



UNITED NATIONS
UNIVERSITY

UNU-FLORES

Institute for Integrated Management
of Material Fluxes and of Resources

USO SEGURO DE AGUAS RESIDUALES EN LA AGRICULTURA: EJEMPLOS DE BUENAS PRÁCTICAS

Hiroshan Hettiarachchi
Reza Ardakanian, Editores

USO SEGURO DE AGUAS RESIDUALES EN LA AGRICULTURA: EJEMPLOS DE BUENAS PRÁCTICAS

Hiroshan Hettiarachchi
Reza Ardakanian, Editores



UNITED NATIONS
UNIVERSITY

UNU-FLORES

Institute for Integrated Management
of Material Fluxes and of Resources

Aunque la información contenida en este libro se considera verdadera y acertada a la fecha de publicación, los editores no aceptan ninguna responsabilidad legal por ningún error u omisión que se hubiera hecho. La casa editorial no deja garantía, de manera explícita o implícita, respecto al material aquí contenido.

Las opiniones expresadas en este libro corresponden a los autores de cada caso. Su inclusión en este libro no implica respaldo de la Universidad de las Naciones Unidas.

**Universidad de las Naciones Unidas
Instituto para la Gestión Integral de Flujos de Materiales y Recursos
(UNU-FLORES)**

Ammonstrasse 74, 01067 Dresden, Germany

Tel.: + 49-351 8921 9370

Fax: + 49-351 8921 9389

e-mail: flores@unu.edu

© 2017 UNU-FLORES

Diseño y Presentación: diamonds network GbR

Edición: Serena Caucci, Arjun Avasthy, Diana Carolina Riaño, Rachel Shindelar,

Atiqah Fairuz Salleh,

Prime Productions

Traducción: Prime Productions, Serena Caucci, Diana Carolina Riaño

Impresión: Reprogress GmbH

Fotografía: UNU-FLORES unless otherwise specified

e-ISBN: 978-3-944863-48-1

PRÓLOGO

Los recursos de agua dulce sufren una progresiva presión como consecuencia del crecimiento demográfico, la rápida urbanización, incremento en el consumo de agua y el cambio climático. La creciente escasez de agua, sumado a otros factores, como la energía y los fertilizantes, está impulsando a millones de agricultores y otros productores a utilizar las aguas residuales. La reutilización de las aguas residuales es un excelente ejemplo que resalta la importancia de la gestión integrada del agua, el suelo y los residuos, y que definimos como el enfoque Nexus. El proceso comienza en el sector de los residuos, pero la selección del modelo de gestión correcto puede ser igual de pertinente e importante para el agua y el suelo. En la actualidad, más de 20 millones de hectáreas de tierra se riegan con aguas residuales, dato interesante, pero lo que preocupa es que un gran porcentaje de esta práctica no se rige por ningún criterio científico que garantice el "uso seguro" de aguas residuales. A fin de abordar los desafíos técnicos, institucionales y políticos de la reutilización segura del agua, los países en desarrollo y en transición necesitan disposiciones institucionales claras y recursos humanos más capacitados con un profundo entendimiento de las oportunidades y los riesgos potenciales que representa el uso de aguas residuales.

En el 2011, siete miembros, socios y programas de ONU-Agua encabezados por el Programa de ONU-Agua para el Desarrollo de la Capacidad en el Marco del Decenio (UNW-DPC) aunaron esfuerzos para abordar las necesidades de los países en cuanto a las capacidades sobre el Uso Seguro de las Aguas Residuales en la Agricultura (SUWA). Los seis socios restantes fueron la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la Organización Mundial de la Salud (OMS), el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), el Instituto de la Universidad de las Naciones Unidas para el Agua, el Medio Ambiente y la Salud (UNU-INWEH), el Instituto Internacional para el Manejo del Agua (IWMI) y la Comisión Internacional de la Irrigación y el Saneamiento (ICID). Entre el 2011 y el 2013, estas actividades de desarrollo de capacidades congregaron a 160 representantes de 73 estados miembros de la ONU de Asia, África

y América Latina. En el marco de estas actividades, los participantes exhortaron con vehemencia un mayor apoyo en estas áreas y la continuidad de las iniciativas SUWA. Con el cese formal del programa UNW-DPC en el 2015, la coordinación de las iniciativas SUWA quedó en manos de la Universidad de las Naciones Unidas. En la actualidad, la Universidad de las Naciones Unidas Instituto para la Gestión Integral de Flujos de Materiales y Recursos (UNU-FLORES) y el UNU-INWEH son los responsables de la coordinación de las actividades de SUWA junto con otros socios.

El objetivo de la fase actual de SUWA es ayudar a los estados miembros de la ONU a desarrollar sus capacidades nacionales en las áreas de interés destacadas e identificadas entre el 2011 y el 2015, y, a su vez, promover el uso de aguas residuales más seguro y productivo. Los países en desarrollo y en transición siguen siendo el foco de atención. El intercambio de información entre los países y las regiones sobre los "ejemplos de buenas prácticas de reutilización segura del agua en la agricultura" es uno de los objetivos importantes que se identificaron durante la fase inicial de la iniciativa SUWA. A los fines de lograr este objetivo, UNU-FLORES seleccionó varios estudios de caso interesantes de distintas partes del mundo en el 2015. Muchos de ellos también se presentaron y analizaron de manera verbal en el taller organizado por UNU-FLORES en Lima, Perú, en febrero del 2016. En el presente libro, se incluyen 17 de estos estudios donde se tratan casos de América Latina, Asia y África. Para facilitar la lectura del contenido, el material se divide en tres secciones: Sección I: Avances tecnológicos; Sección II: Aspectos sanitarios y medioambientales y Sección III: Cuestiones relativas a las políticas y la implementación. Esperamos sinceramente que el contenido de este libro fomente el intercambio de conocimiento entre las regiones y sirva para aprender de los demás.

Quisiéramos agradecer a los autores de los estudios de caso por sus esfuerzos en compartir su conocimiento, así como por el papel que desempeñaron como revisores del trabajo de expertos. También estamos especialmente agradecidos con nuestros colegas del UNU-FLORES, como el Sr. Arjun Avasthy, la Srta. Serena Cauciy la Srta. Diana Carolina Riaño, por su esmerada contribución. Por último, quisiéramos expresar nuestro sincero agradecimiento al Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ) de Alemania

por el generoso apoyo financiero que recibimos para que este proyecto sea una realidad.

Hiroshan Hettiarachchi
Reza Ardakanian

CONTENIDO

SECCIÓN I: AVANCES TECNOLÓGICOS

CASO 1 3

Sistemas de recarga artificial de acuíferos como tecnología de reutilización y recuperación natural y sostenible de aguas residuales: preocupaciones sobre la salud asociadas con los virus humanos (EE. UU.)

Walter Q. Betancourt, Ian L. Pepper y Charles P. Gerba

CASO 2 23

Diseño urbano sensible al agua en Lima Metropolitana, Perú (“Parque de los niños: parque de tratamiento de aguas residuales”): creación de humedales artificiales de flujo vertical en espacio público abierto para la reutilización de aguas residuales tratadas (Perú)

Rosa Miglio, Alexandra Garcia, Eva Nemcova y Rossana Poblet

CASO 3 45

Desafíos que plantean las aguas residuales y la implementación exitosa de los humedales artificiales en Egipto (Egipto)

T. T. El-Gamal y M. H. Housian

CASO 4 63

Uso de reservorios para mejorar la calidad de las aguas para riego en LIMA, Perú (Perú)

Julio Moscoso Cavallini

CASO 5 84

Reutilización del agua en el riego de parques y jardines, y en cisternas de inodoros en Brasilia, Brasil (Brasil)

M. R. Felizatto, F.C. Nery, A. S. Rodrigues y C.M. Silva

SECCIÓN II: ASPECTOS SANITARIOS Y MEDIOAMBIENTALES

CASO 6	106
Buenas prácticas de riego en zonas irrigadas con aguas residuales de Ouardanine, Túnez (Túnez)	
<i>Olfa Mahjoub, Mohamed Mekada y Najet Gharbi</i>	
CASO 7	127
Efectos de más de 100 años de riego con aguas residuales de la Ciudad de México en el valle del Mezquital (Mezquital)	
<i>Christina Siebe, María Chapela-Lara, Mario Cayetano-Salazar, Blanca Prado y Jan Siemens</i>	
CASO 8	146
Tratamiento ecológico de aguas residuales para la reutilización en la agricultura (India)	
<i>Ravinder Kaur</i>	
CASO 9	164
Productividad de caña de azúcar irrigada con efluentes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cañaveralejo en Cali, Colombia (Colombia)	
<i>C. A. Madera-Parra, A. Echeverri y N. Urrutia</i>	
CASO 10	179
Acumulación de metales pesados en los cultivos de cereales y leguminosas a través de riego con aguas residuales y utilización de fertilizantes de fosfato (Pakistán)	
<i>G. Murtaza, M. Bilal Shakoor y Nabeel Khan Niazi</i>	

SECCIÓN III: CUESTIONES RELATIVAS A LAS POLÍTICAS Y LA IMPLEMENTACIÓN

CASO 11	207
Ayuda del Gobierno a los agricultores que utilizan aguas residuales para riego: el caso del Gobierno sudafricano en Lebowakgomo, provincia de Limpopo, que apoya a los agricultores que producen vegetales (Sudáfrica)	
<i>T. Gomo</i>	
CASO 12	219
Retos en la implementación de normas para el reuso de aguas tratadas en riego: Caso Bolivia (Bolivia)	
<i>Juan Carlos Rocha Cuadros</i>	
CASO 13	232
Sistema comunitario de gestión de aguas residuales en zonas periurbanas del valle de Katmandú, Nepal (Nepal)	
<i>Uttam Raj Timilsina</i>	
CASO 14	261
El uso de aguas residuales tratadas en Mendoza-Argentina (Argentina)	
<i>Carlos Horacio Foresi</i>	
CASO 15	278
Proyecto Varamin: un caso exitoso de reutilización de aguas residuales en Irán (Irán)	
<i>Mohammad Javad Monem</i>	
CASO 16	290
Comité de certificación de riego con aguas residuales tratadas en México (México)	
<i>Carlos Antonio Paillés Bouchez</i>	
CASO 17	313
Reuso de aguas tratadas para riego agrícola en Bolivia (Bolivia)	
<i>Luis Grover Marka Saravia</i>	

SECCIÓN I:
AVANCES
TECNOLÓGICOS

CASO 1

Sistemas de recarga artificial de acuíferos como tecnología de reutilización y recuperación natural y sostenible de las aguas residuales: preocupaciones sobre la salud asociadas con los virus humanos (EE. UU.)

Walter Q. Betancourt, Ian L. Pepper y Charles P. Gerba¹

Resumen

Los sistemas de recarga artificial de acuíferos (RAA), como filtración en la margen del río y tratamiento a través de suelo y acuífero (SAT), implican el uso de mecanismos subterráneos naturales para mejorar la calidad del agua recargada (es decir, el agua superficial, el agua pluvial y el agua reciclada) antes de ser reutilizada (por ejemplo, reutilización planificada como agua potable). En la RAA, el agua se infiltra mediante embalses, se inyecta hacia el interior del acuífero o se capta en pozos aledaños a los ríos. Los sistemas de RAA representan una opción interesante para mejorar la calidad del agua subterránea y cumplir con los fines de gestión ambiental. Sin embargo, los sistemas de reutilización destinados a aplicaciones que involucran el contacto humano deberían incluir barreras que impidan el ingreso de agentes patógenos que causan enfermedades transmitidas por el agua. En el presente caso, se tratan los principales aspectos de un estudio de caso sobre la eliminación de virus en tres sistemas de RAA a gran escala en diferentes regiones de los Estados Unidos (Arizona, Colorado y

¹ Walter Q. Betancourt ✉ · Ian L. Pepper · Charles P. Gerba. Water & Energy Sustainable Technology (WEST) Center, The University of Arizona, Tucson, Arizona, EE. UU.
Correo electrónico: wbetancourt@email.arizona.edu, walter.betancourt@fulbrightmail.org

En: Hiroshan Hettiarachchi and Reza Ardakanian (eds). *Uso seguro de las aguas residuales en la agricultura: ejemplos de buenas prácticas* ©UNU-FLORES 2016

California). Es posible que los proyectos de RAA sean económicamente viables en los países en desarrollo; no obstante, es importante ejercer una gestión sostenible para poder mantener las características necesarias que implica la reutilización del agua como fuente de agua potable y no potable.

Palabras clave: gestión, acuífero, recarga, eliminación, virus

1. Introducción

El incremento en la oferta y la demanda de agua en el mundo, sumado a la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, la distribución desigual y la presión que se ejerce en los escasos recursos hídricos remanentes, además de las constantes sequías producto de las extremas condiciones climáticas globales, han generado una mayor exigencia en la promoción de fuentes innovadoras para el abastecimiento y la conservación local del agua. En este contexto, en diversos países (por ejemplo, en los Estados Unidos, Australia, Alemania, Arabia Saudita, Países Bajos), se reutilizan cada vez más los efluentes de excelente calidad, que se obtienen gracias a tecnologías de recuperación y tratamiento de aguas residuales, de manera indirecta como fuente de agua potable (alimentación de fuentes de agua subterránea) y no potable (riego de cultivos, parques y jardines) (Clinton, 2007; Dillon y colaboradores, 2009; Alidina y colaboradores, 2015).

La reutilización indirecta planificada como fuente de agua potable es una manera prudente y cuidadosa de aumentar los recursos hídricos y, a la vez, proteger la salud y el medioambiente. Ésta como agua potable está vinculada principalmente a la alimentación de aguas subterráneas. Sin embargo, en la práctica, la mayor parte del agua que se reutiliza indirectamente para potabilización, ya sea de manera planificada o no, se mezcla con el agua superficial (Asano, 2007). La alimentación de las aguas subterráneas con agua reciclada es una forma de reutilizar el agua que permite aumentar el agua subterránea con distintos fines, como el abastecimiento de agua en municipios e industrias y el riego de cultivos. La recarga de las aguas subterráneas se ha empleado con el fin de 1) reducir, detener e incluso revertir la merma en los niveles de agua subterránea, 2) proteger el agua dulce subterránea en los acuíferos costeros de las filtraciones de agua salobre y salada, 3) almacenar agua

superficial, incluida el agua pluvial u otro excedente de agua, así como el agua reciclada para uso futuro y 4) evitar los posibles hundimientos de terrenos (Asano, 2007). En Estados Unidos se ha utilizado la recarga de acuíferos con agua reciclada, tanto para reuso indirecto como fuente de agua potable como para reuso directo no potable, desde la década de los sesenta. La principal ventaja del almacenamiento subterráneo es la posible mejora de la calidad del agua que se produce durante el proceso de alimentación de las aguas subterráneas. A diferencia del almacenamiento subterráneo, el almacenamiento superficial con agua reciclada puede ocasionar un deterioro importante de la calidad del agua a través de la contaminación secundaria y la proliferación de algas (Asano, 2007).

La recarga artificial de acuíferos (RAA), que incluye filtración del lecho del río, Tratamiento a través del suelo y el acuífero Almacenamiento y Recuperación en acuífero (ASR), ofrece una tecnología natural y sostenible de reutilización y recuperación de las aguas residuales, que permite transformar los efluentes en agua potable, por lo que representa un componente importante en la reutilización indirecta como fuente de agua potable (Asano y Cotruvo, 2004; Dillon y colaboradores, 2009; Missimer y colaboradores, 2011; Bekele y colaboradores, 2011). En la RAA, el agua se infiltra mediante embalses, se inyecta hacia el interior del acuífero o se capta en pozos aledaños a los ríos.

La calidad del agua de origen (por ejemplo, agua pluvial, agua superficial o de riachuelos naturales afectada, aguas residuales de municipios o industrias debidamente tratadas) puede mejorar durante la infiltración y su paso hacia el acuífero (Sharma y Amy, 2011). Los agentes patógenos microbianos, los nutrientes y varias de las sustancias químicas contaminantes se eliminan o biotransforman (Weiss y colaboradores, 2005; Pang, 2009; Hoppe-Jones y colaboradores, 2010). En las regiones donde los recursos de agua dulce convencionales no alcanzan a satisfacer la creciente demanda de agua, el agua reciclada ofrece una fuente alternativa de suministro de agua (Alidina y colaboradores, 2015). Los sistemas de RAA constituyen una opción interesante para mejorar la calidad del agua subterránea y cumplir con los fines de gestión ambiental. Por otro lado, estos sistemas consumen muy poca energía e insumos químicos para la atenuación o remoción de los compuestos químicos y microbianos. Además, a diferencia de los procesos como el tratamiento con membranas, no generan una corriente de desechos (Dillon, 2005; Sudhakaran y colaboradores, 2013).

Anteriormente, se ha reconocido que con proyectos de capacitación y prueba, RAA ofrece el potencial de ser un contribuyente importante a los Objetivos del Milenio de Naciones Unidas (ONU) sobre el Suministro de Agua, especialmente, para el abastecimiento en aldeas y áreas áridas y semiáridas (Dillon, 2005).

Desde luego que también existen las preocupaciones sanitarias asociadas con el agua potable que se extrae de fuentes hídricas contaminadas cuando se trata de reutilizar aguas residuales para consumo humano. Sin embargo, si el proyecto de reutilización del agua se planifica y gestiona como es debido, será posible obtener un agua de calidad superior a aquel que no se haya planificado, como sucede en la práctica común actual (Asano y Cotruvo, 2004). Históricamente, los proyectos de gestión de reutilización de agua han presentado varios obstáculos en el tratamiento a la hora de eliminar elementos orgánicos y agentes patógenos microbianos para proteger la salud pública (Anders y colaboradores, 2004; Weiss y colaboradores, 2005; Hoppe-Jones y colaboradores, 2010; Betancourt y colaboradores, 2014). Es necesario recopilar datos sobre la eliminación y las concentraciones de virus patógenos humanos en las plantas de tratamiento de aguas residuales para poder tomar una decisión más acertada acerca de los requisitos de eliminación logarítmica en los proyectos de reutilización de agua potable. De igual modo, es importante la evaluación de la reducción y el transporte relativo de virus durante la recarga artificial de acuíferos.

El Comité sobre la Evaluación de la Reutilización del Agua como Método para Satisfacer las Necesidades Futuras de Suministro de Agua del Consejo Nacional de Investigaciones, convocado por la Junta de Ciencia y Tecnología Hídrica, llevó a cabo un estudio integral sobre las posibilidades que ofrece la recuperación y reutilización de las aguas residuales municipales como una manera de mejorar y ampliar las alternativas de suministro de agua del país (NRC, 2012). Se encomendó al Comité que abordara los aspectos técnicos, económicos, institucionales y sociales vinculados a una mayor adopción de las prácticas de reutilización del agua y que diera su punto de vista sobre una amplia variedad de aplicaciones del agua reciclada, como agua potable, agua no potable destinada a usos urbanos, irrigación, agua para procesos industriales, alimentación de aguas subterráneas y mejora ecológica. El Comité realizó una evaluación crítica sobre la reutilización del agua como una manera de satisfacer las necesidades futuras de suministro de agua y demostró que, si bien la reutilización

no es la panacea, el gran volumen de agua residual que se desecha en el medioambiente podría jugar un papel importante en el contexto general de los recursos hídricos y complementar otras estrategias, como la conservación del agua. El Comité reconoció que la reutilización fáctica de los efluentes de aguas residuales como fuente de suministro de agua es una práctica común en varios de los sistemas hídricos del país, donde algunas plantas de tratamiento de agua potable utilizan agua proveniente, en gran parte, de efluentes de aguas residuales de las comunidades que se encuentran río arriba, especialmente, en condiciones de bajo caudal. El Comité también reconoció que se emplean sistemas naturales en la mayoría de los mecanismos de reutilización de agua potable a modo de amortiguador ambiental. Sin embargo, no se puede demostrar que dichas barreras “naturales” brinden algún tipo de protección a la salud pública, lo que tampoco ofrecen otros procesos de ingeniería (como los procesos avanzados de tratamiento, embalses) (NRC, 2012).

