

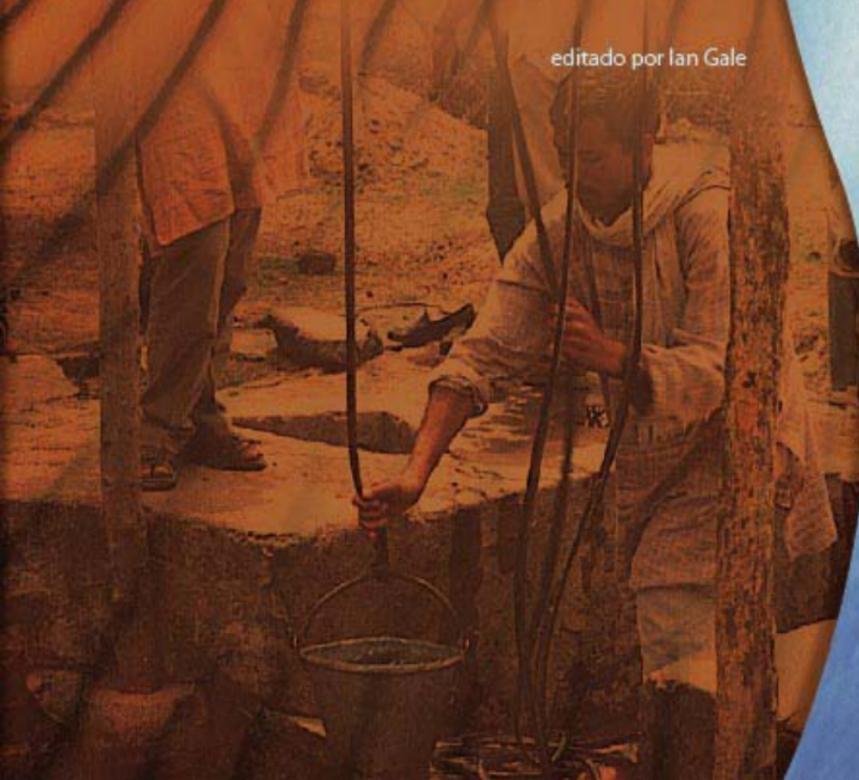


Estrategias

para la Gestión de Recarga de Acuíferos (GRA) en zonas Semiáridas
para la Gestión de Recarga de Acuíferos (GRA) en zonas Semiáridas
para la Gestión de Recarga de Acuíferos (GRA) en zonas Semiáridas

para la **Gestión de Recarga**
de Acuíferos (GRA)
en **zonas semiáridas**

editado por Ian Gale



ASOCIACIÓN INTERNACIONAL DE HIDRO- GEÓLOGOS, COMISIÓN EN GESTIÓN DE RECARGA DE ACUÍFEROS. AIH-GRA

La AIH-GRA se propone incrementar los recursos hídricos y mejorar la calidad del agua por vías apropiadas, ambientalmente sostenibles, técnicamente viables, económica y socialmente deseables. Para ello promoverá la creación y adopción de mejores prácticas de gestión de la recarga de acuíferos. Ello se logrará creando mayor conciencia sobre la GRA entre los miembros de la AIH, profesionales de disciplinas conexas y la comunidad, facilitando el intercambio internacional de información entre los miembros (por ejemplo a través de una página web y una lista de direcciones de correo electrónico), disseminando resultados de investigaciones y experiencias prácticas (conferencias y bases de datos de referencia), y emprendiendo proyectos y actividades conjuntas que sus miembros identifiquen como importantes.

Se han realizado simposios internacionales sobre recarga artificial de aguas subterráneas a intervalos de 3 a 4 años, aproximadamente, en Anaheim, California (1989), Orlando, Florida (1994), Ámsterdam, Países Bajos (1998), ISAR 4 en Adelaida, Australia (2002) y, el más reciente, ISMAR 5, en Berlín, Alemania (2005). Las actuaciones de los dos primeros simposios han sido publicados por la ASCE (www.asce.org) y las del tercero y el cuarto por AA Balkema Publishers (<http://balkema.nl> - ver en IAH). Los documentos del simposio de Berlín serán publicados por UNESCO-PHI. El próximo simposio se realizará, según lo programado, en noviembre de 2007, en Phoenix, Arizona, Estados Unidos de América.

Web: <http://www.iah.org/recharge/index.html>

Presidente: Peter.Dillon@csiro.au

Vicepresidente: i.gale@bgs.ac.uk

Lista de correo electrónico: Suscríbese gratuitamente desde la página web.

PROYECTO DEL PROGRAMA HIDROLÓGICO INTERNACIONAL (PHI) DE LA UNESCO SOBRE RECARGA ARTIFICIAL Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS EN ZONAS ÁRIDAS Y DE ESCASEZ DE AGUA (UNESCO-G-WADI)

Desde la década de los setenta del siglo pasado, el PHI de la UNESCO ha venido contribuyendo a hacer comprender mejor el papel crucial que cumplen los recursos hídricos subterráneos en respaldo del ecosistema y de la humanidad. En la Sexta Fase del PHI (2002-2007) se ha dado suma prioridad a la gestión integrada de los recursos hídricos en zonas áridas y semiáridas (proyectos MAR y G-WADI de la UNESCO). El PHI de la UNESCO viene dando respaldo a la Comisión de GRA de la AIH desde el año 2000.

El PHI es el programa intergubernamental de cooperación científica de la UNESCO en materia de hidrología y recursos hídricos. Un requisito previo del desarrollo sostenible es la adecuada gestión y protección de los recursos hídricos de nuestro planeta. La educación relativa al agua y el avance, la difusión y la aplicación del saber científico son los pilares de una gestión sostenible de los recursos hídricos.

Sólo un público informado y una fuerza de trabajo capacitada pueden introducir las nuevas modalidades de desarrollo y consumo necesarias para reorientar las políticas sobre recursos hídricos y dar forma a la globalización con un rostro humano sin impactos perjudiciales.

Los temas relativos a la gestión de los recursos hídricos son, por definición, complejos y multidisciplinarios. Requieren respuestas científicas, sociales, culturales y éticas elaboradas en base a lineamientos similares.

Uno de los objetivos de la UNESCO consiste en ayudar a los responsables de la gestión del agua a armar ese rompecabezas de complejos elementos. Esperamos que este folleto alentará a más y más personas, incluidos científicos, ONG, gobiernos y jóvenes expertos a unirse a los esfuerzos que realiza la UNESCO para reunir todas las piezas del rompecabezas.

Web: <http://www.unesco.org/water/>

Contacto:

María Concepción Donoso - UNESCO, PHI-LAC
phi@unesco.org.uy

Annukka Lipponen - UNESCO, PHI (G-WADI)
A.Lipponen@unesco.org

Estrategias para la Gestión de Recarga de Acuíferos (GRA) en Zonas Semiáridas

Agradecimientos

El Secretariado del Programa Hidrológico Internacional de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO/ PHI) desea expresar su profundo agradecimiento al Sr. Ian Gale, Hidrogeólogo del Servicio Geológico Británico, y al Sr. Peter Dillon, Hidrogeólogo Principal de la Organización de Investigación Científica e Industrial del Commonwealth (CSIRO) Tierra y Agua (Australia) por la elaboración de este documento. Esta publicación es una contribución a los Objetivos de Desarrollo del Milenio de la Organización de las Naciones Unidas, y es un ejemplo de los logros alcanzados por científicos de distintos países.

La UNESCO/PHI-LAC agradece a la Sra. Ofelia Tujchneider, Profesora Titular de Gestión de los Recursos Hídricos Subterráneos de la Universidad Nacional del Litoral de Argentina, por la revisión de la versión traducida de este documento.

Este documento fue posible gracias a la contribución del equipo de la UNESCO/PHI-LAC quien fue responsable por su traducción al castellano y su edición.

Las designaciones empleadas y la presentación del material en esta publicación no implican la expresión de ninguna opinión por parte de la UNESCO sobre el estatus legal de ningún país, territorio, ciudad o área o de sus autoridades, o acerca de la delimitación de sus fronteras.

Publicado en 2005 por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), 7 Place de Fontenoy, 75352 Paris 07 SP.
Presentación y edición por Eric Lodde

Índice

PREFACIO	1
OBJETIVOS DE LA GESTIÓN DE LA RECARGA DE ACUÍFEROS (GRA)	2
CALIDAD DE AGUA Y FUENTES DE AGUA DE RECARGA	5
AGUA SUPERFICIAL (EJEMPLOS B, H, I Y J)	6
ESCORRENTÍA DE TORMENTA (EJEMPLOS A, C, D Y G)	6
AGUA RECICLADA (EJEMPLO E).....	6
AGUA POTABLE (EJEMPLO F).....	7
ESCENARIOS HIDROGEOLÓGICOS Y CONTROL DE LA RECARGA	8
ALUVIÓN (EJEMPLOS B Y E)	8
ROCA DURA FRACTURADA (EJEMPLOS A, C, F Y H).....	8
ACUÍFEROS DE ARENISCA CONSOLIDADA.....	9
ACUÍFEROS DE CARBONATO (EJEMPLO D)	9
METODOLOGÍAS PARA LA GESTIÓN DE LA RECARGA DE ACUÍFEROS	10
MÉTODOS DE DISTRIBUCIÓN.....	11
MODIFICACIONES EN EL INTERIOR DEL CANAL	13
POZOS, TÚNELES Y PERFORACIONES.....	14
INFILTRACIÓN INDUCIDA EN LAS MÁRGENES DE LOS RÍOS	15
CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA.....	16
PROBLEMAS DE OBSTRUCCIÓN.....	17
ASPECTOS INSTITUCIONALES EN PROYECTOS DE GRA	18
CONCLUSIONES	21
EJEMPLOS DE GESTIÓN DE LA RECARGA DE ACUÍFEROS	22
A. GESTIÓN DE CUENCA EN RAJASTHAN, INDIA.	22
B. RECARGA DE ACUÍFERO UTILIZANDO UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN, KAFTARI, IRAN.....	22
C. REPRESAS PERFORADAS PARA RECARGAR ACUÍFEROS DESABASTECIDOS EN BALOCHISTÁN.....	23
D. ALMACENAMIENTO DE ESCORRENTÍA DE TORMENTA EN ACUÍFEROS SALOBRES MEDIANTE PERFORACIONES. DESARROLLO DE LA OFERTA PARA RIEGO, AUSTRALIA	24
E. RECARGA INTER-DUNAR EN ATLANTIS, SUDÁFRICA.	26
F. RECARGA DE CUARCITAS FRACTURADAS EN WINDHOEK, NAMIBIA	27
G. ALMACENAMIENTO DE AGUA SUBSUPERFICIAL EN KENYA.....	28
H. RECARGA DE ACUÍFEROS MEDIANTE CANALES DE RIEGO EN LA SIERRA NEVADA DEL SUR DE ESPAÑA.....	28
I. AUMENTO DE LA RECARGA DE AGUA SUBTERRÁNEA EN HUNGRÍA MEDIANTE FILTRACIÓN INDUCIDA EN LAS MÁRGENES DE LOS RÍOS PARA ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE	29
J. RECARGA DE ACUÍFEROS MEDIANTE POZOS DE INYECCIÓN EN MÉXICO	29
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS SELECCIONADAS	30

Muchas organizaciones internacionales, nacionales y locales consideran que el aumento de la recarga de acuíferos representa un gran potencial para incrementar la seguridad y la calidad de las fuentes de agua en lugares con escasez de este recurso. Para que estos proyectos sean exitosos, es necesario que estén bien planificados, diseñados y operados, y formen parte de estrategias más amplias de gestión de los recursos hídricos a nivel de cuenca.

Durante la reunión de organizaciones representativas llevada a cabo en UNESCO París durante los días 25 y 26 de abril de 2002, se acordó elaborar planes y actividades conjuntas y coordinar esfuerzos. Este documento forma parte de esta iniciativa y se espera que motive a otras personas y organizaciones a contribuir en futuras iniciativas para hacer sostenibles todos los nuevos proyectos de aumento de la recarga de acuíferos.

Este documento fue compilado por la Comisión de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH) para la Gestión de Recarga de Acuíferos (GRA) con el apoyo del Programa Hidrológico Internacional de UNESCO (PHI) y del Departamento Británico para el Desarrollo Internacional (DFID). Los Sres. Ian Gale (Servicio Geológico Británico) y Peter Dillon (CSIRO, Australia) han recopilado información de una amplia variedad de fuentes y contribuyentes, cuyo aporte es reconocido y agradecido.

El propósito de este documento es reunir experiencias sobre la aplicación de la GRA en regiones semiáridas con el fin de brindar una guía y algunos ejemplos de buenas prácticas alrededor del mundo. Asimismo, realiza una introspección en cuanto a la implementación y gestión de la recarga de acuíferos como parte de estrategias más amplias de gestión de los recursos hídricos y, junto con otras actividades UNESCO-AIH, ayudará a promover el trabajo en red, el intercambio de información y una mejor comprensión e implementación de planes GRA sostenibles.

Las acciones realizadas y planificadas incluyen:

- Folleto informativo, septiembre de 2002.
- Nota informativa para Kyoto 2003.
- Estrategias para la Gestión de la Recarga de Acuíferos (GRA) en Zonas Semiáridas (este documento).
- Taller "Evaluación del Aumento de la Recarga en Zonas Áridas y Semiáridas" (Adelaida, Australia, 20 al 22 de septiembre de 2002).
- Informe sobre el aumento de la recarga con agua reciclada (OMS, 2003).
- Informe de la Conferencia "Gestión de la Recarga de Acuíferos y Almacenamiento Subsuperficial" (IAH/ NHV/ UNESCO, 2003).
- Simposio "Manejo de los Riesgos Asociados a la Recarga de Acuíferos con Agua Reciclada" (IAHS/ WHO/ IAH, Sapporo, Japón, 7 y 8 de julio de 2003).
- Producir otras publicaciones y desarrollar programas regionales de capacitación (en proceso).
- Facilitar la recolección de información, monitoreo y evaluación de proyectos (en proceso).
- Facilitar el trabajo en red y la divulgación de información (www.iah.org/recharge).
- Contribución en talleres regionales de "Gestión de la Recarga de Acuíferos y Captación de Agua" (UNESCO-PHI/ ISESCO, Yazd, Irán, 27 de noviembre al 1 de diciembre de 2004), (UNESCO/ AIH, Hanoi, Vietnam. 15 al 17 de diciembre de 2004), (UNESCO-PHI/ PCRWR, Lahore, Pakistán, 25 abril al 2 mayo de 2005).
- Taller "Implementación de la Gestión de la Recarga de Acuíferos en Países en Desarrollo" (Berlín, Alemania, 11 de junio de 2005).
- UNESCO-GEF/ STAP Taller "Gestión de la Recarga de Acuíferos" (Oficina de UNESCO en Nueva Delhi, India, septiembre de 2005).



Objetivos de la Recarga de Acuíferos (GRA)

La Gestión de la Recarga de Acuíferos (GRA) tiene el potencial de ser una importante contribución a los Objetivos de Desarrollo del Milenio de las Naciones Unidas en lo que se refiere al abastecimiento de agua, especialmente en comunidades pequeñas de zonas áridas y semiáridas.

Los beneficios de usar agua subterránea han sido claramente demostrados. Los acuíferos proveen una reserva de agua, que si es utilizada y gestionada con eficiencia, puede jugar un rol vital en:

- La reducción de la pobreza/ estabilidad del sustento.
- La reducción del riesgo económico y de salud.
- El aumento de las cosechas agrícolas como resultado del riego seguro.
- El aumento de las retribuciones económicas.
- La equidad de la distribución de agua (mayores niveles de agua significan mayor acceso para todos).
- La reducción de la vulnerabilidad (a las sequías, a las variaciones en la precipitación).

La GRA y la captación de agua de lluvia contribuyen al mantenimiento de los beneficios mencionados, particularmente si son practicados como parte de una estrategia más amplia de gestión de los recursos hídricos que considere dimensiones de calidad y demanda, así como también aspectos de abastecimiento.

La GRA es frecuentemente la forma más económica de abastecimiento seguro de agua para pueblos y comunidades pequeñas. La extracción de agua subterránea ha sido limitada por la falta de comprensión de la hidrogeología y/ o de conocimiento sobre la GRA. Con actividades de capacitación y demostración, la GRA tiene el potencial de ser una importante contribución a los Objetivos de Desarrollo del Milenio de las Naciones Unidas en lo que se refiere al abastecimiento de agua, especialmente en comunidades pequeñas de zonas áridas y semiáridas.

La GRA implica el almacenamiento y tratamiento intencional de agua dentro de los acuíferos. El término "recarga artificial" también ha sido utilizado para describir este sistema, pero connotaciones adversas del término "artificial", en una sociedad donde cada vez es más frecuente la participación pública en la gestión de los recursos hídricos, sugieren que es tiempo de asignarle un nuevo nombre. La gestión de la recarga es intencional, a diferencia de los efectos de la eliminación de la cobertura vegetal, el riego, y la instalación de cañerías de agua donde los incrementos de la recarga son incidentales. La GRA también ha sido denominada recarga potenciada, banco de agua y almacenamiento subterráneo sostenible.

La GRA es una de las herramientas de gestión del agua subterránea; puede ser útil para restablecer la presión en acuíferos sobreexplotados, reducir la intrusión salina o fenómenos de subsidencia en suelos. Por sí sola no es la solución en situaciones de sobreexplotación de acuíferos, y podría únicamente aumentar las tasas de extracción. Sin embargo, puede tener un importante papel en el "paquete" de medidas de control de la extracción y restablecimiento del balance hídrico subterráneo. Asimismo, la GRA puede tener un rol central en la captación de agua y su reutilización. Muchas ciudades drenan el agua de tormenta hacia los acuíferos a través de cuencas de infiltración, sumideros o pozos y subsecuentemente reutilizando esta agua para consumo humano o riego.

