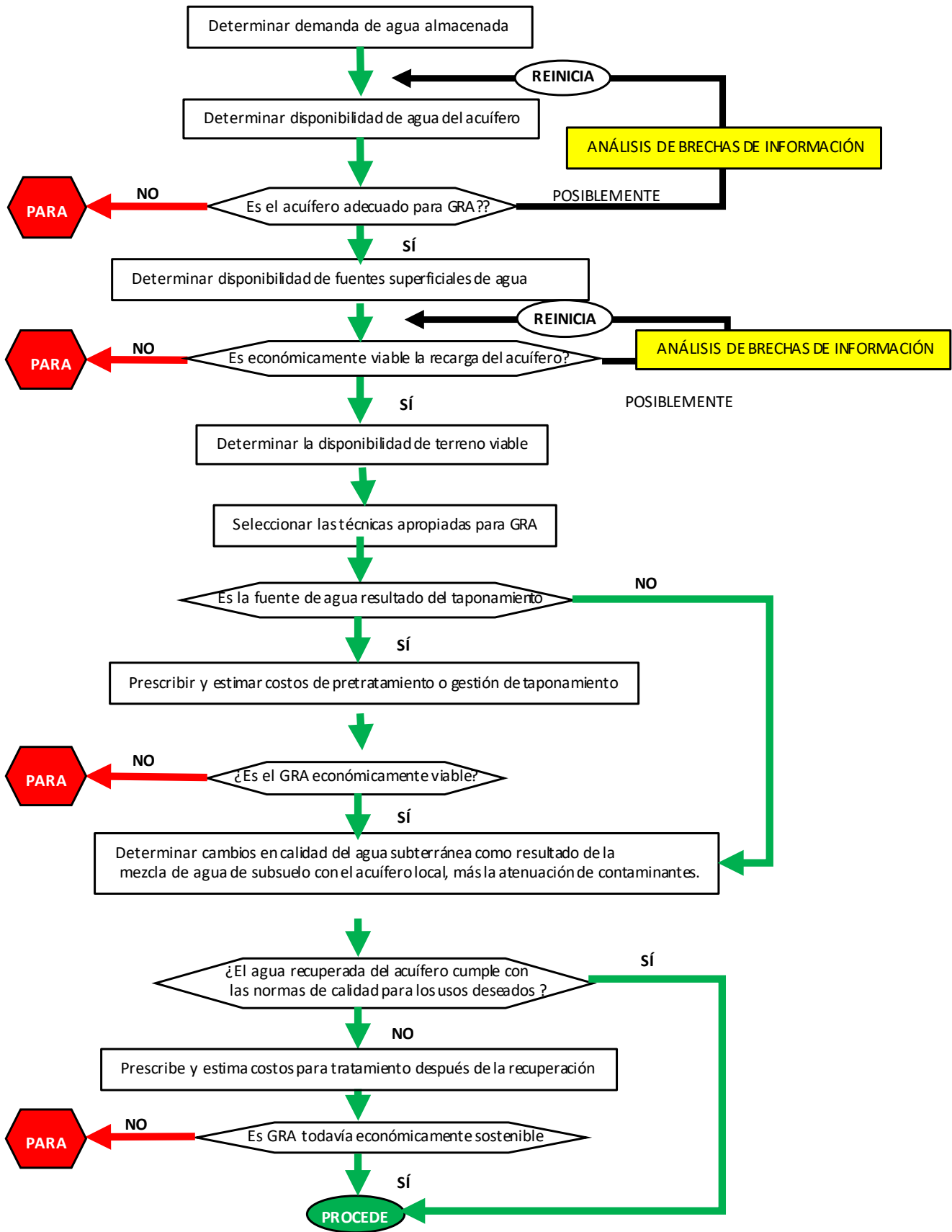


Figura 13: Diagrama de flujo de toma de decisiones

## 5.1 FACTIBILIDAD HIDROGEOLÓGICA

Con el análisis de factibilidad hidrogeológica se establece que las condiciones subsuperficiales son apropiadas para el proyecto previsto, que una fuente de agua superficial es adecuada, que un esquema de GRA a lo mejor puede ser exitosamente aplicado y que el proyecto puede avanzar a la fase de análisis de ingeniería. En el proceso de factibilidad hidrogeológica se identificarán dos puntos de decisión clave (figura 14).

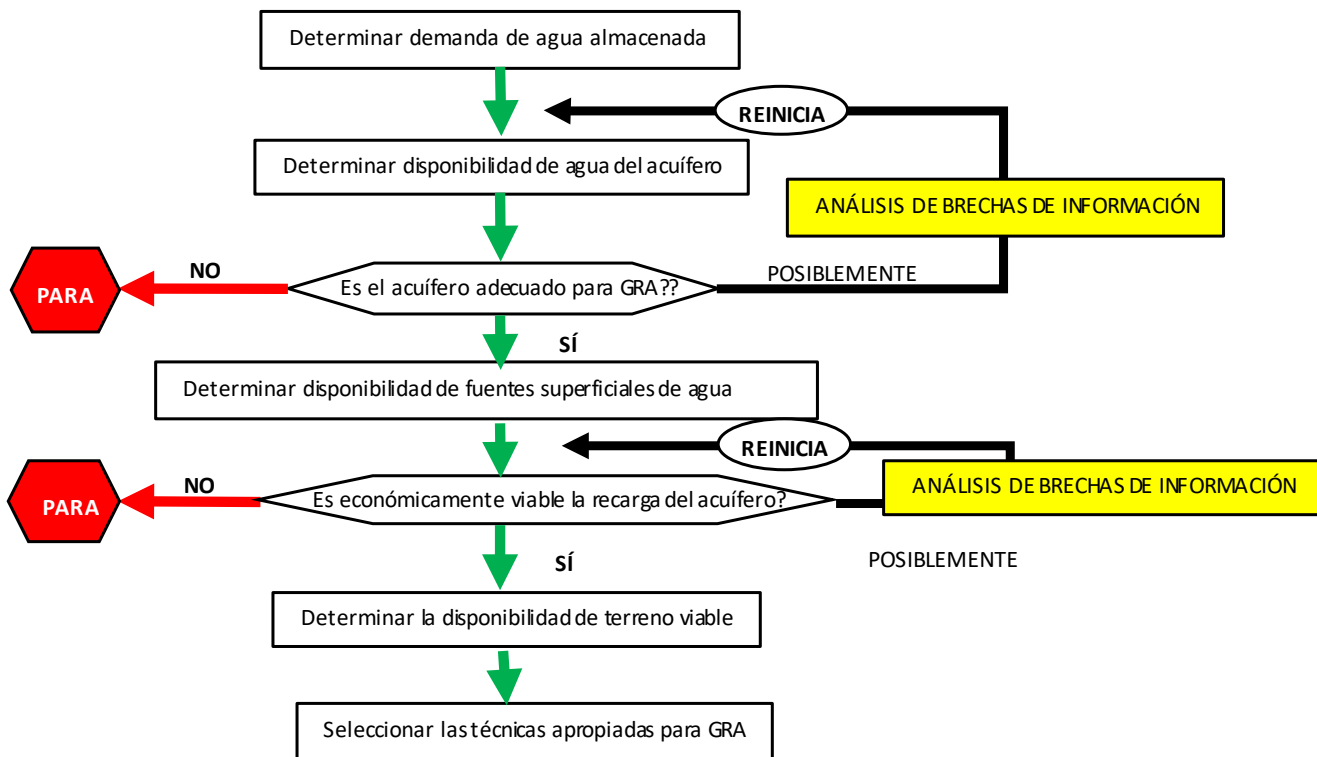


Figura 14: Factibilidad hidrogeológica y selección de sistema GRA

El primer punto de decisión consiste en determinar si existe un acuífero adecuado para almacenar agua subterránea. Si no hay un adecuado depósito de subsuelo, el proyecto de GRA no tendrá éxito. Los factores para considerar en la presente decisión incluyen la naturaleza de las condiciones del subsuelo (permeabilidad, porosidad del acuífero) y del almacenamiento disponible, o si pueden crearse por bombeo y reduciendo el acuífero.

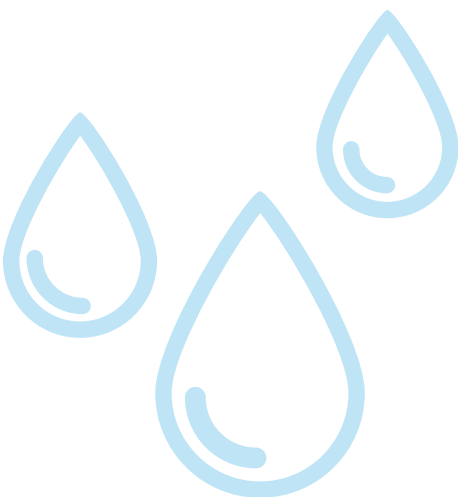
El segundo punto de decisión es determinar si se dispone de cantidades suficientes de agua de recarga, cuándo está disponible,

su calidad, si es que se puede recargar el agua con éxito, si la recarga cumplirá con los objetivos del proyecto (por ejemplo, mejorar las fuentes de agua, mitigar la intrusión salina del agua de mar), y si la recarga generará algún resultado perjudicial (resultando en inundaciones, elevaciones de agua excesivamente altas o degradación de las aguas subterráneas). Se recomienda hacer una prueba piloto para evaluar las condiciones del terreno. Si los objetivos del proyecto incluyen la extracción de agua subterránea almacenada para satisfacer una necesidad agrícola o doméstica, debe incluirse una evaluación de la extracción de agua subterránea. Por lo general, el análisis que se indica en la figura 14 se reporta en un informe de análisis de factibilidad hidrogeológico.

En dos puntos del diagrama de flujo para la toma de decisiones se tiene que un posible resultado es que el conjunto de datos existente no aborda si GRA es hidrogeológicamente factible. Es posible que se necesiten datos, pruebas o análisis adicionales para despejar la incertidumbre en un análisis de brechas de datos. Por ejemplo, puede estar claro cuán alto subirá el nivel freático bajo condiciones de recarga y si el aumento en la elevación del agua subterránea puede causar inundaciones excesivas. Las pruebas piloto y un modelo de agua subterránea pueden ser necesarios para examinar estas situaciones.

Suele suceder que haya limitada información disponible públicamente acerca de las condiciones hidrogeológicas subterráneas, lo que dificultará la elaboración de un análisis de factibilidad hidrogeológico sin recurrir a un costoso programa de perforación e investigación. Con frecuencia la universidad local o regional puede ser una fuente de información útil. Además, las diversas técnicas, como la geofísica de superficies, están disponibles y pueden utilizarse para caracterizar las condiciones subsuperficiales y reducir al mínimo los costos de perforación e investigación. Por último, muchas islas históricamente han contado con una fuente de agua subterránea local que se ha vuelto inutilizable al paso de los años debido a la intrusión marina, la contaminación y/o el descuido. Estas circunstancias indican que existe un acuífero, y ARA/GRA pueden ser útiles en la rehabilitación de este recurso histórico.