El amortiguador ambiental se define como una masa de agua o un acuífero que ofrece una separación “natural” de tiempo y espacio entre el tratamiento del agua residual y el suministro de agua. Los amortiguadores ambientales actúan como sistemas de tratamiento naturales que pueden reducir la concentración de agentes contaminantes a través de varios procesos de atenuación, ofrecer la oportunidad de mezclar o diluir el agua reciclada e incrementar el lapso de tiempo entre el momento en el que se obtiene el agua reciclada y el que se la introduce en el suministro de agua. Los amortiguadores ambientales pueden tener distintas características que repercuten en la remoción de sustancias contaminantes, el volumen de dilución y el tiempo de residencia. La eliminación de los virus en los sistemas de filtración del lecho del río está condicionada por el tiempo y la distancia de recorrido. El Comité reconoce que si no se dispone de suficiente información sobre las características específicas del esquema, se desconocerá a ciencia cierta la capacidad de los amortiguadores ambientales de eliminar las sustancias contaminantes. Los humedales artificiales, el tratamiento a través del suelo y acuífero constituyen procesos de tratamiento natural que, cuando se combinan con los procesos de tratamiento tradicionales y otros procesos avanzados, pueden cumplir con los objetivos de la opinión pública (aceptación de la comunidad de los proyectos de reutilización como fuente de agua potable) y el tratamiento (AWWA/WEF, 2008; NRC, 2012).

En el presente caso, se tratan los principales aspectos de un estudio de caso donde se evaluó la eliminación de determinados virus entéricos patógenos humanos en tres sistemas de RAA a gran escala en diferentes regiones de los Estados Unidos (Arizona, Colorado y California). Los sistemas de RAA difieren entre sí en cuanto a las tecnologías de tratamiento y las aplicaciones tras la recarga. Asimismo, se analiza la viabilidad de los proyectos de RAA en el marco de los países en desarrollo.

2. Estudio de caso: eliminación de virus mediante la RAA en tres esquemas a gran escala

2.1. Descripción de las plantas de RAA

Las tres los esquemas de RAA a gran escala que se estudiaron representan distintos lugares de la región oeste de los Estados Unidos, diferentes procesos de tratamiento del agua residual antes de la recarga y distintas operaciones de recarga y aplicaciones tras la RAA (tabla 1). La planta del complejo norte, que forma parte del proyecto Prairie Waters en Brighton, Colorado, está situada junto al río South Platte (figura 1). El agua se capta mediante un campo de pozos de filtración del lecho del río que se encuentra junto al río. El sitio está ubicado a 29 km río abajo del punto de descarga de la planta de tratamiento de aguas residuales más grande de la región. Desde el punto de descarga, el agua residual tarda unas 18 a 20 h en llegar al campo de pozos (en condiciones de bajo caudal del río). Los pozos están ubicados a una distancia de 31 a 92 m de la ribera y se analizan a una profundidad de 9 a 15 m debajo de la superficie. Cuando se tomaron las muestras, el agua del río estaba constituida en gran parte por las aguas residuales (>85 % según los datos de caudal). Se tomaron muestras de varios pozos de extracción instalación del complejo norte ubicada junto al río, en algunos de ellos, en reiteradas ocasiones. El agua que se obtuvo de todos los pozos de filtración ribereña en funcionamiento se mezcló antes de ser bombeada a un sitio adyacente de recuperación y recarga de acuífero donde, posteriormente, se infiltró mediante embalses de infiltración superficial para tratamiento complementario de suelo y

Tabla 1: Sistemas de RAA y tecnologías de tratamiento antes de la recarga

Sistema de RAA/Ubicación	Proceso de tratamiento del agua residual antes de la recarga	Operación de recarga	Aplicaciones tras la recarga
<p>Instalación del complejo norte, parte del proyecto Prairie Waters en Brighton, (CO), junto al río South Platte.</p>	<p>Tratamiento con lodos activados (nitrificación/desnitrificación) cloración/ decloración</p>	<p>Filtración ribereña seguida de la infiltración mediante embalses de infiltración superficial (tratamiento de suelo y acuífero)</p>	<p>Recuperación y recarga de acuíferos (reutilización potable indirecta)</p>
<p>Instalación de recarga Sweetwater en Tucson (AZ) contigua a la planta de tratamiento de aguas residuales de Roger Road.</p>	<p>"Biotowers" bioreactores (Filtro percolador) cloración/ decloración</p>	<p>Efluentes de aguas residuales que se vierten en embalses de infiltración</p>	<p>Alimentación de las aguas subterráneas (invierno) Riego de parques y jardines (verano)</p>
<p>Instalación de prueba en embalses de recarga, ubicada en el extremo norte de los terrenos de infiltración mediante embalses costeros en el río San Gabriel en Montebello Forebay (CA)</p>	<p>Tratamiento con lodos activados (nitrificación/desnitrificación) Clarificación secundaria, filtración terciaria de dos capas (antracita y arena) cloración/ decloración</p>	<p>Infiltración mediante infiltración superficial</p>	<p>Recuperación y recarga de acuíferos (reutilización potable indirecta)</p>

acuífero. Basados en las pruebas de indicadores (como conductividad y temperatura), se calculó que el tiempo que demora el agua del río en llegar a los pozos fue entre 5 y más de 15 días según la ubicación del

pozo. La composición del suelo en el sitio se caracterizó como arena aluvial con presencia de grava y limo.



Figura 1: Mapa aéreo de los pozos para infiltración ribereña del campo norte a lo largo del río South Platte, Brighton, CO. Indicando los pozos de muestreo (PW).

La instalación de recarga Sweetwater está ubicada en Tucson, Arizona, junto a la planta de tratamiento de aguas residuales de Roger Road (figura 2). Los efluentes de la planta se vierten en los embalses de infiltración para la alimentación de aguas subterráneas, en gran parte, durante los meses de invierno. En los meses de verano,

el agua se extrae para utilizarse en el riego de parques y jardines. Se tomaron muestras de dos pozos de monitoreo durante la actividad de infiltración. El lecho de los embalses está constituido por arena gruesa y grava arenosa. Los embalses se infiltran en ciclos húmedos y secos en lapsos de 2 a 7 días según la estación. Las tasas de infiltración son de alrededor de un metro por día.

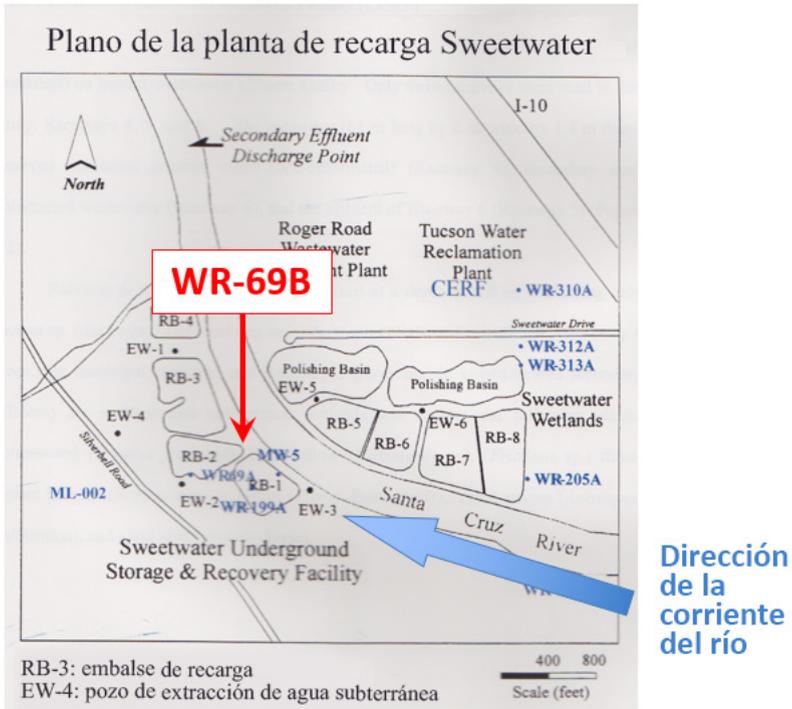


Figura 2: Instalación de recarga Sweetwater en Tucson (AZ), contigua a la planta de tratamiento de aguas residuales de Roger Road (Drewes y colaboradores 2015)

Los terrenos de infiltración mediante embalses costeros en el río San Gabriel en Montebello Forebay, California, se construyeron con el fin de estudiar el destino de las sustancias contaminantes durante la RAA (figura 3). El sitio recibe efluentes de las instalaciones de reciclaje de agua del riachuelo San José y la planta de recuperación de agua en Whittier Narrows. Durante el presente estudio, se determinó que la tasa de infiltración en el embalse de prueba osciló entre 0,6 y 0,9 m por día.

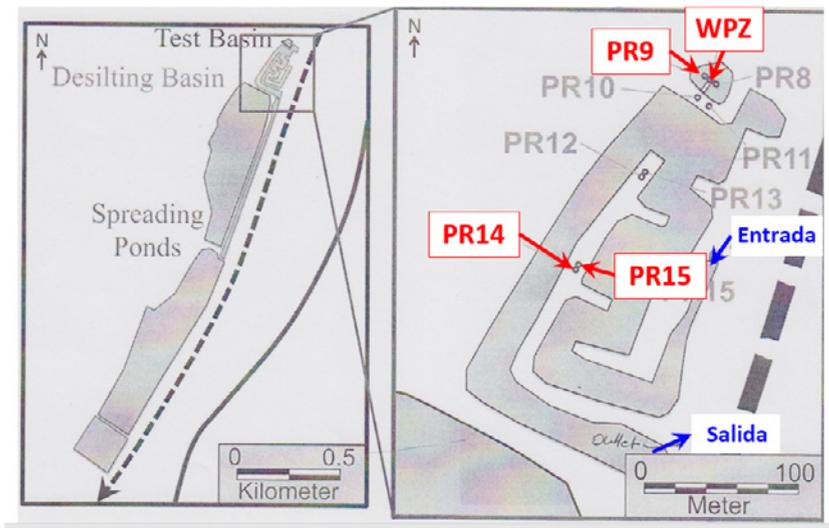


Figura 3: Instalaciones de prueba en embalses de recarga, ubicada en el extremo norte de los terrenos de infiltración mediante embalses costeros en el río San Gabriel en Montebello Forebay (CA) (Drewes y colaboradores, 2015)

2.2. Análisis de virus: recolección de muestras de agua y métodos de detección de virus

Los virus entéricos seleccionados para el estudio (virus Aichi y adenovirus) fueron aquellos que, en el transcurso del año, se encontraron en mayores concentraciones en los efluentes tratados (tras el tratamiento con lodos activados y filtros precoladores) en dos plantas de tratamiento de aguas residuales en Tucson, Arizona. Estos virus demostraron poca o ninguna variación estacional en los efluentes. Asimismo, se recopiló información sobre la incidencia del virus del moteado suave del pimienta (PMMV), un fitovirus que se considera un indicador de contaminación de las aguas residuales. Se incluyeron en el análisis los enterovirus cultivables porque son los que más se han estudiado en proyectos de RAA y se pueden cultivar con facilidad en cultivo celular. El reovirus no formó parte del plan original de prueba. Sin embargo, los métodos moleculares y de cultivo celular permitieron la detección de este virus en una muestra de la planta de recarga en Colorado. Como resultado, se realizaron pruebas moleculares para

identificar la presencia de reovirus en todas las muestras. Se proporcionan algunos detalles técnicos sobre la recolección, el procesamiento y el análisis de las muestras, ya que la calidad de los datos es importante para evaluar los agentes patógenos en los sistemas de RAA.

El volumen de las muestras para el análisis de agentes patógenos fue de 2 l para el efluente de aguas residuales y el agua del río y de 5 a 400 l para el agua subterránea. Las muestras de mayor volumen se procesaron en el sitio mediante la conexión en la boca del pozo de un grifo con un filtro y un caudalímetro en serie. En las muestras de los efluentes de aguas residuales, agua de río y agua subterránea de hasta 10 l, se utilizó filtración por membrana con filtros de membrana de ésteres mixtos de celulosa (HAWP, EMD Millipore Corporation, Billerica, MA, EE. UU.), ya que se ha empleado en diversos estudios anteriores para la detección de virus mediante la reacción en cadena de la polimerasa cuantitativa (qPCR) en diferentes matrices de agua y agua residual. En el caso de volúmenes superiores de agua subterránea, se eligió un método de concentración de virus en el que se utiliza un filtro NanoCeram (Argonide Corporation, Sanford, FL, EE. UU.) con una solución eluyente no proteica (solución de polifosfato sódico al 1 % con 0,05 M de glicina), ya que se determinó que estos elementos generan una concentración con una menor cantidad de sustancias que interfieren con la detección de virus mediante la PCR. Se realizó la extracción del ADN vírico para la detección de adenovirus, además de la extracción del ARN vírico y la transcripción inversa para la detección de enterovirus, virus Aichi y PMMV de acuerdo con los procedimientos estándares del laboratorio. Se aplicó la amplificación en tiempo real para la detección de los genomas víricos, realizado con Light cycler 480 Real-Time PCR Instrument II (Roche Applied Science, Indianapolis, IN, EE. UU.) e iniciadores y sondas que se describen en detalle en otro documento (Betancourt y colaboradores, 2014). La cuantificación absoluta de los virus estudiados se expresó como el número de copias víricas o copias génicas que se obtuvieron a partir de curvas estándares. Todas las muestras de agua subterránea que arrojaron resultados positivos para virus entéricos o PMMV se analizaron en cultivo celular para determinar la presencia de virus infecciosos. Todos los concentrados obtenidos por filtración se analizaron con la línea celular de riñón de Mono Buffalo Verde (BGM). Se prestó especial atención para evitar la contaminación en el laboratorio durante los procedimientos, y se siguieron las pautas de control y aseguramiento de calidad implementadas en el laboratorio de biología molecular y cultivo

celular del Departamento de Suelos, Agua y Ciencias Ambientales de la Universidad de Arizona.

2.3. Genomas víricos y eliminación mediante los sistemas de RAA

Se tomaron muestras de la planta de RAA de Colorado varias veces durante el transcurso de este estudio debido a la gran cantidad de pozos, el funcionamiento continuo y el fácil acceso. El agua del río estaba constituida en gran parte por agua residual vertida río arriba (>85 %) al momento de la recolección de las muestras. Se observaron adenovirus y PMMV en concentraciones más altas en los efluentes que se analizaron en la planta de tratamiento antes de verterlos al río South Platte (tabla 2). Durante el desplazamiento del agua río abajo, la concentración de virus en el agua residual se redujo, en promedio, de 90 a 99 % (1 a 2 log₁₀), según lo detectado por la PCR cuantitativa. Se detectó la presencia de PMMV en todos los pozos de captación que se encontraban junto al río y en la mezcla con el agua filtrada del lecho del río (el agua de los pozos productores es una mezcla), que se vierte más tarde en los embalses de infiltración superficial para infiltración en la instalación de recuperación de recarga de acuífero del complejo norte. Se detectó la presencia de enterovirus en uno de los pozos (PW 10) en una muestra por PCR cuantitativa. Esta muestra también arrojó resultados positivos en los análisis de virus infecciosos mediante el cultivo celular, y el reovirus se identificó mediante PCR. No se observaron amplificaciones de adenovirus, enterovirus y virus Aichi, lo que confirma que estos virus patógenos no estaban presentes en la muestra.

En la planta de California, solo se detectó adenovirus mediante la PCR cuantitativa en bajas cantidades en el efluente tratado (tabla 3). El agua residual en esta planta recibe la mayor cantidad de tratamiento antes de la recarga en comparación con las plantas de Colorado y Arizona, lo que puede explicar la baja presencia de virus en las muestras recolectadas. Sin embargo, puede también deberse a otros factores, como la incidencia de infección en la comunidad y las diferencias estacionales. Solo se detectó PMMV en las muestras de las aguas subterráneas poco profundas del lugar. Se halló, solo, en los pozos en que el agua subterránea llevaba tres o menos días de recorrido en el subsuelo.

Tabla 2: Virus en el sistema de recarga artificial de acuíferos en Brighton, Colorado

Ubicación de la muestra	Fecha de recolección	Adenovirus (copias/l)	Enterovirus (copias/l)	Virus Aichi (copias/l)	PMMV (copias/l)	Tiempo de recorrido (días)
Descarga en la planta metropolitana (efluente)	10/09/12	$3,22 \times 10^5$	$5,42 \times 10^3$	$1,23 \times 10^4$	$8,99 \times 10^6$	-
	10/17/12	$1,83 \times 10^5$	$3,19 \times 10^3$	$1,05 \times 10^4$	$5,84 \times 10^5$	-
	10/30/12	$1,07 \times 10^5$	$5,27 \times 10^4$	$4,73 \times 10^4$	$3,41 \times 10^6$	-
Río South Platte junto al campo de pozos	10/09/12	$1,82 \times 10^3$	$6,89 \times 10^2$	$1,23 \times 10^4$	$8,99 \times 10^6$	-
	10/17/12	$9,56 \times 10^4$	$3,35 \times 10^1$	$1,05 \times 10^4$	$5,84 \times 10^5$	-
	10/30/12	$2,73 \times 10^1$	$7,20 \times 10^2$	$4,73 \times 10^4$	$3,41 \times 10^6$	-
	05/29/13	$8,59 \times 10^2$	$2,52 \times 10^2$			
PW10	10/09/12	$<4,29^* \times 10^0$	$5,00 \times 10^1$	$<8,57 \times 10^0$	$4,25 \times 10^1$	~5
	10/17/12	$<4,29 \times 10^0$	$<8,57 \times 10^0$	$<8,57 \times 10^0$	$3,91 \times 10^2$	~5
	10/30/12	$<4,29 \times 10^0$	$<8,57 \times 10^0$	$<8,57 \times 10^0$	$5,90 \times 10^2$	~5
	05/29/13	$<6,00 \times 10^0$	$<1,20 \times 10^1$	$<1,20 \times 10^1$	$3,56 \times 10^1$	~5
PW11	10/30/12	$<5,25 \times 10^0$	$<1,05 \times 10^1$	$<1,05 \times 10^1$	$8,55 \times 10^2$	~5
PW 18	05/29/13	$1,20 \times 10^0$	$4,00 \times 10^{-1}$	$4,00 \times 10^{-1}$	$1,35 \times 10^1$	>10
PW20	1/10/13	$<1,50 \times 10^1$	$<3,00 \times 10^1$	$<3,00 \times 10^1$	$1,8 \times 10^2$	>10
PW26	10/30/12	$<4,20 \times 10^0$	$<8,40 \times 10^0$	$<8,40 \times 10^0$	$4,04 \times 10^3$	>15
	01/10/13	$<9,00 \times 10^0$	$<1,80 \times 10^1$	$<1,80 \times 10^1$	$<1,80 \times 10^1$	>15
500, combinado	01/10/13	$<1,20 \times 10^1$	$<2,40 \times 10^1$	$<2,40 \times 10^1$	$<2,40 \times 10^1$	5 to >15
1000, combinado	01/10/13	$<6,00 \times 10^0$	$<1,20 \times 10^1$	$<1,20 \times 10^1$	$<1,20 \times 10^1$	5 to >15
400, combinado	05/29/13	$<9,00 \times 10^{-1}$	$<1,80 \times 10^0$	$<1,80 \times 10^0$	$1,02 \times 10^2$	5 to >15

PW: pozos de producción. El PW 10 está situado a 30 metros de la ribera. Los demás pozos de los que se tomaron muestras estaban, en promedio, a 90 metros de la ribera. 400, 500 y 1000, combinado: indica el volumen de agua analizada en litros de un colector combinado.