En la medida que las comunidades, los encargados del ordenamiento territorial, ejecutores, empresas que brindan servicios públicos de agua y entidades reguladoras estén mejor informadas, serán capaces en mayor medida de encontrar soluciones innovadoras para problemas relacionados con los recursos hídricos, disminuir la huella hídrica y crear ciudades más sostenibles y atractivas. Los hidrogeólogos tienen un papel central en crear conciencia del rol que la GRA puede tener dentro del escenario geológico, y para guiar a las comunidades hacia las mejores soluciones.

La Gestión de la Recarga de Acuíferos y la captación de agua de lluvia han sido practicadas por siglos en regiones áridas y semiáridas del mundo, utilizando una amplia variedad de técnicas. Los métodos usados y la efectividad de estas intervenciones son limitados, no solamente por factores físicos, sino también sociales y económicos. Los conocimientos adquiridos a través de la experiencia, incluyendo los planes que han fracasado, son frecuentemente poco divulgados y la efectividad de los planes está en general pobremente evaluada. Este documento pretende unificar el conocimiento actual y proveer algunos ejemplos de buenas prácticas alrededor del mundo.

La siguiente lista es una revisión de los temas que deberían ser considerados cuando se evalúa la aplicabilidad de la GRA como parte de la estrategia de gestión del agua o al estimar la efectividad de los planes existentes. Mayor información y lineamientos se dan en el texto a través de los ejemplos de buenas prácticas que se presenta al final de este documento y en las referencias. Más información y materiales pueden ser encontrados en la base de búsqueda en www.iah.org/recharge y www.unesco.org/water/

¿CUÁLES SON LOS OBJETIVOS Y LOS BENEFICIOS DE LA GRA?

- Almacenar agua en acuíferos para su uso futuro
- Disminuir las fluctuaciones de la relación abastecimiento/demanda
- Compartir de una estrategia de gestión integrada de los recursos hídricos
- Para estabilizar o aumentar los niveles de agua subterránea donde existe sobreexplotación
- Es aplicable cuando no hay disponible un sitio adecuado de almacenamiento superficial del agua
- Disminuir las pérdidas de agua por evaporación y escorrentía
- Impedir la escorrentía de tormenta y la erosión del suelo
- Mejorar y disminuir las fluctuaciones de la calidad del agua
- Mantener los caudales ambientales en arroyos/ ríos
- Gestionar la intrusión salina o subsidencia de tierra
- Disposición/reutilización de agua residual/ de tormenta

¿CUÁLES SON LAS FUENTES DE AGUA DE RECARGA?

- Arroyos, ríos o canales permanentes
- Arroyos intermitentes, uadis, o agua de inundación
- Embalse de almacenamiento
- Agua de tormenta urbana
- Agua potable tratada
- Agua de lluvia recolectada de los techos
- Agua residual o reciclada

¿CÓMO PUEDE SER EVALUADO UN SITIO?

- Desarrollar un modelo conceptual hidrogeológico (comprensión)
- Comprender la hidrología (incluyendo la meteorología)
- Estimar el espacio disponible adicional para almacenar agua en el acuífero
- Cuantificar los componentes del balance hídrico
- Estimar la calidad del agua subterránea y del agua de recarga
- Utilizar modelos numéricos para evaluar el plan
- Evaluar los impactos de la estructura aguas abajo

¿CUÁLES SON LAS METODOLOGÍAS PARA RECARGA DE ACUIFEROS?

- Sistemas de distribución, estanques de infiltración, estanques inter-dunares
- Modificaciones en el lecho del río
- Pozos abiertos, túneles y zanjas
- Recarga por perforación
- Filtración inducida en las márgenes de los ríos
- Vaciamiento de los reservorios de los techos

¿CUÁLES SON LAS CONSECUENCIAS PARA LA CALIDAD DEL AGUA?

- Remoción de sólidos en suspensión, patógenos, metales pesados,

materia orgánica, nitratos, etc. del agua de recarga

- Dilución del agua subterránea de baja calidad
- Posible contaminación del agua subterránea de alta calidad
- Incremento en solutos por mezcla y disolución
- Reacciones geoquímicas adversas (As, F, Fe, Mn)

¿QUÉ ASPECTOS INSTITUCIONALES Y DE GESTIÓN NECESITAN SER CONSIDERADOS?

- Derechos de Agua
- Tenencia de tierra
- Aspectos legales y regulatorios
- ¿Quién paga y quién se beneficia?
- ¿Quién gestiona?
- ¿Comunidad/ ONG?
- ¿Gobierno local/ central/ empresas estatales?
- ¿Municipalidad/ compañías?
- ¿Sector privado/ doméstico/ empresas privadas?
- Gestión integrada (usuarios/ ONG/ gobierno)
- Uso conjunto
- Gestión de la demanda

¿CÓMO PUEDEN SER EVALUADOS LOS BENEFICIOS?

- Estabilización/aumento de los niveles piezométricos
- Aumento de los caudales de base (ambientales) en ríos
- Abatimiento de la intrusión salina
- Reducción de la subsidencia de tierra
- Fuente sostenible de agua subterránea
- Sostenibilidad del área irrigada
- Estabilización de la erosión del suelo
- Análisis positivo de la relación costo-beneficio
- Mejoramiento del nivel de vida

PROBLEMAS FRECUENTES QUE PUEDEN SURGIR

- Obstrucciones
- Conceptualización errónea de la geología y/o hidrología del lugar
- Mal diseño de las estructuras de infiltración/ perforaciones
- Poca estabilidad de la estructura de infiltración o perforación bajo condiciones operativas
- Mala operación o gestión del plan
- Mala calidad del agua subterránea (mezcla difusiva)
- Poca protección de la calidad del agua subterránea
- Pérdidas de agua infiltrada/ inyectada
- Problemas en la transición de escala de prueba a escala operacional
- Aceptabilidad política, social y religiosa
- Disponibilidad y divulgación de información y conocimiento
- Disponibilidad de capacidades y recursos humanos

La GRA es llevada a cabo a escala global por varias razones y, en su forma más simple, involucra restringir la escorrentía superficial y favorecer la infiltración hacia los acuíferos a través de la construcción de montículos de tierra en los campos. Un gran porcentaje de los planes se desarrollan para almacenar agua para su uso futuro, abastecimiento de agua para uso agrícola y para consumo humano. Otras razones para gestionar la recarga de acuíferos incluyen el control de la intrusión de agua salobre, el aumento del caudal base de los ríos, la reducción de la escorrentía y erosión del suelo, la amortiguación de las inundaciones reduciendo así su capacidad destructiva, y el control de la subsidencia de suelos.

La GRA no solamente provee un medio eficaz para almacenar el agua y permitir una mejor gestión de los recursos disponibles, sino que además puede impactar en la calidad de agua, usualmente de manera beneficiosa. Los cambios en la calidad del agua de recarga y del agua subterránea son producidos por la remoción física de materia particular, remoción biológica de materia orgánica y agentes patógenos, dilución o sustitución del agua subterránea de baja calidad e interacciones geoquímicas del agua de recarga con el agua subterránea oriunda del lugar y el material del acuífero.

La GRA debe ser considerada como un método para la gestión de los recursos hídricos junto con un amplio espectro de métodos, incluyendo el almacenamiento superficial, la explotación del agua subterránea, la gestión de la demanda, la reutilización del agua, etc.

GESTIÓN DE LA RECARGA DE ACUÍFEROS EN UNA ALDEA EN INDIA

La historia de la conservación y recarga de acuíferos se remonta a más de 3000 A.C. Desde entonces se han construido, tanques de percolación, represas de control y estanques de almacenamiento de agua en áreas áridas y semiáridas de la India rural para almacenar agua, recargando así, de manera indirecta, los cuerpos de agua subterráneos.

La explotación sin regulación del agua subterránea, particularmente de acuíferos de recarga en áreas áridas y semiáridas, ha llevado a un continuo decaimiento de los niveles de agua en un área de aproximadamente 340.000 km². Del total de la precipitación anual de 4.000 x 10⁹ m³ en India, alrededor de 1.240 x 10⁹ m³ se pierden anualmente por escorrentías superficiales. Se ha estimado que 870 x 10⁹ m³ de agua permanece disponible para recargar y que es viable tener reservas subsuperficiales de 200 x 10⁹ m³ de capacidad. Como parte de esta viabilidad, India planea tener una reserva subsuperficial de 36 x 10⁹ m³ al construir cerca de 230.000 estructuras de recarga pequeñas y simples como por ejemplo estanques de percolación, represas de control, diques subsuperficiales, etc.

REFERENCIA: Chadha, DK, 2003. Capítulo 3 de "Gestión de Recarga de Acuíferos y Almacenamiento Subsuperficial". Publicación NCC-IAH. N°4.

Temas sobre Calidad Del Agua y Fuentes de Agua de Recarga

La calidad del agua subterránea, natural o alterada por actividades antrópicas, y las interacciones con el agua de recarga necesitan ser comprendidas y gestionadas. Un prerrequisito para la recarga gestionada de acuíferos es la disponibilidad de una fuente de agua de recarga de calidad adecuada y en cantidad suficiente. Varias fuentes de agua pueden ser consideradas para uso como agua de recarga, específicamente agua superficial, agua de escorrentía, efluentes tratados, o agua potable.

La calidad natural del agua subterránea variará de un tipo de roca a otro y también entre acuíferos, dependiendo de los recorridos subterráneos del agua. El agua subterránea, cuando no es afectada por impactos antrópicos, es usualmente considerada de excelente calidad desde las perspectivas química, física y biológica. Sin embargo, el agua subterránea puede contener concentraciones naturales de hierro, manganeso, arsénico, boro, fluoruro, sales, etc., que la hacen inaceptable para agua potable o para otros usos. La alta calidad del agua subterránea resulta del filtrado natural y del "tratamiento" microbiológico que sufre el agua de lluvia y el agua de los ríos mientras se percola a través del suelo hacia el acuífero, donde queda protegida, en mayor o menor medida, de la polución antropogénica a la que se ve expuesta el agua superficial.

La calidad natural del agua subterránea puede ser alterada como consecuencia de una amplia variedad de actividades antrópicas; las más significativas son la extracción del agua subterránea, el aumento de la recarga, el riego, cambios en el uso de la tierra, las actividades agrícolas y forestales, urbanización, minería y disposición de residuos líquidos y sólidos. La mayor amenaza para el agua subterránea es la salinización por medio de la intrusión salina en regiones costeras o desde acuíferos más profundos, percolación profunda de aguas de riego y retornos de aguas servidas a los acuíferos. Por lo tanto, cuando se considera el impacto de la recarga en un ambiente hidrogeológico particular es importante conocer la calidad natural del agua subterránea, los impactos de las actividades humanas y los procesos que determinan la calidad resultante. Partiendo de esta base, pueden predecirse y monitorearse los posibles impactos de la recarga en el agua subterránea in situ y en el agua de recarga, para evitar impactos inaceptables.

En general, en acuíferos libres y semiconfinados que han sido sobreexplotados, la disminución de los niveles de agua es, eventualmente, acompañada por el deterioro en la calidad de la misma. La recarga con escorrentía, producto del exceso de lluvia, mediante estructuras de infiltración superficial, por lo general proveerá agua de alta calidad,

que no solamente reabastecerá el acuífero sino que además mejorará la calidad a través de la dilución. Asimismo, puede ser utilizada como barrera hidráulica a la intrusión salina lateral (por ej. los proyectos de recarga en dunas costeras de arena en Holanda).

Cuando el agua potable o el agua de tormenta es inyectada a través de pozos de recarga dentro de acuíferos confinados que contienen agua salobre, la calidad del agua de recarga puede deteriorarse debido a la mezcla y dilución de minerales, pero también puede mejorarse mediante la remoción de nutrientes y disminución de algunos compuestos orgánicos.

En resumen, para evaluar la eficacia de la gestión de la recarga de acuíferos desde el punto de vista de la calidad del agua, es importante conocer la calidad natural del agua subterránea, los impactos de las actividades humanas y los procesos geoquímicos involucrados. A partir de un programa de muestreo de calidad del agua subterránea, el conocimiento de la hidrogeología y de las actividades antrópicas en el área, puede desarrollarse un modelo conceptual adecuado. Los posibles impactos de los planes de recarga se podrían predecir y testados mediante monitoreo.

AGUA SUPERFICIAL (EJEMPLOS B, H, I Y J)*

El agua superficial puede ser una fuente significativa de agua de recarga dependiendo de la situación climática. En condiciones húmedas puede esperarse variabilidad en el caudal de los ríos, pero predominan los ríos permanentes. En condiciones áridas o semiáridas predominan los ríos intermitentes. El agua de ríos permanentes puede ser desviada a instalaciones de recarga cercanas o canalizada hacia instalaciones lejanas. La filtración inducida en los márgenes de los ríos es una opción comúnmente empleada, aunque por lo general el objetivo principal es mejorar la calidad de agua, más que el almacenamiento.

El agua de los ríos puede tener cantidades considerables de limo en suspensión; la cantidad dependerá de la cobertura vegetal de los suelos circundantes, la turbulencia y la "energía" del río. Los ríos de zonas llanas y de lenta corriente generalmente cargan algunas decenas de g/m³ mientras que los ríos de montaña pueden cargar varios cientos de g/m³ y las crecidas pueden aumentar aún más la carga de material en suspensión. Este material en suspensión puede provocar obstrucciones en las instalaciones de recarga si el agua de río se utiliza directamente. Es por esto, que muchas veces se utilizan estanques de sedimentación antes de que el agua entre en los estanques de infiltración.

En los lagos, el agua no se encuentra circulando de manera significativa y por lo general es clara, con poco o ningún material en suspensión. En caso de no existir contaminación por descarga de residuos o escorrentía agrícola, y con bajo crecimiento algal, el agua de los lagos podría ser utilizada directamente sin tratamiento previo (Huisman & Olsthoorn, 1983). En el caso de ríos o lagos contaminados, en particular aquellos con descargas de residuos industriales, el agua debería ser sometida a procesos de tratamiento previos a la recarga. En algunos casos las cuencas de infiltración pueden ser usadas para mejorar la calidad del agua a través de procesos físicos y bioquímicos mientras se recarga el agua subterránea.

ESCORRENTÍA DE TORMENTA (EJEMPLOS A, C, D Y G)

Las áreas urbanas generan cantidades significativas de escorrentía de tormenta. La escorrentía es altamente variable en cantidad, con descargas pico que ocurren luego de lluvias intensas. Para obtener un

abastecimiento más regular, se recomienda colocar en la cuenca estanques de infiltración y retención de agua de tormenta, áreas con pasturas, pavimentos porosos y humedales (Murray & Tredoux, 1998).

En áreas rurales, las lluvias intensas pueden generar escorrentía superficial desde campos agrícolas, así como también desde tierras no cultivadas. En algunas áreas (por ej. Saurashtra, India) esta escorrentía es canalizada hacia el interior de pozos de gran diámetro cavados a mano para recargar el acuífero directamente. En ocasiones se construyen diques de contención para reducir la carga de sedimentos en suspensión, pero esto no reduce la carga de contaminantes disueltos. Por esta razón, la recarga directa hacia pozos abiertos no es recomendable frente a la infiltración a través de una capa de suelo o arena que podría remover algunos de los componentes disueltos, como por ejemplo especies de nitrógeno y patógenos, mediante filtración y procesos químicos y microbiológicos.

En áreas urbanas, por lo general, la escorrentía de tormenta es altamente variable en calidad. Los contaminantes pueden provenir de la deposición atmosférica, de la acumulación de contaminantes en las calles, actividades de construcción, escorrentía industrial, desechos animales, vegetación en descomposición, productos químicos aplicados en césped y jardines, filtraciones desde tanques sépticos y de los desperdicios. La carga de contaminantes más alta puede observarse en la "primera descarga", la cual debería ser eliminada como desecho para mejorar la calidad del agua de recarga. En áreas urbanas el agua de escorrentía de mejor calidad es la proveniente de los techos. De manera creciente se están implementando iniciativas para utilizar el agua de los techos directamente para la recarga de acuíferos mediante galerías de infiltración, pozos y perforaciones (por ej. en edificios gubernamentales en India). Esto no sólo recarga acuíferos urbanos que con frecuencia están sobreexplotados, sino que además introduce agua de buena calidad en cuerpos de aguas subterráneas que generalmente se encuentran contaminados.

La carga de contaminantes en la escorrentía de zonas agrícolas puede incluir residuos de plaguicidas y fertilizantes, así como también materia fecal de ganado, humana y de otras fuentes. Cuando la escorrentía es utilizada directamente para recargar el acuífero, los efectos benéficos de la infiltración a través de una capa de suelo se pierden, aumentando los riesgos de contaminación del acuífero, pudiendo ser necesario incorporar otras formas de tratamiento, como la filtración lenta con arena.