Los costos de implementación de un estudio de factibilidad hidrogeológico en sitios específicos dependen del sistema ARA/GRA, los objetivos del proyecto y la disponibilidad de información histórica sobre los suelos, la geología y el acuífero. El costo de un proyecto de un sencillo embalse que utilizará agua natural en una zona donde se dispone de datos sobre el subsuelo, la factibilidad, el análisis y registros hidrogeológica puede ser inferior a \$100.000.



## 5.2 FACTIBILIDAD DE INGENIERÍA Y FINANCIERA



La segunda parte del diagrama de flujo para la toma de decisiones, figura 15, presenta la siguiente fase del diagrama de flujo para la toma de decisiones y consiste en los análisis de ingeniería y financiero del proyecto. En esta fase del análisis se identifican los posibles costos, factibilidad de construcción del proyecto, y si este es financieramente viable. Esta viabilidad se centra en 1) los costos para tratar el agua antes de la recarga para eliminar contaminantes, para cumplir con los requisitos reglamentarios o para prevenir la obstrucción; y 2) el costo para tratar el agua después de que se recupere para satisfacer los requerimientos de agua potable u otros objetivos del proyecto.

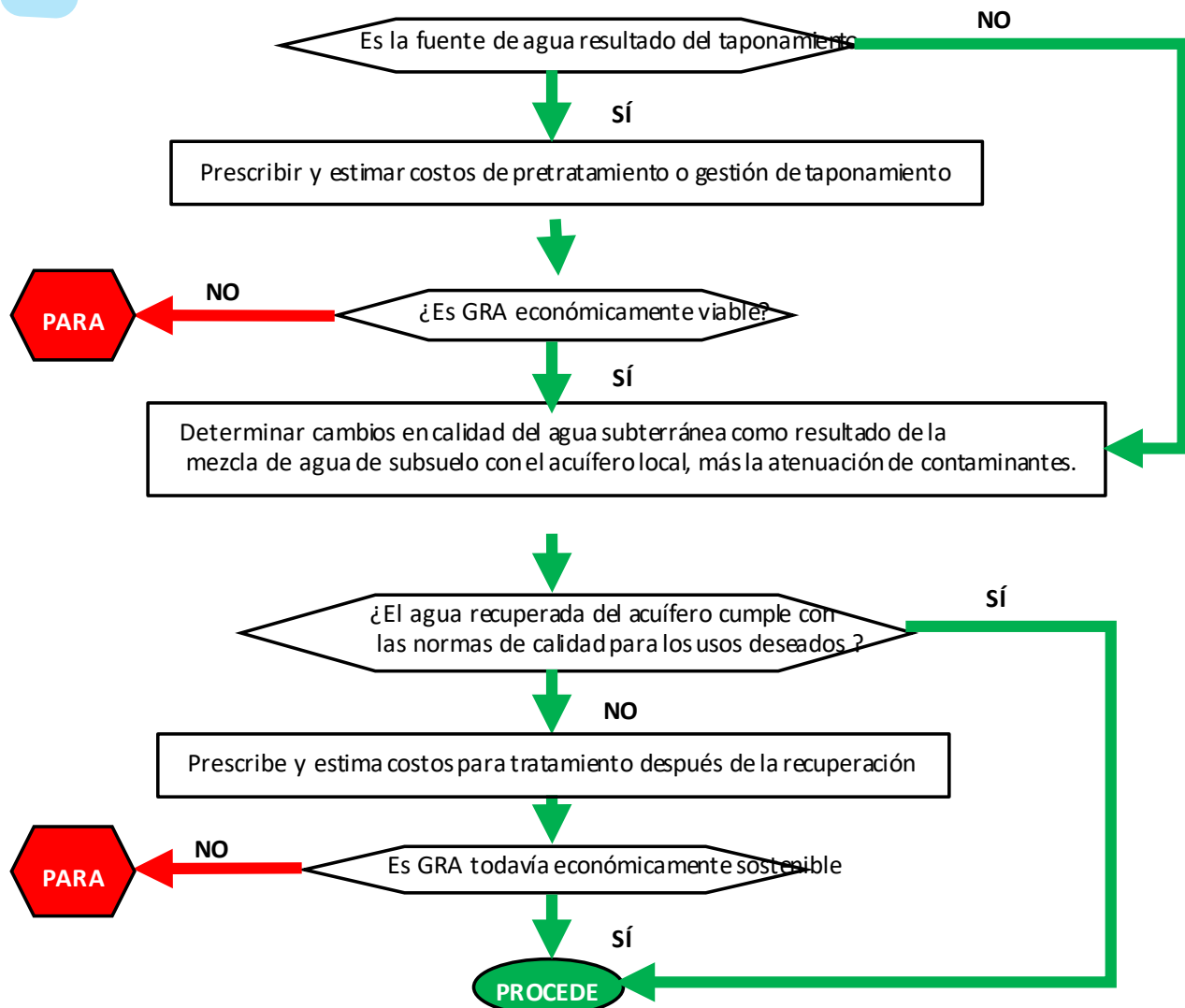


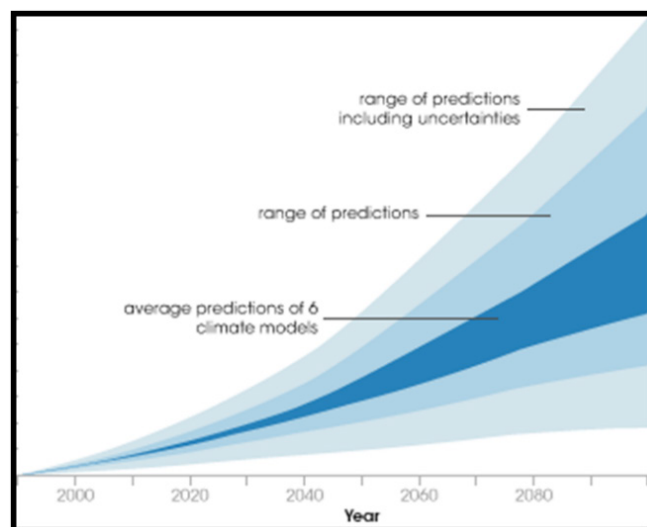
Figura 15: Viabilidad de la ingeniería



Los beneficios del proyecto deben incluir el beneficio directo como el aumento en el abastecimiento de agua de uso doméstico o agrícola o la mitigación de la intrusión de agua salada. Los beneficios secundarios del proyecto, tales como el mejoramiento de la salud pública, respuesta a desastres (fuente alternativa de agua) y el crecimiento económico pueden también considerarse cuantitativamente como parte del análisis de costos o cualitativo. La participación y vinculación de las partes interesadas pueden ayudar a identificar esos beneficios secundarios y establecer su valor. El uso del análisis de decisión multicriterio es un área creciente y existen varios trabajos que ofrecen una visión general de la técnica (Schloten, et. al, 2017; Moglia, et al., 2012).

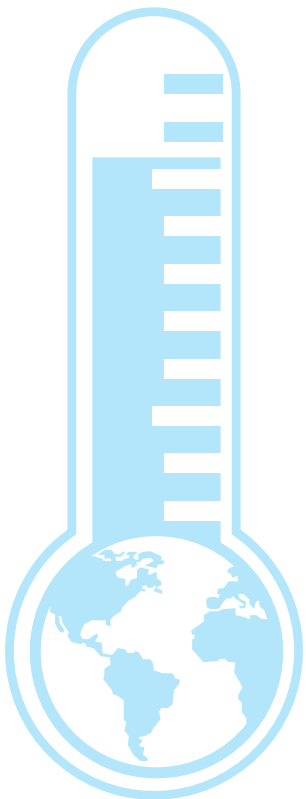
## 5.3 CAMBIO CLIMÁTICO

El cambio climático plantea un desafío en la planificación y ejecución de la gestión regional integrada de los recursos hídricos (GRIRH o IRWM) de gran alcance, ya que el grado de incertidumbre de los factores relacionados con el clima, como los patrones de precipitación y cantidades y frecuencia de sequías, aumentan significativamente con el tiempo (Larson, et al., 2015). La figura 16 muestra un análisis predictivo típico del cambio climático, donde se observa una creciente gama de resultados de respuesta e incertidumbre en el tiempo.



**Figura16: Predicción de incertidumbre por el cambio climático (NASA, 2005)**

En los proyectos individuales de ARA/GRA, el impacto de la incertidumbre en el cambio climático vuelve más apremiante la necesidad de utilizar proyectos conjuntos robustos. En cuanto al impacto futuro del cambio climático en un proyecto, puede ser apropiado recurrir a un enfoque de manejo adaptativo en el diseño y operación de un ARA/GRA dada la incertidumbre en el pronóstico de las condiciones hidrológicas futuras. Cuando se presente la elección de un número limitado de proyectos en una cartera de posibles de estos, se puede dar prioridad a aquellos que presentan la mayor oportunidad de mitigar los efectos del cambio climático.



## 6. ESTUDIOS DE CASO

El siguiente resumen de estudios de caso que cubre una gama de tecnologías y aplicaciones ofrece una mayor comprensión de los sistemas ARA/GRA, sus impactos positivos y sus desafíos. De estar disponible, se incluye la información resumida de costos.

En la literatura se han identificado múltiples referencias a proyectos ARA/GRA; sin embargo, toda la información técnica y de costos no ha estado disponible en fuentes públicas. Por ejemplo, los pozos de inyección y una presa de recarga se utilizan constantemente en Cuba para recarga de escorrentía y evitar la intrusión de agua de GRA en un acuífero kársticos (piedra caliza); sin embargo, había poca información detallada disponible para estudiarla. Se observaron otros proyectos en Costa Rica, Colombia, México y Brasil.

Se describen ejemplos de proyectos que destacan diferentes tecnologías y aplicaciones con el propósito de ofrecer una gama de los problemas técnicos que fueron encontrados. Se presentan varios trabajos de resumen que examinan un conjunto mayor de proyectos y presentan una discusión de las lecciones aprendidas.

### 6.1 JAMAICA: AGRS INNSWOOD (CONSTRUCCIÓN FINANCIADO POR EL BID)

Los recursos hídricos de Jamaica provienen de aguas superficiales y subterráneas. El suministro doméstico es abastecido por igual por aguas subterráneas y superficiales, en tanto que el agua de riego se acerca al 60 % de agua superficial y 40 % de agua subterránea. Jamaica es susceptible de sufrir sequías severas y, así como todo el Caribe, experimentó extrema sequía entre 2015 y 2017. Además, el suministro total de agua subterránea se ha reducido en cerca de un 5 %. El Gobierno jamaicano ha identificado la necesidad de invertir en sus sistemas de agua para mejorar la resiliencia y hacer la fuente menos susceptible a la sequía y el cambio climático.

A mediados de 2014, Jamaica construyó su primer proyecto GRA, y desde 2016 ha estado operando el Artificial Groundwater Storage and Recovery (AGSR) de almacenamiento artificial de agua subterránea y recuperación en Innswood, Jamaica (figura 17). Los objetivos del proyecto AGSR incluyen reversión de intrusión marina, aumento del almacenamiento del acuífero, ayuda para mantener la extracción de 73.000 m<sup>3</sup>/día y alivio a las restricciones de agua potable durante sequías.