NR: no realizado. PMMV: virus del moteado suave del pimienta

En el sitio de recarga Sweetwater, se detectaron todos los virus estudiados en el efluente de agua residual en concentraciones altas. Tanto el virus Aichi como el PMMV se detectaron en un pozo con un tiempo de recorrido de 5 días. No se detectó la presencia de ninguno de los virus en un pozo con un tiempo de recorrido de 14 días. A diferencia de las otras dos plantas, se intentó tomar muestras del mismo efluente a medida que el agua se desplazaba de los embalses hacia el pozo de monitoreo. El muestreo se cronometró (muestreo sinóptico) para tomar muestras de la misma masa de agua a medida que se desplazaba por el subsuelo. Todas las muestras en las que se observó la presencia de algún virus se evaluaron en cultivos celulares, y no se detectaron virus infecciosos en ninguna de las muestras de California y Arizona.

Se calculó la proporción relativa de eliminación de los distintos virus en cada planta cuando se detectaron virus en los efluentes que se recargaban. En la tabla 4, se resume el grado de eliminación aproximada de los distintos virus en las plantas de estudio en pozos con diferente tiempo de recorrido.

La determinación del grado de eliminación estuvo limitada por la concentración de virus en el agua residual tratada que se vertía en las plantas y el volumen de concentrado analizado. Por lo general, fue más fácil determinar la eliminación de PMMV dado que su presencia era, a menudo, superior en el efluente de agua residual. Los virus Aichi y PMMV se eliminaron en una proporción similar tras un tiempo de recorrido de 5 días en la planta de recarga Sweetwater. Sin embargo, la eliminación del virus Aichi superó los 2,8 logaritmos tras 14 días de recorrido, y la eliminación de PMMV fue de casi 5 logaritmos. Solo se pudo determinar la eliminación de adenovirus en el embalse de prueba de California, ya que fue el único virus detectado en el efluente de aguas residuales aplicado. Como mínimo, se redujo en un logaritmo en menos de un día de recorrido. Resultó interesante que la eliminación de PMMV en la planta de Colorado fue casi idéntica en los tres pozos analizados, lo que sugiere una eficacia de eliminación en los rangos logarítmicos de 3 a 4. En todas las plantas, PMMV fue el virus más difícil de eliminar y debe considerarse un trazador inerte de los virus entéricos estudiados.

El único virus infeccioso detectado en el presente estudio fue el reovirus, un virus de ARN bicatenario perteneciente a la

Tabla 3: Virus en los sistemas de recarga artificial de acuíferos en California y Arizona

Ubicación de la muestra	Adenovirus (copias/l)	Enterovirus (copias/l)	Virus Aichi (copias/l)	Virus del moteado suave del pimiento (copias/l)	Tiempo de recorrido (días)
Embalse de prueba, Montebello Forebay, California					
Efluente	$8,07 \times 10^1$	$<6,60 \times 10^1$	$<6,60 \times 10^1$	$<6,60 \times 10^1$	-
Pozo WP-Z	$<6,50 \times 10^0$	$<1,30 \times 10^1$	$<1,30 \times 10^1$	$7,59 \times 10^2$	0,45
Pozo PR-9	$<6,90 \times 10^0$	$<1,38 \times 10^1$	$<1,38 \times 10^1$	$2,10 \times 10^1$	3,5
Pozo PR-15	$<6,30 \times 10^0$	$<1,26 \times 10^1$	$<1,26 \times 10^1$	$<1,26 \times 10^1$	44,5
Pozo PR-14	$<7,20 \times 10^0$	$<1,44 \times 10^1$	$<1,44 \times 10^1$	$<1,44 \times 10^1$	128,5
Sitio de recarga Sweetwater, Arizona					
Efluente	$9,37 \times 10^3$	$3,46 \times 10^4$	$4,76 \times 10^4$	$5,15 \times 10^6$	-
Pozo MW5	$<8,40 \times 10^1$	$<1,68 \times 10^2$	$1,52 \times 10^4$	$1,44 \times 10^6$	5
Pozo WR-69B	$<3,56 \times 10^0$	$<7,11 \times 10^0$	$<7,11 \times 10^0$	$<7,11 \times 10^0$	~14

familia Reoviridae. Dado que ha sido difícil asociar el reovirus con enfermedades específicas en los seres humanos, no ha sido tan estudiado como los demás virus entéricos. En varios estudios en los que se midió la infectividad en cultivo celular, se comprobó que su presencia se halla en concentraciones superiores a las de los enterovirus en aguas residuales no tratadas y tras la desinfección mediante cloración. Son más resistentes a la desinfección por medio de luz ultravioleta que los enterovirus. Asimismo, parecen sobrevivir en el agua durante períodos prolongados. En un estudio sobre pozos de agua potable, fue el virus que se detectó con más frecuencia mediante la PCR. Por consiguiente, pareciera preciso realizar otros estudios sobre reovirus a los fines de evaluar su eliminación mediante la RAA.

Los resultados del estudio indicaron que el tiempo de residencia desempeñó un papel importante en la eficacia de eliminación de los agentes patógenos (es decir, la atenuación vírica) con los tres sistemas de tratamiento natural. Todos los virus se eliminaron por debajo de los límites de detección del método durante la filtración del lecho del río. La capacidad de cuantificar la eliminación de los virus entéricos humanos estuvo limitada por las concentraciones de los virus, en particular, en el agua residual infiltrada, pero se podría esperar una eliminación de aproximadamente 2 logaritmos o más, como mínimo, con un tiempo de recorrido de alrededor de 15 días. El estudio también reveló que PMMV puede servir como un trazador inerte de eliminación vírica en las actividades de recarga artificial de acuíferos. Es preciso realizar otros estudios sobre la incidencia de reovirus en pozos de filtración del lecho del río. Los reovirus son ubicuos en cuanto a su distribución geográfica por lo tanto, se ha informado sobre su presencia en aguas subterráneas de diferentes áreas geográficas. Por otro lado, estos virus son muy estables en el ambiente. La aplicación de tecnologías de secuenciación de última generación (por ejemplo, metagenómica) para una representación completa de los virus presentes en aguas ambientales puede ampliar nuestro conocimiento sobre la diversidad, el destino y la distribución de los virus en sistemas de recarga artificial de acuíferos.

Tabla 4: Eliminación logarítmicas de los virus mediante la recarga en los tres sistemas de recarga artificial de acuíferos

Planta/ pozo	Profundidad del pozo (metros)	Tiempo de residencia (días)	Adenovirus	Enterovirus	Virus Aichi	PMMV
Arizona						
MW5	9,14	5	>2,05	>2,31	0,50	0,55
WR-69-B	46,39	~14	>3,42	>3,69	>3,83	>5,86
California						
WP-2	6,46	0,45	>1,09	ND	ND	ND
PR-9	10,66	3	>1,07	ND	ND	ND
PR- 15	12,34	49,5	>1,05	ND	ND	ND
PR-14	21,48	128,5	>1,11	ND	ND	ND
Colorado						
PW10*						
1° (10/09/12)	9,14	~5	>2,63	1,15	>2,61	3,76
2° (10/17/12)			>4,35	ND	>3,07	2,72
3° (10/30/12)			>0,80	>2,70	>3,35	2,76
4° (05/29/13)			>2,16	ND	>3,31	3,69
PW11	8,83	~5	>0,72	>1,84	>2,49	2,60
PW26	7,31	>15	>0,81	>1,93	>2,58	1,92

El pozo PW 10 se analizó cuatro veces.

ND: no detectado en el agua residual tratada.

NT: agua residual tratada, que aún no se analizó.

3. Proyectos RAA en el contexto de Países en Desarrollo

Se ha reconocido que los sistemas de RAA constituyen mecanismos de tratamiento sencillos, rentables y poco sofisticados que podrían ser económicamente viables en los países en desarrollo (Maliva, 2014). Sin embargo, en estos países, existen muchas preocupaciones ambientales y de salud pública vinculadas con la contaminación por aguas negras, como, por ejemplo, la ausencia de sistemas de recolección y tratamiento del agua residual o métodos de tratamiento inadecuados. Además, la gran demanda de agua de calidad en zonas urbanas y periurbanas superpobladas en los países en desarrollo ejerce una presión importante sobre los recursos hídricos escasos y sumamente afectados. En este contexto, la reutilización del agua cobra gran sentido en estas regiones, aunque cualquier proyecto de reutilización del agua no sería posible hasta que no se implementen sistemas adecuados de tratamiento y recolección del agua residual. Los sistemas de RAA también requieren de una gestión sostenible para mantener satisfactoriamente las características necesarias para la reutilización del agua potable y no potable.

4. Agradecimientos

Los autores agradecen a WaterReuse Research Foundation (WRRF) por su asistencia económica, técnica y administrativa para el financiamiento y la gestión del proyecto que permitió obtener la presente información. Los autores expresan su agradecimiento a Water Replenishment District of Southern California, Sanitation Districts of Los Angeles County, Aurora Water y Tucson Water por su ayuda económica y técnica.

Referencias

- Alidina, Mazahirali, Dong Li, Mohamed Ouf y Jörg E. Drewes. (2014). "Role of primary substrate composition and concentration on attenuation of trace organic chemicals in managed aquifer recharge systems." *Journal of Environmental Management* 144, 58–66. doi:10.1016/j.jenvman.2014.04.032.
- Anders, Robert, William A. Yanko, Roy A. Schroeder y James L. Jackson. (2004). *Virus fate and transport during recharge using recycled water at a research field site in the Montebello Forebay, Los Angeles County, California, 1997–2000; Scientific Investigations Report 2004-5161*. U.S. Geological Survey: Reston, Virginia.
- Asano, Takashi, Franklin Burton, Harold L. Leverenz, Ryujiro Tsuchihashi y George Tchobanoglous. (2007). *Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications*. New York: McGraw-Hill.
- Asano, Takashi y Joseph A. Cotruvo. (2004). "Groundwater recharge with reclaimed municipal wastewater: Health and regulatory considerations." *Water Research* 38, 1941–1951.
- AWWA/WEF (American Water Works Association and Water Federation). (2008). *Using reclaimed Water to Augment Potable Water resources*. 2.º Ed. Denver, CO: American Water Works Association.
- Bekele, Elise, Simon Toze, Bradley Patterson y Simon Higginson. (2011). "Managed aquifer recharge of treated wastewater: Water quality changes resulting from infiltration through the vadose zone." *Water Research* 45, 5764–5772. doi:10.1016/j.watres.2011.08.058.
- Betancourt, Walter Q., Masaaki Kitajima, Alexandre D. Wing, Julia Regnery, Jörg E. Drewes, Ian L. Pepper y Charles P. Gerba. (2014). "Assessment of virus removal by managed aquifer recharge at three full-scale operations." *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering* 49, 1685–1692. doi: 10.1080/10934529.2014.951233.
- Clinton, Tracy. (2007). *Reclaimed Water Aquifer Storage and Recovery: Potential Changes in Water Quality*. WateReuse Foundation Report. Alexandria, VA, USA: WateReuse Foundation.
- Dillon, Peter, Paul Pavelic, Declan Page, Helen Beringen y John Ward. (2009). *Managed aquifer recharge: An Introduction*. Serie de informes Waterlines n.º 13, febrero de 2009. Canberra: Commonwealth de Australia. Recuperado de http://www.nwc.gov.au/__data/assets/pdf_file/0011/10442/Waterlines_MAR_completeREPLACE.pdf.
- Dillon, Peter. (2005). "Future management of aquifer recharge". *Hydrogeology Journal* 13, 313–316.

Drewes J., Regnery J., Dickenson E., Gerba C.P., Snyder S.A., Missimer T. (2015). Role of Retention Time in the Environmental Buffer of Indirect Potable Reuse Projects: An Investigation of Managed Aquifer. WateReuse Foundation Report. Alexandria, VA, EE. UU.: WateReuse Foundation.

Hoppe-Jones, Christiane, Gretchen Oldham y Jörg E. Drewes. (2010). "Attenuation of total organic carbon and unregulated trace organic chemicals in U.S. riverbank filtration systems." *Water Research* 44, 4643– 4659. doi:10.1016/j.watres.2010.06.022.

Maliva, Robert G. (2014). "Economics of managed aquifer and recharge." *Water* 6, 1257–1279.

Missimer Thomas M., Jörg E. Drewes, Robert G. Maliva y Gary Amy. (2011). "Aquifer Recharge and Recovery: Groundwater Recharge Systems for Treatment, Storage, and Water Reclamation." *Ground Water* 49, 771.

National Research Council. (2012). *Water Reuse: Potential for Expanding the Nation's Water Supply through Reuse of Municipal Wastewater*. Washington, D.C.

Pang, Liping. (2009). "Microbial removal rates in subsurface media estimated from published studies of field experiments and large soil cores." *Journal of Environmental Quality* 38, 1531–1559. doi:10.2134/jeq2008.0379.

Sharma Saroj K. y Gary Amy. (2011). "Natural Treatment Systems." James K. Edzwald (Ed.), en *Water Quality and Treatment: A Handbook on Drinking Water* (págs. 1-33). Denver, Colorado: American Water Works Association.

Sudhakaran, Sairam, Sabine Lattemann y Gary L. Amy. (2013). "Appropriate drinking water treatment processes for organic micropollutants removal based on experimental and model studies – A multi-criteria analysis study." *Science of The Total Environment* 442, 478–488. doi:10.1016/j.scitotenv.2012.09.076.

Weiss W. Joshua, Edward J. Bouwer, Ramon Aboytes, Mark W. LeChevallier, Charles R. O'Melia, Binh T. Le y Kellogg J. Schwab. (2005). "Riverbank filtration for control of microorganisms: results from field monitoring." *Water Research* 39, 1990–2001. doi:10.1016/j.watres.2005.03.018.

CASO 2

Diseño urbano sensible al agua en Lima Metropolitana, Perú ("Parque de los niños: parque de tratamiento de aguas residuales"): creación de humedales artificiales de flujo vertical en espacio público abierto para la reutilización de aguas residuales tratadas (Perú)

Rosa Miglio, Alexandra Garcia, Eva Nemcova y Rossana Poblet¹

Resumen

Lima, la capital peruana, situada en la costa desértica del Pacífico y habitada por más de 9 millones de personas, se caracteriza por desigualdad en el acceso a los servicios básicos, como agua potable y tratamiento de las aguas residuales, así como en el acceso a espacios verdes saludables. Lima es una de las ciudades latinoamericanas con la menor cantidad de espacios verdes por habitante (Economist Intelligence Unit, 2010). Muchos de los espacios verdes públicos y privados de Lima se riegan con la escasa agua potable o con agua superficial contaminada; por otro lado, el porcentaje de reutilización de aguas residuales fue de tan solo 10% en el 2011 (Kosow y colaboradores, 2013). En el marco del proyecto de investigación LiWa (*Lima Water*), se creó la Estrategia de Infraestructura Ecológica de Lima (LEIS, por sus siglas en inglés). Su propósito es integrar el diseño y la planificación urbana y paisajística con la gestión del agua

¹ Rosa Miglio ✉ · Alexandra Garcia · Eva Nemcova · Rossana Poblet.
Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional Agraria (UNALM), Lima, Perú
Correo electrónico: rmiglio@lamolina.edu.pe

En: Hiroshan Hettiarachchi and Reza Ardakanian (eds). *Uso seguro de las aguas residuales en la agricultura: ejemplos de buenas prácticas* ©UNU-FLORES 2016

a fin de favorecer el ciclo urbano del agua, incluida la reutilización de aguas residuales, e incrementar el acceso a espacios verdes públicos que brinden servicios de los ecosistemas para el beneficio de las comunidades. En el plano técnico, el uso de los humedales artificiales se plantea como una posible estrategia de diseño urbano sensible al agua para una región seca como Lima. Dado que se trata de espacios verdes, ofrecen grandes posibilidades de integrarse en el diseño de espacios abiertos. En el 2013, se construyó el “Parque de los niños: parque de tratamiento de aguas residuales”, en el distrito de San Martín de Porres, que cuenta con una zona recreativa y un humedal artificial de flujo vertical que trata el agua de un canal de irrigación contaminado. El diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales estuvo a cargo de Akut Perú e incluyó un sistema de pretratamiento con rejillas y sedimentador, y un humedal artificial de flujo vertical. La planta trata $5,57 \text{ m}^3/\text{día}^{-1}$ en un área de 50 m^2 , lo que genera una carga hidráulica de aproximadamente $0,11 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}^{-1}$. El agua contaminada presenta una DBO5 (demanda bioquímica de oxígeno al quinto día) y turbiedad variables con máximos de $15,4 \text{ mg/l}$ y 1000 UNT , respectivamente. Los coliformes fecales varían en gran medida de 3×10^2 a $10^4 \text{ UFC}/100 \text{ ml}$; se observa la presencia de parásitos (*Ascaris toxocara*). La Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) de Lima se encargó de analizar la calidad del agua y evaluar el nivel de aceptación social. Los análisis indican que la calidad del agua mejora notablemente tras el proceso de tratamiento, lo que permite reducir los riesgos para la salud de los usuarios del parque, además de aminorar los aspectos ambientales negativos, como malos olores y la presencia de vectores de hábitat acuático. En este artículo, se describe el proyecto, se presentan los resultados de los análisis, se examinan los obstáculos y los desafíos del proyecto. Además, se explica el enfoque participativo que permitió diseñar en forma conjunta un proyecto de diseño sensible al agua que pueda generar conciencia socioambiental y superar las situaciones negativas que surgen en las conflictivas zonas periurbanas.

Palabras clave: Lima, regiones áridas, humedal artificial, infraestructura ecológica, espacio verde abierto, reutilización de aguas residuales, ciclo urbano del agua, tratamiento de aguas residuales, diseño urbano sensible al agua

1. Introducción

En Lima Metropolitana el agua es escasa debido a varias razones: el bajo índice de precipitaciones anuales ($< 15 \text{ mm}$), los ríos estacionales con déficit hídrico ($0-10 \text{ m}^3/\text{s}^{-1}$ de mayo a diciembre), las aguas contaminadas (Fernández-Maldonado, 2008) y la gestión ineficiente y poco sostenible del agua. La explosión demográfica de las últimas décadas, la falta de implementación y modernización de los instrumentos de planificación urbana y regional, la crisis económica y otros factores han llevado a la gran expansión de asentamientos informales, especialmente, en las zonas periurbanas. Varios de estos asentamientos y cerca de 1 millón de personas no tienen acceso a los servicios públicos de agua potable y cloaca. Se asientan en tierras, como corredores de ríos o valles agrícolas, donde quedan expuestos a condiciones de vida peligrosas; por otro lado, la ocupación de estas tierras significa la pérdida de tierras que ofrecen servicios esenciales de los ecosistemas a la ciudad. En muchas zonas periurbanas, la distribución de los espacios verdes es inferior a 2 m^2 por persona, mientras que en zonas más ricas es de 20 m^2 por persona (Eisenberg y colaboradores, 2014, 26), lo que pone de manifiesto la gran desigualdad que existe en esta esfera en toda la ciudad. Asimismo, los distritos más ricos pueden permitirse usar agua potable para regar los espacios verdes, mientras que en las zonas más pobres y en la mayoría de las zonas periurbanas, se utilizan aguas residuales sin tratar o mal tratadas para riego, lo que representa un peligro para la salud de la población. Los recursos hídricos disponibles no se utilizan con eficiencia, y el porcentaje de reutilización de las aguas residuales fue de tan solo 10% en el 2011. Los efectos del cambio climático en la cordillera de los Andes, que se cree generarán una merma de las reservas hídricas (Kosow y colaboradores, 2013), acrecentarán los desafíos que enfrenta Lima. Entre los principales obstáculos de la planificación integrada se encuentra la falta de una visión unificada de la ciudad, que compartan diseñadores y planificadores urbanos y paisajísticos, e ingenieros hídricos. Por lo tanto, a fin de reducir los procesos de desarrollo urbano y las prácticas no sostenibles, es necesario ejercer un cambio de paradigma en el manejo del agua urbana y adoptar conductas más sostenibles que contemplen el ciclo urbano del agua (Eisenberg y colaboradores, 2014).