AGUA REICLADA (EJEMPLO E)

Utilizar agua reciclada para la recarga implica tener una fuente de volumen predecible, a una tasa uniforme y de calidad constante, pero inferior (Murray & Tredoux, 1998). El agua residual requiere tratamien-

*Ver último capítulo de este documento.

to antes de ser considerada de calidad aceptable para la recarga de acuíferos, de forma de minimizar el grado de degradación de la calidad del agua subterránea. Los compuestos que representan un riesgo dependen del origen del agua residual, por ej. agua residual industrial o doméstica. El agua residual como fuente de agua de recarga ofrece un potencial significativo para todos los usos no potables. Asimismo, con un pre- y post- tratamiento apropiado o dilución con agua subterránea nativa, su uso como agua potable también puede ser una opción viable (Bouwer, 1996).

Las principales limitaciones en la utilización de agua reciclada es la aceptación pública, así como también al costo asociado a las cañerías, las estaciones de bombeo, etc. para transportar el agua desde la planta de tratamiento de agua residual hacia donde sea necesario. Utilizar cuencas de distribución tiene la ventaja de mejorar la calidad del agua residual mediante el Tratamiento Suelo-Acuífero (TSA) y la dilución con agua subterránea originaria (Bouwer, 2002). La recarga y recuperación además provee un tratamiento natural, un elemento fundamental para contribuir a la aceptación de la reutilización de agua. El uso de agua residual reciclada para el riego de cultivos forrajeros es más aceptado que el uso para riego de cultivos de consumo humano directo y uso para abastecimiento de agua potable. Cuanto más directo es el uso que se le da al agua de recarga, se requieren niveles más altos de tratamiento y de seguridad de operación.

Las características del agua reciclada estarán determinadas principalmente por la calidad de la fuente de agua, la presencia y naturaleza de descargas de desechos industriales y tratamiento aplicado. El agua residual municipal es la más consistente en términos de calidad. Los componentes de riesgo potencial incluyen cloruros, materia orgánica, especies de nitrógeno, fósforo, organismos patógenos y sólidos en suspensión (Comité para la Recarga de Agua Subterránea, 1994). Los contaminantes tóxicos dependerán principalmente de la composición del efluente industrial. En el caso de flujos de retorno de agua de riego a sistemas de drenaje superficiales, la calidad del agua puede ser afectada por sólidos en suspensión, nutrientes, residuos de plaguicidas, incremento en el contenido de sal y elementos traza incluyendo selenio, uranio, boro y arsénico (Comité para la Recarga de Agua Subterránea, 1994).

AGUA POTABLE (EJEMPLO F)

El agua potable es una fuente importante de agua de recarga utilizada en los proyectos Almacenamiento Subterráneo y Recuperación (ASR). Agua tratada de buena calidad es inyectada a través de pozos hacia el interior de acuíferos, en su mayoría confinados, para crear una burbuja de agua potable dentro del mismo. Estas burbujas pueden ser creadas en acuíferos de agua no potables desplazando el agua oriunda del lugar, y ha sido probado que es un método costo-beneficio efectivo y ambientalmente sustentable para resolver una amplia variedad de problemas (Pyne, 1995). Los proyectos son usualmente implementados próximos a las plantas de tratamiento de agua, fuente del agua de recarga, de forma de disminuir costos y aprovechar la capacidad de tratamiento excedente.

En zonas áridas, por ejemplo la región del Golfo de Medio Oriente, la demanda de agua excede la disponibilidad de agua a partir de recursos renovables, y el agua dulce proveniente de plantas de desalinización es utilizada para disminuir esta diferencia. Para asegurar la disponibilidad de agua durante emergencias, por ejemplo cuando las plantas de desalinización se encuentran fuera de servicio, se requiere una gran capacidad de almacenamiento de agua dulce. Se han realizado estudios piloto para evaluar la viabilidad de introducir agua desalinizada en acuíferos para construir un reservorio de agua dulce (Mukhopadhyay & Al-Sulaimi, 1998). Debido a la alta calidad del agua desalinizada, no se esperan mayores problemas de compatibilidad geoquímica, ya que el agua puede ser tratada para minimizar potenciales reacciones con el material del acuífero; por ejemplo, el pH puede ser regulado para que no sea agresivo.

Escenarios Hidrogeológicos y Control de la Recarga

El éxito de un proyecto de Gestión de la Recarga de Acuíferos depende en gran medida de las condiciones hidrogeológicas locales. Éstas determinan la capacidad del agua de recarga para percolarse a través de la zona no saturada y la capacidad del acuífero para almacenar el agua de recarga.

Los principales factores a considerar son:

- Los límites físicos e hidráulicos del acuífero y el grado de confinamiento.
- Propiedades hidrogeológicas del acuífero y formaciones superiores.
- Gradiente hidráulico en el acuífero.
- Profundidad desde el nivel del suelo hasta la superficie del acuífero/ piezométrica.
- Calidad del agua subterránea.
- Mineralogía del agua del acuífero.

Las condiciones hidrogeológicas en la superficie y en la zona no saturada son muy importantes en proyectos que usan técnicas de distribución, ya que el agua debe moverse hacia abajo a través de estas zonas antes de alcanzar el acuífero. La tasa de percolación depende de la permeabilidad vertical del suelo y de la zona no saturada. Una vez que el agua de recarga alcanza el nivel freático, la cantidad de agua que el acuífero puede almacenar depende de las características hidráulicas (transmisibilidad, capacidad de almacenamiento, coeficiente de almacenamiento o porosidad eficaz, etc.) su espesor y contenido de aire. La formación geológica de entrada debe tener la permeabilidad y el espesor suficientes como para recibir agua de recarga a una tasa determinada. Por otro lado, los acuíferos con alta conductividad hidráulica pueden tener una rápida dispersión del agua de recarga y como resultado, únicamente cantidades limitadas de agua pueden ser recuperadas. Esto no es un problema si el objetivo del proyecto de recarga es proveer agua subterránea y caudal base a ríos de carácter regional.

Los acuíferos con baja capacidad de almacenamiento probablemente tengan un limitado potencial para recibir agua adicional. Niveles freáticos altos pueden resultar en un movimiento rápido de agua hacia los puntos de descarga en corrientes y ríos, prolongando el período de caudal en los cursos de agua intermitentes. Sin embargo, probablemente estos no sean los casos donde el

agua subterránea se explota fuertemente y los niveles de agua subterránea estén disminuyendo. Es así que la capacidad de almacenamiento depende de la capacidad de almacenar agua mediante recarga natural y recarga gestionada.

Aunque hay una gran variedad de ambientes hidrogeológicos, desde la perspectiva de la gestión de la recarga de acuíferos, éstos pueden ser agrupados en cuatro categorías generales, éstas son:

ALUVIÓN (EJEMPLOS B Y E)

El aluvión consiste en depósitos fluviales, marinos o lacustres que varían en grosor, desde varias decenas de metros a kilómetros. Por lo general, los depósitos más importantes se encuentran en las zonas bajas de las cuencas de ríos, formando las planicies de inundación. El relieve topográfico es usualmente bajo, al igual que los gradientes hidráulicos naturales. Los sedimentos varían desde grava gruesa altamente permeable hasta limo impermeable de grano fino y lodo. Donde los ríos son permanentes, los niveles de agua subterránea son poco profundos; sin embargo, en zonas áridas o en zonas donde el bombeo ha disminuido el nivel freático, el nivel de agua puede estar a mayor profundidad. En el primer caso hay poco espacio en el acuífero disponible para almacenamiento y si los recursos del mismo son intensamente explotados, puede provocar que el agua del río sea inducida al interior del acuífero.

ROCA DURA FRACTURADA (EJEMPLOS A, C, F Y H)

Este tipo de acuífero usualmente consiste de roca madre fracturada compuesta de rocas ígneas, metamórficas o volcánicas. Estos acuíferos se encuentran en grandes áreas en regiones semiáridas y, a pesar de tener baja capacidad de almacenamiento y de trans-

misión, pueden ser la única fuente de agua subterránea, por lo que deben ser gestionados con cuidado. La zona erosionada puede tener un rol importante en el almacenamiento del agua subterránea, y de estar presente también lo tendrá la cobertura aluvial, ya que proveen un mecanismo para absorber y almacenar agua de lluvia, que luego puede percolarse al acuífero subyacente. En muchas áreas, la zona erosionada es el acuífero principal. El éxito de la explotación del agua subterránea o de la recarga del acuífero dependerá de identificar el lugar donde estas zonas erosionadas o fracturadas se encuentran saturadas. La extracción de agua en acuíferos de roca dura mediante pozos puede drenar el aluvión y/o la zona erosionada superior de forma estacional. El método de recarga apropiado dependerá del acuífero que se quiera recargar. Si el aluvión no consolidado es el objetivo, entonces las cuencas de infiltración o zanjas probablemente sean lo más efectivo; sin embargo, si el objetivo es el acuífero de roca dura, más profundo, entonces es probable que la inyección por perforación sea la única opción.

ACUÍFEROS DE ARENISCA CONSOLIDADA

Estos son acuíferos porosos y/o fracturados que pueden tener una gran capacidad de almacenamiento y transmisión. La capa superficial determinará la recarga natural y gestionada. Si el suelo se originó a partir de arenisca la capacidad de recarga será alta, aunque puede ser reducida si se encuentra recubierto por depósitos aluviales de grano fino. Si la permeabilidad del acuífero es alta, es probable que el agua de recarga se disipe

rápidamente, pudiendo perderse hacia el caudal base de ríos. En este caso, es necesaria una buena comprensión de la hidráulica del acuífero para asegurar que los resultados netos de la recarga sean beneficiosos. Es posible gestionar el acuífero creando un excedente anual durante la época de lluvias, de forma de "crear" almacenamiento que puede ser aprovechado en otras épocas.

ACUÍFEROS DE CARBONATO (EJEMPLO D)

Presentan características similares a los acuíferos de arenisca, excepto que el volumen de agua y flujo más importante se encuentra en las fracturas. La proporción del volumen de agua que se encuentra en las fracturas respecto al volumen intergranular variará considerablemente, será bajo en piedras calizas porosas (por ej. oolitas) a alto en piedras calizas cársticas. La respuesta de los acuíferos cársticos será la más extrema en términos de disipación del agua de recarga y velocidad de entrada de contaminantes. Los acuíferos cársticos pueden proveer almacenamiento utilizable donde el volumen de agua subterráneo es restringido, por ejemplo en un acuífero confinado. Nuevamente, una buena comprensión de la hidrogeología del acuífero, y de los recursos hídricos que contiene, es necesaria para una gestión eficaz.

Metodologías para la GRA

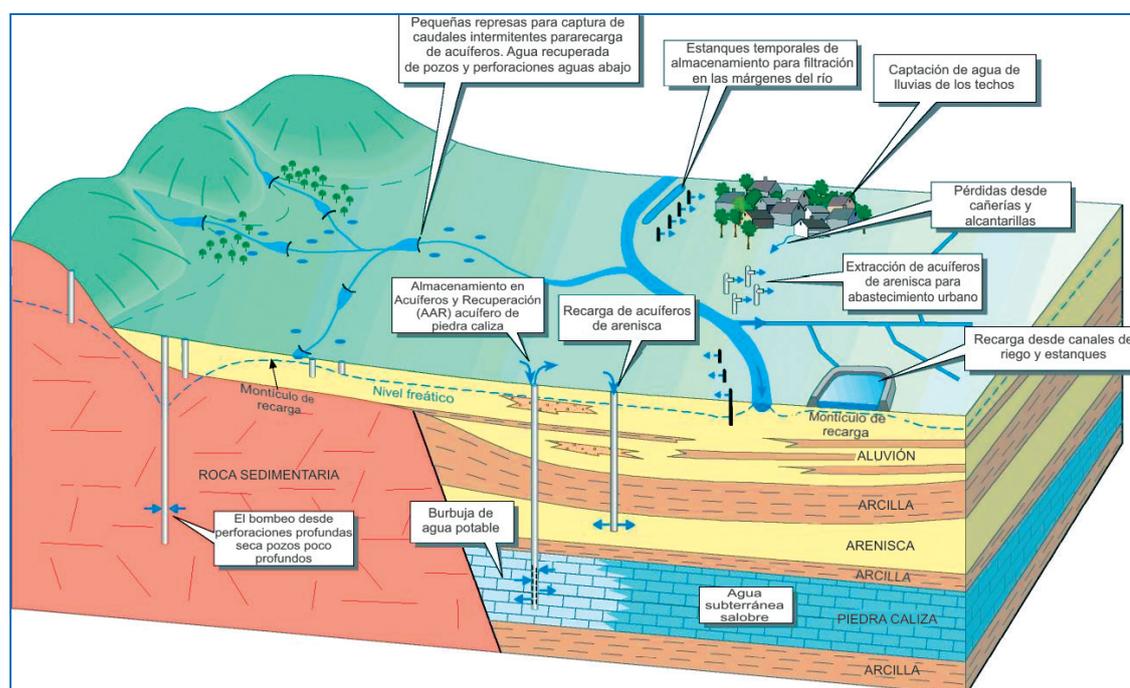
Las técnicas GRA han sido aplicadas por milenios para gestionar los recursos hídricos disponibles. Las metodologías varían en complejidad, desde la simple recolección de agua de lluvia hasta la inyección de agua reciclada hacia el interior de un acuífero salobre mediante pozos profundos. Las metodologías aplicadas deben ser apropiadas para cumplir con los objetivos establecidos que, en el nivel más básico, será el almacenamiento y tratamiento del agua. La obstrucción es un tema clave que requiere ser comprendido para que los impactos puedan ser minimizados y gestionados de manera que la relación costo-beneficio sea positiva.

Existen numerosos proyectos para aumentar la recarga del agua subterránea y son tan variados como el conocimiento de aquellos involucrados en su construcción y operación. Estos proyectos son diseñados con el objetivo principal de aumentar la recarga (recarga intencional), aunque los acuíferos también pueden ser recargados de forma no intencional (recarga incidental) mientras se llevan a cabo otras actividades, como por ejemplo el riego. El objetivo de los métodos intencionales es aumentar las reservas de agua subterránea; sin embargo, puede tener además otros propósitos, como por ejemplo la mitigación de las inundaciones, la reducción de la erosión del suelo o la disminución del impacto negativo del cambio en el uso de la tierra. Aquí nos enfocaremos en la recarga intencional, las metodologías utilizadas (la mayoría de las cuales están ilustradas en la figura) son agrupadas, a grandes rasgos, en las siguientes categorías:

- Métodos de distribución
 - Cuencas y estanques de infiltración
 - Tratamiento Suelo-Acuífero (TSA)
 - Inundación controlada
 - Recarga incidental por riego

- Modificaciones en el interior del canal
 - Estanques de percolación asociados a represas de control, gaviones, etc.
 - Represas de arena para almacenamiento
 - Represas subsuperficiales
 - Represas con pérdidas
- Recarga con pozos, túneles y perforaciones
 - Pozos abiertos y túneles
 - Almacenamiento en Acuíferos y Recuperación (AAR)
- Infiltración inducida en las márgenes de los ríos
 - Filtración en las márgenes de los ríos
 - Filtración inter-dunar
- Captación de agua de lluvia
 - Construcción de terraplenes, etc.
 - Recolección de agua de lluvia en techos

Muchos proyectos requieren bajos niveles de tecnología y pueden ser (y han sido por siglos) implementados con poco conocimiento de ingeniería. Estos incluyen técnicas de captación de agua para aumentar la recarga, la construcción de terraplenes, y pequeños diques a través de arroyos efímeros. Las técnicas de excavación



de pozos han sido desarrolladas durante generaciones y la desviación del flujo superficial hacia el interior de los pozos (a pesar de potenciales problemas de contaminación), posterior a la sedimentación de la mayoría de los sólidos en suspensión, se están haciendo cada vez más populares en algunas partes de India. Represas de arena para almacenamiento, desagües hacia las márgenes de los ríos y represas permanentes requieren mejor diseño y conocimientos de ingeniería. Aun más conocimientos se requieren cuando se utilizan pozos y perforaciones para inyección o para Almacenamiento en Acuíferos y Recuperación (AAR). Si bien es simple en teoría, la eficiente operación de cuencas de distribución y proyectos de infiltración requiere un buen conocimiento de los procesos físicos, hidráulicos, geoquímicos y microbiológicos que operan y de cómo gestionarlos, para alcanzar un óptimo desempeño. Temas similares deben ser considerados en la recolección de agua de lluvia de los techos.

MÉTODOS DE DISTRIBUCIÓN

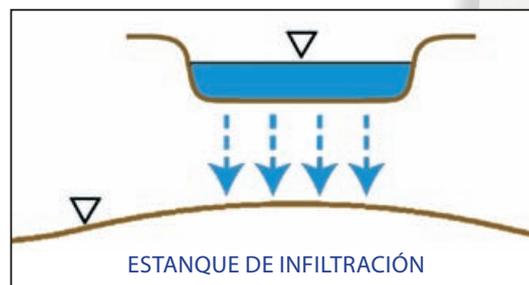
Los métodos de distribución de agua se aplican cuando el acuífero libre o semiconfinado que ha de ser recargado se encuentra cerca de la superficie del suelo. La recarga se logra por infiltración a través del material permeable de la superficie, el cual debe ser gestionado para mantener las tasas de infiltración. En situaciones en las cuales hay una fuente de agua de recarga permanente y de buena calidad, y la infiltración se puede realizar a lo largo del año, se pueden alcanzar cargas hidráulicas de 30 m³/año para suelos de textura fina, como arcillas margas arenosas, 100 m³/año para suelos francos, 300 m³/año para arenas medianas puras y 500 m³/año para arenas gruesas puras (Bouwer, 2002). Las tasas de evaporación de superficies de aguas libres varían entre aproximadamente 0,4 m³/año en climas fríos y húmedos, hasta 2,4 m³/año en climas templados y secos donde constituye un componente secundario del balance hídrico.