**Figura 17: AGSR, Innswood, Jamaica (Google Earth)**

El proyecto de 68 hectáreas está ubicado en una zona rural aproximadamente 22 kilómetros al oeste del centro de la ciudad de Kingston. La selección del sitio tuvo como base las características del acuífero subyacente, la disponibilidad de fuentes de agua, la capacidad de recarga y para extraerse grandes volúmenes de agua y los riesgos en general. Las operaciones incluyen una estructura de toma, estructuras de control y medidores de flujo, colocación de fosas de decantación (sedimentación) y lechos de humedales para tratar el agua, tuberías y pozos de recuperación. Las fuentes de agua están compuestas del exceso de agua superficial suministrado por medio de un canal de riego. Los costos de construcción del proyecto fueron aproximadamente \$8,2M, de los cuales unos \$393K fueron costos de gestión del proyecto y consultoría (total aproximado \$8,6M).

La instalación está diseñada para tratar y recargar un máximo de 36.000 m<sup>3</sup>/día, pero en promedio se tratan y recargan unos 23.000 m<sup>3</sup>/día a un costo operacional anual de \$70.000-año. Los costos

normalizados de capital son \$8,6 millones / (23.000 x 365) = \$ 1,02/m<sup>3</sup>. Esto se compara bastante bien con los costos en el cuadro 1 (\$0,77/m<sup>3</sup> para los embalses de recarga). Los costos AGSR O&M son muy bajos (\$0,01/m<sup>3</sup>) y más de un orden de magnitud inferior a los citados en el cuadro 2 (\$0,17/m<sup>3</sup>); sin embargo, GRA es relativamente nuevo y los costos de O&M deben ser considerados como preliminares. La Autoridad ha indicado que estaría interesada en construir y operar proyectos GRA adicionales.

El proyecto opera bajo flujo por gravedad, lo que minimiza los requerimientos de energía y la huella de carbón. La Jamaican Water Resources Authority (“la Autoridad”) recientemente ha puesto en marcha un programa de monitoreo para rastrear el aumento medido en las elevaciones de las aguas subterráneas y los cambios en la calidad de las aguas subterráneas.

La Autoridad indicó que el proyecto beneficia al suministro de agua y que no ha encontrado ningún obstáculo importante durante la planificación o construcción.

## 6.2 SONORA, MÉXICO: GRA CON AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES TRATADAS

Al igual que muchos países con grandes zonas áridas, México tiene una escasez crónica de agua subterránea, habiendo presentado en 2013 un estimado de 106 acuíferos en situación de grave agotamiento. La gestión integrada del agua es necesaria para lograr mejorar la sostenibilidad. Este proyecto de GRA fue realizado con el objeto de reducir las aguas residuales tratadas y la recarga del acuífero subyacente sobreexplotado en aproximadamente 7.500.000 m<sup>3</sup> sobre una base anual. El financiamiento del proyecto fue apoyado por el Banco de Desarrollo de América del Norte (Humberto, 2017).

El proyecto tiene lugar en el San Luis Río Colorado (SLRC), ubicado en la esquina noroeste del estado de Sonora. SLRC cuenta con una población de casi 200.000 habitantes y descansa sobre un acuífero agotado. La precipitación en promedio se sitúa cerca de 55 mm/año, casi 30 veces menos que la tasa de evaporación. La geología de la zona se reveló propicia al GRA mostrando una gruesa capa de gravas, arenas y limos entremezclados. El agua subterránea que subyace el proyecto tiene un contenido de sólidos totales de sólidos disueltos (TDS) de poco menos de 1.000 mg/L.

Se realizaron pruebas piloto para estimar la capacidad de infiltración mediante la construcción de una cuenca de infiltración como prueba piloto, la instalación de pozos de monitoreo y la infiltración agua clara seguida por aguas residuales tratadas (figura 18). Las tasas de infiltración en la prueba piloto disminuyeron considerablemente en un corto período cuando se utilizó agua de reclama debido a la obstrucción del poro.

Luego de la prueba piloto, se construyeron 115.200 m<sup>2</sup> de estanques de infiltración con capacidad para una carga volumétrica promedio de 5200 m<sup>3</sup>/día (invierno) a 8600 m<sup>3</sup>/día (en verano). Es necesario hacer, de modo rutinario, el monitoreo del agua subterránea nativa subyacente requerido por el organismo regulador ambiental (SEMARNAT). El monitoreo indica un aumento de TDS (y varios otros parámetros), probablemente como resultado de las actividades de recarga mediante tierra salina (es decir, TDS de 1700 mg/L se ha detectado en aguas subterráneas poco profundas). La zona vadosa parece ser efectiva para remover bacterias en el percolado del agua superficial (geopurificación).

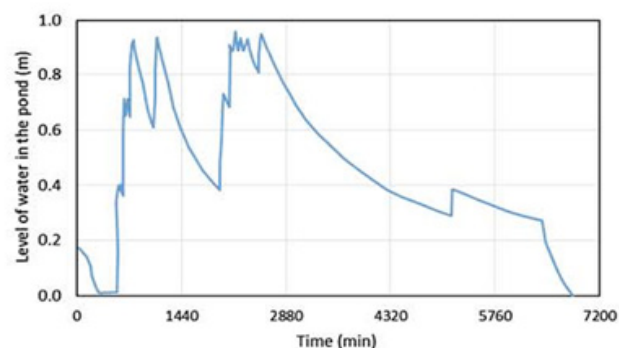


Figura 18: Prueba piloto de tasas de infiltración: aguas residuales tratadas (Humberto, et al, 2017)

El mantenimiento se realiza rutinariamente en la medida en que las algas en general, las algas muertas y los sedimentos obstruyan los espacios del poro y reduzcan con rapidez la tasa de infiltración. El estanque se pone fuera de operación y la corteza superior (0,15 m) es removida físicamente de los estanques de infiltración y es utilizada como una enmienda del suelo (figura 19). Inicialmente la corteza no se quitó, pero solo fue mezclada en el suelo subyacente. Esto resultó en una disminución sustancial de las tasas de infiltración. La remoción de la capa de obstrucción ha ayudado a frenar este descenso de la infiltración. No es recomendable simplemente arar los suelos.



**Figura 19. Corteza terrestre (Humberto, et al, 2017).**

Las tasas de infiltración son vigiladas de cerca para identificar cuando los estanques requieren de rehabilitación. En promedio, los estanques se raspan cada 2-3 ciclos de humedecimiento y secado. Los estanques han estado operando un total de 10 años y en promedio recargan unos 8.200.000 m<sup>3</sup> por año de aguas residuales tratadas secundarias (que representan pérdidas por evaporación de 1,5 m/año). Tal situación más que compensa la sobreexplotación de 7.500.000 m<sup>3</sup>. El capital y los costos de operación y de mantenimiento no estaban disponibles para este proyecto.

## 6.3 KINGS COUNTY, CALIFORNIA, USA: BANCOS DE AGUA UTILIZANDO FLUJOS DE CORRIENTE EN EXCESO

La cuenca de agua subterránea del Kings River o Río de los Santos Reyes del Valle de San Joaquín en California se agota seriamente debido al exceso de bombeo para uso agrícola. Esto ha llevado a crónicas caídas de agua en la capa freática y hundimientos significativos. Entre 2003 y 2009 se construyó un banco de agua cerca del río de los Santos Reyes para cosechar el exceso de los caudales en el río de los Santos Reyes, almacenarlos bajo tierra y recuperar el agua subterránea almacenada en una fecha posterior.

Después de una extensa investigación, esta ubicación junto al río Santos Reyes fue elegida para constituir un banco de agua APEX con base en la proximidad a la fuente de agua, un sistema de transporte cercano existente y las condiciones hidrogeológicas. Un canal de río cercano que ha sido abandonado fue seleccionado como depósito de recarga que sería equipado con aliviaderos para crear estanques de recarga. Se terminaron una investigación hidrogeológica, pruebas de acuífero y una prueba piloto. Con base en estos resultados se desarrolló un diseño de proyecto y se instalaron pozos de extracción de aguas subterráneas, presas, tuberías, medidores de flujo y vertederos de agua superficial. El mantenimiento incluye la limpieza de los estanques de recarga para mantener las tasas de infiltración. En el acuífero agotado en



**Figura 20: Pozo de recuperación y construcción de tubería de conducción (From Author's Archive)**



promedio se recargan 7.000.000 m<sup>3</sup> de agua al año y hasta 90% del volumen de esa recarga se extrae con pozos de recuperación. Los informes anuales se preparan para dar cuenta del agua recargada y extraída y de las aguas subterráneas de almacenamiento. La calidad del agua del río es excelente (teniendo un promedio de TDS inferior a 100 mg/L).

Dos de las lecciones más importantes aprendidas en la construcción y operación de este banco de agua incluyen: 1) el valor que tiene la buena comunicación entre las partes interesadas durante el diseño del proyecto y su implementación y 2) la importancia de llevar la contabilidad exacta de las aguas subterráneas de almacenamiento. Es probable que de haberse dedicado atención a estas áreas de modo más directo y a fondo se habría mejorado la aceptación del proyecto entre los terratenientes vecinos. Por último, se han modificado la configuración del sistema y las operaciones y el mantenimiento con el paso del tiempo para reflejar los datos de rendimiento. Una estrategia de manejo adaptable habría ofrecido una mejor plataforma para la gestión de las expectativas de las partes interesadas<sup>11</sup>.

Los costos de capital para la construcción del banco de agua se ubicaron aproximadamente en \$8,2 Millones o \$ 1,17/m<sup>3</sup> de agua recargada (\$8.2 M/7.000.000)<sup>12</sup>. Los costos de capital promedio normalizados en el Cuadro 1 fueron de \$ 0,77/m<sup>3</sup> de agua recargada. Los costos anuales para operar el banco de agua fueron de \$1,6 Millones o \$ 0,23/m<sup>3</sup> de agua recargada (\$1,6 Millones/7.000.000). Esta cifra es mayor que los costos de O&M citados en el Cuadro 1 en lo referente a la recarga de agua natural (\$0,13/m<sup>3</sup> con cuencas de infiltración y \$0,19/m<sup>3</sup> utilizando pozos de recarga). Estos costos se ven compensados por el precio del agua vendida desde la orilla del agua, \$0,45/m<sup>3</sup>.

---

11 La gestión adaptativa incluye el monitoreo del desempeño, aprender de las decisiones y ajuste de las operaciones y expectativas para optimizar el resultado.

12 Los costos de capital son \$0,15/m<sup>3</sup> superiores a los del proyecto AGSR en Jamaica (\$ 1,02/m<sup>3</sup>).

## 6.4 HILTON HEAD ISLAND, CAROLINA DEL SUR, ESTADOS UNIDOS: GRA Y CONTROL DE INTRUSIÓN MARINA

La isla de Hilton Head Island en la costa de Carolina del Sur tiene aproximadamente 19 km largo y hasta 6 km de ancho. Está muy desarrollada y cuenta con una población permanente de 37.000 personas, la que puede elevarse a 275.000 durante la temporada turística. El agua potable es suministrada por 27 pozos de agua subterránea en un acuífero subyacente de piedra caliza. El acuífero naturalmente desemboca al mar. El bombeo regional ha reducido las elevaciones del agua subterránea y la intrusión marina ha ido avanzando hacia el interior a una velocidad de unos 60 metros/año. Esto ha resultado en la pérdida de aproximadamente el 25% de los pozos de suministro de agua subterránea debido al avance lateral del frente de agua de GRA y proximidad de aguas salobres. Se han impuesto restricciones al uso del agua para retardar la progresión de la intrusión del agua marina. Sin embargo, se ha mantenido la tasa de intrusión. Se ha instalado una tubería desde el continente a la isla y se ha construido una planta de desalinización, la cual se puso en funcionamiento en 2009. La GRA se ha evaluado como una fuente potencial de agua, en particular con el propósito de satisfacer la demanda pico estacional (Pyne, 2015).