Dado que la situación de Lima exige soluciones urgentes, el Instituto de Planificación del Paisaje y Ecología (ILPÖ) de la Universidad

de Stuttgart (Alemania), como parte del proyecto de investigación LiWa “Gestión Sostenible del Agua y las Aguas Residuales en Centros Urbanos en Crecimiento Afrontando el Cambio Climático: Conceptos para Lima Metropolitana, Perú”, creó la “Estrategia de Infraestructura Ecológica de Lima” (LEIS). La estrategia consiste en 1) los Principios LEIS para respaldar la planificación urbana estratégica y la elaboración de políticas que conduzcan al desarrollo urbano sensible al agua; 2) la Herramienta LEIS para utilizar en la planificación urbana para que se considere la relación entre el agua y los espacios verdes abiertos; y (3) el Manual LEIS que incluye pautas de diseño urbano sensible al agua para el desarrollo del proyecto. Con la intención de brindar la asistencia técnica solicitada por la municipalidad de San Martín de Porres, en el proyecto LiWa se escogió a la cuenca baja del río Chillón para demostrar la aplicación de la estrategia LEIS en diferentes escalas. El enfoque de este caso es el proyecto piloto que se ha implementado “Parque de los niños: parque de tratamiento de aguas residuales” que sirve como ejemplo de Diseño Urbano Sensible al Agua (DUSA). Se describirán y analizarán el proceso de implementación del proyecto piloto, los parámetros del diseño, los resultados del análisis de la calidad del agua y evaluación del nivel de aceptación social, así como las lecciones aprendidas. Se pretende brindar información para la futura aplicación de la tecnología de humedales artificiales en espacios públicos abiertos en Lima Metropolitana. En términos más amplios, se invita a reflexionar sobre los potenciales que ofrecen LEIS y DUSA como estrategias integrales de diseño y planificación para que las ciudades en condiciones de clima seco se preparen y afronten los problemas de escasez de agua y los efectos del cambio climático.

2. Finalidad y objetivos del proyecto

La principal finalidad del proyecto piloto fue implementar un ejemplo de un parque de DUSA donde se trate agua contaminada para reutilizar en el riego de espacios verdes, se utilice menos agua que un parque convencional de Lima y, que a su vez, fuese un espacio público atractivo para la comunidad. Otros objetivos incluyeron:

- Promover la reutilización de las aguas residuales tratadas en los espacios verdes.

- Crear espacios verdes saludables que reduzcan la desertificación y el polvo en la zona, y también beneficien a la comunidad local.
- Demostrar oportunidades para mejorar la calidad de las aguas residuales a través de tecnologías ecológicas, como los humedales artificiales, e integrar estos componentes a los espacios públicos.
- Generar conciencia y demostrar la importancia de los canales de irrigación como un recurso permanente de agua que permite la generación de espacios verdes y las actividades agrícolas.
- Concienciar acerca del entorno desértico y sus limitados recursos hídricos en relación con la demanda de agua en los espacios verdes; para ello en el diseño del parque solo se incluyeron especies de plantas autóctonas con bajo consumo de agua.
- Crear sinergia entre los actores clave, principalmente, los residentes rurales y urbanos nuevos, que utilizan y aprovechan el agua transportada por los canales de irrigación.
- Servir como proyecto de demostración para la reutilización de las aguas residuales.

3. Contexto

El área de estudio comprende un terreno que se destinaba a la agricultura, llamado Chuquitanta, en la cuenca baja del río Chillón en Lima Norte, en el distrito de San Martín de Porres (figura 1). A Chuquitanta la atraviesa una red de canales (acequias) que forman parte de un sistema de irrigación ancestral. En las últimas décadas, el uso de la tierra en esta zona ha cambiado debido al rápido crecimiento urbano y la especulación urbana. Las empresas constructoras privadas que han implementado programas informales de vivienda han transformado la zona a un ritmo vertiginoso. Debido a la falta de habilitación municipal, las nuevas viviendas no cuentan con la infraestructura ni los servicios básicos y, por lo tanto, vierten sus aguas residuales y desechos sólidos en los canales de irrigación, que se utilizan para regar tanto tierras agrícolas como espacios verdes recreativos. La mala calidad del agua pone en riesgo la salud de los consumidores de los cultivos, así como de los usuarios de los espacios verdes. Además, debido a los procesos de regularización urbana, las acequias se transforman en canales de irrigación de hormigón que impiden que el agua se infiltre en el

suelo y reponga el agua subterránea. Varios canales se han cerrado completamente, lo que llevó a la desertificación de parques que alguna vez fueron áreas verdes y a los consiguientes conflictos sociales. En este contexto, es preciso contar con un nuevo enfoque de diseño de espacios abiertos y agua para restablecer los canales de irrigación locales como recursos sostenibles de agua.



Figura 1: Cuenca baja del río Chillón, Lima Metropolitana (Fotografía: Evelyn Merino Reyna)

4. Descripción del proyecto

4.1. Ubicación

El proyecto está ubicado en La Florida II, uno de los nuevos programas informales de viviendas construidas en tierras que eran destinadas a la agricultura, que pertenecen a la empresa de bienes raíces Residencial SAC. En la periferia de La Florida II, dentro de sus límites administrativos, se encuentra el canal de irrigación San José en su paso hacia las tierras agrícolas. El asentamiento está en proceso de obtener los derechos legales urbanos, que se concederán una vez que la empresa de bienes raíces finalice toda la infraestructura básica. En la actualidad, se debe

transportar el agua de 2 a 4 veces por semana en camiones cisternas. Los ciudadanos compran 200 litros (capacidad del tanque de agua) a un precio aproximado de 2 PEN (0,5 US\$ cada tanque), unas 10 veces más alto que el de las zonas formales que tienen conexión a la red pública. La calidad de esta agua no es buena, y muchos residentes compran agua embotellada para el consumo humano.

La Florida II está constituida por unas 600 personas y cubre una superficie de alrededor 31.740 m². Comprende 141 lotes distribuidos en 8 manzanas, un área destinada a la educación y dos parques: el parque 1 (1992,2 m²) y el parque 2 (598,16 m²). Al parque más grande (parque 1) lo utilizan principalmente los adultos para jugar al fútbol y se riega con agua contaminada del canal con una manguera. El proyecto piloto está ubicado en el parque más pequeño (parque 2), que está situado junto al canal de irrigación (véase la figura 2). En el 2012, este canal natural se convirtió en un canal de hormigón para cumplir con los requerimientos que exigía la formalización de La Florida II. La construcción significó la remoción de árboles y césped que mantenían los vecinos. La destrucción de las plantas desató muchos conflictos



Figura 2: Asentamiento La Florida II: canal de irrigación San José y zona del proyecto a la izquierda del canal, antes de su construcción (Fotografía: Eva Nemcova)

en la comunidad y generó otros problemas sociales y legales. De igual manera, surgieron conflictos entre la asociación comunitaria y la Comisión de Regantes Chuquitanta por la modificación de la ruta de la acequia y el uso de hormigón en sus bordes, así como con las autoridades municipales, por encomendar este trabajo como parte de un proceso de regularización urbana que va “en contra del medio ambiente”.

4.2. Actores clave

Los actores clave involucrados en el proyecto son la comunidad de La Florida II y los representantes de la comunidad, la Comisión de Regantes Chuquitanta, la Gerencia de Servicios Públicos y Medio Ambiente de la Municipalidad de San Martín de Porres y el equipo de implementación del ILPÖ.

Durante el desarrollo del proyecto, hubo distintas razones que motivaron la participación de los actores clave, como los interminables conflictos y las disputas sociales, ambientales, políticas y administrativas. El parque está situado en un área que antiguamente era un “parque ecológico” y que se destruyó para poder obtener la licencia de habilitación urbana de la municipalidad. Dada esta situación, la comunidad solicitó asistencia técnica para construir otro parque. Por lo tanto, se utilizó la creación del parque, que se basó en un enfoque participativo, para restablecer el diálogo entre los vecinos, la Comisión de Regantes Chuquitanta y las autoridades locales. Durante el proceso, se observó que la creación del parque favoreció la relación entre los diferentes actores. Sin embargo, surgieron tensiones en relación al mantenimiento del parque. No obstante es importante mencionar que la asociación entre estos actores es fundamental para garantizar la sostenibilidad actual y futura del parque y su sistema de tratamiento.

4.3. Metodología del Proyecto

El proceso se desarrolló considerando las siguientes etapas:

- La **evaluación inicial** incluyó el estudio de las condiciones ambientales y socioeconómicas, la identificación de los actores clave, el estudio de la tierra y el análisis de la calidad del agua.

- Los **talleres de capacitación comunitaria y diseño participativo** incluyeron talleres de diseño con la comunidad para definir el concepto, las funciones y el programa. Además, sirvieron para generar conciencia ambiental en general.
- La **integración del diseño y los humedales artificiales** engloba el diseño y la elaboración de documentos de la construcción del sistema de tratamiento y los componentes del parque.
- La **implementación** del parque. Se obtuvo electricidad pública a fin de contar con alumbrado público dentro del parque y favorecer el funcionamiento del humedal artificial, además del permiso de la Comisión de Regantes Chuquitanta para utilizar el agua del canal San José.
- La **evaluación y capacitación** incluyeron la evaluación del sistema de tratamiento y la capacitación de los funcionarios municipales sobre el funcionamiento y mantenimiento de los humedales artificiales y del parque en general.
- El **funcionamiento y la supervisión inicial del parque**: el control del agua empezó tras la inauguración del parque y estuvo a cargo de un estudiante de la UNALM como trabajo de tesis. Además, se llevaron a cabo visitas periódicas encabezadas por la exgerente de proyectos del ILPÖ Rossana Poblet para hablar con los actores clave. El seguimiento del mantenimiento y funcionamiento del parque estuvo a cargo de las autoridades municipales y los vecinos.

4.4. Principales características del proyecto

El parque consta de tres partes principales: 1) el sistema de humedal artificial con un reservorio de aguas residuales tratadas; 2) un espacio verde recreativo con árboles frutales para la recreación pasiva y 3) un área de juego con superficies secas y árboles para sombra. En la figura 3, se pueden observar la propuesta y el parque en el día de su inauguración en agosto del 2014.

4.4.1. Demanda de agua en el parque

Solo el 40 % de la superficie total del parque está cubierta con césped y árboles frutales autóctonos. El área restante está cubierta con

superficies secas y árboles de especies autóctonas (mimosa) y xerófitas. Gracias a la selección cuidadosa de la vegetación y al uso de sistemas de irrigación presurizados, la demanda de agua total en toda el área es baja ($\sim 1 \text{ m}^3/\text{día}^{-1}$). Por consiguiente, el agua tratada restante se puede utilizar para irrigar el otro parque ($\sim 2000 \text{ m}^2$) de La Florida II.



Figura 3: Parque de los niños: parque de tratamiento de aguas residuales, en el día de su inauguración en agosto del 2014; incluye: 1) sistema de tratamiento con humedal artificial y reservorio, 2) espacio verde recreativo con árboles frutales y 3) área de juego con superficies secas (Fotografía: Evelyn Merino Reyna)

4.4.2. Descripción del sistema de tratamiento de aguas residuales

Akut Perú se encargó del diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales, que incluyó un sistema de pretratamiento con rejillas (20 mm de distancia) y un sedimentador, un humedal artificial de flujo vertical modelo WTL-Rotaria y un reservorio. El humedal cubre un área de 50 m^2 (5 m x 10 m) y tiene una profundidad total de 0,90 m. Se diseñó como un canchero en elevación para utilizar la pendiente del parque; se enterró 0,40 m y el resto (0,5 m) quedó a la vista.

El humedal artificial se rellenó con arena gruesa y grava de acuerdo con los detalles descritos en la tabla 1, desde el fondo hasta la parte superior.

Tabla 1: Distribución del material de relleno del humedal artificial

Grava para cubrir el conducto de drenaje	0,15
Arena gruesa sin polvo	0,50
Protección de la superficie con grava	0,10
Margen libre	0,15
Altura total	0,90

Fuente: Akut Perú

Al principio se plantaron dos especies diferentes de vegetación, vetiver *Chrysopogon zizanioides* y paragüitas *Cyperus alternifolius*, pero la mayoría de las plantas de paragüitas no se adaptaron bien, por lo que a los tres meses se reemplazaron por plantas de vetiver. Quedaron algunas plantas de paragüitas en el suelo, por lo que aún sigue habiendo esta especie en el humedal.

El sistema de tratamiento es un sistema automatizado que depende del bombeo para alimentar la planta de tratamiento en ciclos de 48 horas, que en total suman 3 ciclos por semana. La alimentación del humedal vertical se programa de acuerdo con pulsos, lo que asegura la oxigenación del sistema.

La planta trata $5,57 \text{ m}^3/\text{día}^{-1}$ distribuidos en un área de 50 m^2 , lo que genera una carga hidráulica de alrededor $0,11 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}^{-1}$. El agua contaminada presenta una DBO5 y turbiedad variables con máximos de $15,4 \text{ mg/l}$ y 1000 UNT , respectivamente. Los coliformes fecales varían en gran medida de 3×10^2 a $10^4 \text{ UFC}/100 \text{ ml}$; se observó la presencia de parásitos (*Ascaris toxocara*). Sin embargo, solo se realizó un análisis de coliformes fecales, que se presenta en este documento como un resultado preliminar.

4.4.3. Diseño del espacio abierto e integración con la tecnología de tratamiento

El humedal artificial se sitúa en el punto más alto del parque a fin de reducir la necesidad de bombeo. Al borde elevado del humedal

se le dio el diseño de un banco con una plataforma de madera, y se colocaron carteles didácticos en los que se informa a la comunidad sobre el origen y la calidad del agua, el proceso de tratamiento y reutilización. Las especies vegetales del humedal contribuyen de manera significativa al aspecto estético del sistema de tratamiento y son una característica destacada del parque. Las figuras 4 y 5 muestran algunas imágenes del Parque de los niños: parque de tratamiento de aguas residuales al año de su inauguración.



Figura 4: Humedal artificial con banco, plataforma de madera y cartel didáctico sobre el origen del agua del canal San José, “La gota San Pepito” (Fotografía: Alexandra Garcia)



Figura 5: Área recreativa-productiva verde y área de juego seca en el primer plano (Fotografía: Alexandra Garcia)

5. Análisis y resultados de la calidad del agua

Se analizaron los indicadores fisicoquímicos y microbiológicos todas las semanas durante dos meses, se evaluaron siete muestras a través de los métodos normalizados de APHA-AWWA-WEF.

Se midieron la temperatura y el pH en el terreno. Los demás indicadores, incluidos los indicadores microbiológicos, se midieron en el Laboratorio de Saneamiento y Medio Ambiente de la UNALM. En la tabla 2, se muestran los resultados del análisis fisicoquímico y microbiológico obtenidos hasta la fecha. En la tabla 3, se pueden observar los resultados preliminares correspondientes a los parásitos.

5.1. Eficacia de eliminación

El análisis de la calidad del agua arrojó los siguientes resultados:

- El pH de las aguas residuales resultó ligeramente alcalino. Ingresó al sistema de tratamiento con un valor promedio de 7,66 y a la salida se registró una ligera reducción con un valor promedio de 7,39. Es posible que esto se deba a la actividad microbiana que acidificó el ambiente (ácido carbónico), pero este valor no impide que el agua tratada se pueda utilizar para regar los espacios verdes.
- En lo que respecta a la conductividad eléctrica, el afluente del sistema presentó un valor promedio de 548 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y en cada muestra se incrementó hasta alcanzar un valor de 922 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en promedio. Sin embargo, este aumento no influye en el uso del agua residual tratada para la irrigación de espacios verdes de acuerdo con las pautas de la FAO.
- La turbiedad se redujo drásticamente en el sedimentador y en la salida del humedal (96 %); el valor promedio en la salida del humedal fue de 1,66 UNT.
- La reducción de la DBO5 en el sistema registró un valor promedio de 77 %, pero en las dos últimas muestras (al año y cuatro meses de iniciar las operaciones de la planta de tratamiento), la eficacia alcanzó un 93 % en promedio.
- La reducción de los coliformes fecales en el sistema alcanzó, en promedio, el 80 %, aunque en la mayoría de los casos en la salida

Tabla 2: Resultados preliminares del análisis del agua junto con el análisis físicoquímico y microbiológico

Nº	PUNTO DE MUESTREO	PRELIMINARY REPORTS						
		Temper, (°C)	Valor de pH	Conduct, Eléctr, (CE) (µS/cm)	Turbiedad (UNT)	Sólidos en suspensión (mg/l)	DBO ₅ (mg/l)	Colif, fecal (UFC/100 ml)
1	EI	N	7,35	1044	23	2000	15,37	N
	ES	N	7,14	1184	19,4	1800	13,96	-
	EH	N	7,15	1271	1,1	200	3,9	N
2	EI	27,2	7,73	1044	162	600	14,2	300
	ES	27,5	7,67	1184	140	200	9,2	-
	EH	28,6	7,58	1271	1,84	<100	4,67	< 20
3	EI	30,0	7,93	544	212	2000	9,53	4540
	ES	29,6	7,53	516	44,2	200	2,94	-
	EH	29,9	7,54	625	1,98	<100	1,35	680
4	EI	26,9	7,71	346	94	1000	2,68	420
	ES	27,2	7,50	477	47,5	200	1,27	-
	EH	27,6	7,55	592	0,75	<100	0,56	240
5	EI	23,8	7,58	502	83,1	500	6,17	980
	ES	23,6	7,71	501	73,1	100	3,17	-
	EH	23,3	7,64	612	4,07	<100	2,87	110
6	EI	N	7,71	368	>1000	15600	7,75	>10000
	ES	N	7,55	510	953	3000	3,22	...
	EH	N	7,20	1395	1,25	<100	0,45	1520
7	EI	N	7,63	599	102	5200	9,06	7740
	ES	N	7,46	506	30,4	600	2,94	...
	EH	N	7,10	1282	0,64	<100	0,71	1080

Tabla 3: Resultados preliminares de parásitos en el Parque de los niños: parque de tratamiento de aguas residuales

Nº	PUNTO DE MUESTREO	RESULTADOS PRELIMINARES	
		Número de huevos/l	ESPECIES HALLADAS
1	EI	15	<i>Ascaris Toxocara</i>
	EH	0	<i>Ascaris</i>

EI: punto de entrada al sistema de tratamiento de aguas residuales, ES: salida del sedimentador, EH: salida del humedal, N: no determinado

del sistema, el valor correspondiente a estas bacterias no alcanzó las 1000 UFC/100 ml.