Donde la fuente de agua de recarga es esporádica y el caudal estacional contiene grandes cargas de sólidos en suspensión, la gestión de la estructura de recarga se hace cada vez más importante con el fin de minimizar los problemas de obstrucción de forma de mantener las tasas de infiltración, y disminuir al mínimo la evaporación en aguas libres. El monitoreo básico de la tasa de sedimentación y la tasa de infiltración con respecto a la tasa estimada de evaporación en aguas libres será de utilidad en decisiones operativas de gestión.

Estanques de infiltración o recarga (Ejemplo B)

Un estanque de infiltración se excava en el suelo, o comprende un área deprimida de tierra, que retiene el agua de

recarga (por ej. agua de lluvia), hasta que se haya infiltrado a través del suelo. Si el material del acuífero es fino, ocurrirá una rápida obstrucción. En este caso, si se cubre el fondo y los lados con una capa de arena de grano medio, aproximadamente 0,5 m de espesor, es posible retrasar el proceso de obstrucción y extender los periodos de recarga en la instalación (Huisman & Olsthororn, 1983). La misma técnica debería ser usada en un acuífero de roca fisurada, para prevenir la penetración profunda de sólidos en suspensión o algas, que podría resultar en una obstrucción irreversible.



La depresión debe ser lo suficientemente superficial como para permitir el drenaje rápido en casos en que sea necesaria su limpieza mediante secado y raspado. Los niveles del agua dentro de la misma deben ser manejados para prevenir el crecimiento de la vegetación o acumulaciones de algas, y la consecuente resistencia al flujo de agua. La superficie disponible para infiltración y la tasa de infiltración determinan el volumen de recarga que se podrá alcanzar.

El material que se deposita en el fondo y en los lados del estanque crea una capa que actúa como filtro y que puede provocar la obstrucción del estanque impidiendo la filtración del agua, siendo el principal problema durante la recarga. Para contrarrestar esto, se pueden considerar los siguientes métodos:

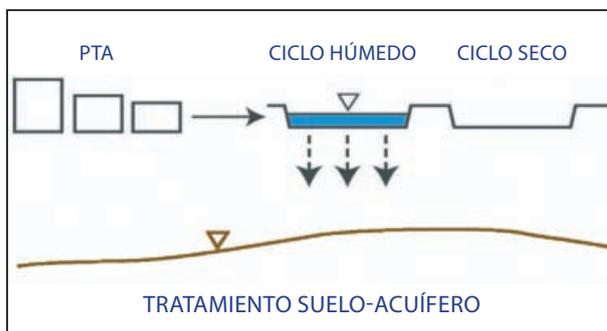
- Aplicar un sistema rotacional de distribución de agua, secado y posterior raspado del fondo del estanque. El secado elimina el crecimiento de algas, y esto, combinado con el raspado del fondo del estanque, reestablece las tasas de infiltración.
- Construir caballones en el fondo del estanque y controlar el nivel de agua para que los granos finos se asienten en las depresiones, y así mantener las tasas de infiltración a los lados de los caballones (Peyton,

2002).

- Realizar un tratamiento mecánico del agua de recarga mediante sedimentación primaria para remover sólidos en suspensión. La eficiencia de la sedimentación puede ser incrementada con la adición de floculantes químicos.
- Cloración del agua de recarga para inhibir la actividad microbiana.
- Tratamiento mecánico del suelo mediante arado para aumentar la permeabilidad.
- Recubrir el estanque con una capa de arena de grano medio de modo que actúe como filtro para remover sólidos en suspensión.

Tratamiento Suelo-Acuífero (TSA)

En la medida que el agua proveniente de las plantas de tratamiento de agua (PTA) es considerada como una oportunidad, y no un problema de disposición, la planificación de la reutilización del agua será cada vez más importante. Investigaciones experimentales llevadas a cabo en las últimas décadas (especialmente en Phoenix, Arizona dirigida por H. Bower), han estudiado los procesos hidráulicos, operacionales y biogeoquímicos involucrados en la recarga y recuperación de agua residual mediante el Tratamiento Suelo-Acuífero (TSA). La inclusión de este ciclo en el proceso de reutilización tiene varias ventajas, incluyendo el almacenamiento para disminuir la variabilidad de la relación abastecimiento/demanda, mejoras en la calidad debido al pasaje a través del suelo y el acuífero, ser económicamente favorable y la mejor aceptación pública de la reutilización de agua (Bower, 2002). El efluente de aguas residuales que es recargado vía estanques de infiltración es generalmente tratado a nivel secundario y clorado antes de ser vertido a los estanques. Mejorar la calidad del agua es con frecuencia el objetivo principal de la remoción de sólidos en suspensión y microorganismos. La re-



moción de especies de nitrógeno por medio de la desnitrificación es también un beneficio clave, al igual que la reducción en la concentración de carbono orgánico disuelto mediante procesos biológicos. Los fosfatos y metales también pueden ser removidos pero son retenidos en el suelo.

El agua de recarga puede ser recuperada totalmente para evitar la contaminación del agua subterránea natural y, como está libre de patógenos, puede ser utilizada para el riego de cultivos, municipal y recreativo. Sin embargo, su uso como agua potable estará limitado por el contenido de carbono orgánico residual, muchos de ellos compuestos orgánico-sintéticos. Esto se puede solucionar tratando al efluente con ósmosis inversa o filtración de carbono previo al TSA o mediante la dilución con agua subterránea durante la recuperación.

Inundación controlada (Ejemplo B)

En áreas de topografía relativamente plana el agua puede ser desviada, mediante canales, desde un río y distribuida uniformemente sobre un área superficial amplia; formándose una fina capa de agua que se mueve a una velocidad mínima, evitando así la alteración de la cobertura del suelo. Las tasas de infiltración más altas se observan en áreas con vegetación no alterada y con el suelo cubierto (Todd, 1959). De forma de controlar el proceso de inundación en todo momento, bancos o zanjas deberían rodear la planicie de inundación. Como se requiere una preparación mínima de la tierra, la inundación es sumamente efectiva, desde el punto de vista de la relación costo-beneficio comparada con otros métodos de distribución. Sin embargo, se requieren grandes superficies de tierra disponibles para la operación de recarga. Altas cargas de sedimentos se depositarán en la superficie reduciendo las tasas de recarga, y es probable que haya que tomar medidas de remediación para mantener las tasas deseables. La superficie de tierra agrícola utilizada puede beneficiarse de la carga de sedimentos, pero esto requiere ser contrapuesto con la reducción en las tasas de recarga (Esfandiari-Baiat & Rahbar, 2004).

Recarga incidental por riego (Ejemplo H)

El agua excedente de riego proveniente de canales y campos ha causado históricamente problemas de salinización y saturación hídrica del suelo. Sin embargo, cuando este excedente es cuantificado y gestionada puede convertirse en una oportunidad favorable. Por ejemplo, en la Planicie Indo-Gangéctica los niveles del agua subterránea aumentaron 6 m aproximadamente en un período de 10 años y, cada vez en mayor medida, el agua está siendo utilizada para riego de otras áreas. IWMI (2002) estima que únicamente 60% del agua aplicada en los cultivos de arroz es utilizada, y el 40% restante se filtra pasando a ser parte del recurso hídrico subterráneo. Estudios recientes han demostrado que sistemas de riego por canales pueden ser modificados para aumentar la recarga de agua subterránea.

Cuando se produce recarga incidental por riego con agua residual urbana, surgen problemas de calidad del agua. Por ejemplo, en México el uso del agua residual municipal para riego de áreas agrícolas está ampliamente establecido. Alrededor de ciudades

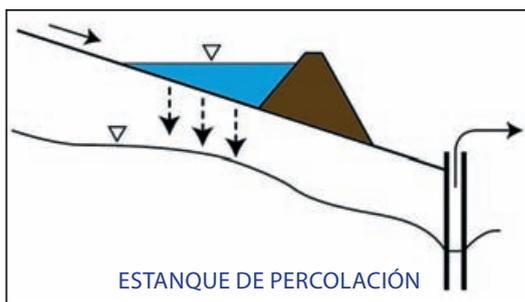
como León y Ciudad de México, los niveles de agua subterránea están decreciendo rápidamente en lugares donde la extracción para cubrir la demanda de la población en rápida expansión excede a la recarga. Sin embargo, en los lugares en que el agua residual es utilizada para riego, el nivel freático es cercano al nivel del suelo. El agua residual contiene contaminantes industriales de varios tipos; en León los efluentes provenientes de curtiembres son un componente importante de las aguas residuales de origen urbano. El mayor impacto en la calidad del agua subterránea en el área irrigada es la presencia de agua de baja calidad en profundidades de 50 a 100 m con concentraciones de cloruros de 800 a 1.000 mg/l en las partes superiores. Muchos de los otros contaminantes del agua residual son retenidos o atenuados por el sistema de distribución y en las capas de suelo. Esto ayuda a evitar que contaminantes como carbono orgánico, nutrientes, metales pesados y agentes patógenos alcancen el cuerpo de agua subterránea. La mayor amenaza para el agua subterránea es la creciente concentración de cloruro llevados a los pozos municipales de abastecimiento en el área (Chilton et al., 1998).

También es importante considerar la recarga incidental en áreas urbanas, ya que puede constituir un componente significativo del balance hídrico de una cuenca. Las pérdidas de los sistemas de suministro y alcantarillado de áreas urbanas pueden contribuir en forma significativa a la recarga de agua subterránea, que en algunos casos resultan en niveles crecientes de agua subterránea e inundaciones.

MODIFICACIONES EN EL INTERIOR DEL CANAL

Estanques de percolación asociados a represas de control (Ejemplo A)

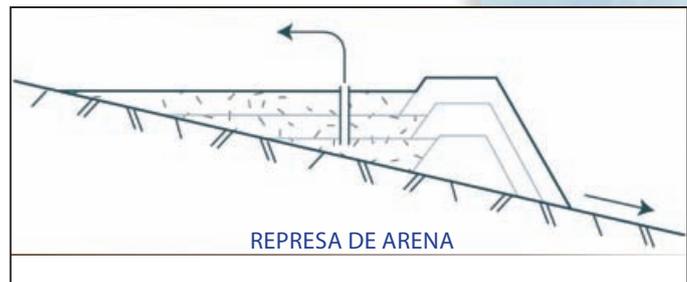
Una manera económica de recargar agua subterránea puede ser mediante la construcción de represas de control en los cursos de agua, siendo el material de construcción es el mismo aluvión del río. Para evitar la erosión o destrucción anual de estas estructuras, con frecuencia se construye un vertederero de concreto y, para contener y canalizar la escorrentía superficial, además se construyen diques. Los diques asociados a las represas de control retardan el flujo de agua hacia el curso,



permitiendo que el agua se infiltre en el suelo a la vez que se reduce la erosión del suelo.

Una serie de estas estructuras a lo largo de una línea de drenaje reduce la energía destructiva de escorrentías intensas (por ejemplo provocada por las precipitaciones asociadas a un monzón), lo que resulta en la reducción de la erosión y del transporte de sedimentos. Debido a que estas estructuras retienen el agua únicamente por cortos períodos de tiempo, la tierra puede ser inmediatamente cultivada, permitiendo el aprovechamiento de la humedad del suelo, lo que puede resultar en una cosecha anual adicional. Labrar la tierra también mantiene la capacidad de infiltración, dejándola lista para la próxima entrada de agua.

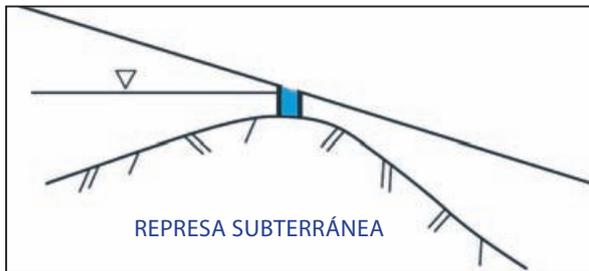
En Kenya y en muchas partes de India represas superficiales, y en Taiwán represas inflables, han sido utilizadas para prolongar la presencia del agua e incrementar las zonas húmedas de aluviones en los ríos intermitentes.



Represas de arena para almacenamiento (Ejemplo G)

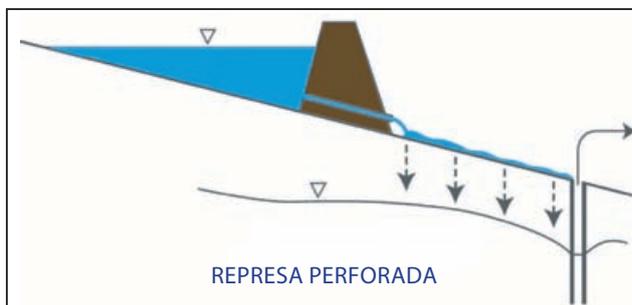
La mejor localización para represas de arena es en terrenos ondulados con condiciones climáticas áridas, en donde la escorrentía se produce durante inundaciones repentinas. Típicamente, las represas son construidas sobre el lecho de ríos intermitentes y arenosos en valles bien definidos. Se construye una pared sobre el lecho, transversal al cauce del río, de manera de disminuir inundaciones repentinas o eventos de caudales efímeros extensos. Esto permite que el material más grueso se asiente y acumule bajo la pared de la presa. Así, luego de cada evento de inundación, la pared de la represa se eleva, la altura de la pared determinará el caudal de inundación y la cantidad de material que se acumula. Sin embargo, se debe permitir el desborde suficiente para que el material más fino sea transportado aguas abajo (Murray & Tredoux, 1998). Idealmente, la formación de roca predominante en el área debería erosionarse produciendo sedimentos gruesos, arenosos; por ej. granitos, areniscas, cuarcitas. Con el tiempo, los eventos sucesivos de

inundaciones formarán un acuífero artificial, permitiendo que el agua se almacene en vez de fluir aguas abajo. El agua almacenada estará disponible para extracción. Sin embargo, las represas de arena para almacenamiento también pueden ser localizadas sobre lechos de roca permeable, y de esta forma, el agua almacenada se filtrará recargando el acuífero subyacente.



Represas subsuperficiales

Las represas subsuperficiales (subterráneas) pueden ser utilizadas para retener el agua en acuíferos aluviales. En arroyos intermitentes en los cuales zonas elevadas del basamento restringen el caudal, se construye una zanja atravesando el lecho del arroyo, inmersa en las rocas del basamento. La zanja se rellena con material de baja permeabilidad para restringir el flujo de agua a través del suelo. El agua subterránea se recupera mediante pozos o perforaciones.



Represas perforadas (Ejemplo C)

En los casos de crecidas repentinas de los ríos, con caudales que transportan grandes cantidades de sólidos en suspensión, el agua puede ser desaprovechada escurriéndose ésta hacia la cuenca o hacia el mar antes de que pueda infiltrarse para recargar el acuífero. Construir presas en estos arroyos intermitentes puede eliminar este problema al facilitar la sedimentación. El agua luego se descarga aguas abajo de la represa a través de cañerías, donde puede ocurrir recarga de agua subterránea. Un buen ejemplo de esta práctica es el proyecto de la represa OMDEL en Namibia (Zeelie, 2002). Una variación de esta práctica es la construcción de represas perforadas con gaviones rellenos de roca con caños perpendiculares a la represa (Kahlow, 2004). Estas estructuras retienen inundaciones de alta energía; estimulan la sedimentación de sólidos en suspensión, liberando lentamente el agua mediante escapes, y favoreciendo así la infiltración.

POZOS, TÚNELES Y PERFORACIONES

Pozos y túneles

Estas estructuras son usadas para recargar acuíferos freáticos superficiales y en zonas donde las capas superficiales tienen baja permeabilidad, y por lo tanto los métodos de distribución no son efectivos. Cada vez es más frecuente para este propósito el uso de pozos que se han secado debido a que el nivel freático disminuyó debido a la sobreexplotación.

Previamente a la recarga es necesario que los sólidos en suspensión del agua de recarga sedimenten; esto disminuirá la potencial obstrucción de los poros, en particular si la fuente es agua de tormenta. La extracción posterior de agua puede remover las partículas finas que se han depositado en los poros, y de esta forma recuperar parte de la capacidad de recarga. Además, puede ser necesaria la remoción física del sedimento y la limpieza mediante inyección de agua a presión (jetting).

El uso de pozos tiene el potencial de introducir directamente sólidos en suspensión, además de contaminantes químicos (nitratos, plaguicidas, etc.) y bacterianos (incluyendo de origen fecal). Los métodos de distribución mencionados anteriormente tienen la ventaja, en comparación con los pozos abiertos, de que el agua se infiltra desde la superficie a través del suelo y depósitos aluviales que pueden actuar como mecanismos de filtrado/tratamiento extremadamente efectivos. En algunos casos, se utiliza material grueso para rellenar hoyos o zanjas que actúa como filtro. Este material puede ser reemplazado si el problema de obstrucción se hace severo.

En suelos de material débilmente consolidado y en casos en que hay material de baja permeabilidad por encima del acuífero, se utilizan hoyos y zanjas de recarga de profundidades aproximadamente de 5 a 15 m (Bouwer, 1996). Estas estructuras son excavadas con la suficiente profundidad como para atravesar los estratos de baja permeabilidad, y acceder directamente al acuífero. Las zanjas u hoyos



Trinchera de recarga, contruida para la recarga de escorrentía superficial, Rajasthan, India.