Se terminaron pozos GRA en una zona particular del acuífero, donde estaba limitada la migración lateral, manteniendo el agua inyectada en cercana proximidad al pozo GRA, mientras el agua estaba almacenada. Se realizaron pruebas para evaluar la eficiencia del proceso de extracción de recarga (la eficiencia en el porcentaje del agua inyectada y el almacenada que puede ser recuperada). Un elemento clave del éxito de este proyecto fue el desarrollo de una zona “de amortiguamiento” alrededor



Figura 21: Hilton Head Island (Pyne, 2015)

del pozo de GRA (figura 8). El mantenimiento de esta zona facilitó las mayores tasas de recuperación de agua almacenada.

Los costos de capital para las instalaciones de GRA fueron de \$1,9 M. La capacidad de recuperación de diseño es de 8.000 m<sup>3</sup>/día. Esto genera un costo normalizado de \$ 0,65/m<sup>3</sup>. La desalación de aguas salobres en comparación típicamente es de 2,5 a 6 veces el costo de capital y la desalinización de agua marina es de 8 a 14 veces el costo de capital de ARA.

## 6.5 KINGS COUNTY, CALIFORNIA: FLOOD- GRA EN TERRANOVA RANCH

La gestión de la recarga de acuíferos con aguas de inundaciones es una tecnología relativamente nueva recientemente aplicada, sobre todo en el Valle Central de California. Actualmente se está implementando un nuevo proyecto a lo largo del río Santos Reyes en el Valle de San Joaquín, con el propósito de contrarrestar la grave sobreexplotación de las aguas subterráneas en el acuífero subyacente. El proyecto consiste en captar los altos flujos de temporada del río Santos Reyes e inundar los cultivos resistentes a las inundaciones o de barbecho (nogales y viñedos) y dejar que esta agua se filtre al subsuelo. Este proyecto también alivia posibles daños por inundaciones que afecten a las comunidades aguas abajo.

Se realizaron pruebas piloto en 1000 acres de tierras de cultivo al introducir inundaciones en toda el área a una profundidad de 15 a 30 centímetros. Las pruebas piloto evaluaron tasas de infiltración, requerimientos de infraestructura, logística, efectos en los cultivos y costos. En total, entre enero y abril se desviaron casi 4.000.000 m<sup>3</sup> de agua en 1.000 hectáreas de campos agrícolas. La cantidad de agua que podría ser desviada durante este período se vio limitada por la infraestructura de conducción. No se identificó ningún impacto significativo en el rendimiento de los cultivos y tampoco se espera que ocurra alguno a largo plazo.



**Figura 22: Pruebas piloto (California Department of Water Resources, 2018)**

Los costos para captar y aplicar los flujos de inundación fueron aproximadamente de \$0,02/m<sup>3</sup> en comparación con los embalses de recarga dedicados, cuyos costos ascienden hasta cerca de \$0,90/m<sup>3</sup>. Los costos de bombeo de aguas subterráneas suelen ser del orden de \$0,05 a \$0,10/m<sup>3</sup> (profundidad del agua es de alrededor de 65-70 metros por debajo de la superficie del terreno) (Banchard, 2016).

## 6.6 ORANGE COUNTY, CALIFORNIA: GRA Y CONTROL DE LA INTRUSIÓN DE AGUA DE GRA UTILIZANDO AGUAS RESIDUALES RECICLADAS

El condado Orange County Water District (OCWD) ubicado en el sur de California administra el suministro de agua de aproximadamente 2,4 millones de personas. El suministro de agua consiste en aproximadamente 2/3 de agua subterránea y 1/3 de agua importada. El costo del agua subterránea es aproximadamente el 50% del agua importada. El agua importada se origina fuera de la cuenca subterránea y es abastecida por un tercero. La principal fuente de recarga del agua subterránea del condado de Orange es el río Santa Ana, cuyos flujos consisten en aguas pluviales y aguas residuales tratadas procedentes de los municipios río arriba. El condado OCWD capta y recarga aproximadamente 185 millones de m<sup>3</sup>/año de agua del río a través de su gama de embalses de recarga y 57 Millones de m<sup>3</sup>/año de agua reciclada se recarga a través de 109 pozos de inyección utilizados para controlar la intrusión marina y recargar el acuífero. Esta fue la primera instalación en California a la que se le permitió inyectar agua reciclada en un acuífero de agua potable. Los pozos de inyección de barrera han sido eficaces en prevenir la intrusión marina.

Las aguas residuales son tratadas mediante una combinación de tecnologías de tratamiento antes de la inyección. Estas tecnologías incluyen la microfiltración, la ósmosis inversa y la oxidación avanzada utilizando luz ultravioleta y peróxido de hidrógeno.

Debido al tratamiento avanzado de las aguas residuales, el agua resultante se agotó en contenido mineral, dando lugar a un deterioro de la tubería de conducción de hormigón y en la movilización de arsénico en el suelo subyacente hacia los embalses. Los efluentes de la planta de tratamiento avanzado

de agua están condicionados antes de la conducción a las instalaciones de recarga para mitigar ese impacto.

El costo del capital para construir el avance del sistema de tratamiento de aguas residuales fue de \$481 Millones (\$8,4/m<sup>3</sup> de capacidad de recarga)<sup>13</sup>. El costo unitario de producción de agua del sistema de tratamiento avanzado es de \$0,72/m<sup>3</sup>. Estos costos son comparables a los identificados en el cuadro 1. El costo de tratar las aguas residuales es equivalente al costo de la importación de agua (Herndon, 2014).



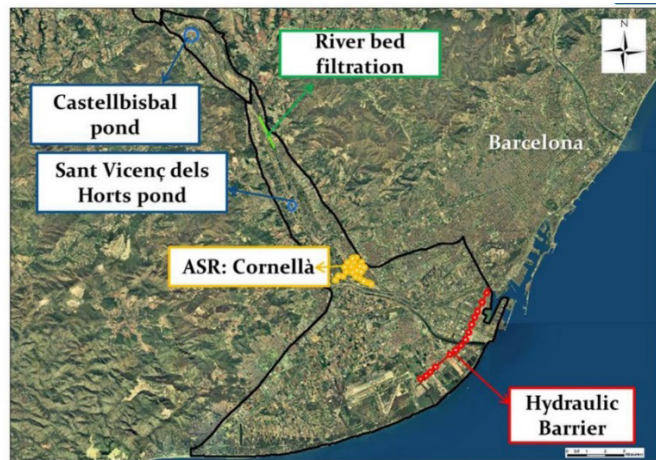
**Figura 23: Embalses de recarga, Orange County California (Orange County Water District, 2015)**

## **6.7 BARCELONA, ESPAÑA: ACUÍFERO DE LLOBREGAT, EMBALSE DE INFILTRACIÓN E INYECCIÓN DE POZO PROFUNDO**

El acuífero de Llobregat en Barcelona es una fuente importante de agua para uso agrícola, industrial y agua potable, particularmente durante los períodos secos. La sobreexplotación del acuífero ha

---

13 La construcción de la planta de tratamiento evitó la necesidad de un nuevo desagüe al océano del alcantarillado sanitario de (\$200 Millones) al reducirse el flujo hacia el desagüe. Estos flujos reponen el suministro de agua subterránea.



**Figura 24: Elementos GAR en el río Llobregat y su delta (Martín-Alonso, 2016)**

propiciado la disminución de los niveles de agua subterránea y la intrusión marina. Durante las últimas décadas, se ha instalado una serie de proyectos para mejorar la sostenibilidad de este importante recurso. Estos proyectos incluyen escarificación del cauce del río de rutina en lugares específicos para fomentar la recarga, que se separa de los embalses (estanques), los pozos ARA y una barrera hidráulica del agua de mar.

Los embalses de recarga han sido construidos y son operados a lo largo del río Llobregat para recargar agua de río y efluentes tratados de la planta de tratamiento terciaria de aguas residuales (PTAR). El agua de río es tratada mediante embalses de sedimentación para reducir la obstrucción potencial y la calidad del agua es monitoreada respecto a turbidez, conductividad y amoníaco. La recarga al acuífero estimada proveniente de estos embalses es de 6 M a 10 Millones m<sup>3</sup>/año.

Los pozos ARA también se utilizan para inyectar, almacenar y extraer agua potable previamente. La fuente de agua se deriva de la etapa intermedia de una planta de tratamiento de agua potable después de la filtración de arena. Las tasas de inyección son 2,2 m<sup>3</sup>/min y las tasas de extracción son de 13,2 m<sup>3</sup>/min. Se han realizado varios estudios para evaluar el impacto de la utilización de agua parcialmente tratada incluida la obstrucción potencial en las rejillas de pozos y la calidad del agua del acuífero.

La inyección de pozos profundos también es utilizada en el acuífero de Llobregat como esfuerzo para controlar la intrusión marina. El agua residual tratada con tratamientos terciarios de la PTAR se somete a más de estos en la barrera hidráulica antes de realizar la inyección mediante ósmosis inversa

(reducir TDS), desinfección ultravioleta y ultrafiltración (reducir el ensuciamiento y la obstrucción potencial). Después del tratamiento se inyectan los efluentes utilizando una formación lineal de 15 pozos aproximadamente 1 km hacia el interior del mar y paralela a la costa. Las tasas de inyección de 2.400 a 10.000 m<sup>3</sup>/día se utilizaron durante las pruebas del sistema de barrera. Esta agua es bombeada y utilizada para el abastecimiento doméstico e industrial. El proyecto ha generado elevaciones de agua subterránea y reducciones en la salinidad. El tratamiento ha minimizado la obstrucción de los pozos de inyección (DEMEAU, 2014).

## 6.8 LOS ÁNGELES, CALIFORNIA: DISTRITO DE REPOSICIÓN DE AGUA (DRA)

El DRA del sur de California tiene muchos programas en curso destinados a aumentar la sostenibilidad de recursos de agua dulce en su región de 420 millas cuadradas de sur del condado de Los Ángeles. Los 43 municipios utilizan unos 310 M m<sup>3</sup>/año en su área de servicio. El DRA trabaja actualmente en su programa Water Independence Now (WIN) para volverse independiente del agua importada para las operaciones de recarga.



**Figura 25: Planta de tratamiento terciario de aguas residuales, embalse de recarga y estructura hidráulica Inlet**

(Water Replenishment District of Southern California, 2016)

Los proyectos DRA abarcan desde el tratamiento avanzado de agua reciclada para la inyección en las barreras de intrusión de agua salina hasta la reposición de aguas subterráneas con aguas pluviales en varias zonas de grandes embalses (recarga).