- En lo que respecta a los parásitos, solo fue posible realizar una prueba. En esta muestra de agua residual sin tratar, se hallaron 15 huevos/l, que se eliminaron por completo a la salida del humedal. La especie identificada fue *Ascaris toxocara*, que se asoció con la contaminación originada a partir del excremento de animales domésticos, como perros y gatos.
- En la figura 6, se muestran las muestras de turbiedad del agua de los tres puntos donde se tomaron muestras: Entrada del sistema (EI), salida del sedimentador (ES) y salida del humedal vertical (EH), respectivamente.



Figura 6: Turbiedad observada en las muestras de agua de la entrada del sistema (EI), salida del sedimentador (ES) y salida del humedal vertical (EH) (Fuente: Alexandra Garcia)

6. Percepción social- Nivel de Aceptación

Un sondeo fue realizado para evaluar la sostenibilidad del sistema de tratamiento y su aceptación por parte de los habitantes de la localidad. En total 20 habitantes fueron parte de la encuesta, la mayoría mujeres menores de 35 años y que llevaban viviendo menos de 5 años en el área (figura 7).

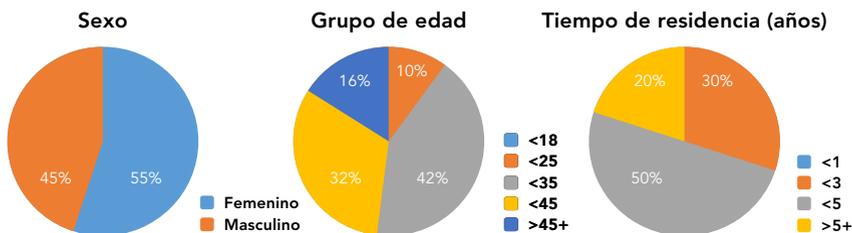
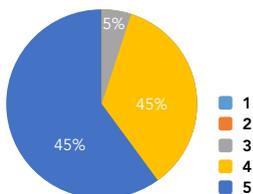


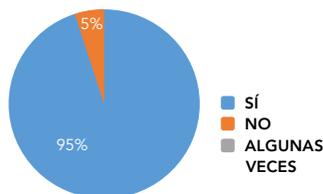
Figura 7: Perfil de los participantes de la encuesta para evaluar el sistema de tratamiento (Fuente: Garcia Rospigliosi, 2015)

Las preguntas de la encuesta pretendían medir el grado de conocimiento por parte de los habitantes de los riesgos para la salud que representa el uso de agua contaminada del canal para irrigar espacios verdes, así como saber de qué manera repercute en sus vidas y hasta qué punto estarían dispuestos a participar en la erradicación de la contaminación. Se utilizó una escala de 1 a 5 para determinar los grados de contaminación donde 1 significa "no está contaminada" y 5, "está muy contaminada". Los resultados se muestran en la figura 8.

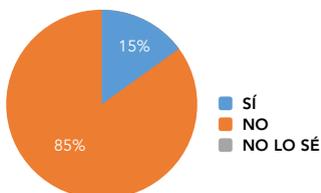
En una escala de 1 a 5, ¿cómo calificaría el nivel de contaminación del agua que se usa para regar los espacios verdes de su comunidad?



¿Cree que el riego de espacios verdes con agua contaminada repercute en su calidad de vida?



¿Cree que el gobierno local se responsabiliza como es debido ante la contaminación actual?



¿Estaría dispuesto a participar en un plan sostenible para gestionar la contaminación del agua o la zona?

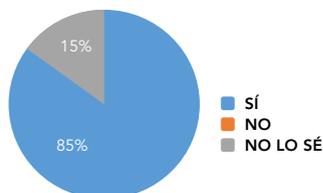
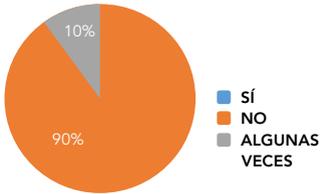


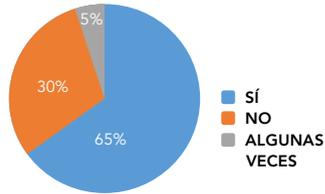
Figura 8: Percepción del nivel de contaminación del agua en el canal de irrigación y disposición para participar en un plan sostenible para su gestión (Fuente: Garcia Rospigliosi, 2015)

Se les preguntó a los habitantes cuál era su percepción acerca del parque, sus quejas sobre el parque, qué les parecía la gestión del parque y si estarían dispuestos a participar en la gestión. Los resultados se muestran en la figura 9.

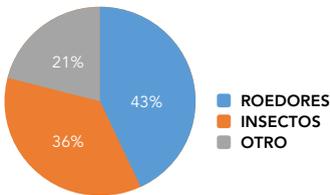
¿La construcción del parque le ha generado algún problema?



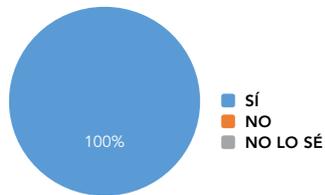
¿Ha notado la presencia de algún animal o especie indeseada en el parque?



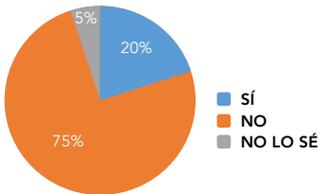
¿Qué tipo de especie le ha causado problemas?



¿Considera que el parque ha mejorado el valor paisajístico de la zona?



¿Cree que el parque se administra bien?



¿Estaría dispuesto a participar en el cuidado y gestión del parque?

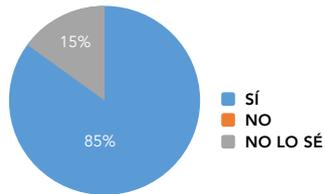


Figura 9: Percepción acerca de la construcción del parque, quejas realizadas, gestión y disposición para participar en un programa de gestión. (Fuente: García Rospigliosi, 2015)

Por último, la encuesta se centró en determinar el nivel de conocimiento de los habitantes sobre el sistema de tratamiento instalado en el parque. Los resultados se muestran en la figura 10.

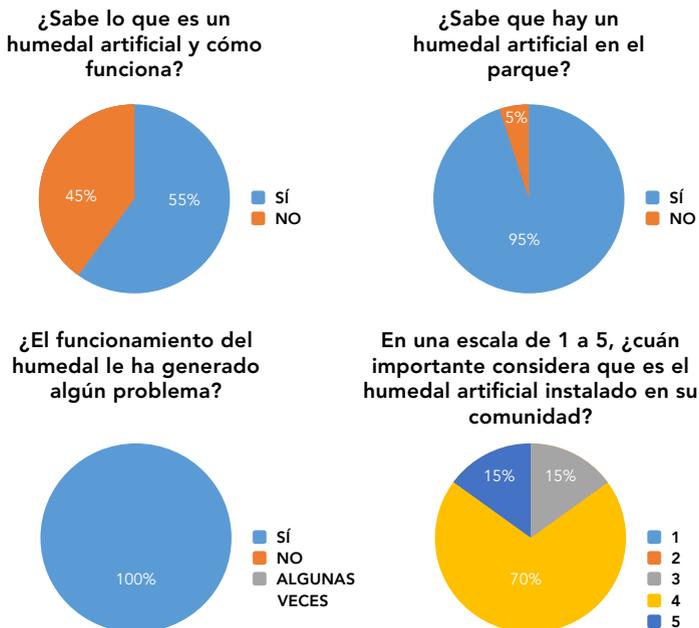


Figura 10: Conocimiento de los habitantes sobre el sistema de tratamiento y su importancia (Fuente: Garcia Rospigliosi, 2015)

7. Funcionamiento actual del parque

Tras la inauguración del proyecto en agosto del 2014, el equipo de LiWa se lo entregó a los vecinos y la municipalidad local. Luego de las elecciones municipales en el 2014, un nuevo gobierno del distrito asumió el mando en enero del 2015, a tan solo cuatro meses de la inauguración del proyecto: un nuevo panorama que puso en riesgo el mantenimiento y funcionamiento del parque. En el 2015, se reemplazó a todo el personal técnico, incluso, en los cargos de alta gerencia, así como muchos trabajadores de mantenimiento y jardineros. La comunidad

de La Florida II, bien organizada, exigió a la municipalidad que se encargara del funcionamiento y mantenimiento del parque y presentó el proyecto al nuevo gobierno. A su vez, el proyecto LiWa brindó los medios para emplear a un vecino a fin de superar el período de transición entre el nuevo y el anterior gobierno y contrarrestar el tiempo que la municipalidad no proporcionó mantenimiento. Posteriormente, la municipalidad designó a un trabajador para que se ocupara de las tareas operativas y el mantenimiento, pero la persona no disponía de suficiente tiempo, ya que estaba encargada del mantenimiento de varios espacios verdes de la municipalidad a la vez. Asimismo, la capacitación sobre el funcionamiento y mantenimiento que se ofreció fue escasa. En la actualidad, un trabajador municipal es responsable del funcionamiento del sistema de bombeo y riego, y acude al lugar prácticamente de manera regular tres veces a la semana.

8. Lecciones aprendidas y conclusiones

Tras la implementación del proyecto surgieron varios interrogantes y obstáculos. En los siguientes puntos se ofrecen algunas reflexiones y las principales lecciones aprendidas durante y después del proceso:

- El proyecto se encuentra ubicado en una zona periurbana dinámica, donde es el escenario de diferentes conflictos sociales y ambientales, condiciones cambiantes e incertidumbre. Estos factores fueron un desafío durante el proceso de diseño e implementación.
- El caudal irregular del agua, que se caracteriza por excedentes en la estación lluviosa y escasez y restricciones en el uso del agua durante la estación seca, representó un desafío para la automatización, las pruebas y el diseño del humedal artificial. Es por ello que el funcionamiento automático del sistema de tratamiento no se pudo realizar satisfactoriamente y el riego debe efectuarse de manera manual.
- El diseño eficiente del sistema de irrigación solo se utiliza en forma parcial debido a la falta de conocimiento. Por lo tanto, se continúa con la práctica de inundar los espacios verdes para regarlos.
- La seguridad sigue siendo un tema muy importante que se debe considerar a la hora de escoger la tecnología. En las áreas

aledañas, se producen hechos delictivos, consumo de alcohol y drogas. Estos aspectos deben desempeñar un papel importante cuando se selecciona la tecnología de tratamiento y las especies de plantas. Se debe tener en cuenta la altura que alcanzarán cuando crezcan. La opinión positiva del humedal artificial como sistema de tratamiento ecológico podría cambiar a negativa si la vegetación tupida se convierte en un escondite para los criminales. Se produjo un hecho de tentativa de asalto, por lo que la comunidad decidió cortar las plantas a la mitad de su altura.

El proyecto se caracteriza por sus aspectos positivos y la innovación:

- La implementación de una planta de tratamiento de aguas residuales en un espacio público es un caso único y novedoso. Sobre la base de los cuestionarios, se podría suponer que la integración de un sistema de tratamiento en un espacio recreativo fue satisfactoria.
- Los análisis indican que la calidad del agua mejora notablemente tras el proceso de tratamiento, lo que permite reducir los riesgos para la salud de los usuarios del parque, además de aminorar los aspectos ambientales negativos, como malos olores y la presencia de vectores de hábitat acuático. Sigue siendo una preocupación la presencia de insectos, y se debe investigar esta situación.
- Los residentes que viven cerca del parque han indicado que son conscientes de los posibles riesgos para la salud que representa el uso de agua contaminada para riego, por lo que reconocen los beneficios del parque de tratamiento. Los residentes también reconocieron que la calidad del paisaje ha mejorado considerablemente.
- La mayoría de los encuestados afirmó que el principal problema era la falta de una buena gestión y funcionamiento del parque. Los residentes pagan impuestos a la municipalidad, lo que también incluye el mantenimiento de los espacios verdes y públicos. Por lo tanto, pueden surgir conflictos futuros si las autoridades locales no toman medidas para hallar una solución común al mantenimiento de los espacios verdes. Es por ello que se necesita una mejor coordinación entre los vecinos y las autoridades municipales.
- Dado que el proyecto culminó con la inauguración de parque, es preciso realizar investigaciones científicas y sociales para evaluar plenamente el funcionamiento del parque, la aceptación social, los

obstáculos, los desafíos y los beneficios. Es clave la participación activa de los distintos actores, como las instituciones educativas locales, para crear e intercambiar conocimientos y brindar un control integral.

- Pese a estas condiciones, el “Parque de los niños: parque de tratamiento de aguas residuales” es un lugar alegre para los niños, hombres y mujeres que viven en La Florida II y las zonas aledañas. Sería necesario investigar la manera de aumentar volumen de tratamiento del agua contaminada para el riego de más espacios verdes.
- El proyecto representa el final de cuatro años de investigación y un proceso de diseño y planificación participativa con soluciones y propuestas para un uso más sostenible de los recursos hídricos de Lima y, específicamente, en la cuenca baja del río Chillón, que involucró a las comunidades, a las autoridades locales y metropolitanas, a universidades peruanas y alemanas e investigadores. Como resultado de esta experiencia, se publicó el libro de la LEIS a modo de guía para la aplicación de DUSA en diferentes escalas. Asimismo, el proyecto piloto actuó como catalizador para demostrar las posibilidades de implementación de DUSA en diferentes situaciones urbanas, donde se reutilizan distintos recursos hídricos, como aguas residuales, aguas negras, aguas grises tratadas de modo insuficiente o agua superficial contaminada. El proyecto fue posible gracias a la comunidad de La Florida II, que ha demostrado que tiene el poder para dirigir en forma conjunta el proceso y apoyar el diseño del parque, la construcción, el mantenimiento y su funcionamiento. Además, el Ministerio Alemán de Educación e Investigación (BMBF), la municipalidad de San Martín de Porres y la comunidad de La Florida II financiaron el proyecto con el objetivo de beneficiar a la comunidad con un nuevo espacio verde, que pueda mitigar los conflictos socioambientales de la zona.

Referencias

Akut Perú. (2014). *Manual del tratamiento de aguas de canal en humedal artificial WTL-ROTARIA para el uso en riego del parque en La Florida – Chuquitanta*.

Economist Intelligence Unit. (2010). *Latin American Green City Index 2010: Assessing the environmental performance of Latin America's major cities*. Múnich, Alemania: Siemens AG. [Fecha de consulta: 2 de febrero del 2016] Recuperado de: https://www.siemens.com/entry/cc/features/greencityindex_international/all/en/pdf/report_latam_en.pdf.

Eisenberg, Bernd, Eva Nemcova, Rossana Poblet y Antje Stokman. (2014). *Estrategia de Infraestructura Ecológica de Lima: Estrategias integradas de planificación urbana y herramientas de planificación*. Stuttgart, Alemania: Instituto de Planificación del Paisaje y Ecología. Recuperado de: http://issuu.com/ilpe/docs/leis_-_esp_20141117_copy.

Fernández-Maldonado, Ana María. (2008). "Expanding networks for the urban poor: Water and telecommunications services in Lima, Peru." *Geoforum* 39(6), 1884–1896.

García Rospigliosi A. (2015). *Sostenibilidad de un humedal artificial de flujo vertical, para el tratamiento de aguas contaminadas con fines de reúso. Avances del trabajo de tesis para título de Ingeniero Agrícola*.

Kosow, H., C. León y M. Schütze. (2013). *Escenarios para el futuro – Lima y Callao 2040. Escenarios CIB, storylines & simulación LiWatool*. [Fecha de consulta: 30 de septiembre del 2013] Recuperado de: <http://www.lima-water.de/documents/scenariobrochure.pdf>.

LiWa Project. Recuperado de: <http://www.lima-water.de/>.

Zapater-Pereyra, M., Eva Nemcova y Rossana Poblet. (2014). "Ecological Infrastructure: Coupling wastewater treatment and open space design – Lima, Peru." En *IWA Specialist Group on Wetland Systems for Water Pollution Control Newsletter No. 45*, pág. 30.

Nota: La descripción del proyecto se basa en la publicación de la Estrategia de Infraestructura Ecológica de Lima (Eisenberg y colaboradores, 2014).

CASO 3

Desafíos que plantean las aguas residuales y la implementación exitosa de los humedales artificiales en Egipto (Egipto)

T. T. El-Gamal y M. H. Housian¹

Resumen

A raíz de la demanda cada vez mayor de agua y el suministro limitado de agua, la solución factible a este problema en Egipto es la reutilización de las aguas residuales de las industrias, los municipios y el sector agrícola. El sistema de riego egipcio se considera un sistema cerrado, donde las distintas pérdidas de agua regresan al sistema de drenaje, así como un sistema mixto. Este sistema provoca una contaminación más alta del agua de drenaje y dificulta enormemente su reutilización. Brindar servicios de alcantarillado y tratamiento de aguas estuvo entre las principales prioridades del gobierno en las últimas décadas. Sin embargo, debido a los problemas económicos, los servicios colapsaron por el rápido crecimiento demográfico. Por ende, es importante encontrar alternativas viables desde el punto de vista económico y técnico para mitigar el problema de la contaminación. Los humedales artificiales son una técnica prometedora para solucionar el problema. En Egipto, la técnica se implementó, a gran escala, en los lagos del norte y, a pequeña escala, en algunos drenajes secundarios (humedales

¹ El-Gamal, T. T.⁽¹⁾ ✉ · Housian, M. H.⁽²⁾

(1) Profesor adjunto, Instituto de Investigación de Gestión del Agua, Centro Nacional de Investigación del Agua, Egipto; Correo electrónico: elgamalt@yahoo.com, elgamalt@gmail.com

(2) Investigador, Instituto de Investigación de Gestión del Agua, Centro Nacional de Investigación del Agua, Egipto; Correo electrónico: elhousian_helmy@hotmail.com

En: Hiroshan Hettiarachchi and Reza Ardakanian (eds). *Uso seguro de las aguas residuales en la agricultura: ejemplos de buenas prácticas* ©UNU-FLORES 2016

dentro del cauce). En los proyectos piloto llevados a cabo, se comprobó una eficiencia de remoción muy prometedora de distintos elementos contaminantes. Los humedales dentro del cauce no requieren áreas adicionales y, como son una técnica sencilla y económica, se podrían implementar al mismo tiempo en diferentes lugares con la participación de organizaciones no gubernamentales. Además, mediante un programa adecuado de difusión y desarrollo de capacidades, se podrían hacer avances considerables en lo que respecta a la mejora de la calidad del agua y salvar el uso de las aguas residuales.

Palabras clave: aguas residuales, reutilización, contaminación, problemas económicos, humedales artificiales

1. Introducción

Al ser una región semiárida, Egipto sufre de escasez de agua, y la brecha entre el suministro y la demanda de agua se profundiza gradualmente con el rápido crecimiento demográfico. La capacidad de incrementar los recursos hídricos actuales del río Nilo se volvió muy limitada, por consiguiente, la solución factible para acortar esta brecha es reutilizando el agua de los drenajes agrícolas y las aguas residuales municipales. La mayoría de las áreas cultivadas depende del sistema de riego por gravedad, que, por lo general, se asocia con una baja eficiencia en el uso del agua. Todas las pérdidas de agua destinada a la agricultura regresan al sistema y se mezclan con las aguas residuales y los desechos industriales, que también retornan al sistema. Debido al aumento de los desechos industriales y municipales, y la necesidad de reutilizar tales pérdidas, la contaminación del agua se convirtió en un problema grave.

El concepto de la reutilización de las aguas residuales en Egipto se remonta a la década de 1930. Sin embargo, no fue sino hasta la década de 1970 que se comenzó a implementar de manera intensiva. Desde entonces, se incrementó gradualmente la dependencia del agua de drenaje debido al aumento en la demanda de agua. Al mismo tiempo, hubo un incremento en la contaminación del sistema de drenaje y los acuíferos poco profundos por el rápido aumento de la población y los cambios acelerados en el nivel de vida.