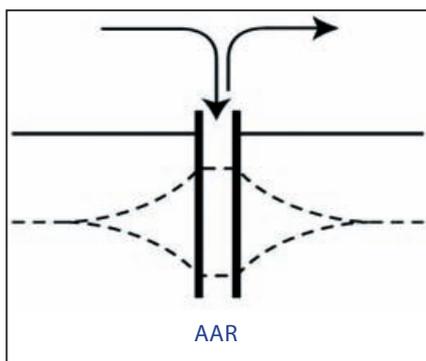
son contruidos de forma de maximizar el área de sus paredes y minimizar el área de la superficie del fondo, facilitando el movimiento horizontal del agua de recarga hacia el interior del acuífero (Murray & Tredoux, 1998). Las zanjas se pueden rellenar con arena gruesa o grava fina y el agua se aplica en la entrada de la superficie. Idealmente, las instalaciones deben ser cubiertas para mantener alejados a personas y animales, y evitar la exposición solar.

En general, los pozos y zanjas son costosas de construir y recargan pequeños volúmenes de agua, por lo tanto su uso está en su mayoría limitado a los casos en que se encuentran previamente disponibles en forma de canteras abiertas, pozos de extracción de grava, etc.

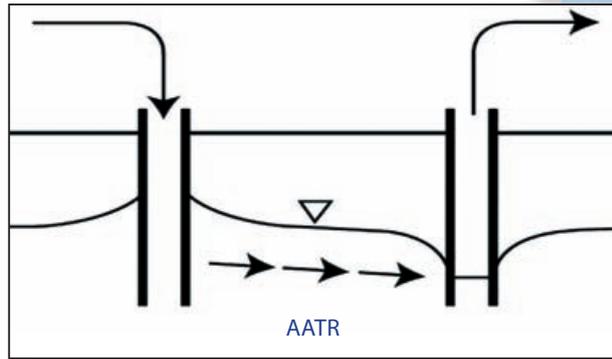
Pozos con perforaciones

(Ejemplos D, F y J)

Las perforaciones se utilizan cuando por encima de los acuíferos de destino existen estratos de gran espesor y de baja permeabilidad, con el fin de recargar agua directamente hacia el interior del acuífero. Las perforaciones también son ventajosas cuando la superficie de tierra disponible es escasa. Sin embargo, el uso de perforaciones para inyectar agua en acuíferos requiere mayor calidad del agua, en comparación con la recarga mediante métodos de distribución. La descripción detallada de este método se encuentra fuera del alcance de este documento, pero puede ser encontrado en Pyne (1995, 2005). Cuando la perforación es utilizada para inyección y recuperación (Almacenamiento en Acuíferos y Recuperación, AAR), los costos son minimizados y la obstrucción es eliminada durante el ciclo de recuperación. El agua puede ser inyectada hacia el interior por una perforación y recuperada desde otra, algo más distante, para incrementar el tiempo de transporte y beneficiarse de la capacidad de tratamiento del agua del acuífero. Esto se define como Almacenamiento en Acuíferos, Transferencia y Recuperación (AATR).



La tecnología necesaria para construir este tipo de estructuras puede ser bastante compleja, requiriéndose conocimientos de ingeniería. El diseño de estas estructuras puede variar considerablemente e incluye la construcción de perforaciones en la base de los pozos de recarga y su relleno con material de filtro graduado para (a) restringir el ingreso de sólidos en suspensión que rápidamente obstruirían al



sistema; y (b) para restringir el ingreso de contaminantes que podrían contaminar el cuerpo del agua subterráneo.

La obstrucción de material del acuífero o del filtro de la perforación, ya sea por sedimentos en suspensión, aire que ingresa en el agua de recarga, crecimiento microbiano o precipitación química, es un problema común, y provoca un aumento excesivo de los niveles de agua en el pozo de recarga. Estos procesos de obstrucción pueden ser manejados mediante tratamiento mecánico del agua de recarga permitiendo la sedimentación o el filtrado previo de forma de remover los sólidos en suspensión. El agua debería ser introducida mediante una válvula para asegurar de que se obtenga una columna continua de agua hasta la superficie. Puede ser necesario algún pretratamiento químico del agua para prevenir la floculación de hierro, CaCO_3 , etc. y la cloración u otra desinfección para prevenir el crecimiento microbiano. Puede ser necesaria la recuperación de pozos obstruidos de manera regular por medio de bombeo y oleadas de agua para remover físicamente partículas finas y crecimiento bacteriano, y el uso de agentes humectantes para remover aire en el caso de pozos obstruidos con aire. Los acuíferos de carbonato tienen menos problemas de obstrucción debido a la disolución gradual de la calcita por un inyectante ligeramente ácido, si se observa un reflujó periódico.

INFILTRACIÓN INDUCIDA EN LAS MÁRGENES DE LOS RÍOS

Filtración en las márgenes de los ríos

(Ejemplos E e I)

Los proyectos de infiltración en los lechos de los ríos consisten comúnmente en una galería o una línea de perforaciones paralelas a la margen de un cuerpo de agua superficial y a poca distancia del mismo. El bombeo de las perforaciones disminuye el nivel freático adyacente al río o lago, induciendo al agua de la corriente a



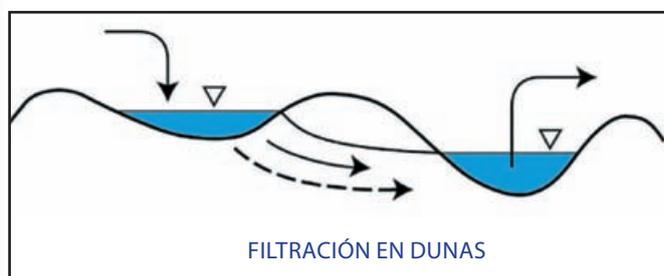
ingresar en el sistema del acuífero. Para asegurar una depuración satisfactoria del agua superficial a través de su pasaje por el suelo, el tiempo de viaje debe exceder los 30 a 60 días (Huisman & Olsthoorn, 1983), es así que la distancia que recorre el agua al ser transportada debería asegurar que esto ocurra.

Los factores que determinan el éxito de los proyectos de infiltración inducida son la disponibilidad de una fuente confiable de agua superficial de calidad aceptable, y la permeabilidad de los depósitos del lecho del río o lago y de las formaciones adyacentes al cuerpo de agua superficial (O'Hare et al., 1982). Si la permeabilidad de los depósitos del lecho del río o lago y acuífero es alta y el acuífero tiene el suficiente espesor, es posible extraer grandes cantidades de agua subterránea de un pozo o de una galería sin que ocurran efectos adversos serios en la capa freática tierra adentro (Huisman & Olsthoorn, 1983).

El agua de ríos y lagos suelen tener una cantidad considerable de material en suspensión, y por ende, si el agua entra en el acuífero, este material se filtra y deja una capa fina en el fondo del río o lago. Esto provee un tratamiento útil para el agua infiltrada pero si la obstrucción es excesiva puede ser necesario el raspado de la superficie durante períodos de bajo nivel de agua.

Filtración inter-dunar

Una variante particular de este método es utilizada en zonas costeras y se conoce como filtración inter-dunar. En este caso los valles entre dunas costeras de arena son inundados con agua de ríos. El agua se infiltra al interior de los sedimentos subyacentes y crea un volumen de agua de recarga. El montículo puede tener un rol importante en cuanto a prevenir la intrusión salina, además de ser una fuente de agua para utilizar tierra adentro. Esta técnica ha sido usada por siglos y es muy utilizada en las costas de Holanda, donde los ríos son la fuente



de agua de recarga. En otros proyectos, las aguas de lluvia y agua residual urbana tratada son utilizadas como fuentes de agua.

Un objetivo clave de este tipo de proyectos es mejorar la calidad de la fuente de agua de baja calidad. Gran cantidad de investigaciones se han realizado para comprender y optimizar la gestión de los sólidos en suspensión, los problemas de obstrucción y la disminución de los sólidos disueltos, incluyendo compuestos orgánicos, a través de procesos físicos, químicos y biológicos.

CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA (COSECHA DE LLUVIA)

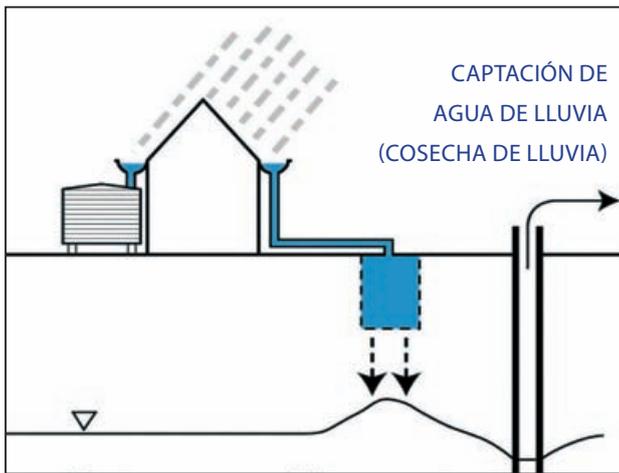
La captación de agua de lluvia es, en su sentido más amplio, la recolección de escorrentía para uso productivo. Esto generalmente implica la acumulación de agua de lluvia de un área extensa para su uso en un área de menor tamaño para riego o para recarga de agua subterránea. La captación de agua de lluvia de los techos es un caso especial que se está utilizando cada vez más para almacenar en tanques, para riego urbano y recarga de agua subterránea.

Cultivo en tierras áridas (Ejemplo G)

En regiones semiáridas, los sistemas de cultivo utilizan entre el 15% y el 30% del agua de lluvia; la mayor parte del agua se evapora (30-50%) y el resto deriva en escorrentía superficial (10-25%) y en agua de recarga subterránea (10-30%) (van Leeuwen & Beernaerts, 2002). Intervenciones que varían desde terraplenes de campo, arado de contorno y represas de roca en canales de drenaje, hasta la desviación de agua de inundación hacia áreas de cultivo, tienen como objetivo reducir la escorrentía y acumular el agua para ser almacenada en el perfil del suelo o en acuíferos más profundos. Cualquiera sea el sistema usado, el objetivo es reducir la escorrentía superficial y la evaporación para aumentar la producción agrícola y, muchas veces y de manera no intencional, aumentar la recarga de agua subterránea.

Captación de agua de lluvia de los techos

La recolección de agua de lluvia de los techos permite aprovechar el agua de lluvia para consumo directo o para recarga de agua subterránea. Este método requiere conectar el caño de salida del desagüe del techo para desviar el agua de lluvia hacia pozos preexistentes u otras estructuras de recarga o tanques de reserva. Las cañerías de desagüe, las superficies de techos y los tanques de reserva deberían ser construidos a partir de materiales químicos inertes, por ejemplo plástico, aluminio, hierro galvanizado o fibra de vidrio, para evitar contaminar el agua de lluvia.



Cuando el agua es utilizada para consumo directo, se deja que el agua del inicio de la lluvia corra libremente de manera de remover la suciedad acumulada en el área de recolección y canaletas. Las fuentes más importantes de contaminación son la deposición aérea, insectos, y excrementos de aves y otros animales. La contaminación bacteriana puede ser minimizada manteniendo la superficie de los techos y los desagües limpios, pero no puede ser completamente eliminada. Las ventajas de recolectar y almacenar agua de lluvia en áreas urbanas incluye la reducción de la demanda de sistemas de abastecimiento, así como también la reducción de la cantidad de escorrentía de tormenta y consecuente inundación.

PROBLEMAS DE OBSTRUCCIÓN

La sedimentación de material fino y consecuente obstrucción del acuífero es el principal problema en la mayoría de los proyectos descritos anteriormente. La obstrucción puede deberse a la carga de sedimento en suspensión, crecimiento microbiológico, precipitación química y, en el caso de la inyección de pozo de tipo AAR, burbujas de aire entrante que bloquean los poros. Se requiere de una sólida comprensión del funcionamiento de la estructura y de los mecanismos de obstrucción para lograr una gestión exitosa. Si la tasa de infiltración es de la misma magnitud que la de evaporación de aguas libres, el valor de la estructura de recarga debe ser cuestionado. Esta situación puede gestionarse reduciendo el problema potencial de obstrucción antes de la infiltración, junto con la renovación periódica de la superficie de infiltración mediante raspado, bombeo u otros medios físicos o químicos. Los métodos incluyen:

- Aberturas en las paredes de las represas de arena a través de las que el agua pueda fluir durante períodos de bajo caudal, a velocidad suficiente como para mantener las partículas finas en suspensión, permitiendo que existan canales libres de limo en la pared de la represa.
- Gestión del área de captación de la estructura para reducir la escorrentía superficial y la erosión del suelo, a través del arado de contorno, zanjas, prevención del sobrepastoreo, vegetación para estabilizar el suelo, u otros.
- Construcción de estanques de sedimentación aguas arriba de la estructura de recarga para que las partículas finas se sedimenten antes que el agua de recarga ingrese a la estructura. Esto puede incluir la construcción de represas perforadas y de represas de carga y descarga.
- En el caso de los pozos de inyección, donde el área de infiltración es pequeña, la calidad del agua tiene que ser especialmente alta y puede requerir la filtración a través de arena y la eliminación de burbujas de aire, así como también la desinfección en el caso de que los problemas de obstrucción sean tratados.
- El agua residual con alta carga de nutrientes debe ser tratada para remover sólidos en suspensión y nitrógeno a través de ciclos de humectación y secado. Ver TSA (Bouwer, 2000).
- Remoción periódica del sedimento a través de raspado, para evitar que el material fino penetre profundamente en el interior de la superficie de infiltración

Los costos de estos programas de gestión y mantenimiento deben ser evaluados en contraposición con los beneficios de la recarga. Si la estructura de recarga es de establecimiento comunal, los más beneficiados deberían absorber la mayoría de los costos.

Aspectos Institucionales en Proyectos de GRA

Aun cuando los parámetros hidrológicos e hidrogeológicos de un proyecto de recarga sean favorables, el éxito del proyecto no puede garantizarse a menos que sea gestionado y operado efectivamente. Los principales aspectos institucionales a considerar se encuentran relacionados con la planificación y determinación de los objetivos y la implementación y gestión de las actividades de recarga establecidas.

Diversos métodos han sido empleados para implementar actividades de gestión de los recursos naturales, por ejemplo la GRA, recayendo la responsabilidad recae (en distintos grados) en los gobiernos estatales, locales, agencias de desarrollo, el sector privado, ONG y población local. En esta sección, centraremos la atención en actividades de recarga descentralizadas y de bajo costo, con frecuencia organizadas a través de asociaciones Estado/ gobierno-ONG.

Un tema institucional predominante que ha surgido en las últimas dos décadas ha sido la descentralización, generalmente asociada a los esfuerzos en promover un proceso de planificación más participativo y "ascendente" (bottom-up). Este ha sido el caso en India, por ejemplo, en donde los programas de desarrollo de cuencas, en general con un fuerte enfoque GRA, han destacado de manera creciente la necesidad de que la toma de decisiones sea participativa y descentralizada. Considerando que los sectores de menos recursos son por lo general los más dependientes del acervo común de recursos naturales como el agua, las mejoras en la gestión descentralizada -ya sea en la igualdad de derechos y responsabilidades, en la productividad de los recursos, o en su sostenibilidad- pueden contribuir sustancialmente en su sustento (Carney & Farrington, 1998).

La descentralización y la gestión participativa están claramente vinculadas. La gestión participativa puede ser definida como un proceso en el que "aquellos que tienen un interés legítimo en un proyecto, influyen en las decisiones que los afectan, y además reciben una proporción de los beneficios que de él derivan" (ODA, 1995). Actualmente es generalmente aceptado que para aumentar y sostener la productividad de los recursos naturales, involucrados y afectados por la gestión del recurso tienen que participar en la planificación de su rehabilitación y gestión. Como se destaca en Farrington et al. (1998), esto implica nuevas formas de hacer negocios (en la canalización de fondos, en la gestión de los proyectos, en la toma de decisiones, etc.) para aquellos involucrados en construir las nuevas coaliciones. También implica cambios en la localización del poder en la toma de decisiones y el acceso a los recursos. A pesar del concepto positivo, la participación no es un concepto neutral: los intereses existentes, así como las relaciones de poder, son desafiados y las nuevas formas de hacer negocios son en general altamente competitivas.

Un tema clave de la GRA, cuando se lleva a cabo de manera aislada o como parte de una paquete más amplio de medidas de gestión del recurso, es identificar metodologías que aseguren que la interfase entre la población rural, las organizaciones locales y el Estado sea manejada de manera tal de aumentar la eficiencia, la efectividad y la responsabilidad (Carney & Farrington, 1998). Considerando específicamente las etapas del ciclo de proyectos, y basándose en la experiencia de GRA dentro de los programas de cuencas en India, vale la pena destacar algunos casos.

Un tema clave en la etapa de **definición de los objetivos** es la claridad de los objetivos, y cómo (y por quiénes) son definidos. Es particularmente importante considerar las visiones e intereses de diferentes grupos - incluyendo los habitantes de las zonas aguas abajo del proyecto de recarga, y aquellas personas desprovistas de tierra o recursos hídricos privados- así como el grado en que los objetivos han sido definidos y acordados localmente. La experiencia indica que los proyectos que tienen mejor desempeño involucran a la población local en la discusión sobre cuáles son sus problemas y prioridades (por ejemplo, abastecimiento de agua potable, riego suplementario, etc.), consideran las distintas valoraciones que se le da al recurso, y son aquellos que adoptan metodologías flexibles para diversos sistemas de sustento y condiciones físicas.

Otros temas de importancia se relacionan al grado en el que las decisiones son tomadas con, o a favor de, la población local sobre:

- Selección o elegibilidad del área/ comunidad.
- Responsabilidades de participación (por ejemplo en la construcción, la repartición de costos, etc.).
- Opciones técnicas (por ejemplo para el diseño y localización de las estructuras).