La DRA dispone de datos bien establecidos, ingeniería, conservación del agua y programas de alcance comunitario. Se han desarrollado modelos informáticos de aguas subterráneas para probar sistemáticamente cómo los cambios en las operaciones de reposición, el clima, la demanda u otros factores afectan sus operaciones.

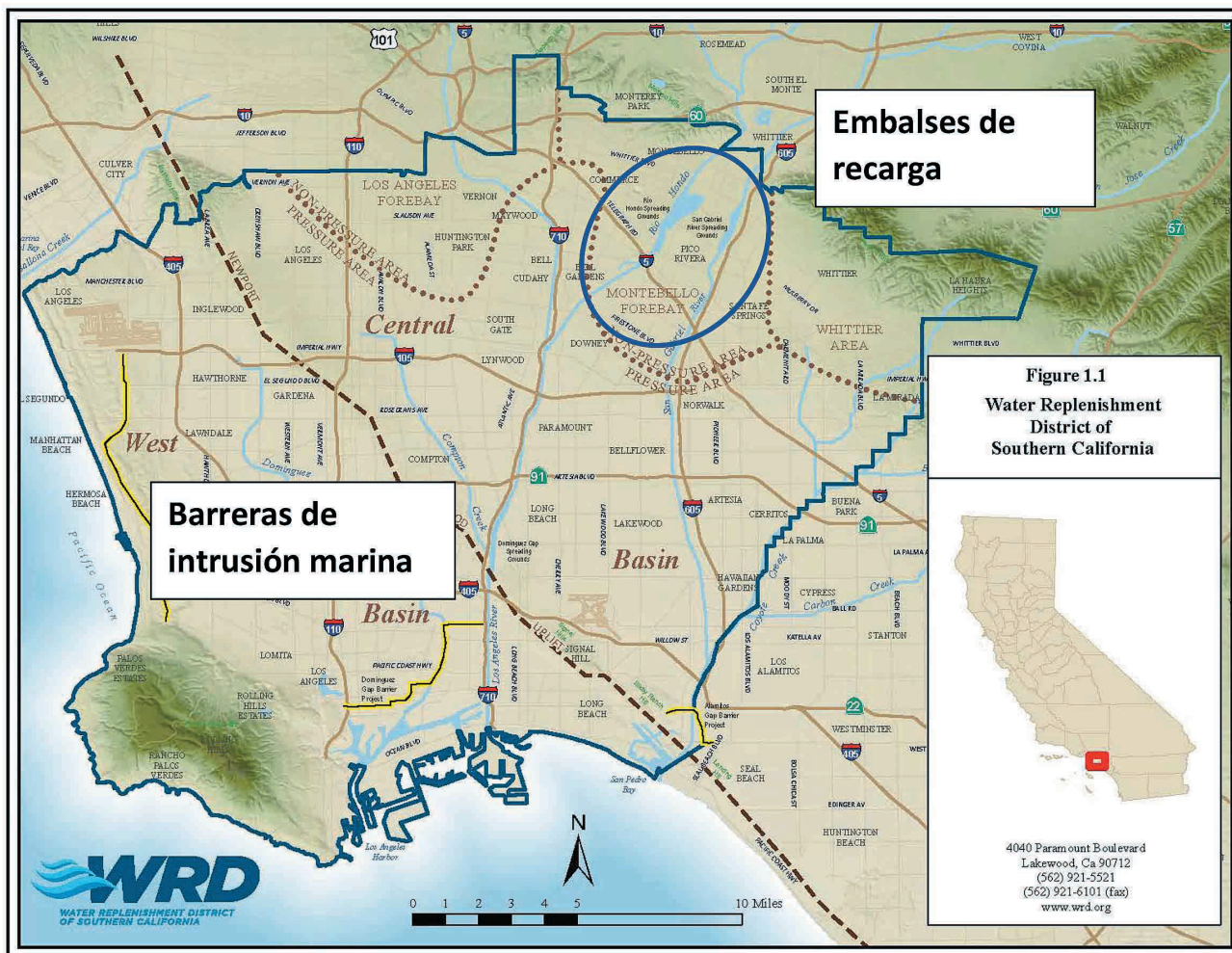


Figura 26: Área de servicio de distrito de reposición de agua y características GRA (Water Replenishment District of Southern California, 2016)

## 6.9 PUERTO RICO: GRA DEL ACUÍFERO DE SALINAS

El acuífero de Salinas en el sur de Puerto Rico ha sido intensamente explotado para uso doméstico y agrícola durante muchos años de sobregiro de las aguas subterráneas, intrusión marina y el impacto a los receptores ambientales sensibles cercanos. Una sequía en el año 2015 exacerbó las condiciones.



El Gobierno Federal de los Estados Unidos bajo FEMA subvenciona un proyecto exitoso<sup>14</sup> de GRA para recargar el acuífero regulando las descargas desde un depósito cercano y promoviendo la recarga a través de canales de riego existentes. Los coordinadores del proyecto involucran a las partes interesadas locales para desarrollar e implementar el proyecto. El costo del proyecto efectivamente utilizó infraestructura de agua existente y requirió de una mínima construcción nueva.

## 6.10 ESTADOS UNIDOS, INGLATERRA, AUSTRALIA, INDIA Y ÁFRICA: LECCIONES APRENDIDAS EN GRA

La Universidad de Florida y el U.S. Army Corps of Engineers estudiaron un total de 50 proyectos GRA implementados en Estados Unidos, Inglaterra, Australia, India y África, con el objeto de recopilar información sobre el desempeño de diferentes aplicaciones de la tecnología de GRA (Brown, 2006). Los proyectos estudiados incluyen aplicaciones de GRA en 30 sitios de agua salobre (agua de inyección en un acuífero salobre) y 20 sitios de agua dulce (agua de inyección en un acuífero de agua dulce). De los 30 sitios salobres estudiados, 21 estaban en Florida. Los acuíferos receptores abarcan desde roca fracturada (basalto, tiza y piedra caliza) hasta areniscas, arenas y gravas.

Los autores extrajeron cuatro principales lecciones aprendidas a partir de la revisión de los 50 proyectos individuales, las que se resumen a continuación:

**Obstrucción de pozos:** La obstrucción de pozos fue identificada en el 65 % de los sitios de agua dulce. La obstrucción puede ser mejorada por contralavado o “backflushing” (bombeo), del pozo para retirar partículas de materia. Los acuíferos de arena pueden requerir de frecuentes (casi diarios) contralavados, mientras que los acuíferos fracturados o de piedra caliza pueden requerir de enjuague posterior poco frecuente. La entrada de aire puede tapar el pozo. El aire puede introducirse en el acuífero si cae agua libremente en el pozo o si los gases disueltos son liberados debido

---

14 Un video preparado por FEMA ofrece una visión general del proyecto desde el inicio de su ejecución. El video puede encontrarse en: <https://www.youtube.com/watch?v=EpmMXbuv2Go>.

a cambios de presión y temperatura del acuífero receptor. La extracción de aire del acuífero puede ser difícil. La necesidad de extraer el aire por lo general se puede identificar al monitorearse de cerca la presión de inyección (la presión de inyección aumenta con la obstrucción) o disminución de la capacidad específica del pozo (tasas de inyección divididas por la elevación del agua en el pozo de inyección).

**Mezcla de agua de diversa calidad:** La inyección de agua oxigenada en un acuífero de oxígeno agotado (ocurrencia común) o con agua de calidad significativamente diferente puede crear reacciones con la matriz del acuífero que pueden liberar metales como arsénico, hierro y manganeso en el agua. Al respecto, debe hacerse un perfil químico del agua inyectada y recibida para evaluar el impacto potencial que tendría la inyección en la calidad del agua de las aguas mixtas.

**Interferencia de pozos y pozos hídricos:** Las interferencias de pozos ocurren cuando hay pozos múltiples que están ubicados en la misma proximidad general. La inyección o recuperación de un pozo puede afectar el rendimiento de otros en el campo de pozos. Del mismo modo, si existen otros usuarios de las aguas subterráneas en la zona, el agua inyectada puede ser arrastrada hacia pozos GRA que no son parte del proyecto. A veces la inyección puede generar incrementos no deseados en la elevación de las aguas subterráneas en el área y producir impactos potenciales a terceros. Los pozos de recuperación de proyectos de alto volumen GRA pueden tener también efectos no previstos en otros usuarios de aguas subterráneas reduciendo sus niveles de agua y provocando el aumento de sus costos de bombeos lo que reduce sus rendimientos, o peor aún, provoca que sus pozos se sequen. La colocación y el monitoreo de pozos de observación pueden ser un indicador de alerta temprana de las consecuencias no previstas de la operación de ARA.

**Desarrollar e implementar un robusto programa de monitoreo GRA:** Se recomienda prever suficientes puntos de monitoreo en el subsuelo y en las instalaciones en la superficie para que, a la brevedad posible, se puedan identificar y diagnosticar con precisión los problemas. También, es conveniente desarrollar un programa de monitoreo por medio del cual se verifiquen rutinariamente los componentes del sistema respecto a los niveles de presión y de los químicos indicadores de posibles problemas.

# 7. DOCUMENTOS GUÍA DE ARA/GRA

Se tienen disponibles varios documentos de pautas clave que han sido desarrollados en Estados Unidos, Europa y Australia, que pueden ser recursos útiles a la hora de evaluar o implementar proyectos de ARA/GRA. Si bien esta no es una lista exhaustiva, la consulta de los documentos brindará una base para el desarrollador o analista del proyecto.

Pautas estándar para la recarga artificial de agua subterránea (Sociedad Americana de Ingenieros Civiles, 2001)

Las Pautas Estándares para la Recarga Artificial de Agua Subterránea de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE) fueron preparadas con el objeto de ofrecer una descripción completa de los pasos individuales necesarios para planificar, desarrollar, diseñar, operar y mantener proyectos los ARA/GRA. Estas incluyen una discusión de los temas regulatorios y sobre los derechos de agua, restricciones institucionales típicas, consideraciones económicas y el análisis financiero. La guía fue desarrollada por un panel de expertos reconocidos por su experiencia en la gestión de la recarga de acuíferos.

Este sólido conjunto de directrices puede aplicarse a proyectos de cualquier tamaño y describe los procedimientos típicos de la investigación y pruebas que pueden aplicarse a la mayoría de los aspectos del proyecto ARA/GRA. Se ofrece una discusión detallada de los problemas potenciales que generalmente se presentan al implementar proyectos ARA/GRA junto con una descripción de las posibles soluciones. El documento ofrece la definición de términos y una lista de los métodos de la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM) para los procedimientos de pruebas de campo (por ejemplo, instalación de pozos, pruebas de pozos y pruebas de acuíferos), técnicas de análisis de datos y análisis de modelos de aguas subterráneas.