Los recursos económicos escasos repercuten en la habilidad del país para recolectar y tratar todos los desechos municipales. Más del 88 %

de las zonas rurales aún no cuentan con servicios de alcantarillado. Recolectan las aguas residuales en pozos sépticos detrás de las viviendas, que se filtran a los acuíferos poco profundos. Cuando estos pozos están llenos, los agricultores los vacían en el sistema de riego o drenaje mediante cisternas móviles. En muchas plantas de tratamiento de las ciudades, los efluentes de las aguas residuales excedieron la capacidad de dichas plantas, y parte de ellos pasa directamente a los distintos cursos de agua. Además, los desechos industriales son arrojados en muchos lugares con apenas un tratamiento básico y los procesos para mejorar todos estos desechos son muy costosos.

Es fundamental estudiar diferentes alternativas para desarrollar una solución que sea técnica y económicamente viable, y que se pueda aplicar a corto plazo, así como que se ajuste al rápido crecimiento de la población y los cambios acelerados en el nivel de vida.

Se analizaron muchas alternativas para afrontar el problema actual de la calidad del agua en Egipto. La técnica de los humedales es una opción prometedora en ese sentido. El bajo costo, que es casi una décima parte del que tienen las típicas plantas de tratamiento, y los buenos resultados obtenidos en algunas pruebas convierten a esta técnica en una de las posibles soluciones a dicho problema. La técnica ya se investigó en algunos sitios pequeños, y el desafío actual es analizar la posibilidad de difundir el concepto y de involucrar a las organizaciones no gubernamentales en la construcción y el mantenimiento de estos sitios.

2. Reutilización de las aguas residuales en Egipto

2.1. El balance hídrico actual en Egipto y la importancia de la reutilización

En la figura 1, se muestra el balance hídrico de Egipto en 2010 sobre la base de la estrategia egipcia del agua para 2017 (agosto de 2013). Los recursos hídricos totales fueron de alrededor de 59,35 mil millones de metros cúbicos e incluye, principalmente, la cuota del río Nilo, así como los pequeños aportes de las aguas subterráneas, las precipitaciones y

la desalinización. La cuota egipcia del río Nilo no se ha modificado desde el tratado de 1959, mientras que la población aumentó casi tres veces durante el mismo período. La cuota per cápita de los recursos hídricos bajó considerablemente de un excedente de agua de 2526 m³/per cápita/año en 1947 a un nivel suficiente de 1972 m³/per cápita/año en 1970 y, finalmente, a una escasez de agua de 663 m³/per cápita/año en 2013.

Según la figura 1, la cantidad de agua utilizada en 2010 fue de 75,46 mil millones de metros cúbicos (127% de los recursos hídricos), entre los que se incluyen las pérdidas de agua reutilizada. Esta cantidad de agua utilizada se distribuye entre tres categorías de consumo (agrícola, municipal e industrial), y 34,8 mil millones de metros cúbicos regresan al sistema. Las pérdidas finales son de 18,7 mil millones de metros cúbicos, incluidos los 2,8 mil millones de metros cúbicos que se evaporan y los 15,9 mil millones de metros cúbicos del agua de drenaje que se descarga en el mar, y el resto se vuelve a utilizar.

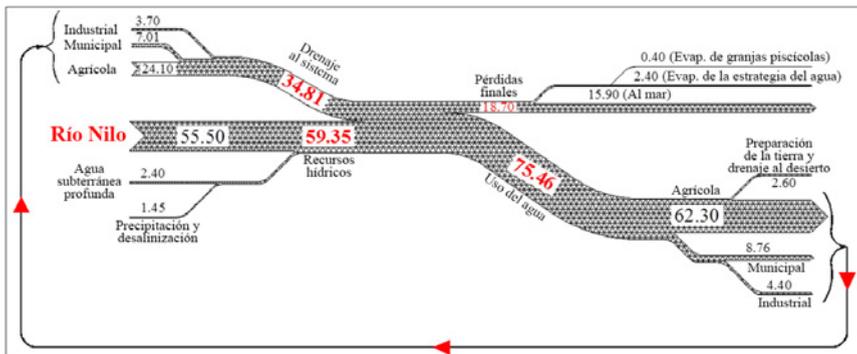


Figura 1: Balance hídrico de Egipto en 2010 sobre la base de la estrategia egipcia del agua para 2017

La reutilización tiene un efecto positivo en la eficiencia general de riego. Teniendo en cuenta la figura anterior y considerando que la cantidad total de agua destinada a la agricultura fue de 35,6 mil millones de metros cúbicos, la reutilización incrementó la eficiencia general del 57 % al 74 %. Según otras referencias, se calculó que la eficiencia general de riego pasó de menos del 50 % al 82 % con el efecto de la reutilización (R. J. Oosterbaan, 1999).

Como ya se mencionó, la dependencia de las pérdidas de agua se acrecentó de manera gradual durante las décadas recientes. En la figura 2, se muestra el aumento gradual de la dependencia de la reutilización del agua de drenaje en las últimas décadas (Alam, 2001). Alam (2001) indicó que el uso no oficial del agua de drenaje por parte de los agricultores es de alrededor de 3 mil millones de metros cúbicos/año y está aumentando rápidamente a raíz de la profundización de la crisis hídrica.

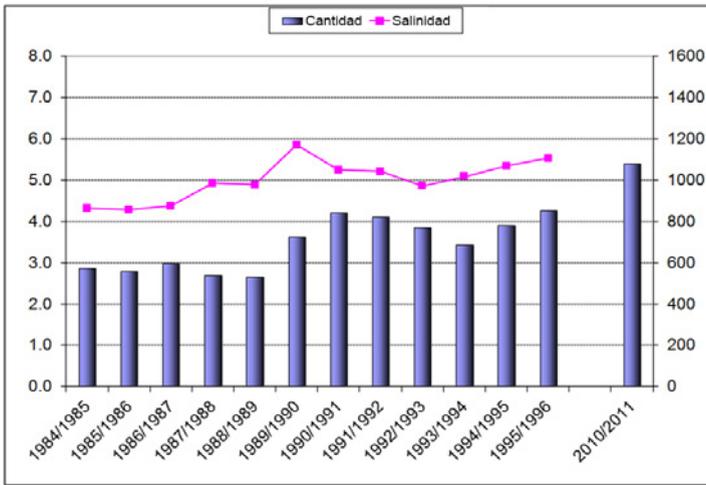


Figura 2: La dependencia de la reutilización del agua de drenaje en Egipto durante las últimas décadas

2.2. Los efectos secundarios de la reutilización

Si bien la reutilización tiene un efecto positivo en el aumento de la eficiencia de riego, también acarrea muchos efectos secundarios. La acumulación de sal es un problema, y el equilibrio de sales es un tema crucial que merece ser objeto de estudio en Egipto. La salinidad del agua de drenaje está aumentando, como se puede observar en la figura 2, pero los valores aún no son peligrosos. El problema importante es la contaminación biológica cada vez más aguda en los diferentes cursos de agua. Con motivo de los cambios acelerados en el nivel de vida, los efluentes de las aguas residuales aumentaron de manera gradual, tanto en las plantas de tratamiento, donde el flujo excedió la capacidad de

estas plantas, como en las zonas rurales, donde las aguas residuales se descargan directamente en los cursos de agua.

2.2.1. Fuentes de contaminación (fuentes puntuales frente a fuentes no puntuales de contaminación)

Por lo general, el agua de drenaje contiene distintos desechos industriales, municipales y agrícolas. Debido a que una gran parte de los desechos industriales y municipales no reciben tratamiento, la contaminación aumenta de manera gradual en esta agua de drenaje. Los desechos industriales llegan a los drenajes situados en puntos específicos (fuente puntual). Las aguas residuales se mezclan con las aguas de drenaje de una fuente puntual (bocas de salida de las plantas de tratamiento) o con los efluentes de las aguas residuales que se transportan en cisternas móviles y se arrojan a los drenajes, dado que en la mayoría de las zonas rurales aún no hay servicios de alcantarillado. En la figura 3, se presentan dos ejemplos de fuente puntual y no puntual de contaminación en el drenaje Sabal en el delta medio. En la figura de la derecha, se muestra la boca de salida de una planta de tratamiento que arroja sus desechos en el drenaje. En la figura de la izquierda, se muestran cisternas móviles que arrojan aguas residuales sin tratamiento en el drenaje.

El agua dulce se contamina cuando el agua de drenaje se mezcla con el agua dulce de los canales y, en unos pocos casos, las aguas residuales se descargan directamente en el agua dulce, a pesar de que esto está prohibido.



Figura 3: Descarga de aguas residuales en los cursos de agua de las zonas rurales de Egipto

2.2.2. La contaminación del agua dulce al mezclarse con el agua de drenaje

El agua de drenaje se mezcla con el agua dulce de Egipto de dos maneras. Algunos desagües descargan el agua en el río Nilo y sus brazos. Además, el agua de drenaje se bombea a los canales principales o secundarios mediante distintas estaciones elevadoras.

Unos 78 drenajes agrícolas principales descargan sus aguas residuales municipales, agrícolas e industriales en el río Nilo (El-Sherbini, 1998). Normalmente, estos desagües contienen agua de los drenajes agrícolas. Durante las últimas décadas, se construyeron muchas plantas de tratamiento que arrojan sus efluentes en estos desagües. El tratamiento era primario y debido a que el nivel de descarga empezó a superar la capacidad de estas plantas, una parte de las aguas residuales no se somete a tratamiento. Esto condujo a un grave deterioro de la calidad del agua en estos desagües. La situación en el brazo Rosetta es un claro ejemplo de los riesgos de contaminación. El brazo recibe alrededor de 3 mil millones de metros cúbicos diarios de agua de drenaje que contienen desechos industriales y municipales con tratamiento primario y sin tratamiento a través de cinco drenajes principales (El-Rahawy, Sabal, El-Tahreer, Zaweit El-Bahr y Tala), así como los desechos de algunas fábricas (Ezzat y colaboradores, 2012). A estos desagües, llega el agua de uso doméstico de cincuenta y cinco pueblos y comunidades distribuidas a lo largo del brazo. Ezzat y colaboradores (2012) demostraron el efecto de este tipo de agua de drenaje en la calidad del agua del brazo. Por ejemplo, el efecto del drenaje El-Rahawy se evaluó midiendo la calidad del agua en el brazo Rosetta antes y después de la unión con el drenaje. El nivel de amoníaco (NH_3) en la salida del drenaje El-Rahawy fue de 22,3 mg/l. En el brazo Rosetta, la concentración fue de 3,6 mg/l y 8,35 mg/l antes y después de la unión con el drenaje, respectivamente. En cuanto a la demanda biológica de oxígeno (DBO), la concentración en la salida de uno de estos drenajes fue de 120,0 mg/l, y los valores de la DBO se elevaron en el brazo de 5,0 mg/l antes del drenaje a 52,5 mg/l después del drenaje. Los problemas con la calidad del agua en el brazo Rosetta tienen muchos efectos graves, en especial, durante el invierno, que es cuando disminuye el volumen de agua dulce en el brazo. Uno de estos efectos es la muerte de peces en el brazo. Este problema ocurrió en diversas ocasiones y la última vez fue en enero del 2016. El 21 de enero

del 2016, el portavoz oficial del Ministerio de Salud y Población declaró que la muerte de peces se debía al aumento de amoníaco en el agua, que provocó una falta de oxígeno disuelto y, como consecuencia, la asfixia de los peces. Confirmó que este suceso fue debido al agua no tratada del drenaje El-Rahawy, que está lleno de contaminantes químicos y biológicos (diario Youm7, 21 de enero del 2016).

En la figura 2, se muestra el brazo Rosetta en el punto donde el drenaje Sabal, que contiene aguas residuales, descarga las aguas en el brazo. En las dos imágenes de la derecha, se observan los peces muertos al final del brazo en enero del 2016.



Figura 4: El brazo Rosetta en el punto de unión con el drenaje Sabal y la muerte de peces al final del brazo

2.2.3. Dependencia directa del agua de drenaje

La interrupción de algunas de las estaciones elevadoras que bombeaban agua de drenaje a los canales principales tuvo un efecto positivo en la calidad de estos canales. Sin embargo, dado que la reutilización es una parte del balance hídrico de Egipto, esta interrupción, con el aumento de la demanda, ocasionó la dependencia directa del agua de drenaje al final de la red de riego (áreas del norte). En muchos sitios, el agua de drenaje está muy contaminada. Por ejemplo, existe una elevada dependencia respecto del drenaje principal El-Gharibya, independientemente de su mala calidad. Según el estudio llevado a cabo por investigadores egipcios y japoneses (Satoh y colaboradores, 2016), el nivel de amoníaco en el drenaje era de 29,4 mg/l, es decir, 59 veces más que el valor permitido. El valor de DBO era de 31,0 mg/l

o 3,1 veces más que el valor permitido. Los coliformes totales eran 1.632.000 UFC/100 ml, que es 326 veces más que el valor permitido. De todos modos, se depende en gran medida de este drenaje, que se usa para bombear agua a algunos canales o verter el agua de otros canales, o bien lo utilizan directamente los agricultores.

El aumento continuo de la demanda con la prevista reducción en el suministro de agua podría conducir a un grave problema en estas áreas.



Figura 5: Agua al final de dos canales secundarios que reciben las aguas de los drenajes principales Nashart y El-Gharibya

3. Desafíos y soluciones

3.1. Las características de las redes de riego y drenaje

La mayoría de la población de Egipto vive en el valle y el delta del Nilo, que constituye alrededor del 3,5 % de Egipto (unos 35.000 km²). Más de 4600 comunidades y miles de poblados más pequeños (denominados *ezbas*) se distribuyen en esta área. En esta área, también se encuentra la mayoría de las ciudades egipcias. La zona se parece a un área de tierra cultivada con miles de canales de riego entrelazados en diferentes niveles. Más de 50.000 km de canales de drenaje y riego cubren esta superficie, formando un sistema muy compacto. La mayoría de las zonas rurales no cuenta con servicio de alcantarillado, por ende, las aguas residuales en estas zonas rurales se recolectan y arrojan en los

sistemas de drenaje y riego. Parece ser que los agricultores no tienen otras soluciones factibles, a menos que se desarrollen y difundan otras alternativas entre ellos.

3.2. El desafío económico

Solucionar el problema de la contaminación estuvo entre los principales objetivos del gobierno de Egipto en las últimas décadas. De acuerdo con el memorando informativo del proyecto de la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de 6 de Octubre (2009), las inversiones en el tratamiento de las aguas residuales en Egipto subieron de 0,8 mil millones de libras egipcias en 1982 a 40 mil millones de libras egipcias en el 2007. Durante el mismo período, el total de agua tratada aumentó de 1,1 millones de metros cúbicos diarios a 11,0 millones de metros cúbicos diarios, o de 25 l/per cápita/día a 150 l/per cápita/día. Sin embargo, y sobre la base de la misma referencia, los servicios de alcantarillado en el 2007 cubrieron el 60 % de las ciudades y el 4 % de las zonas rurales. Cabe destacar que los servicios de saneamiento llegaron unos 10 años después de abastecer a las zonas rurales de agua potable. El suministro de agua potable en las zonas rurales significó un cambio considerable en el uso del agua municipal y, en consecuencia, en los efluentes de las aguas residuales. Los requisitos municipales aumentaron unas tres veces, de 3,1 mil millones de metros cúbicos en 1990 a 6,57 mil millones de metros cúbicos en el 2005 y 8,76 mil millones de metros cúbicos en el 2010, y se calcula que llegarán a 11,4 mil millones de metros cúbicos en el 2017. En el 2010, de un total de 8,76 mil millones de metros cúbicos, 7,0 mil millones de metros cúbicos regresaron al sistema y 3,6 mil millones de metros cúbicos no se trataron. Pese a los grandes esfuerzos por prestar servicios de saneamiento en las zonas, el avance es más lento que el aumento de la población. Abdel Wahaab y Omar (2013) afirmaron que "a pesar de los esfuerzos continuos del gobierno por ampliar el servicio de agua en todas las regiones urbanas y rurales, las tareas de ampliación no avanzan tan rápido como el crecimiento de la población, por lo que la cobertura del servicio está empeorando".

En cuanto a los costos requeridos, las autoridades declararon que el costo de prestar servicios de alcantarillado a todas las poblaciones ronda los 100 mil millones de libras egipcias. Abdel Wahaab y Omar

(2013) indicaron que el costo promedio para tratar un metro cúbico de aguas residuales en Egipto es de unas 5000 libras egipcias. Los costos de operación y mantenimiento corresponden al 15 % del costo de inversión. Riad (2004) comentó que el tratamiento parcial de las aguas residuales le cuesta al gobierno unos 600 millones de libras egipcias. Una inversión de tal magnitud puede que no sea factible teniendo en cuenta la situación económica actual de Egipto. Por consiguiente, se deben investigar técnicas económicas y sencillas.

3.3. Soluciones para abordar el problema de la calidad del agua en Egipto

La manera directa, que depende de la recolección de aguas residuales y del establecimiento de nuevas plantas de tratamiento, es la manera oficial actual de enfrentar el problema de la contaminación en Egipto. Se evaluaron otras técnicas, como actividades de investigación o proyectos piloto a pequeña escala. Algunas de estas ideas se describen en el presente artículo.

Una de estas alternativas fue utilizar el agua contaminada para la construcción de bosques artificiales. Se abordó un proyecto piloto para cultivar trece regiones (2700 hectáreas) en diferentes gobernaciones egipcias (Riad, 2004). Hubo dos problemas con este enfoque. El primero de ellos es las características de las redes de riego y drenaje en Egipto, que se describieron anteriormente. Las redes compactas y entrelazadas que están rodeadas por las áreas cultivadas hacen que esta técnica sea adecuada para drenajes específicos en las márgenes del delta del Nilo. El segundo problema es el riesgo de cambiar a cultivos forrajeros. Los bajos niveles culturales, sumado a una gran diferencia en las ganancias obtenidas de cultivar diferentes cultivos, podrían producir este cambio. Un claro ejemplo sobre el uso de agua contaminada para cultivos normales es el canal El-Saf. El canal recibe aguas residuales tratadas de algunas plantas de tratamiento, además de aguas residuales industriales. Estaba previsto utilizar el canal para plantar árboles forestales o sembrar cultivos que sean adecuados para la calidad del agua del canal. Actualmente, en lugar de plantar árboles forestales, se sembraron más de 8000 hectáreas con cultivos y vegetales tradicionales con los que se utiliza el método de riego superficial. Esta decisión, probablemente, conducirá a graves problemas de salud.

La segunda alternativa fue reutilizar el agua de los drenajes agrícolas proveniente de los colectores y los drenajes agrícolas antes de mezclarla con el agua contaminada en los drenajes principales. La idea fue debatida en el Ministerio de Recursos Hídricos y Riego, pero aún no se ha implementado. Utilizar un porcentaje del agua de los drenajes agrícolas antes de arrojarla en los drenajes principales significa que la contaminación en el drenaje principal aumentará y emplearla será perjudicial.

La tercera técnica fue los humedales que se aplicaron con éxito en muchas regiones de Egipto. La técnica es muy prometedora y se analizará con más detalle.

3.4. Utilización de los humedales artificiales como una solución

De acuerdo con El-Torkemany (2009), la utilización de “humedales artificiales/diseñados” se remonta a 1905 en Australia y fue limitada hasta 1950, cuando los europeos empezaron a ponerlos en práctica en Alemania. Los estadounidenses empezaron a utilizarlos en 1970. Actualmente, miles de humedales están distribuidos en todo el mundo. En dichos humedales, las plantas, a través de sus raíces, tallos y hojas, son un lugar ideal para descomponer la materia orgánica de las aguas residuales. La técnica es apropiada para las poblaciones pequeñas y medianas.