Nuevamente, la experiencia indica que la flexibilidad y la toma de decisiones de manera conjunta son clave: proyectos que dedican tiempo y recursos a consultar y organizar a la población local, y que claramente definen las obligaciones y responsabilidades de los diferentes grupos (por ejemplo sobre el mantenimiento de la estructura) se desempeñan

mejor a largo plazo.

En la etapa de planificación es importante considerar los temas de distribución y equidad de la GRA. Debido a que los patrones de acceso al agua y los derechos de agua son desiguales, suponer que las actividades de recarga beneficiarán a todos por igual no es correcto. Así el proyecto debe considerar cómo serán distribuidos los

costos y beneficios entre:

- Grupos sociales diferentes y de distinto poder adquisitivo; por ejemplo, considerando los potenciales beneficiarios del proyecto, ¿quién debería contribuir a los costos?
- Las áreas diferentes, ¿cómo serán afectados los

LA EVOLUCIÓN DE PROGRAMAS DE DESARROLLO Y GRA EN INDIA

En India, la GRA en áreas rurales es llevada a cabo típicamente como parte de un paquete de medidas que apuntan al desarrollo o rehabilitación de cuencas. Estos programas de desarrollo de cuencas combinan una variedad de actividades de desarrollo/protección de la tierra, conservación de la humedad del suelo, reforestación, actividades de desarrollo de pasturas y hortalizas, así como también medidas explícitas de conservación/ incremento de los recursos hídricos.

Los proyectos de desarrollo de cuencas, han estado operando en India en varias formas, desde antes de su independencia. Sin embargo, el mayor estímulo para la acción gubernamental ocurrió en los años 70 y 80, cuando experiencias piloto de campo a largo plazo confirmaron que la introducción de barreras físicas a los flujos de agua y suelo, junto con la reforestación, podían producir incrementos significativos en la productividad del recurso. Estas experiencias impulsaron la creación de numerosos proyectos, planes y programas gubernamentales, a cargo de diversos departamentos de gobierno, para apoyar el desarrollo a nivel de microcuencas.

Los primeros programas de desarrollo a nivel de cuencas tomaban objetivos ecológicos como punto de partida. Los objetivos ecológicos, determinados a través de aspectos físicos, definieron la escala y el alcance de los proyectos de cuenca, y éstos fueron manejados como trabajos públicos con participación local limitada. Revisiones de estos proyectos indicaron que tuvieron un éxito limitado en alcanzar los objetivos ambientales y de sustento establecidos, y sólo una pequeña minoría de los proyectos –los gestionados por ONG y otras agencias locales– demostraron resultados sostenibles para las personas de menores recursos económicos (Kerr et al., 1998).

Esta metodología cambió en forma radical a mediados de los años 90s, reflejando mayores cambios en las políticas del sector del agua, con el fin de promocionar una metodología de planificación más focalizada en la gente. En particular, hubo un alejamiento de los objetivos físicos hacia la rehabilitación y desarrollo de los recursos ambientales de manera integrada, con el fin de desarro-

llar los recursos económicos y reducir la pobreza. En términos de estrategia, el énfasis fue puesto en enfoques participativos que involucraron comunidades locales en las etapas de planificación e implementación de los proyectos. Muchos de los cambios fueron impulsados por una serie de lineamientos (comúnmente llamados "lineamientos comunes") para el desarrollo de cuencas creados en 1994 por el Ministerio de Áreas Rurales y Empleo de aquel entonces. Los lineamientos marcaron un cambio significativo en el enfoque en varios aspectos importantes (basado en James & Robinson, 2001):

- Promover el desarrollo de asociaciones entre organizaciones gubernamentales y no gubernamentales como Agencias de Implementación de Proyectos (AIP), incluyendo ONG.
- Descentralizar, en lo posible, la gestión de programas al gobierno local y a las AIP.
- Facilitar la participación de la población local en el diseño e implementación de actividades de rehabilitación de cuencas, incluyendo la GRA, a través de comités de cuencas especialmente designados.
- Permitir el control local sobre la expedición de fondos para la rehabilitación, mediante agencias de desarrollo de distritos rurales.

Actualmente, la gestión de microcuencas consume más de US\$ 500 millones por año, canalizados a partir de fuentes del gobierno central. Los donantes han mostrado considerable interés en el desarrollo de cuencas, como era de suponer considerando que es una oportunidad para implementar los principios de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH), incluyendo la conservación del agua y el incremento del abastecimiento, con apoyo a sustentos rurales. No obstante, si bien la mayoría de los programas de desarrollo de cuencas subrayan la importancia de GRA, no hay "soluciones rápidas" para riesgos de sobreexplotación emergentes, y ciertamente no las habrá de no existir acciones para restringir la demanda de agua.

Referencia: basado en Gale et al., 2002.

usuarios aguas abajo, por ejemplo, si los flujos superficiales excedentes son utilizados como agua de recarga aguas arriba? Los impactos de las actividades de recarga -positivos y negativos- probablemente no estén limitados dentro de las fronteras de la comunidad.

- Períodos diferentes de tiempo, ¿existen beneficiados y perjudicados a corto y largo plazo?

Ciertos temas claves en las etapas de **implementación y gestión del proyecto** se relacionan con la composición y capacidad de las organizaciones locales de gestión, y la definición y manejo de los temas relacionados a la distribución de los costos.

En relación con la organización de la gestión, es probable que el establecimiento de comités de usuarios de estructuras de recarga, o con mayor frecuencia de actividades de desarrollo de cuencas, sea una precondición para la asistencia a proyectos. La gestión comunitaria, por lo general implica que la comunidad debería comprometer recursos para la implementación y mantenimiento de la estructura, y a la vez beneficiarse a través del ejercicio de la autoridad y control en la gestión del sistema.

El compromiso de los usuarios frente a una actividad o proyecto de recarga puede ser demostrado de distintas maneras. Por ejemplo, los contratos, pagos en efectivo por adelantado, y contribuciones al trabajo y/o materiales para la construcción pueden ser usados para evaluar la demanda de un sistema, y para indicar a los encargados del proyec-

to, o al gobierno, que las actividades planificadas concuerdan con las expectativas del usuario. Los proyectos que dedican tiempo a la movilización de la comunidad y a la formación de grupos de usuarios, y que claramente definen sus derechos y responsabilidades, probablemente logren mayor sostenibilidad.

En relación con la distribución de los costos, las reglas relacionadas con la determinación de los propietarios, la operación y el mantenimiento de las estructuras, y la recuperación de los costos, deben ser establecidas durante la fase de planificación y acordadas por todos los involucrados. Es necesario que las reglas sean transparentes y definidas mediante metodologías claras, para determinar, monitorear y ajustar las contribuciones en el tiempo. Nuevamente, el impacto potencial de un proyecto de recarga en los sectores más carenciados debe ser afrontado mediante un proyecto previo a la implementación del sistema de contribución, y todo arreglo de subsidio debe ser acordado. La flexibilidad es importante; por ejemplo, en la contribución a los principales costos de un proyecto de recarga, puede permitirse que las personas de menores ingresos aumenten su contribución en mano de obra a cambio de que realicen una contribución financiera menor.

Como se mencionó anteriormente, deben definirse los temas relacionados con la distribución de costos y beneficios de una actividad de recarga, a pesar de que, como se menciona en los resúmenes técnicos de este trabajo, no siempre es fácil predecir el impacto de la GRA en el agua subterránea y el acceso de las personas al agua en un área específica.

Conclusiones

- La Gestión de la Recarga de Acuíferos (GRA) está siendo utilizada cada vez en mayor medida para la gestión y almacenamiento de agua. Hay muchos métodos que han sido desarrollados a través de los siglos, según la fuente y la disponibilidad de agua, la demanda, la geología y la estructura socio-económica. Estos métodos están siendo ampliamente replicados y desarrollados usando tecnologías actuales, sin embargo los ejemplos de estimaciones cuantificadas de su efectividad son limitados.
- Es necesario una mejor comprensión y divulgación de cómo las estructuras de recarga funcionan realmente y de los impactos que tienen sobre la disponibilidad y calidad del agua, la sostenibilidad social y económica, así como también el impacto sobre el ambiente local y aguas abajo; de manera de promover una implementación en la cual la relación costo-beneficio sea positiva y de amplio alcance.
- La Gestión de la Recarga de Acuíferos debe ser considerada como parte de una estrategia de gestión integrada del agua y cuencas junto con la gestión del agua superficial y manejo del suelo, el control de la erosión y la contaminación, así como también la gestión de la demanda y del ambiente, y la reutilización del agua. Su rol será cada vez más importante, ya que la demanda crece y los impactos del cambio y variabilidad climática se hacen más visibles.
- La promoción de la Gestión de la Recarga de Acuíferos debería enfocarse en compartir conocimientos y experiencias a través de redes y proyectos de demostración de buenas prácticas, junto a iniciativas de capacitación incluyendo recursos en la web, cursos, seminarios y talleres.



Ejemplos de Proyectos de Gestión de la Recarga de Acuíferos

Con el fin de ilustrar algunos de los temas analizados en este informe, se han seleccionado ejemplos de sistemas de recarga en un amplio rango de escenarios hidrológicos y utilizando diversas fuentes de agua de recarga. Los breves resúmenes que se presentan a continuación proveen una conexión con documentación adicional, siendo citada la bibliografía que fue utilizada como fuente. Adicionalmente, al final de este informe se detalla una lista de documentos de referencia clave, además se puede acceder a mayor información y ejemplos a través de la base de búsqueda de datos en la página web: www.iah.org/recharge.

A. GESTIÓN DE CUENCA EN RAJASTHAN, INDIA

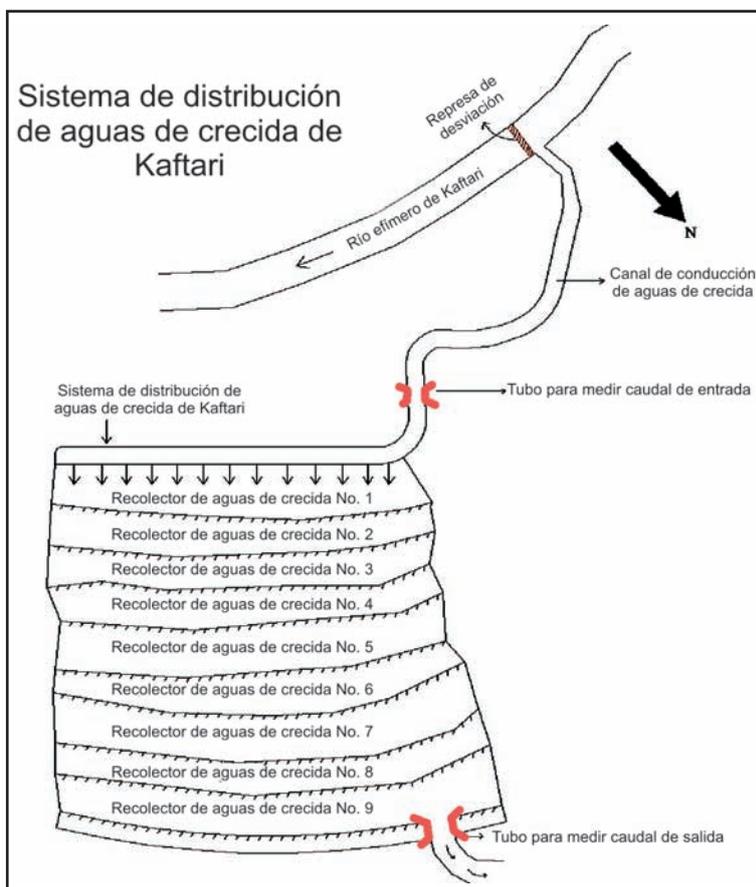
En 1985, la cuenca del río Arvari (al igual que otras cuencas del área) se encontraba en un estado de alta degradación debido al sobrebombeo de agua subterránea, remoción de la vegetación natural y erosión del suelo, agravados por una severa sequía. La falta de empleo condujo a la migración de los habitantes del área. La ONG Tarun Bharat Sangh (TBS) afrontó el problema de la falta de seguridad hídrica iniciando un programa de captación de agua mediante la construcción de represas de tierra con forma de media luna ("johad") para recolectar la escorrentía producida durante breves, pero intensas, tormentas que se producían en el área. La captación de agua de lluvia durante las siguientes dos décadas fue acompañada de programas de conservación suelo-agua-bosque, diseñados e implementados por los propios pobladores del área. El aporte financiero y de asesoría fue provisto por TBS bajo la dirección de Rajendra Singh. La nueva forma de gestión fue implementada con consentimiento popular y consideró la relación costo beneficio entre los pobladores, por ejemplo, el granjero que brindó la tierra para la construcción del johad fue el principal beneficiario del agua de recarga. Sin embargo, la comunidad entera se vio beneficiada.

La implementación de iniciativas similares por un número creciente de aldeas en el área ha resultado en que actualmente, más de 70 aldeas estén involucradas en el plan, construyendo muchos miles de johads así como otras estructuras de captación de agua. El "Parlamento del Río Avari", formado por todas las personas vinculadas con la causa, actualmente se encarga de la gestión de la cuenca. El aumento de la recarga, combinado con las otras iniciativas de gestión de cuencas han resultado en un incremento de los niveles de agua subterránea y, desde 1995, el río Avari tiene un caudal permanente.

REFERENCIA: Avari. Información VDC publicada por el Centro para la Ciencia y el Ambiente, India. www.cseindia.org

B. RECARGA DE ACUÍFERO UTILIZANDO UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN, KAFTARI, IRÁN

En la planicie de Dorz-Sayban, localizada 115 km al suroeste de Larestan, en Irán, donde 3.500 hectáreas de tierra son irrigadas con agua subterránea, la sobreexplotación de este recurso ha causado una significativa disminución del nivel freático (1,5 m/año) y el deterioro de su calidad. Con el propósito de reducir la tasa de disminución del nivel



freático, cinco sistemas de distribución para recarga subterránea con agua de inundación fueron diseñados y construidos en la región entre 1983 y 2001.

Durante el periodo 2002-2003, utilizando canales rectangulares fueron medidos, en nueve eventos de inundación, los caudales de entrada y salida del sistema de distribución. Las tasas máximas de caudales de entrada y salida fueron 20,3 y 7,26 m³/s, respectivamente. Los volúmenes totales de entrada y salida del sistema fueron cerca de 886.000 y 146.000 m³ para los nueve eventos de inundación. Por lo tanto, 83,5% del caudal de entrada al sistema fue recargado al acuífero y únicamente pequeñas cantidades se perdieron por evaporación. Esto muestra el alto desempeño de los sistemas de distribución con agua de inundación en la recarga de agua subterránea.

En este sistema, más del 70% del material en suspensión se sedimenta. Esto conduce inevitablemente a la obstrucción y a la reducción de la eficiencia del sistema, pero también provoca un mejoramiento del suelo desde la perspectiva de la agricultura. Adicionalmente, la recarga gestionada mejora la calidad del agua subterránea, ya que la Conductividad Eléctrica (CE) del agua de inundación es bastante menor que la del agua subterránea (0,3-0,4 vs. 2,0-9,0 dS/m).

REFERENCIA: Esfandiari-Baiat, M. y Rahbar, G. 2004. Monitoreo de las tasas de caudal de entrada y de caudal de salida del sistema artificial de recarga de agua subterránea del Kaftari en la región Dorz-Sayban en el Sureste de Irán.

C. REPRESAS PERFORADAS PARA RECARGAR ACUÍFEROS DESABASTECIDOS EN BALOCHISTÁN, PAKISTAN

El agua subterránea es la única fuente de agua dulce en Balochistán. Durante las últimas dos décadas su uso ha aumentado de manera sustancial debido a la expansión de la agricultura, el rápido crecimiento de la población y de la industria. La extracción en exceso de agua subterránea desde los acuíferos ha provocado el secado de muchos pozos de extracción, manantiales y karezes; la situación se vio agravada aún más por la reciente sequía que se extendió en la provincia durante el periodo 1998-2002.

El Consejo de Investigación en Recursos Hídricos de Pakistán (PCRWR, por sus siglas en inglés) introdujo e implementó el concepto de construir y operar represas perforadas en Balochistán en el marco de uno de sus proyectos de investigación y desarrollo. La primera represa perforada fue construida durante 2002 en Margat, a 35 Km de Quetta. Una red de monitoreo de agua subterránea constituida por 7 piezómetros fue instalada para monitorear los efectos de la represa.

La represa perforada actúa como barrera reduciendo la velocidad de la escorrentía y reteniendo el agua por tiempo suficiente como para permitir que el material en suspensión sedimente, reduciendo así la obstrucción de los macroporos del lecho del río aguas abajo de la represa. Esto aumenta el



Vista aguas abajo de una represa perforada en Balochistán



Arbustos xerófitos plantados en zona de captación

movimiento del agua de lluvia hacia el interior del acuífero y el almacenamiento bajo la superficie para su uso futuro, minimizando las pérdidas por evaporación, que son elevadas en la zona alta de Balochistán.

La construcción de represas perforadas de bajo costo y represas de control con bancos perforados fue realizada con cantos rodados, adoquines, piedras y gravas de gran tamaño disponibles en y alrededor de los arroyos y ríos. Los materiales para la represa fueron contenidos con redes de tela metálica, construidas en 5 escalones logrando una altura total de 4,9 m. Los caños se incorporaron luego del segundo y cuarto escalón para descargar aguas abajo el agua excedente para infiltración. La parte superior de la represa actúa como un vertedor. Además se construyeron mallas de contención aguas arriba y aguas abajo para prevenir la erosión. Actualmente, la represa tiene un área de captación de 1,79 km² y una capacidad de almacenamiento de aproximadamente 11.000 m³.