Código de prácticas para el almacenamiento y recuperación de acuíferos (Autoridad de Protección Ambiental, 2004)

El Código de Prácticas para ARA fue desarrollado por la Agencia Australiana de Protección Ambiental (EPA) específicamente para pozos ARA. En él se presenta una breve descripción de los

problemas clave que deben abordarse en los sistemas ARA y una lista de las mejores prácticas para garantizar que el sistema ARA sea sostenible. Aunque está preparado principalmente para la implementación de ARA en Australia, el documento es pertinente para las aplicaciones de ARA en otros países.

Estrategias para la recarga de acuíferos administrados (ARA) en áreas semiáridas (UNESCO/ Asociación Internacional de Hidrogeólogos, 2005)

Este manual ha sido preparado para resumir la experiencia práctica y las lecciones aprendidas relacionadas con la implementación de las estrategias ARA/GRA. En él se presenta una descripción de los sistemas GRA típicos y un resumen de las mejores prácticas que deben considerarse al implementar los sistemas GRA.

Recarga administrada de acuíferos (GRA): Técnicas prácticas para el Caribe (GWP, 2010)

Este documento presenta un resumen de las aplicaciones típicas de GRA (incluyendo ARA), consideraciones para la selección de la GRA, mejores prácticas y una guía estratégica, y ha sido preparado teniendo en cuenta la región del Caribe. Las aplicaciones de almacenamiento de acuíferos se centraron en Barbuda y Antigua en las Islas de Sotavento.

D12.2 Requisitos previos y criterios de diseño para los nuevos sistemas GRA cumpliendo con la DMA y la DMP de la UE (incluido el tratamiento previo) (DEMEAU, 2014)

Este estudio e informe fueron financiados por la Comisión Europea y ofrecen un detallado examen de los requisitos hidrogeológicos para recarga e inyección de la superficie, de los procedimientos para la investigación de campo y una descripción general de las opciones de pretratamiento del agua de recarga. Se presentan también varias tablas que resumen los criterios para la toma de decisiones, en particular, para la viabilidad hidrogeológica y las opciones de tratamiento previo del agua de recarga.

Evaluación de la Metodología para Presentar y Evaluar Proyectos de Recarga de Acuíferos Artificiales (AMPHOS 21 Consulting, Chile, 2014)

El informe fue preparado por AMPHOS 21 en nombre de la Dirección General de Aguas de Chile, para elaborar un documento de orientación y presentar, evaluar y analizar proyectos de recarga de acuíferos artificiales en Chile. El alcance del trabajo incluyó una

revisión bibliográfica de proyectos de recarga de acuíferos locales e internacionales, una evaluación técnica y legal del marco de trabajo para la recarga artificial en Chile, el desarrollo de la guía y la aplicación de la metodología propuesta en tres cuencas y validar el enfoque sugerido.

La guía fue validada al aplicarse a las cuencas de Choapa, Quiligrá y Aconcagua. Los resultados de la validación indican que existen las mismas oportunidades de mejora en las tres cuencas: (i) la demanda y la disponibilidad de agua no se han calculado; (ii) no se evaluó el impacto en las aguas subterráneas, las aguas superficiales y los ecosistemas; (iii) el desarrollo del modelo conceptual es incompleto; (iv) la fase de evaluación y diseño no incluye una evaluación económica; y (v) no hay planes de monitoreo centinela de contingencia relacionados con posibles escenarios de contaminación.

Manejo conjunto y almacenamiento de agua subterránea (Departamento de Recursos Hídricos de California, 2016)

Este documento se centra en los proyectos GRA y describe las consideraciones de viabilidad, desarrollo e implementación del proyecto. Si bien el informe se centra en aplicaciones en California, donde se han instalado y operado cientos de sistemas ARA/GRA, las herramientas y técnicas descritas están relacionadas con los proyectos en el Caribe.

Manual de planificación y desarrollo territorial para el desarrollo de bajo impacto (DBI) (Ciudad de Los Ángeles, 2016)

Esta publicación de la Ciudad de Los Ángeles ofrece una revisión de las tecnologías DBI y analiza las mejores prácticas de gestión. El manual se preparó como parte de la implementación del programa de gestión de aguas pluviales de la ciudad en su totalidad.

## 8. CONCLUSIONES

Las tecnologías ARA/GRA son una parte integral de cualquier programa de GIRH dirigido a mejorar la seguridad del abastecimiento y la sostenibilidad del agua en el que los recursos de aguas subterráneas son una parte existente o propuesta del abastecimiento de agua. Se tiene una buena comprensión de las tecnologías, además son ampliamente aplicadas y normalmente son rentables en comparación con otras fuentes de agua como la construcción de embalses de agua superficial o la desalinización de agua marina. Con el seguimiento adecuado y la gestión de operaciones, los sistemas ARA/GRA pueden funcionar exitosamente durante muchos años. Si bien ARA/GRA no puede ofrecer la única solución a la preocupante escasez de los suministros de agua, sí puede ser una parte importante de la solución.

La correcta aplicación de ARA/GRA requiere de un entorno físico adecuado que disponga de un esquema de ARA/GRA diseñado para adaptarse a las condiciones locales. El esquema incluye un suministro de agua superficial o, en el caso de pozos ARA, agua potable, un adecuado entorno hidrogeológico e instalaciones para la conducción del agua. Se requiere también del apoyo y diseño ingenieril para construir la infraestructura necesaria para recargar, almacenar, recuperar y transmitir el agua subterránea extraída. Por último, la operación y la implementación exitosa requieren del control, supervisión y vigilancia locales apropiadas y que estén acompañadas de un sólido programa de alcance a las partes interesadas, que fomente el apoyo de la comunidad.

Los beneficios directos de la ejecución de los proyectos ARA/GRA en el Caribe pueden incluir la reducción de la dependencia de las fuentes de agua más caras como la desalinización del agua marina, la reducción al mínimo la intrusión de agua de mar, la cobertura de abastecimiento de agua contra desastres naturales, la utilización de los existentes depósitos de almacenamiento del subsuelo, más la producción agrícola sostenible y la calidad del agua superficial mejorada. Los beneficios indirectos son el mejoramiento de la salud pública y el crecimiento económico.

La región del Caribe ofrece oportunidades para implementar proyectos ARA/GRA de diversas escalas dirigidos a mejorar la seguridad del abastecimiento del agua. Entre los proyectos exitosos de la región está el proyecto AGSR, apoyado por el BID en Jamaica, y el acuífero de Salinas, apoyado por FEMA en Puerto Rico. Ambos proyectos fueron construidos sobre infraestructura de abastecimiento de agua, son innovadores en su enfoque y han dado por resultado una mejora general en la seguridad del suministro de agua. Es razonable suponer que los nuevos proyectos pueden aplicarse con éxito en muchos otros lugares de la región.

Si bien los beneficios de ARA/GRA pueden ser sustanciales, y es probable que haya múltiples lugares en donde se pueden llevar a la práctica estas tecnologías, los proyectos no pueden aplicarse como si fueran un patrón. La situación geológica, social y económica de una región tan diversa como el Caribe exige que los proyectos sean adaptados para acomodar las variaciones regionales y locales en cuanto a condiciones geológicas, disponibilidad de abastecimiento de agua de recarga, infraestructura, controles institucionales y la economía. Se suministra un instrumento de trabajo para la toma de decisiones que ofrece paso a paso un marco para la evaluación de posibles proyectos con el propósito de ayudar a identificar a aquellos que tienen el mayor potencial de éxito en su implementación. Este instrumento se basa en las características fundamentales del proyecto tales como la ubicación, el diseño y la aplicación, a la vez que se ofrecen salidas al proyecto en situaciones donde la implementación no es factible.

Los impactos del cambio climático están alterando fundamentalmente la seguridad del abastecimiento del agua del Caribe. ARA/GRA ofrece un conjunto de instrumentos de trabajo que pueden utilizarse para ayudar a enfrentar los desafíos que encara la región siempre en la medida en que se acomoden a las condiciones locales.

# REFERENCIAS

Amphos 21 Consulting Chile Ltda, 2014, Diagnóstico de Metodología Para La Presentación y Análisis de Proyectos de Recarga Artificial de Acuíferos, diciembre.

AQUASTAT, 2015, Food and Agricultural Organization of the United Nations <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/index.stm>

ASCE, 2001, Standard Guidelines for Artificial Recharge of Ground Water, EWRI/ASCE 34-01.

Banchard, A.M., Roy, S.B., Stern, N., Choperena, J., Cameron, D., Horwath, W.R., 2016, On-Farm flood capture could reduce groundwater overdraft in Kings River Basin, California Agriculture, Vol 70, No. 4.

Bisson R.A., Hoag R.B., Ingari J.C., Maharaj U.S., Jadoo L., 2001, Megawatersheds groundwater assessment and recharge calibration on the Island of Tobago, W.I.: A comparison of results using megawatersheds versus traditional methods of groundwater assessment, Proceedings: CWWA 10th Annual Conference & Exhibition October. <https://www.researchgate.net/publication/286930425/download>

Bonilla Valverde J. P., et al, Inventory of managed aquifer recharge schemes in Latin America and the Caribbean, 2018, Sustainable Water Resources Management, 4, 163-178, 15 February

Bower, H., 2002, Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering, Hydrogeology Journal, January 26

Brown, C.J., et al, 2006, Lessons learned from a review of 50 ARA projects from the United States, England, Australia, India and Africa, Paper 68  
[http://opensiuc.lib.siu.edu/ucowrconfs\\_2006/68](http://opensiuc.lib.siu.edu/ucowrconfs_2006/68)

Calle A., GRachall M., Eby C., and Bolai J., 2017, Addressing water security challenges in the Caribbean Small Island Developing States to increase against climate change threats, International Conference on Sustainable Development, New York, 18-20 September.



California Department of Water Resources, 2016, Conjunctive Management and Groundwater Storage, July 29.

California Department of Water Resources, 2018, Flood-GRA, Using flood water for managed aquifer recharge to support sustainable water resources, June.

Cashman, A., 2014, Water security and services in the Caribbean, *Water*, 6, 1187-1203.

Chase, V., 2008, Water Forum of the Americas, Report of the Caribbean Sub-Region, September.

Choi J., Skibniewski M., Shim Y-G., 2018, Economics of alternative resources with an emphasis on aquifer storage and recovery, *Water Science & Technology: Water Supply*, 18 February.

Christian-Smith, et. al., 2010, California farm water success stories, Pacific Institute, March.

City of Los Angeles, 2016, Planning and land development handbook for low impact development (LID), 5th Edition, May 9.

City of Tulatin, 2018, <https://www.tualatinoregon.gov/publicworks/source-water-information>

Cormier C.A., Ingari J.C., Hoag R.B., 2000, Exploration and pumping test results for a high-yield crystalline bedrock well in Tobago, West Indies, Proceedings: CWWA, 9th Annual Conference, October.

Edwards E. C., Harter T., Fogg G. E., Washburn B., Hamad H., Assessing the effectiveness of drywells as tools for stormwater management and aquifer recharge and their groundwater contamination potential, *Journal of Hydrology*, June 1.

Fakhreddine, S., DittGRA, J., Phipps, D, Dadakis, J., Fendorf, S., 2015, Geochemical triggers of arsenic mobilization during managed aquifer recharge, *ES&T*, 49, 7802-7809.