Según El-Torkemany, las ventajas de esta técnica son los bajos costos de construcción y operación con porcentajes eficaces de remoción. Además, las plantas utilizadas en los humedales se pueden aprovechar después de la cosecha para alimentar el ganado. La desventaja principal es la gran cantidad de espacio requerido para esta técnica en comparación con las plantas de tratamiento tradicionales.

En Egipto, la técnica se utilizó de dos maneras: el primer tipo se implementó al final de la red de drenaje. Los humedales se construyeron en el lago El-Manzala en la costa norte de Egipto, que recibe agua muy contaminada de algunos drenajes principales. El otro tipo (humedales dentro del cauce) se aplicó al principio de la red de drenaje y se utilizó en drenajes pequeños. En ambos casos, los resultados fueron muy prometedores.

En el caso de los humedales de los lagos del norte, el proyecto fue llevado a cabo por el Ministerio de Asuntos Ambientales de Egipto con

el aporte del PNUD y fue cedido en pleno funcionamiento al Ministerio de Recursos Hídricos y Riego. El agua tratada se utilizó para riego y agricultura, y una parte se desvió a tanques diseñados para la cría de peces. El caudal total hacia el humedal fue de 25.000m³/día. El sistema cuesta solo un 10 % de los sistemas tradicionales de tratamiento de aguas residuales con gran cantidad de sustancias químicas, y el nivel de tratamiento fue considerablemente elevado. La eficacia de remoción superó el 60 % de la demanda biológica de oxígeno (DBO), el 80 % del total de sólidos en suspensión (TSS), el 50 % del total de nitrógeno (TN) y el 99 % de coliformes fecales y totales (Higgins y colaboradores, 2001).

3.5. Humedales dentro del cauce

El segundo tipo (humedales dentro del cauce) se trata con más detalle. Por lo general, la técnica se aplica en drenajes pequeños donde comienza la red de drenaje. Además de los beneficios generales de los humedales, los humedales dentro del cauce tienen dos ventajas principales:

- La técnica no requiere áreas adicionales. Este aspecto constituye una desventaja general para los humedales, especialmente, en Egipto, donde todas las tierras aledañas a las redes de drenaje son sumamente valiosas.
- Trabajar con humedales pequeños brinda la posibilidad de que participen las organizaciones no gubernamentales en las tareas de operación y mantenimiento, e incluso en su construcción. Con buenos programas de difusión y desarrollo de capacidades, las poblaciones aisladas, a través de las organizaciones no gubernamentales locales, podrían tomar la iniciativa y trabajar a la par en diferentes sitios, con lo que se podrían hacer avances significativos para mejorar la calidad del agua.

Se llevaron a cabo muchos experimentos de humedales dentro del cauce, y algunos de ellos se describen en este artículo:

Abbel Bary y colaboradores (2003) probaron el efecto de un sistema de tratamiento acuático natural (jacinto de agua) para mejorar el agua de los drenajes agrícolas. Investigaron la técnica en el drenaje Sabal,

que es una de las fuentes principales de contaminación del brazo Rosetta. El jacinto de agua natural puede reducir la DBO en un 37 % y el TSS en un 80 %. Los porcentajes de eficiencia del tratamiento para el amoníaco (NH_3) y el nitrato (NO_3) fueron del 14 % y el 2 %.

Abou-Elela y colaboradores (2014) investigaron el efecto de los humedales artificiales plantados y no plantados para la remoción de diferentes contaminantes. De acuerdo con los autores, los humedales plantados demostraron ser una tecnología eficaz para la remoción de contaminantes biológicos y fisicoquímicos. Los porcentajes de demanda química de oxígeno (DQO), DBO y TSS alcanzaron los 88%, 91% y 92%, respectivamente. Se logró un porcentaje elevado de remoción de parámetros microbiológicos en los humedales plantados en comparación con los no plantados, lo que indica el papel positivo de las plantas en la remoción de las bacterias de las aguas residuales. Los humedales no plantados tuvieron un desempeño eficaz en la remoción de DQO, DBO y TSS, pero no fueron tan eficaces en la remoción de patógenos y nutrientes.

Rashed y Adbel Rasheed (2008) investigaron los humedales dentro del cauce en dos drenajes pequeños: el drenaje Faraa Al-Bahow en el delta este y el drenaje Edfina en el delta oeste. El primer experimento se presenta en detalle como ejemplo de haber conseguido una eficacia elevada de tratamiento con un humedal dentro del cauce.

Sobre la base de Rashed y Adbel Rasheed (2008), el drenaje Faraa Al-Bahow es un drenaje pequeño con una longitud de 1710 m y un área cubierta de 533 hectáreas. Dentro del área cubierta, hay una pequeña comunidad rural de 3000 personas que se abastece de agua potable con una red pequeña de tuberías donde se recoge las aguas residuales que se arrojan en la entrada del drenaje sin tratamiento. El drenaje Faraa Al-Bahow desemboca en un drenaje de mayor volumen (Al-Bahow) que cubre 2100 hectáreas. El área sufre de escasez de agua durante el verano, lo que obliga a los agricultores a depender del agua de drenaje. Por consiguiente, la baja calidad del drenaje Al-Bahow afecta gravemente a los agricultores. Los humedales dentro del cauce en el drenaje Faraa Al-Bahow son:

- un tanque de sedimentación (100 x 2 x 1 m);
- un vertedero con compuerta de madera y una reja de acero que controla la altura de una serie de plantas flotantes y la extensión de plantas acuáticas emergentes (150x3x0.5 cm);

- un vertedero de control a la salida del drenaje, su función es controlar la profundidad del agua del drenaje y aumentar el tiempo de retención de acuerdo con la carga de contaminantes

El sistema descrito por el autor consta de cinco procesos: sedimentación, filtración, biodegradación, absorción de nutrientes por parte de las plantas y erradicación de patógenos. La penetración de la luz solar aumenta la cantidad de oxígeno y la desinfección del agua. El sistema de vegetación consta de carrizo (*Phragmites Australis*) y jacinto de agua flotante.

Los resultados ofrecidos por Rashed y Abdel Rasheed (2008) demostraron el efecto de las diferentes partes de los humedales dentro del cauce respecto de la remoción de elementos contaminantes. El TSS se eliminó, principalmente, en el estanque de sedimentación donde el TSS cayó de 915 a 114 mg/l. El TSS llegó a 20 mg/l en la salida del drenaje. La DBO disminuyó de 550 a 32 mg/l antes de llegar a las celdas del humedal y fue de 7 mg/l en la salida del drenaje. Los patógenos (CT y CF) se trataron por completo en el recorrido del drenaje. Los coliformes totales se redujeron de 4.E+07 TCU/100 ml en la entrada a 2.E+06 TCU/100 ml después de los 800 m, posteriormente, a 7.E+04 TCU/100 ml a través de las celdas dentro del cauce y, por último, llegaron a 5.E+03 en la salida del drenaje. Los coliformes fecales tuvieron resultados similares a los coliformes totales.

Las eficiencias de tratamiento para TSS, DBO, CT y CF fueron de 97,8 %, 98,7 %, 99,9 % y 99,9 %, es decir, resultados muy prometedores.

4. Conclusión y estudios futuros

La contaminación es un grave problema en Egipto. Con la limitación de los recursos hídricos, la reutilización de las pérdidas de agua se convirtió en la solución factible para cubrir la demanda de agua. Tales pérdidas contienen diferentes desechos agrícolas, municipales e industriales. El nivel de tratamiento es relativamente bajo, por consiguiente, tales pérdidas están muy contaminadas. La principal preocupación es el ahorro al utilizar estas pérdidas disponibles. Recolectar y tratar todos los desechos municipales e industriales exige grandes inversiones, de las que no se dispone debido a la situación económica actual en

Egipto. Es importante encontrar una solución que sea factible desde el punto de vista técnico y económico. Los humedales son una buena opción para afrontar un problema de estas características. La técnica se aplicó en dos escalas diferentes en Egipto. La técnica de mayor escala se implementó en los lagos del norte y la de menor escala en algunos drenajes secundarios (humedales dentro del cauce). Los humedales dentro del cauce es una técnica prometedora para solucionar los problemas de la calidad de agua en Egipto. En los proyectos piloto llevados a cabo, se obtuvo una buena eficiencia de remoción de diferentes elementos contaminantes. Además, los humedales dentro del cauce tienen algunas características que los hacen más adecuados para Egipto. La técnica no precisa áreas de superficie adicionales y emplea una tecnología sencilla. Las poblaciones aisladas, con la ayuda de las organizaciones no gubernamentales que allí se encuentran, podrían tomar la iniciativa y trabajar a la par en diferentes sitios, mediante un programa adecuado de difusión y desarrollo de capacidades. Esto podría ofrecer avances considerables en el mejoramiento de la calidad del agua.

Por consiguiente, la cuestión clave es investigar la capacidad de integrar a las organizaciones no gubernamentales en la construcción y el funcionamiento de tales sitios. Para ello, se debería comprender en profundidad sus situaciones y cómo desarrollar sus capacidades. Las asociaciones de usuarios del agua deberían estar al frente de estas organizaciones y el funcionamiento de tales sitios debería estar entre sus funciones para mantener diferentes propiedades de drenaje y riego. También se debería investigar cómo mejorar las capacidades de estas organizaciones a fin de lograr un sistema eficiente y sostenible.

Referencias

- Abdel Bary, M. Rafeek, Abdelkawi Khalifa, M. Nour Eldin, Ashraf M. Refaat, Maha M. Ali y Zeinab M. El-barbary. (2003). "Wetland as Pollution Control Treatment System for Agricultural Drains." Ponencia brindada en la VII Conferencia Internacional de Tecnología del Agua, Egipto, 1-3 de abril.
- Abdel Wahaab, Rifaat and Mohy El-Din Omar. (2013). *Wastewater Reuse in Egypt: Opportunities and Challenges*.
- Abou-Elela, Sohair. I., G. Golinelli, Abdou Saad El-Tabl, and Mohammed S. Hellal. (2014). "Treatment of municipal wastewater using horizontal flow constructed wetlands in Egypt." *Water Science & Technology* 69(1) págs.: 38–47.
- Alam, M. N. (2001). *Water and agricultural lands in Egypt*. Cairo, Egipto.
- El-Sherbini, A. M. (1998). "Quality of agricultural wastewater disposed into Rosetta Branch." Acta del Consejo Árabe para el Agua 98, Centro Internacional de Conferencias del Cairo, el Cairo, Egipto, 26–28 de abril.
- El-Torkemany, A. M. (2009). *Constructed Wetlands: Plan, Design and Construction Guide*. <http://www.4enveng.com/userfiles/file/CWs%20Plants%20Guid.pdf>.
- Ezzat, Safaa M., Hesham M. Mahdy, H. M., Mervat A. Abo-State, Essam H. Abdel Shakour y Mostafa A. El-Bahnasawy. (2012). "Water Quality Assessment of River Nile at Rosetta Branch: Impact of Drains Discharge." *Middle East Journal of Scientific Research* 12(4) págs.:413–423.
- Higgins, John. M., D. El-Qousey, A. G. Abul-Azm y M. Abdelghaffar. (2001). "Lake Manzala Engineered Wetland, Egypt." Conferencia de Restauración de Ríos e Ingeniería de Humedales, 27–31 de agosto, Reno, NV. doi: [http://dx.doi.org/10.1061/40581\(2001\)49](http://dx.doi.org/10.1061/40581(2001)49).
- Ministerio de Vivienda, Servicios Públicos y Desarrollo Urbano/Unidad Central de la Asociación Público-Privada (APP). (2009). *6th of October Wastewater Treatment Plant Project, Information Memorandum*. <http://www.pppcentralunit.mof.gov.eg/SiteCollectionDocuments/PPPCUSite/Info%20memo.pdf>
- Ministerio de Recursos Hídricos y Riego. (2013). *Redesarrollo del Plan Nacional de Recursos Hídricos, Estrategia del Agua hasta 2017 (en árabe)*, agosto. Cairo, Egipto: Ministerio de Recursos Hídricos y Riego.
- Oosterbaan, R. J. (1999). "Impacts of the Irrigation Improvement Project on Drainage Requirements and Water Savings." Informe para el Panel Asesor Egipcio-Holandés sobre Drenaje de Tierras y Drenaje Relacionado con la Gestión del Agua de una misión de asesoría a corto plazo.
- Rashed, Ahmed y Adel Abdel Rasheed. (2008). "Polluted Drainage Water Natural On-Stream Remediation." ". Ponencia presentada en la 26.º Conferencia Anual de Tratamiento del Agua, Alejandría, Egipto. Volumen: 26.

Riad, Mamdouh. (2004). *Innovative Approach to Municipal Wastewater Management: The Egyptian Experience*. Egipto: Ministerio de Estado de Asuntos Medioambientales. <http://www.unep.org/GC/GCSS-VIII/Egypt-sanitation.pdf>.

Satoh, M., El-Gamal, T., Taniguchi, T. y Xin, Y. (2016). "Water Management in Nile Delta." En *Irrigated Agricultural in Egypt, Past, Present and Future*, editado por M. Satoh y S. Aboulroos. Springer (de próxima aparición).

Youm7. (2016). <http://www.youm7.com/story/2016/1/21/2549336/>.

CASO 4

Uso de reservorios para mejorar la calidad de las aguas para riego en LIMA, Perú (Perú)

Julio Moscoso Cavallini¹

Resumen

Debido al vertimiento de desagües domésticos sin tratamiento a los ríos y la creciente escasez de agua, el uso de aguas contaminadas es una condición de vida a la que se enfrentan la mayoría de agricultores urbanos y peri-urbanos de las grandes ciudades. Este círculo vicioso se cierra al ofertar a estas mismas ciudades alimentos contaminados, que generan serios problemas de salud en la población más pobre y vulnerable. Los esfuerzos por alcanzar las Metas de Desarrollo del Milenio de reducir el 50% de personas sin abastecimiento actual de agua segura y saneamiento apropiado para el 2015 podría incrementar el problema antes descrito, si el tratamiento de las aguas residuales no va de la mano con todo este esfuerzo. Mientras tanto, es necesario buscar alternativas inmediatas que reduzcan la contaminación del agua utilizada en el riego de productos agrícolas como las hortalizas.

Frente a esta contexto el Programa de Cosecha Urbana del Centro Internacional de la Papa (CIP) evaluó la calidad de agua en la cuenca del río Rímac para cuantificar los impactos en las aguas de regadío, los suelos y las hortalizas; y un sistema de tratamiento basado en reservorios para mejorar la calidad del agua y de las hortalizas que se produce en la zona. Los estudios realizados entre 2005 y 2007 han confirmado que el agua de riego de esta importante zona agrícola está fuertemente

¹ Julio Moscoso Cavallini ✉; Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), Lima, Perú; Correo electrónico: jcmoscosoc@yahoo.es

En: Hiroshan Hettiarachchi and Reza Ardakanian (eds). *Uso seguro de las aguas residuales en la agricultura: ejemplos de buenas prácticas* ©UNU-FLORES 2016
Translated from Spanish to English

contaminada con parásitos y coliformes fecales. La concentración de coliformes fecales supera más de cinco mil veces los límites permitidos para agua de regadío en hortalizas. Como consecuencia, más del 30% de estas hortalizas no son aptas para el consumo.



Figura 1: Primer reservorio construido en el Este de Lima

La implementación de sistemas de tratamiento del agua, basados en el uso de reservorios permitió promover una agricultura regada con agua de buena calidad, sustentando una producción de hortalizas sanas que no afecte la salud de los consumidores. El almacenamiento del agua del río por más de 10 días permitió remover totalmente los parásitos humanos y reducir los coliformes fecales hasta los niveles estipulados por la Ley para el riego de hortalizas. Los reservorios también permiten una mayor productividad y rentabilidad en el cultivo de las hortalizas, en compensación del uso del terreno y la inversión realizada para instalar dichos reservorios. La incorporación de las ganancias adicionales por la producción de peces criados en los reservorios mejoró los rendimientos obtenidos y justificó mejor la inversión para implementar nuevos reservorios.

Una evaluación realizada en 2013 por la Organización Panamericana de la Salud (OPS) y la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA) permitió confirmar que luego de 6 años la calidad del agua de los

reservorios sigue siendo buena para el cultivo de las hortalizas, y que los agricultores siguen cultivando peces para alimentar a sus familias. También estos productos agrícolas son comprados a mejores precios.

Palabras Clave: Contaminación, agua de riego, hortalizas, mejora de calidad, reservorios

1. Antecedentes

El rápido incremento de la población en Lima, que actualmente alberga 9.8 millones de personas (INEI, 2015), está ocasionando un crecimiento no planificado de asentamientos humanos informales que no cuentan con servicios urbanos como manejo de residuos, agua potable y sistemas de alcantarillado. Esta situación genera la descarga de grandes volúmenes de residuos líquidos que impactan negativamente en los cuerpos de agua superficiales usados para la agricultura y otros propósitos, y afectan la salud de los pobladores urbanos. Los productores agrícolas y los consumidores de los alimentos producidos localmente tienen un alto riesgo de contraer algunas enfermedades transmitidas por el agua. Tanto la escasez del agua como la falta de un tratamiento adecuado de las aguas residuales domésticas, determina que el uso de aguas contaminadas sea una práctica común en las áreas urbanas y periurbanas. Como Lima, otras ciudades del mundo localizadas junto a los ríos tienen los mismos problemas ambientales de sobrecargas de nutrientes y contaminación con patógenos y sustancias químicas tóxicas que afectan el ecosistema y la salud pública.

La agricultura en la parte Este de Lima produce más del 15% de las hortalizas que consume la ciudad. El agua del río Rímac es utilizada para el riego de estos cultivos, pero está **contaminada por los desagües domésticos no tratados** de los centros poblados que se descargan en la parte baja de la cuenca y antes de su uso en riego. Este tipo de asentamientos informales también están localizados alrededor de la zona agrícola, lo que agrava la contaminación de estas aguas.

Frente a este contexto, en 2004 el **Programa de Cosecha Urbana** conducido por el Centro Internacional de la Papa (CIP), concretó una alianza con la Organización Panamericana de la Salud (OPS), la Junta de Usuarios del Río Rímac, la Municipalidad de Lurigancho-Chosica y agricultores de la zona. Esta alianza contó con soporte financiero de la

Comunidad de Madrid-CESAL para: a) evaluar la calidad de agua en la cuenca del río Rímac y cuantificar los impactos en las aguas de regadío, los suelos y las hortalizas que se producen en el Cono Este de Lima, y b) evaluar un novedoso **sistema de tratamiento basado en simples reservorios** para mejorar la calidad del agua usada en la producción de hortalizas y usar estos ambientes para la acuicultura como una opción económica para los agricultores (Moscoso et.al. 2008).

Luego de concluido el proyecto en 2007 no se ha continuado monitoreando este caso durante los siguientes seis años. Recién en 2013 se realizó una nueva evaluación del agua, suelos, hortalizas y peces de esta zona agrícola, aprovechando las pruebas del **Manual**



Figura 2: Ubicación de la zona agrícola al Este de Lima

para elaborar Planes de Seguridad en Saneamiento (PSS) realizadas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en varios países del mundo y que incluyó como **uno de los estudios de caso esta zona agrícola del Este de Lima**. Estos PSS están sustentados en la identificación de los enfoques de riesgo recomendados en un proceso paso a paso, con una forma de facilitar la puesta en práctica de las **Guías de la OMS 2006**. Un monitoreo intensivo de este caso fue realizado por la Organización Panamericana de la Salud (OPS) y la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA) del Ministerio de Salud del Perú (OPS, 2014).