Aunque el impacto cuantitativo de las represas perforadas únicamente podrá ser determinado con el paso del tiempo, la introducción del concepto ha sido apreciada y reconocida por profesionales y granjeros. Estas tecnologías serán evaluadas, ajustadas e implementadas para incrementar aún más la recarga de agua subterránea.

El diseño de la represa ya fue mejorado. Se identificó la necesidad de utilizar una pequeña lámina ajustable rellena de grava para ser colocada aguas arriba del cuerpo de la represa. Esto permitió incrementar el tiempo de retención del agua de lluvia en el embalse, previo a la descarga en el cauce.

La implementación de esta tecnología debió ser acompañada por otras intervenciones. Éstas incluyeron un estricto control del pastoreo, junto con la gestión extensiva de la cuenca en las zonas de captación, de forma de reducir la carga de sedimentos que llegan a la represa y aumentar la recarga natural del agua de lluvia. En este caso se plantaron

600 arbustos de 3 especies xerófitas en el área de captación.

Por otro lado, la tala indiscriminada y la extracción de arbustos, pastos y árboles no deben ser incentivados, por ejemplo mediante la creación de fuentes de energía alternativas, entre ellas el abastecimiento subsidiado de gas licuado de petróleo (GLP), gas natural y madera combustible. Los subsidios en forma de tarifas planas de electricidad, conexión de electricidad para los granjeros, etc. deberían estar vinculados con la adopción y construcción de estructuras de recarga, así como también prácticas de gestión de cuencas.

REFERENCIA. Kahlown, M.A. 2004. Represa perforadas para recargar acuíferos desabastecidos en Balochistán.

D. ALMACENAMIENTO DE ESCORRENTÍA DE TORMENTA EN ACUÍFEROS SALOBRES MEDIANTE PERFORACIONES PARA DESARROLLAR LA OFERTA DE AGUA PARA RIEGO - AUSTRALIA

El desarrollo de reservas de agua para riego mediante la inyección de escorrentía de tormenta en acuíferos salobres es practicada en pocos lugares del mundo, pero puede tener aplicaciones más amplias, especialmente en regiones semiáridas. Ejemplos en Australia del Sur demuestran la viabilidad técnica y económica, y la sostenibilidad ambiental de la recarga artificial y la recuperación de agua de tormenta para reservas peri-urbanas de agua para riego.

Un importante factor que impulsa la reutilización de agua mediante acuíferos es la necesidad de proteger a los ecosistemas marinos y de agua dulce, que por lo general son los receptores del agua de tormenta y efluentes tratados. La tendencia hacia una carga o límites de concentración de descarga más estrictos implica una gestión de la captación más avanzada y métodos de tratamiento mejorados, brindando mayores oportunidades para el almacenamiento y recuperación en acuíferos.

La calidad del agua a ser inyectada en el acuífero para ser reutilizada se define sobre la base de tres objetivos:

- Se debe evitar la obstrucción irreversible del pozo de inyección.
- Se deben proteger los usos beneficiosos existentes y potenciales del agua subterránea.
- La calidad del agua recuperada debe cumplir con los requisitos para los fines que se utilizará.

Tomando en cuenta estos objetivos, recientemente se han desarrollado en Australia nuevos lineamientos sobre la calidad del agua de inyección. Estos lineamientos difieren de aquellos que se utilizan en

otros países, por dos razones: (i) consideran otros usos beneficiosos además del consumo humano, y (ii) consideran el tratamiento que sufre el agua dentro del acuífero. Los lineamientos cumplen con los principios de la Estrategia Nacional de Gestión de Calidad del Agua de Australia, y se refieren a los lineamientos de calidad de agua necesario para determinar la adecuación del agua para cada uso (o valor ambiental).

En áreas urbanas con suelos arcillosos, como la mayor parte del área metropolitana de Adelaida, la escorrentía de tormenta urbana no era retenida; por el contrario, las redes de drenaje aceleraban su descarga hacia el mar. Los acuíferos de piedra caliza ubicados por debajo de la ciudad, no podían ser conectados al agua de tormenta mediante estanques de retención o cuencas de distribución de una manera costo-efectiva debido a las bajas tasas de filtración a través de la arcilla superficial.

Sin embargo, perforaciones de 100 m o más que penetran en los acuíferos de piedra caliza subyacentes permitieron la conexión, y la escorrentía de invierno pudo ser almacenada hasta el verano usando el acuífero como una reserva subterránea. La escorrentía urbana es recogida y tratada en cuencas de retención y humedales construidos para reducir el riesgo de inundación y para mejorar la calidad del agua de tormenta y las aguas captadas. El agua retenida luego es llevada por gravedad o bombeada hacia el interior del pozo de inyección por medio de sistemas básicos de tratamiento, como por ejemplo pantallas o filtros. El agua recuperada en general no requiere tratamiento cuando se utiliza para riego.

El sitio de estudio se localiza en un nuevo complejo suburbano, conocido como la Granja Andrews, localizado en la franja norte del área metropolitana de Adelaida. La fuente de agua para la inyección es escorrentía de tormenta derivada de una zona de captación periurbana (pastoreo ovino y área residencial), que cubre un área de 55 km².

La inyección se realizó en la parte más alta, 19 m, de un acuífero terciario confinado, situado a una profundidad de 105 m debajo de la superficie. Tres pozos de observación fueron perforados a distancias de 25, 65 y 325 m por debajo del gradiente de inyección del pozo. El acuífero está constituido por carbonato fino cementado de forma variable y material arenoso, con una transmisividad de 180m²/día y un coeficiente de almacenamiento de 5x10⁻⁴ medido mediante pruebas de bombeo en el acuífero (Gerges et al., 1996).

La escorrentía efímera de tormenta es contenida en una cuenca de retención y bombeada, mediante una pantalla, a través del pozo de inyección al acuífero. En el período de agosto 1993 a marzo 1997 existieron 5 estaciones principales de inyección. La primera utilizaba agua corriente y el resto agua de tormenta. Se inyectaron aproxi-

madamente 240.000 m³ de agua, y la tasa de recarga varió entre 15 y 20 l/s.

Luego de la inyección, sólo los coliformes fecales excedieron (en algunos momentos) los límites establecidos para agua de riego; en el caso de los límites para agua potable de los coliformes fecales excedieron los límites establecidos en la Estrategia Nacional de Gestión de Calidad del Agua (1992), pero en un período de cuatro semanas decayeron a niveles aceptables (Pavelic et al., 1996). Actualmente, se están realizando estudios para estimar la supervivencia de patógenos que son más longevos que las bacterias coliformes (Toze, 2005).

El resto de los parámetros tuvieron poco o ningún impacto negativo en la calidad del agua subterránea y a menudo tuvo impactos beneficiosos (por ej. Sólidos Totales Disueltos, STD). Es importante destacar que previamente a la inyección, el agua subterránea no cumplía con los límites para agua potable con respecto a STD y hierro. De los compuestos orgánicos traza monitoreados sólo atrazina (un herbicida de uso frecuente) y pentaclorofenol (un conservante de la madera de uso frecuente), se detectaron en el agua de tormenta y pozos de observación a niveles sustancialmente menores que los niveles límites para el agua potable.

La inyección de agua provocó la obstrucción de los pozos por distintos factores. El zooplancton fue el primero en causar la obstrucción y el factor más fácilmente identificable, además fue el único factor que detuvo la inyección. Esto fue solucionado protegiendo la toma de bombeo con un filtro (Gerges et al., 1995). Algunos sólidos en suspensión se acumulan alrededor del área de contacto entre el pozo de inyección y la interfaz del acuífero. Debido a que el rango de tamaño de las partículas del agua de inyección (mediana aproximadamente de 4 mm) es menor que el del acuífero (mediana aproximadamente de 120 mm), la mayoría de las partículas del agua de inyección penetran al acuífero y sedimentan en un extenso radio alrededor del pozo de inyección, pero esto todavía debe ser confirmado. Hekmeijer (1997) demostró que la obstrucción física causa formación de espuma alrededor del pozo de inyección, pero no representa un riesgo significativo para la operación. La desobstrucción del pozo de inyección se logra mediante la inyección de aire a presión (Pavelic et al., 1998). Luego de los problemas de obstrucción con zooplancton, que requirió que el pozo fuese desobstruido de manera frecuente, se logró que la desobstrucción se realizara únicamente una o dos veces al año. El monitoreo de la carga de sólidos en suspensión del agua de inyección, y del tama-

ño de las partículas de los sedimentos removidos con la maniobra de desobstrucción mediante aire, muestran que una parte muy pequeña de estos sedimentos (aproximadamente el 1%) derivan del agua de tormenta. La mayoría de los sedimentos derivan de las arenas de la matriz del acuífero, que es movilizadas como calcita disuelta (Rattray et al., 1996). La materia orgánica filtrada se deposita alrededor del pozo de inyección provocando un crecimiento bacteriano, que puede contribuir a la obstrucción a corto plazo.

Los resultados de este estudio piloto, el primer sitio AAR bien instrumentado y monitoreado que utiliza agua de tormenta tratada de una cuenca de retención en Australia, muestran la capacidad de la instalación para proveer agua adecuada para el riego. Es posible que con el tratamiento que sufre el agua dentro del acuífero, el agua recuperada pueda ser utilizada para consumo humano. Como en muchas experiencias piloto, se han presentado problemas técnicos, pero éstos se han solucionado.

REFERENCIA: Martin, R.R., Gerger, N.Z. y Dillon, P.J. (2000). Almacenamiento en acuíferos y recuperación (AAR) usando agua tratada hasta los estándares para riego. Proc. 30th Congreso IAHR, Ciudad del Cabo, Sudáfrica.

E. RECARGA INTER-DUNAR EN ATLANTIS, SUDÁFRICA

Atlantis, una ciudad situada en la costa oeste de Sudáfrica, 50 Km al Norte de Ciudad del Cabo, cubre completamente su demanda de agua potable de 5,5x10⁶ m³/a mediante la gestión de la recarga de un acuífero arenoso superficial. El clima local es mediterráneo, con una media de temperaturas máximas y mínimas de 23,3 °C y 11,8 °C respectivamente. La precipitación media anual es alrededor de 450 mm; sin embargo, cerca del 65% de los eventos de precipitación ocurren durante los meses de invierno, de mayo a septiembre.

Grandes depósitos de sedimentos del Cenozoico, que constituyen un acuífero arenoso no confinado subyacen al área. La capa de arena tiene un espesor de 60 m en el área central, con un promedio de 25 m. Bajo estos sedimentos se encuentran esquistos y areniscas grises. La parte superficial del acuífero está cubierta por dunas de arena móviles o de arena con vegetación. Debido a cambios rápidos de facies en cortas distancias, el acuífero es heterogéneo, anisotrópico y freático a semiconfinado y el rango de transmisividad varía de 50 a 1.300 m²/d.

Actualmente, la extracción de agua del acuífero de Atlantis está restringida a dos áreas de pozos, dos grandes cuencas de recarga, que cubren un área aproximada de 500.000 m² y se sitúan unos 500 m por encima del gradiente de recarga del acuífero. Las tres fuentes

de agua disponibles para recarga son: Escorrentía de tormenta, agua subterránea y agua residual tratada. El agua de tormenta es recolectada mediante cuencas de retención. Se ha establecido un sistema para derivar las aguas de tormenta de zonas industriales de baja calidad fuera de las cuencas de recarga y depositar el agua en cuencas de recarga costera. El agua subterránea se extrae del acuífero arenoso, luego es tratada en una planta de intercambio de iones y ablandamiento del agua, y finalmente distribuida, utilizada, colectada, y tratada junto con la escorrentía de tormenta urbana, para nuevamente ser recargada al interior del acuífero.

Para que el agua residual pueda ser utilizada como fuente de agua de recarga, se ha implementado un sistema de alcantarillado reticulado, esto permite la separación del agua residual proveniente de las áreas residenciales del agua proveniente de las áreas industriales. El agua residual doméstica es tratada en una planta de lodo activado y mezclada con agua de tormenta proveniente de áreas residenciales, antes de ser descargada en la cuenca de recarga. Los efluentes industriales tratados y el agua de tormenta recolectada de áreas industriales no son considerados como reutilizables para abastecimiento de una ciudad, y son dispuestos en cuencas de infiltración costeras. Esto provee una forma ambientalmente aceptable de disposición final de agua de escasa calidad, a la vez que constituye una barrera entre el área de pozos de extracción y la posible intrusión salina desde el mar.

El bajo contenido de arcillas del acuífero aluvial limitó los procesos de purificación durante la infiltración y solutos como potasio se detectaron a lo largo de distancias importantes debajo de la cuenca de recarga. Es necesario un control cuidadoso de la calidad del agua que es descargada en la cuenca de recarga de manera de mejorar la calidad del agua de recarga; esto es posible únicamente si se controla la cantidad de agua que se recarga. Si la cuenca de recarga recibe la máxima cantidad de agua disponible, la calidad del agua subterránea se deteriora severamente. Si sólo el agua de mejor calidad es utilizada para recarga, el volumen de la recarga se reduce de manera importante, pero la calidad del agua subterránea mejora. Diferentes estrategias de gestión se reflejan en la calidad del agua de recarga, que a su vez se reflejan en el agua subterránea. Por esta razón, es importante que se incluya flexibilidad en el plan, de forma de posibilitar una gestión que incluya o excluya los distintos componentes del agua de recarga, según las necesidades de calidad de agua y las demandas de abastecimiento.

Gestionar la calidad del agua y, en particular, la salinidad, ha sido uno de los desafíos más grandes del Plan de Aguas de Atlantis. La salinidad en el acuífero de Atlantis proviene de distintas fuentes, por ejemplo aerosoles salinos arrastrados por el viento desde el Océano Atlántico, lixiviación de afloramientos de esquistos de la roca madre, y de sedimentos de origen marino. El reciclado parcial del agua del

sistema, donde el agua residual tratada proveniente de la ciudad es infiltrada al interior del acuífero, contribuye al problema de salinidad. La importación de pequeñas cantidades de agua superficial es una importante fuente adicional de agua dulce de baja salinidad que ingresa al sistema. El agua residual doméstica e industrial es tratada de manera separada en plantas gemelas de tratamiento y únicamente el efluente final de la planta de tratamiento de agua de origen doméstico es usado para recarga.

La obstrucción de las perforaciones es un fenómeno complejo causado por una variedad de agentes físicos, químicos y biológicos, funcionando individualmente o de manera conjunta. Una disminución del rendimiento de las perforaciones condujo a la detección de problemas de obstrucción extensivos. La naturaleza amplia del problema y la presencia de hierro y sulfato en el agua subterránea llevaron a determinar que se trataba de un problema de obstrucción de origen biológico y relacionado con el hierro, y no de una obstrucción física de perforaciones individuales. Se sospechaba que la raíz principal del problema era el sobrebombeo de las perforaciones, lo que habría permitido el ingreso de oxígeno en el interior del acuífero.

La recarga mejorada de agua subterránea aseguró la sostenibilidad del suministro de agua de Atlantis durante dos décadas y continuará jugando un rol esencial. El plan es altamente costo-efectivo y puede sostener el continuo crecimiento urbano de Atlantis hasta bien entrado el siglo XXI. El plan es capaz de abastecer de agua a un costo del 20% de lo que hubiera sido si el agua superficial por cañería hubiera sido utilizada para suministrar agua potable para Atlantis, como se propuso en una etapa previa. Atlantis representa un prototipo a desarrollar en zonas áridas del sur de África.

REFERENCIA: Tredoux, G., Murray, E.C. & Cave, L.C. 2003. Del capítulo 8. Sistemas de infiltración y otros sistemas de recarga en el sur de África. "Gestión de la recarga del acuífero y almacenamiento subsuperficial" Publicación NCC-IAH. N°4.

F. RECARGA DE CUARCITAS FRACTURADAS EN WINDHOEK, NAMIBIA

Windhoek se encuentra localizado en las tierras semiáridas del centro de Namibia. Hasta 1970, con la finalización de una represa para abastecimiento de agua, el acuífero de Windhoek fue la principal fuente de agua de la ciudad. Actualmente el acuífero es una fuente de respaldo de agua superficial y una fuente de emergencia en períodos de sequía. La confiabilidad de esta fuente, sin embargo, se ha visto comprometida como resultado de la extracción de agua a gran escala desde mediados del siglo pasado.

La ciudad depende principalmente del agua superficial, pero debido a la inestabilidad de las lluvias, las reservas en las represas de abastecimiento con frecuencia escasean. El agua subterránea en general representa el 10% de las necesidades de agua de la ciudad, pero con la recarga de acuíferos gestionada a gran escala esto podría aumentar significativamente, al punto que el acuífero (o banco de agua) constituya la fuente de agua principal durante las sequías.

El acuífero Windhoek consiste principalmente de cuarcitas y esquistos. El escenario geológico es extremadamente complejo debido a varios episodios de desdoblamiento y fractura, incluyendo compresión y agrietado. La intensa fracturación, junto con las características físicas y mineralógicas contrastantes de esquistos y cuarcitas han resultado en un sistema de acuífero altamente fracturado y anisotrópico.