FEMA, 2015, Climate resilient mitigation activities – aquifer storage and recovery; <https://www.fema.gov/media-library/assets/videos/160141>

Global Water Partnership and Caribbean Water and Wastewater Association, 2012, Press Release – 8th High Level Session Ministerial Forum, 10 October.

GWP-C (2017). Caribbean Regional Framework for Investment in Water Security and Climate Resilient Development. In partnership with the Caribbean Community Climate Change Centre (CCCCC).

Accessed online at <https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-c-files/caribbean-regional-framework-for-investment-in-water-security-and-climate-resilient-development.pdf>

GWP, 2010, Managed aquifer recharge (GRA): practical techniques for the Caribbean, CARICOM, May

Hartog, N., Stuyfzand, P.J.; 2017, Water Quality Considerations on the Rise as the Use of Managed Aquifer Recharge Systems Widens, Water, 22 October.

Herndon, R., & GRAkus, M., 2014, Large-Scale Aquifer Replenishment and Seawater Intrusion Control Using Recycled Water in Southern California. Boletín Geológico y Minero, 125 (2), 143-155.

Humberto, H.A.M., Raul, C.C., Lorenzo, V.V., Jorge, R-H., 2017, Aquifer recharge with treated municipal wastewater: long-term experience at San Luis Colorado, Sonora, Sustainable Water Resource Management, 4:251-260, 11 October.

Maliva R., Missimer T.; 2012, Arid lands water evaluation and management, Springer.

Maliva, 2014, Economics of Managed aquifer recharge, Water, 6, 1257-1279.

Martion-Alonso, J., 2016, Artificial recharge systems applied in the Low Llobregat aquifers (Barcelona, Spain), ISMAR9, Mexico DF, June.

Moglia, M., Kinsman, D. and Maheepala, S., 2012, Multi-criteria decision assessment methods to identify total water cycle management strategies, Urban Water Security Alliance, Technical Report No. 101, CSIRO, December.

NASA, 2005, The Impact of Climate Change on Natural Disasters, March 30

NGWA, 2014, Best suggested practices for aquifer storage and recovery, July 16.

New York Times, 2016, Storm Water, Long a Nuisance, May be a Parched California's Salvation, 19 February.

Orange County Water District, 2015, Groundwater management plan – 2015 update, June 17

Orange County Water District, 2016, Newsletter, September

Paso Robles Daily News, 2014, City Wins Green Innovation award for 21st St., December 9

Pyne, R. D., 2014, Aquifer storage recovery: an ASR solution to saltwater intrusion at Hilton Head Island, South Carolina, USA.

Reese, R. S., USGS, 2004, Review of aquifer storage and recovery in the Floridian Aquifer System of Southern Florida, November.

Ross, A., Hasnain, S., 2018, Factors affecting the cost of managed aquifer recharge (MAR) schemes, Sustainable Water Resources Management, No. 4, pp. 179-190.

Safege Consortium, 2015, Overseas Countries and Territories: Environmental Profiles, Final Report, Part 2 – Detailed Report, Section A – Caribbean Region, January.

Scalley T. H., 2012, Freshwater resources in the insular Caribbean: an environmental perspective, Caribbean Studies, December, Vol. 40, No.2, pp 63 – 93.

Scholten, L., Maurer, M., Lienert, J., 2017, Comparing multi-criteria decision analysis and integrated assessment to support long-term water supply planning, PLoS One 12(5): e0176663, May 8.

Talbot, D., 2015, Megascale Desalination, MIT Technology Review, February 18.

Taylor, M. A., L. A., Clarke, A. Centella, A Benzanilla, T. S. Stephenson, J. J. Jones, J. D. Campbell, A Vichot, J. Charlery, 2018, Future Caribbean climate in a world of rising temperatures, the 1.5 vs. 2.0 Dilemma, Journal of Climate, Vol. 31, 1 April, pp 2906-2927.

Texas Water Development Board, 2015, Technical Note 15-04, Aquifer Storage and Recovery in Texas: 2015.

The Los Angeles and San Gabriel Rivers Watershed Council, 2008, Los Angeles Basin Water Augmentation Study, Phase II Monitoring Report Update, August.

UNESCO-International Association of Hydrogeologists, 2005, Strategies for Managed Aquifer Recharge (MAR) in Semi-Arid Areas, United Nations, International Decade for Action 'Water for Life' 2005-2015. <http://www.un.org/waterforlifedecade/iwrm.shtml>

US EPA, 2017, Integrated Planning: Characterizing the value of water to inform decision-making, EPA 830-R-17-001, August.

USGS, 2010, Simulation of groundwater mounding beneath hypothetical stormwater infiltration basins, G. B. Carleton, SIR 2010-5102.

USGS, 2011, Virgin Islands Water Resources Institute, Annual Technical Report.

# APÉNDICE A: RESUMEN DE LOS SUMINISTROS DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LA REGIÓN DEL CARIBE

<p><i>Anguilla</i></p>	<p>La escasez de agua es significativa en Anguilla y para su suministro de agua la isla depende en gran medida de la lluvia y el almacenamiento de agua. El agua subterránea es generalmente salobre y no apta para beber. Además, el rendimiento del agua subterránea ha sido considerado insuficiente para satisfacer las necesidades a largo plazo de la isla.</p> <p>Históricamente, una capa delgada de agua subterránea fresca sobre una zona de agua salada más pesada. El agua subterránea fue producida por el Departamento de Aguas de Anguilla a partir de unos 10 pozos a una tasa de aproximadamente 1.000 m<sup>3</sup>/día (1993). En 2010 se construyó una planta de desalinización y posteriormente se retiró. Varias compañías han importado equipos de tratamiento de agua y venden esa agua al público. Los hoteles tienen sus propias instalaciones de tratamiento de agua (Safege, 2015).</p>
<p><i>Antigua and Barbuda</i></p>	<p>En Antigua, hay aproximadamente 43 pozos activos. La isla tiene tres plantas / sistemas de desalinización con una capacidad total de desalinización de aproximadamente 7,1 millones de m<sup>3</sup>/año. La Autoridad de Servicios Públicos de Antigua (APUA) trata de depender de las aguas superficiales y subterráneas en la medida de lo posible, dada la naturaleza económica de su producción. Siendo una isla propensa a las sequías, a menudo es difícil depender de las aguas superficiales y subterráneas.</p> <p>En Barbuda, que cuenta con una población de menos de 2,000 personas, la mayor parte del agua suministrada a la población proviene de pozos poco profundos. En 2005, el agua obtenida de los pozos en el área de Palmetto Point era potable, pero se ha encontrado que otros pozos alrededor de la isla son salinos. APUA instaló una planta de ósmosis inversa (RO) en Barbuda que produce aproximadamente 113,6 m<sup>3</sup>/ día o 0,041 millones de m<sup>3</sup>/año para satisfacer las necesidades de los residentes de Barbuda.</p>
<p><i>Aruba</i></p>	<p>El agua potable es provista por las plantas de desalinización. El agua subterránea tiende a ser salobre debido a la intrusión de agua de mar y el ambiente árido. Algunas aguas subterráneas son lo suficientemente frescas para fines agrícolas. Históricamente, los pozos se usaban para el suministro de agua potable, pero estos pozos se volvieron salinos con el paso del tiempo.</p>
<p><i>The Bahamas</i></p>	<p>Los recursos de agua dulce son finitos y vulnerables en las Bahamas. El agua dulce superficial es esencialmente inexistente. No hay ríos ni arroyos verdaderos en las islas debido al bajo relieve del país y a la alta permeabilidad de la piedra caliza que permite que el agua de lluvia se filtre rápidamente a la capa freática. Los recursos de agua dulce en el país están limitados a “lentes” de agua dulce muy frágiles en los acuíferos de caliza kársticos poco profundos. En 2000, el agua desalinizada total producida se estimó en 7,4 millones de m<sup>3</sup> (20.300 m<sup>3</sup>/día). (AQUASTAT, 2015).</p>
<p><i>Barbados</i></p>	<p>El suministro principal de agua proviene de aguas subterráneas y una cantidad creciente de instalaciones de desalación. Una planta desalinizadora de agua salobre es manejada por Autoridad del Agua de Barbados y suministra 40.000 m<sup>3</sup>/día (Chase, 2008). La fuente de agua subterránea en Barbados ha sido extensamente estudiada</p>

## Apéndice A: Resumen de los suministros de agua subterránea en la Región del Caribe.

<i>Bonaire</i>	El agua potable es suministrada por plantas de desalinización por medio de tuberías y camiones. El agua subterránea tiende a ser salobre debido a la intrusión marina y el ambiente árido (Safege, 2015).
<i>British Virgin Islands</i>	Las islas tienen limitado recursos naturales de agua dulce a excepción de unos pocos arroyos estacionales y fuentes en Tortola. Los hogares suelen recolectar agua de lluvia mediante cisternas individuales. El agua potable es suministrada por el Departamento de Agua y Alcantarillado del Ministerio de Comunicaciones y Obras Públicas y se obtiene de varias fuentes de aguas subterráneas y de una planta de desalinización. El abastecimiento de agua en todas las islas de Tortola y Jost Van Dyke es agua desalada, el 95% de abastecimiento de agua público de Virgen Gorda. (Safege, 2015).
<i>Cayman Islands</i>	Los recursos de agua dulce son escasos en las Islas Caimán y el agua manufacturada se produce a gran escala a partir de plantas de desalinización en Gran Caimán. Históricamente el agua dulce se ha obtenido de pozos y cisternas. Las pequeñas plantas de desalinización descentralizadas dan servicio a propiedades individuales y desarrollos en Cayman Brac (Safege, 2015).
<i>Cuba</i>	Aproximadamente el 52% de los recursos hídricos se utilizan para el riego. Los suministros de agua subterránea se producen a partir de acuíferos de piedra caliza y se tensionan, lo que resulta en una intrusión de agua de mar cerca de la costa. (Chase 2008)
<i>Curacao</i>	El agua potable es proporcionada por las plantas de desalinización. El agua subterránea tiende a ser salobre debido a la mezcla de agua de mar y el ambiente árido. La isla una vez tuvo acuíferos confiables, pero la urbanización ha reducido la infiltración. Una serie de represas, construidas por los holandeses alrededor de 1920 impidieron la escorrentía y permitieron la filtración en el suelo para promover los niveles de agua subterránea (Safege, 2015).
<i>Dominica</i>	En comparación con otros países de la región, Dominica tiene una gran cantidad de ríos y aguas superficiales. En 2004, la Compañía de Agua y Alcantarillado de Dominica produjo cerca de 16,4M m <sup>3</sup> de agua potable a partir de 47 tomas de río diferentes.
<i>República Dominicana</i>	En 2002, la demanda de agua doméstica de la República Dominicana fue de aproximadamente 1.800 M m <sup>3</sup> /año y la demanda industrial, de 8.000M m <sup>3</sup> /año. Alrededor del 67% del suministro de agua corresponde a los recursos de agua superficial siendo el 33% del agua subterránea. Los acuíferos de las aguas superficiales y las aguas subterráneas poco profundas están cada vez más contaminados con desechos biológicos y agrícolas cerca y río abajo de los centros de población. Debido a la creciente migración de la población a centros urbanos, como Santo Domingo y Santiago, la contaminación biológica ha ido en aumento. Muy pocas aguas residuales son tratadas antes de ser descargadas en arroyos, fosos sin recubrimiento y algunos pozos. En áreas con piedra caliza muy permeable, estos desechos se transportan a una gran distancia de la fuente en el acuífero subyacente.
<i>Grenada</i>	Los recursos hídricos se originan principalmente en un sistema de arroyos y ríos permanentes, pero hay algunas aguas subterráneas disponibles de las áreas de piedra caliza a lo largo de la costa noroeste. La mayor parte del agua superficial se origina en las áreas de alta precipitación en las cordilleras centrales de la isla de Granada. En general, hay 71 cuencas en la isla. Los ocho ríos principales tienen flujos perennes, aunque estos se reducen significativamente durante la estación seca. (AQUASTAT, 2015)
<i>Haiti</i>	Los recursos de agua subterránea de Haití son considerados abundantes, teniendo más de 2B m <sup>3</sup> /año de recursos renovables y 56B m <sup>3</sup> de reservas. Sin embargo, el agua subterránea no está disponible en todas partes y muchos acuíferos suelen ser de bajo rendimiento, discontinuos o están en riesgo de intrusión de agua salada, sobreexplotación, recarga reducida y contaminación.