La capacidad del acuífero para recibir agua a una tasa lo suficientemente alta como para que el proyecto sea económicamente rentable fue establecida mediante pruebas de inyección por perforaciones. La prueba más larga duró 195 días y la tasa de inyección más elevada alcanzada fue 59,4 l/s (214 m³/hora). El agua que se inyectó, si bien era agua potable completamente tratada proveniente de las represas de abaste-



Construcción de un sistema de carbono activado, cercano a un pozo de inyección en Windhoek, Namibia

cimiento de Windhoek, fue además clorada y tratada con carbono granular activado. De esta forma se aseguró que únicamente el agua de buena calidad fuera transferida al acuífero, y los riesgos de obstrucción a largo plazo se minimizaran.

La recarga artificial a gran escala se implementó en tres etapas. En la primera etapa se usaron perforaciones existentes. Se logró una capacidad de inyección de 3,7 Mm³/año. La segunda etapa (también utilizando perforaciones existentes) incrementará la capacidad de inyección a 8,1 Mm³/año; y la tercera etapa (con nuevas perforaciones en la periferia del acuífero) podría proveer infraestructura para inyectar 16,5 Mm³/año, lo que equivale al 90% de las necesidades actuales de agua de la ciudad por año. El objetivo a largo plazo es hacer posible que se recargue el acuífero lo más rápidamente luego de periodos de gran extracción.

Referencia: Murray, E.C. 2004. Gestión inteligente del agua para pueblos y ciudades. Comisión de Investigación de Aguas, Sudáfrica (www.wrc.org.za) ISBN 1-77005-092-2.

G. ALMACENAMIENTO DE AGUA SUBSUPERFICIAL EN KENYA

En zonas áridas y semiáridas de Kenia, donde las lluvias son erráticas y las pérdidas de agua por escorrentía son elevadas, existe una creciente presión sobre la tierra. La escorrentía superficial recolectada en estas áreas es utilizada para los cultivos y cría de ganado. Debido al incremento en frecuencia y severidad de las sequías durante la década de 1970-1980, la preocupación en captar el agua de lluvia ha aumentado (Thomas, 1997).

Varias técnicas se utilizan en Kenia para captar agua de lluvia, éstas incluyen:

- Barreras de desechos: éstas son hechas a partir de los residuos de las cosechas, son simples y fáciles de hacer. Son efectivas a bajos niveles de precipitación. El pasto y las malezas que crecen a lo largo de ellas las estabiliza en aproximadamente 2 años. El suelo atrapado refuerza estas barreras;
- Bandas de pasto: son desarrolladas a partir de bandas de tierra sin arar o bandas donde no se plantan semillas de pasto. Como en el caso de las barreras de desechos mencionadas anteriormente, el agua y el suelo son retenidos en estas bandas;
- Microcaptaciones: incluyen varios tipos de hoyos de recolección utilizados para plantar árboles y cultivos de valor, por ejemplo bananos y árboles frutales;
- Montículos de contorno y diques: éstos son surcos construidos según las líneas de contorno del relieve y la tierra se dispone pendiente abajo del surco. Pueden ser hechos de tierra o de piedra.

Almacenan agua en el área excavada. Los cultivos con este sistema tienen mayores producciones, especialmente en estaciones del año con lluvias por debajo de lo normal;

- Caballones de retención: éstos son grandes zanjas diseñadas para captar y retener la escorrentía y mantenerla hasta que se infiltre en el suelo (Thomas, 1997:98). Son utilizadas cuando la escorrentía de los caminos es desviada hacia tierras cultivadas;
- Terrazas (Fanya Juu): se realizan cavando una zanja y colocando la tierra pendiente arriba formando un caballón de barrera. El caballón de barrera retiene agua y tierra. Son utilizados para mejorar la retención y controlar la erosión de tierras cultivadas, mejorando la producción de la cosecha.
- Represas de tierra y hoyos: éstas son bancos elevados de tierra compactada construidos en el extremo inferior de una depresión. Son susceptibles a la acumulación rápida de limo si la zona de captación no es conservada o si es desnudada por animales. Existen numerosos ejemplos en los que las estructuras son completamente disfuncionales en 10 años. También, debido a la alta evaporación, se pierde una gran cantidad de agua;
- Represas de arena: están hechas mediante la construcción de una pared transversal al lecho del río que retiene al agua. Debido a la baja tasa de evaporación, las pérdidas de agua son mínimas. Además tienen una vida útil larga, y altas recargas laterales y verticales. Presentan un gran potencial para crear acuíferos artificiales poco profundos.

El costo de una represa de arena de 60 m³ en Kitui con un tiempo de vida mínimo de 50 años y una producción mínima de 2.000 m³, es de 6.000 euros. Esto es el equivalente a 6 tanques de 46 m³ de 1.000 euros cada uno. Evidentemente es más económico construir una represa de arena, que servirá a 50 hogares por el costo de seis tanques, que servirían sólo a seis hogares.

REFERENCIA: Mutiso, S. 2003. Del capítulo 4 de "Gestión de la Recarga de Acuíferos y Almacenamiento Subsuperficial." Publicación NCC-IAH. N° 4.

H. RECARGA DE ACUÍFEROS MEDIANTE CANALES DE RIEGO EN LA SIERRA NEVADA DEL SUR DE ESPAÑA

En el Sur de España, entre marzo y junio de cada año, cuando hay un excedente de agua disponible debido al deshielo, el agua de los ríos es desviada por medio de una extensa red de canales de riego hacia áreas bien definidas, altamente permeables.

Rocas duras, fundamentalmente esquistos, cuarcitas secundarias y areniscas subyacen en el área. La GRA se practica mediante una red de canales de riego, que descienden suavemente, siguiendo las líneas

de contorno del relieve. Los canales son cavados hacia el interior del suelo, de manera no lineal, alcanzando hasta 15 Km de largo.

El agua se filtra en zonas de alta permeabilidad, que son las zonas más erosionadas o zonas de fractura de la roca madre. Las zanjas hacia el canal de riego conectan algunas fracturas de la roca madre. Las fracturas utilizadas para infiltración presentan aberturas de hasta 10 cm. Debido a la actividad de recarga en el área se desarrollaron dos tipos de manantiales. Manantiales temporales, que emergen en los lugares en que se observa circulación de agua del subsuelo. El régimen de flujo de este tipo de manantiales está directamente relacionado al proceso de riego y se secan tan pronto el canal de riego se haya secado. El agua que penetra en la roca madre fracturada, también se descarga en manantiales perennes del área. En este caso, el flujo se mantiene todo el año, pero puede decaer considerablemente luego de largos periodos sin recarga. El tiempo de tránsito entre el punto de infiltración y los diferentes manantiales se estableció mediante pruebas de rastreo, y es de aproximadamente 5 días para agua que circula a escasa profundidad e incursionando en manantiales temporales, mientras que el agua es retenida el doble de tiempo en el caso de los manantiales perennes. Los diferentes tiempos de residencia tienen una influencia marcada en la calidad del agua, siendo los manantiales perennes los que suministran agua de calidad superior. Por esta razón, estos manantiales son utilizados para abastecer agua potable a las aldeas, mientras que los manantiales temporales son utilizados únicamente para riego.

El agua recuperada de los manantiales es sólo una fracción del agua de recarga: gran parte de ésta es utilizada para mantener la humedad del suelo, pendiente abajo de los canales de riego. Esto tuvo un efecto duradero en el área, ya que densa vegetación se ha establecido. El sistema no requiere infraestructura sofisticada y se cree que es aplicable en diferentes partes del mundo.

REFERENCIA: Pulido-Bosch, 1995. Siglos de recarga artificial en la franja sur de la Sierra Nevada. Geología Ambiental. V.26. pp.57-63.

I. AUMENTO DE LA RECARGA DE AGUA SUBTERRÁNEA EN HUNGRÍA MEDIANTE FILTRACIÓN INDUCIDA EN LAS MÁRGENES DE LOS RÍOS PARA ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE

El agua filtrada en las márgenes de los ríos cubre un tercio de la demanda de agua, y es de importancia crucial para el suministro de agua potable en Hungría. El abastecimiento de agua potable de Budapest depende completamente del agua filtrada en las márgenes del Danubio. La cantidad extraída está limitada únicamente por la capacidad de filtración de las márgenes; la descarga del río es un orden de mag-

nitud mayor que la cantidad extraída. Desde el punto de vista de la fuente de agua prácticamente no habría limitación, lo que le da a esta fuente de agua una alta seguridad, especialmente si se considera la sensibilidad a la variabilidad climática y el cambio climático de las restantes fuentes de agua superficiales. La ventaja que representa en comparación con la extracción directa del agua superficial, es la reducida necesidad de tratamiento del agua. Las capacidades de purificación natural de las secciones explotadas del río son muy elevadas; de hecho, no se han encontrado microcontaminantes en el agua extraída. Esta ventaja es valiosa para usuarios que requieren agua potable de alta calidad para suministro público y determinados usos industriales, pero no para riego. A lo largo de las márgenes del Danubio se encuentran la mayoría de los pozos de extracción, únicamente dos de encuentran en otros ríos (uno en la zona Suroeste del país, y otro en la zona Norte). El uso actual es de 0,9 Mm³/d (75% con fines públicos), y la capacidad potencial futura es de aproximadamente 4,0 Mm³/d, de la cual 300.000 m³/d de capacidad es protegida al ser designada como recurso hídrico futuro.

REFERENCIA: Simonffy, Z. 2003. Del capítulo 5 de "Gestión de Recarga de Acuíferos y Almacenamiento Subsuperficial." Publicación NCC-IAH N°4.

J. RECARGA DE ACUÍFEROS MEDIANTE POZOS DE INYECCIÓN EN MÉXICO

Debido a que en más de la mitad del territorio predominan condiciones climáticas áridas y semiáridas, el agua subterránea constituye una fuente esencial para el desarrollo en México. La extracción de agua subterránea total se ha estimado en 28.000 Mm³/a. El sector agrícola utiliza 71% de este volumen, mientras que áreas urbanas e industriales consumen un 26%. La población urbana constituye 65% del total de habitantes de México (100 millones). Por ejemplo, 21 millones de personas viven en el área metropolitana de Ciudad de México. Las ciudades mexicanas consumen 7600 Mm³/a y el agua subterránea constituye dos tercios de ese abastecimiento. Más de 100 acuíferos regionales son sobreexplotados, con una extracción anual de 5.400 Mm³/a de la reserva. Esto ha tenido, durante las últimas cuatro décadas, sus consecuentes impactos ambientales.

Un proyecto piloto de recarga de acuíferos fue llevado a cabo en la Comarca Lagunera de México Norte, una de las principales zonas agrícolas del país. El suministro de agua para riego se basa en las descargas de los ríos que drenan hacia la región, el río Nazas y el río Aguanaval y unas 3.500 perforaciones que extraen agua subterrá-

nea del acuífero Comarca Lagunera, con fines agrícolas, domésticos e industrial. Actualmente, se estima que la extracción es por lo menos tres veces mayor que la recarga, lo que resulta en una disminución significativa de la superficie piezométrica y un deterioro de la calidad del agua subterránea. El mayor problema es la presencia de arsénico en el agua subterránea en concentraciones muy superiores al del valor recomendado por la OMS para uso doméstico, de 0,05 mg/l, actualmente sugerido de 0,01 mg/l.

El plan piloto utilizó una cuenca de recarga arenosa adaptada próxima al lecho del Río Nazas, en la ciudad de Torreón, que cubre un área de 13 ha con una capacidad aproximada de 197.000m³. Se implementaron redes de abastecimiento de agua para transportar el agua superficial de la represa Zarco, por medio del canal de riego Sacramento, a la cuenca de recarga. Dos pozos de monitoreo fueron perforados para observar las respuestas del nivel freático local durante la recarga y doce pozos preexistentes fueron acondicionados con fines de monitoreo adicional del nivel freático. Durante las pruebas realizadas entre mayo y agosto

de 2000, un volumen total de 5,2 Mm³ fue transportado desde el canal de Sacramento hasta la cuenca de recarga. De este volumen, 0,2 Mm³ fue evaporado y 5,0 Mm³ fueron infiltrados a la subsuperficie. La capacidad de infiltración del agua se redujo de 2,4 m/d a 0,116 m/d debido a problemas de obstrucción.

Las recomendaciones del plan piloto incluyeron construir nuevas estructuras para controlar la liberación de agua a las cuencas, liberar hasta 0,5 Mm³/semana con el objetivo de evitar los desbordes de la cuenca, construir cuencas de sedimentación paralelas con el fin de reducir los problemas de obstrucción, y construir pozos de adsorción de 20 m de profundidad y más de 0,3 m de diámetro para evitar los horizontes de baja conductividad.

REFERENCIA: Chavez-Guillen, R. 2003. Del capítulo 6 de "Gestión para la Recarga de Acuíferos y Almacenamiento Subsuperficial." Publicación NCC-IAH. N°4.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS SELECCIONADAS

Únicamente se presentan a continuación una selección de referencias bibliográficas claves. Otras referencias bibliográficas pueden ser encontradas en la base de búsqueda en www.iah.org/recharge.

- Recarga artificial de agua subterránea, 1983.* Huisman, L. & Olsthoorn, T.N. Pitman, Boston ISBN 0-273-08544-01.
- Recarga artificial de agua subterránea, II, 1994.* Procedimientos del Segundo Simposio Internacional sobre Recarga Artificial de Agua Subterránea, 17 al 22 de julio, 1994, Orlando, FL, Estados Unidos, Sociedad Americana de Ingenieros Civiles, Nueva York, NY, Estados Unidos.
- Recarga artificial de agua subterránea, 1996.* Procedimientos de un Simposio Internacional, Helsinki, Finlandia, Informe #38 del Programa Hidrológico Nórdico.
- Recarga artificial de agua subterránea, III, 1998.* Procedimientos del Tercer Simposio Internacional sobre Recarga Artificial de Agua Subterránea, Ámsterdam, Ed. Jos H. Peters, Balkema.
- Gestión de la recarga de acuíferos para la sostenibilidad, 2002.* Procedimientos del Cuarto Simposio Internacional sobre Recarga Artificial de Agua Subterránea (ISAR-4), Adelaida, Australia. Ed. P.J. Dillon. A.A. Balkema.
- Recarga artificial de agua subterránea: hidrogeología e ingeniería, 2002.* Bouwer, H., en *Journal of Hydrogeology* 10:121-142.
- Atelier Sous-Regional sur la Collecte des Eaux de Surface en Afrique de L' Ouest et du Centre, tenu à Niamey au Niger du 26-29 Octobre 1999* – FAO RAF, Estudio de casos: Nigeria, Camerún, Burkina Faso, Nigeria, Mauritania, Gambia y Chad.

- El agua subterránea y la sociedad: recursos, tensiones y oportunidades, 2000.* Burke, J.J. & Moench, M.H. Asuntos relacionados con la gestión del agua subterránea superficial para el Siglo XXI. Publicación de Naciones Unidas
- Recarga de agua subterránea y pozos: una guía para almacenamiento de agua en acuíferos y recuperación, 1995.* Pyne R.D.G. Publicación Lewis, Florida, Estados Unidos. Segunda Edición, 2005.
- Guía para la recarga artificial de agua subterránea, 2000.* Panel Central sobre Agua Subterránea, Gobierno de India, Nueva Delhi.
- Lineamientos sobre calidad del agua de tormenta y agua de tormenta tratada para la inyección en acuíferos para almacenamiento y reutilización, 1996.* Dillon, P. & Pavelic, P. Informe de Investigación n°109 de la Asociación de Investigación sobre Aguas Urbanas de Australia.
- Captación de agua de lluvia y recarga artificial a agua subterránea: una guía para seguir, 2000.* UNESCO-PHI y Panel Central sobre Agua Subterránea, Gobierno de India, Nueva Delhi.
- Lineamientos estándar para la recarga artificial de agua subterránea, 2001.* Instituto de Recursos Hídricos y Ambientales, Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles, 2001. EWRI/ASCE 34-01.
- Captación de agua - Manual para el diseño y construcción de proyectos de captación de agua para la producción de plantas.* Critchley, W., Siegert, K., Chapman, C. & Finkel, M. Publicación FAO AGL/MS/17/91. Disponible en línea en <http://www.fao.org/docrep/U3160E/U3160E00.htm>. Además está disponible el Taller de Capacitación en Captación de agua (2002) en CD-ROM en inglés, francés, español, árabe y chino: <http://www.fao.org/ag/AGL/aglw/wharv.htm>.
- Gestión de la recarga de acuíferos y almacenamiento Subsuperficial. 2003.* Publicación NCC-IAH. No. 4.
- Gestión de la recarga de acuíferos y captación de agua en regiones áridas y semiáridas de Asia. 2005.* Procedimientos del Taller patrocinado por UNESCO en Yazd, Irán. Noviembre, 2004.
- Riesgos en la salud por la recarga de acuíferos utilizando agua reciclada, 2003.* Aertgeerts, R. & Angelakis, A. (Eds.) SDE/WSH/03.08. Organización Mundial de la Salud.



Comisión de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos
en Gestión de Recarga de Acuíferos (IAH - MAR)

www.iah.org/recharge

Programa Hidrológico Internacional (IHP)

UNESCO Division of Water Sciences

1, rue Molière

75732 Paris CEDEX 15

France

Tel: 33 1 45 68 40 02

Fax: 33 1 45 68 58 11

e-mail: ihp@unesco.org

<http://www.unesco.org/water/ihp>

Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO para
América Latina y el Caribe

<http://www.unesco.org/uy/phi>

Información en Agua y Desarrollo para Tierras Áridas
Una Red Global

<http://www.g-wadi.org>