## Apéndice A: Resumen de los suministros de agua subterránea en la Región del Caribe (cont.)

<i>Jamaica</i>	Jamaica bombea aproximadamente 26M m <sup>3</sup> de agua subterránea al año. Aproximadamente el 50% de la demanda doméstica y el 40% de la demanda de riego provienen de la extracción de agua subterránea.
<i>Montserrat</i>	La demanda de agua fresca de toda la isla se satisface por medio del abastecimiento de agua potable de seis manantiales productivos en los flancos del complejo volcánico extinto de Centre Hill. En 2013 la descarga combinada de seis manantiales de suministro superó los 4.300 m <sup>3</sup> /día (Montserrat Utilities Ltd.). El suministro a este ritmo cumple con facilidad con las exigencias actuales de la población, (~1.600 m <sup>3</sup> /día). Sin embargo, se espera que las tasas de consumo se eleven a medida que aumentan la población y la producción agrícola y durante un período de relativa quietud volcánica.
<i>Puerto Rico</i>	El agua subterránea es abundante en las costas de Puerto Rico y razonablemente se tiene buen conocimiento al respecto ya que ha sido objeto de numerosos estudios integrales. Los problemas por intrusiones marinas o por la contaminación industrial/sanitaria son numerosos en la isla. Actualmente se financia un proyecto ARA en el sur de Puerto Rico para compensar la escasez de suministros de agua subterránea debido a la sequía y la sobreexplotación.
<i>Saba &amp; St. Eustatius</i>	El agua potable es abastecida por medio de cisternas o pozos de agua subterránea. Hay algunas instalaciones de aguas superficiales.
<i>St. Maarten/ St. Martin</i>	El agua potable es provista por plantas de desalinización. El agua subterránea tiende a ser salobre debido a la mezcla de agua de mar y el ambiente árido.
<i>St. Kitts &amp; Nevis</i>	El suministro de agua subterránea principal proviene de un acuífero costero, y siete cuencas de agua subterránea. El rendimiento seguro estimado es aproximadamente de 38.000 m <sup>3</sup> /día. Cerca del 40% de su abastecimiento potable proviene del acuífero del Valle de Basseterre. Los acuíferos están siendo afectados por el aumento del nivel del mar (intrusión marina), la contaminación y la invasión urbana y a la larga se verán afectados negativamente por una mayor intrusión marina debido al cambio climático. (GWP, 2014).
<i>St. Lucia</i>	Los recursos de agua en Santa Lucía son extraídos para fines agrícolas y municipales. En 2007 el total de agua retirada se estimó en 42,9 millones de m <sup>3</sup> , de los cuales 12,5 millones de m <sup>3</sup> (29 por ciento) fueron extraídos por los municipios. El agua superficial representó el 100 por ciento de las extracciones totales. Los intentos para desarrollar las aguas subterráneas para el abastecimiento público han tenido muy poco éxito en la isla. Un estudio de 1998 sobre los suministros de agua mejorados para el sur de la isla llegó a la conclusión de que con esta fuente es poco probable hacer una contribución significativa excepto en pequeñas comunidades rurales aisladas. (AQUASTAT, 2015).
<i>St. Vincent &amp; Granadinas</i>	San Vicente tiene una abundancia de agua superficial de cuantiosos arroyos de los cuales se obtiene el suministro de agua. Las Granadinas utilizan la cosecha de lluvias y la desalinización de agua pluvial que producen unos 1.600 m <sup>3</sup> /día.
<i>Trinidad and Tobago</i>	En 2011, el retiro de agua total en el país se estimó en 383,2 millones m <sup>3</sup> de los cuales 237,6 M m <sup>3</sup> o el 62 por ciento para uso municipal, 128,9 M m <sup>3</sup> o 34 por ciento para el industrial uso y 16,7 M m <sup>3</sup> o 4 por ciento para el uso agrícola. De la retirada total, 228,4 M m <sup>3</sup> o 60 por ciento proviene de aguas superficiales, 107,8 M m <sup>3</sup> o 28 por ciento de aguas subterráneas y 47,0 M m <sup>3</sup> o el 12 por ciento de agua desalada. Tobago produce aproximadamente el 20% de su agua potable a partir de aguas subterráneas.

## Apéndice A: Resumen de los suministros de agua subterránea en la Región del Caribe (cont.)

<p><i>Turcas y Caicos</i></p>	<p>El agua es escasa en Turcas y Caicos, habiendo muy escasos recursos de agua dulce naturales. El agua potable proviene típicamente de la desaladora de ósmosis inversa de agua salobre subterránea en las islas pobladas de Providenciales y Cayo Sal; en tanto que, en las islas menos pobladas, muchas casas tienen cisternas de tamaño considerable para almacenar agua (lo que se ha prescrito por ley), y estas pueden ser recargadas ya sea mediante lluvia o suministros de agua transportados por pipas. Los recursos de agua no potable como el agua de mar y las aguas subterráneas salobres son utilizados también para usos no potables. El agua subterránea no se utiliza para un suministro de agua dulce en Grand Turca. Estudios previos descartan la posibilidad de esta fuente en Gran Turca y otras islas de las Caicos.</p>
<p><i>Islas Vírgenes de EE.UU.</i></p>	<p>Históricamente, la recolección de agua de lluvia ha sido una fuente principal de agua potable para los residentes de las Islas Vírgenes con alguna dependencia del agua subterránea. El suministro de agua superficial es prácticamente inexistente. La desalinización satisface la mayoría de las necesidades de agua de la población de alrededor de 115.000 personas y es la principal proveedora de agua para los limitados sistemas públicos de distribución de agua de las islas (USGS, 2011).</p>

**Apéndice A: Resumen de los suministros de agua subterránea en la Región del Caribe (cont.)**



# APÉNDICE B: AGUA EN US DÓLARES/METRO CÚBICO ENTREGADO.

Country/Island	Unit	To 1 USD	Domestic	Commercial	Source
Anguilla	XCD	2.70	3.91	11.62	<a href="http://gov.ai/water.php">http://gov.ai/water.php</a>
Antigua & Barbuda	XCD	2.70	2.05	4.89	<a href="http://www.apua.ag/">http://www.apua.ag/</a>
Aruba	AWG	1.79	2.54	5.33	<a href="https://www.webaruba.com/your-water-bill/water-rates">https://www.webaruba.com/your-water-bill/water-rates</a>
Bahamas	EUR	0.86	5.11	8.52	<a href="http://www.wsc.com.bs/Tariff.aspx">http://www.wsc.com.bs/Tariff.aspx</a>
Barbados	BDD	2.00	2.48	4.66	<a href="http://barbadoswaterauthority.com/?p=393">http://barbadoswaterauthority.com/?p=393</a>
Bonaire	USD	1.00	3.76	Not Available	<a href="https://www.webbonaire.com/wp-content/uploads/rates/WEB_Water_tarieven_NL_2018_01-03-18.pdf">https://www.webbonaire.com/wp-content/uploads/rates/WEB_Water_tarieven_NL_2018_01-03-18.pdf</a>
British Virgin Islands	USD	1.00	4.90	5.56	<a href="http://www.viwapa.vi/Customers/RatesFees/Water_Rate.aspx">http://www.viwapa.vi/Customers/RatesFees/Water_Rate.aspx</a>
Cayman Islands	KYD	0.83	5.39	6.47	<a href="http://www.waterauthority.ky/upimages/pagebox/WaterRatesRevJul2018_1531431139.pdf">http://www.waterauthority.ky/upimages/pagebox/WaterRatesRevJul2018_1531431139.pdf</a>
Cuba	CUP	25.50	0.04	1.00	(Scalley, 2012)
Curaçao	NAF	1.84	2.67	5.67	<a href="https://www.aqualectra.com/en/rates/">https://www.aqualectra.com/en/rates/</a>
Dominica	XCD	2.70	2.11	3.57	<a href="http://www.dowasco.dm/index.php/tariffs">http://www.dowasco.dm/index.php/tariffs</a>
Dominican Republic	DOP	50.08	1.67	1.85	(Scalley, 2012)
Jamaica	JMD	136.58	0.91	3.42	<a href="https://www.nwcjamaica.com/Rates">https://www.nwcjamaica.com/Rates</a>
Martinique	EUR	0.86	6.32	Not Available	<a href="http://www.observatoire-eau-martinique.fr/services-d-eau-potable-et-d-assainissement/prix-de-l-eau/prix-de-l-eau-martinique/commune/35?annee=2016">http://www.observatoire-eau-martinique.fr/services-d-eau-potable-et-d-assainissement/prix-de-l-eau/prix-de-l-eau-martinique/commune/35?annee=2016</a>
Montserrat	XCD	2.70	12.84	19.97	(Scalley, 2012)
Puerto Rico	USD	1.00	4.73	6.59	<a href="http://www.acueductospr.com/TARIFA/estructuratarifaria.html">http://www.acueductospr.com/TARIFA/estructuratarifaria.html</a>
Saba & St. Eustatius	ANG	1.84	5.55	14.16	(Scalley, 2012)
St Maarten / St Martin	ANG	1.84	5.55	14.22	(Scalley, 2012)
St. Kitts & Nevis	XCD	2.70	5.71	14.27	(Scalley, 2012)
St. Vincent & The Grenadines	XCD	2.70	6.34	11.62	<a href="https://habgroup.com/water">https://habgroup.com/water</a>
Trinidad & Tobago	TTD	6.74	11.01	22.02	(Scalley, 2012)
Turks and Caicos Islands	USD	1.00	4.02	Not Available	<a href="https://habgroup.com/water">https://habgroup.com/water</a>
US Virgin Islands	USD	1.00	4.90	5.56	<a href="http://www.viwapa.vi/Customers/RatesFees/Water_Rate.aspx">http://www.viwapa.vi/Customers/RatesFees/Water_Rate.aspx</a>

## Apéndice B: Agua en US dólares/Metro cúbico entregado

(Costos de 2018 excepto donde se indica)