2. Metodología

El estudio se ha desarrollado en tres etapas. Las dos primeras se realizaron en 2007 y comprendió las siguientes actividades:

- La evaluación de la calidad de agua en la cuenca del río Rímac y los impactos en las aguas de regadío, los suelos y las hortalizas.
- Luego de la construcción del primer reservorio, se realizó la evaluación del agua y las hortalizas regadas con agua de canal y del reservorio, así como los peces cultivados en dicho reservorio.

La tercera parte se realizó en 2013 y consistió en una evaluación luego de 6 años de la calidad del agua, algunas hortalizas y los peces cultivados en los reservorios de la zona agrícola.

2.1. Evaluación de los datos históricos sobre la calidad del agua del Río Rímac

Como un trabajo previo se evaluó la data histórica sobre la calidad del agua del Río Rímac, información proveniente principalmente del programa de monitoreo realizado durante varios años consecutivos por el Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima (SEDAPAL) y la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA) del Ministerio de Salud. Los parámetros seleccionados fueron Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cromo (Cr) y Plomo (Pb), por ser los elementos tóxicos que por bioacumulación tienen mayor impacto en la salud pública. Como

indicador de contaminación fecal se utilizaron los coliformes fecales, considerados en las Directrices de la Organización Mundial de la Salud para el uso de aguas residuales en la agricultura y acuicultura (OMS, 1989).

2.2. Primera evaluación de la calidad del agua, suelos y productos agrícolas

Se realizó un estudio detallado sobre el estado de la calidad del agua, suelos y productos agrícolas en las zonas agrícolas de Carapongo, Huachipa y Nievería. Estas localidades fueron seleccionadas debido a que el 50%, 33% y 28% de las áreas ocupadas están dedicadas al cultivo de hortalizas.

Entre 2004 y 2005 se recolectaron **45 muestras de agua en los canales de riego** en las zonas agrícolas de Carapongo, Nievería y Huachipa. Los puntos de muestreo incluyeron las bocatomas, canales principales, canales de derivación, canales laterales y los posibles puntos de contaminación dentro del sistema de riego.

Los parámetros seleccionados para evaluar la calidad de las hortalizas fueron: As, Cd, Cr, Pb, coliformes fecales y parásitos humanos. Entre 2004 y 2006 se tomaron **32 muestras de los principales cultivos de hortalizas**: huacatay (*Tagetes minuta* L.), lechuga (*Lactuca sativa* L.), rábano (*Raphanus sativus* L.), nabo (*Brassica rapa* L. var. *rapa*), betarraga (*Beta vulgaris* L. var. *Crassa*) y apio (*Apium graveolens* L.). También se hizo un muestreo de gras americano (*Lolium perenne* L.), por ser un cultivo muy desarrollado en estas zonas durante los últimos años. Al momento de la cosecha se tomaron de 5 a 6 sub-muestras para conformar una muestra compuesta. Las hortalizas fueron clasificadas de acuerdo a la posición de la parte comestible como: raíces (nabo, rábano y betarraga), y **follaje** (lechuga y huacatay). En nabo, betarraga, huacatay y rábano se recogieron muestras **antes y después del lavado** previo a la comercialización de estos productos.

Las muestras de suelo fueron obtenidas de los 20 cm. superficiales en el mismo lugar donde se extrajeron las muestras de las hortalizas. También se tomaron de 5 a 6 sub-muestras para conformar una muestra compuesta.

2.3. Criterios para el diseño de los reservorios

La implementación del reservorio experimental de Carapongo tuvo la finalidad de verificar si el **almacenamiento del agua del río por más de 10 días** permitía remover totalmente los parásitos humanos y reducir los coliformes fecales hasta los niveles estipulados por la Norma para el riego de hortalizas. En términos prácticos, se propuso usar semanalmente el 50% del volumen almacenado, por tanto se esperaba un **tiempo de retención teórico de aproximadamente dos semanas**. Luego de acordar con el agricultor el riego de una parcela de 2000 m², se procedió a calcular el requerimiento de agua para regar dicha parcela, teniendo en cuenta que la frecuencia de riego (FR) durante el periodo de verano es de 4 días, mientras que en invierno es de 7 días.

2.4. Evaluación de la mejora de la calidad del agua y la producción por el uso de los reservorios

Durante los primeros cuatro meses de operación del reservorio de Carapongo (abril a julio de 2005) se realizaron las primeras experiencias de **cultivos de rábano y lechuga** en dos parcelas similares de 500 m² cada una, una de ellas **regada directamente con agua de canal**, mientras que la otra con el **efluente del reservorio**. Una siguiente experiencia de cultivo combinado de betarraga y rábano se realizó entre agosto y noviembre de 2005.

La **calidad sanitaria del agua del canal y del efluente de los reservorios** usados para el riego fue analizada mensualmente, considerando los parámetros sanitarios parásitos humanos y coliformes fecales. Los **análisis sanitarios realizados en los productos cosechados** permitieron conocer las concentraciones de coliformes fecales y parásitos humanos detectados en los productos.

La **mejora de la productividad agrícola** se evaluó comparando los ingresos y costos obtenidos en las parcelas regadas con agua de canal y efluente del reservorio. Las diferencias de utilidad se atribuyeron al beneficio del reservorio y se estableció la capacidad de pago de la deuda por construir el reservorio, expresada en número de campañas requeridas para pagar tal inversión.

2.5. Evaluación de la producción adicional de peces

El cultivo de peces en los reservorios fue propuesto con la finalidad de **compensar la pérdida de suelo agrícola** por la construcción del reservorio y de proveer a las familias de una fuente de nutrición adicional para consumir o vender. En abril de 2005 se sembraron en el **primer reservorio** 3,000 alevinos de tilapia del Nilo, población combinada de las variedades gris y roja e instalada a una densidad de 20 peces/m². A fines de noviembre de 2005 se sembraron 1,450 juveniles de tilapia en el **segundo reservorio**. En enero de 2007 se sembraron 5,000 alevinos de tilapia en el **tercer reservorio**. En los dos últimos casos se sembraron 3 peces/m².



Figura 3: Control mensual del peso de los peces

Los peces fueron alimentados con un concentrado para tilapia. La temperatura del agua se registró diariamente y el **peso de los peces fue controlado cada mes** para conocer su crecimiento en función a la temperatura.

2.6. Segunda evaluación de la calidad del agua, suelos y productos agrícolas

Gracias al soporte de la Organización Mundial de la Salud para la elaboración del Plan de Seguridad en Saneamiento de zona agrícola al

este de Lima fue posible seis años después ejecutar un intenso monitoreo para verificar la **calidad del agua, suelos, césped y hortalizas regadas con las aguas del río y los reservorios existentes, así como de los peces** cultivados en estos reservorios. El Plan de muestreo de estos componentes contempló los siguientes parámetros:

- Parámetros químicos en el agua: Sólidos suspendidos (SS), Demanda bioquímica de Oxígeno (DBO5), N-total, P-fosfatos, salinidad y metales pesados (As, Cd, Cr, Pb y Hg).
- Parámetros sanitarios en el agua: coliformes termo tolerantes (fecales), nemátodos y protozoos parásitos humanos.
- Parámetros físico-químicos en el suelo: pH, materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio, salinidad y metales pesados (As, Cd, Cr, Pb y Hg).
- Parámetros sanitarios en el suelo: coliformes termo tolerantes (fecales), nemátodos y protozoos parásitos humanos.
- Parámetros químicos en el suelo: metales pesados (As, Cd, Cr, Pb y Hg).
- Parámetros sanitarios en el césped y hortalizas: coliformes termo tolerantes (fecales), nemátodos y protozoos parásitos humanos.
- Parámetros sanitarios para peces: aeróbicos mesófilos, Echerichia coli, Salmonella spp, Staphylococcus aureus y parásitos humanos

Entre octubre y diciembre de 2013 se tomaron **230 muestras de agua, suelo y césped** en las tres zonas de evaluación y en tres fechas de muestreo: 21 de octubre, 11 de noviembre y 9 de diciembre de 2013. Adicionalmente se efectuaron dos muestreos en enero de 2014 para evaluar cinco tipos de **hortalizas y los peces** de dos reservorios.

3. Resultados y discusión

3.1. Calidad del agua de los canales de riego

Ninguna muestra de agua sobrepasó los límites máximos permisibles de As, Cd, Cr y Pb fijados por la norma para el cultivo de hortalizas. Esto muestra que el agua usada actualmente en el riego de hortalizas no representa riesgo de contaminación por estos metales.

Sin embargo la **contaminación del agua de riego con patógenos constituye el problema más serio** para la producción de hortalizas. Como se muestra en la figura 4, más del **97% de muestras de agua de los canales** de riego estuvieron muy por **encima del límite máximo permitido para coliformes fecales** y algunas muestras tenían más de 5 millones MPN/100 ml. El Río Rímac es una de las fuentes principales de contaminación fecal, pero también contribuyen los centros poblados que están alrededor de las zonas de producción de hortalizas, que desechan sus desagües y excretas directamente sobre los canales de regadío.

La figura 4 también muestra los niveles de **contaminación por nemátodos y protozoos parásitos humanos** en los canales de regadío. La bocatoma de Carapongo recibe un agua con más de 25 parásitos por litro, concentración similar a la mayoría de los puntos de muestreo evaluados en ese sistema de riego. En cambio la bocatoma de Nievería recibe un agua sin parásitos, situación que se desmejora cuando recibe las aguas de drenaje de Carapongo. En general, los niveles de contaminación alcanzan los **25 parásitos por litro** en Nievería y Huachipa.

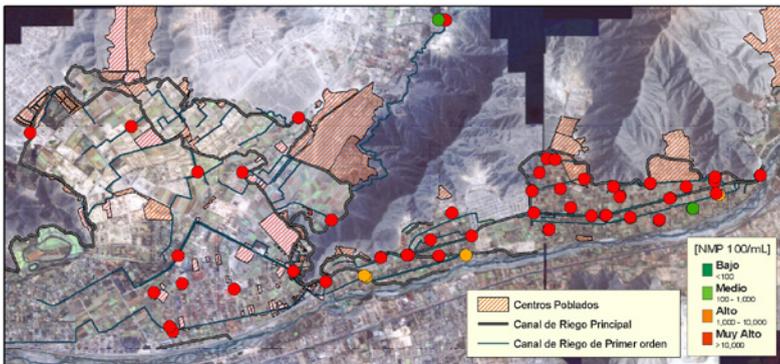


Figura 4: Nivel de coliformes fecales y parásitos en el agua de los canales de riego de Lima Este (Fuente: Moscoso et.al. 2007)

3.2. Calidad de las hortalizas regadas con agua de río

Los análisis químicos indican que **las hortalizas** son cultivadas en zonas afectadas **con arsénico y plomo**, sin embargo a pesar de los altos

niveles de plomo en la cuenca del río, los niveles encontrados en los suelos y los cultivos **no eran suficientemente altos** como para suponer un riesgo para la salud. El análisis de algunas de las hortalizas mostró que hubo mucho **más absorción de cadmio y arsénico en los cultivos de hojas (follaje) que de raíces**, pero sólo el "huacatay" estaba por encima de los niveles máximos permitidos. Este cultivo se utiliza en pequeñas cantidades para sazonar diferentes comidas peruanas y por lo tanto **no representaría un riesgo grave** para la salud.

Los análisis de lechuga y rábano, ambas consumidas crudas, mostraron que entre el 17% y el 31% de las muestras estaban por encima de los límites permitidos para coliformes fecales. Además, la práctica de lavado de los productos en los canales de riego incrementa la contaminación. El 57% de las verduras de buena calidad fueron contaminadas durante el lavado (Figura 5). Acciones tales como lavado de verduras con agua limpia corriente podrían reducir en gran medida la contaminación de estos alimentos con patógenos.

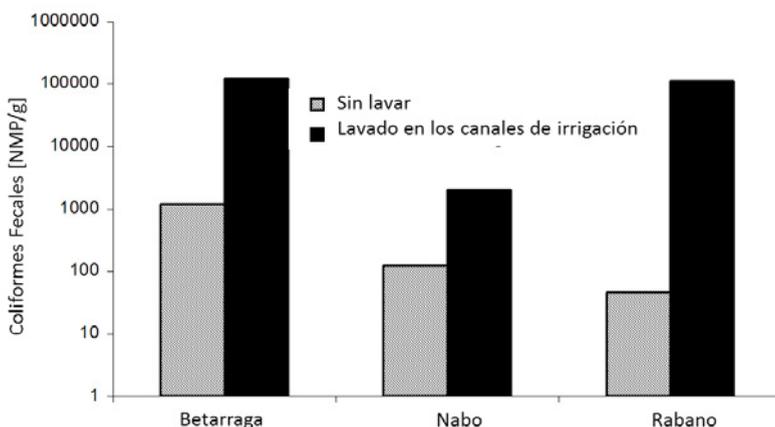


Figura 5: Efecto del lavado de las hortalizas en los canales de riego (Fuente: Moscoso et al. 2007)

También se ha comprobado que los cultivos de follaje como lechuga y huacatay, e incluso el gras americano, presentan mayores niveles de parásitos que los cultivos de raíz como nabo, rábano y betarraga, tal como se muestra en la figura 6. Esta mayor presencia de parásitos en los productos de follaje podría atribuirse al contacto directo con el agua contaminada, mientras que en los productos de raíz, el agua pasa a través del suelo que de alguna manera funciona como filtro. Merece

especial atención las concentraciones superiores a 24 parásitos/g (nemátodos y protozoarios) encontrados en lechugas, por ser un producto que se consume crudo.

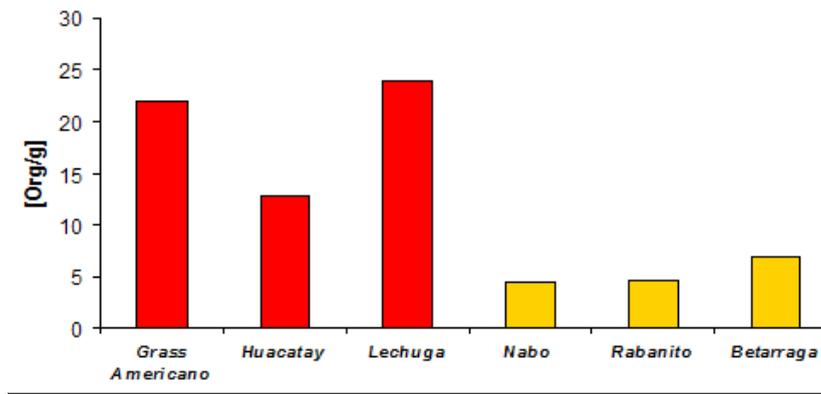


Figura 6: Concentración de parásitos según el tipo cultivos (Fuente: Moscoso et al. 2007)

3.3. Reservorios de bajo costo para reducir la contaminación de las hortalizas

En vista que los metales pesados no fueron un problema en esta zona agrícola, el estudio se centró en la necesidad de abordar los elevados niveles de bacterias fecales y parásitos, principalmente procedentes de las aguas residuales domésticas sin tratamiento descargadas al río. El escenario ideal para mejorar la calidad del agua para riego y lavado sería eliminar las descargas de aguas residuales domésticas sin tratar. Sin embargo, no existen planes a corto plazo para implementar este servicio de saneamiento en esta zona.

La construcción de pequeños reservorios de tratamiento fue identificada como una opción viable para reducir los contaminantes en el agua de riego. El tratamiento del agua en estos reservorios es bastante sencillo y se basa, tanto en el tiempo necesario para que los procesos físicos actúen sobre los patógenos, además de cumplir con las necesidades de riego y prácticas de los agricultores. El agua llega al reservorio por los canales y permanece cerca de 10 a 14 días. La acción de mantener el agua por más de 10 días, reduce la concentración y viabilidad de bacterias patógenas, proceso que está fuertemente

influenciado por la radiación solar y las variaciones de temperatura. Por otro lado, los nemátodos parásitos se sedimentan y acumulan en el fondo para morir progresivamente, dejando el agua limpia para riego de las hortalizas. Estos depósitos también fueron diseñados para el cultivo de peces. Se estimó que el 50% del volumen se utiliza en una semana, lo que permite alcanzar un período de retención de 14 días con el máximo volumen, suficiente para reducir los contaminantes en el agua de riego.

El agua tratada en los reservorios y el agua de río contaminada fueron comparadas al usarse para el riego de las hortalizas rábano y lechuga. Los resultados mostraron que el reservorio removi6 el 98% de coliformes fecales y elimin6 pr6cticamente todos los nem6todes y protozoarios par6sitos humanos del agua de riego. La calidad del agua cambi6 de estar muy por encima de los l6mites m6ximos permitidos de 1,000 coliformes fecales/100 ml para hortalizas (agua directa del r6o) a estar por debajo de esos l6mites m6ximos al almacenarse en el reservorio. (Figura 7).

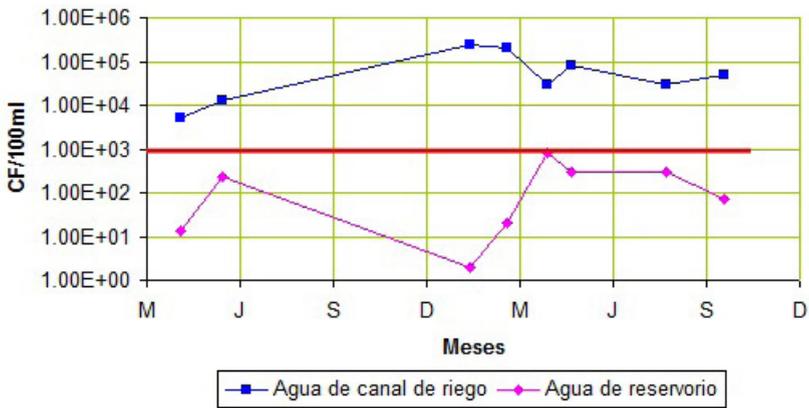


Figura 7: Concentraci6n de coliformes fecales en las aguas del canal de riego y el reservorio (Fuente: Moscoso et.al. 2007)

El r6bano y la lechuga cultivados con ambas fuentes de agua tambi6n fueron evaluados, mostrando que aquellos regados con el agua de reservorio ten6an hasta un 97% menos coliformes (entre 10 y 100 NMP coliformes fecales/g) y por debajo de los l6mites permitidos,

al igual que los nemátodos y protozoarios parásitos humanos que estaban prácticamente ausentes en ambos cultivos.

Además, el riego con el agua almacenada parece haber tenido un efecto beneficioso en la tasa de crecimiento y la uniformidad de la cosecha, al lograr un mayor porcentaje de productos comercializables que los regados con agua de río. Esta tecnología de bajo costo y simple, captura los nutrientes del agua de riego en una biomasa de micro algas que luego permite reutilizarlos para lograr una mayor producción en las hortalizas.

La evaluación definió que para obtener agua de calidad suficiente para el riego de una hectárea de cultivo se requiere un reservorio de 700 m³, con un costo de US\$1,360 si se impermeabiliza con una mezcla de suelo y cemento. Revestimientos alternativos se comparan en el cuadro 1. Si el depósito está conectado a un sistema de riego de multi-compuertas, el requisito de agua puede reducirse en un 50%.

Cuadro 1: Opciones para impermeabilizar los reservorios

	Área (m ²)	USD/m ²
Losa de concreto simple, f'c=140 kg/cm ²	232	7,97
Geo membrana HPDE 1 mm de espesor	232	5,82
Geo membrana HPDE 1 mm de espesor	714	5,82
Geo membrana HPDE 1 mm de espesor	1350	3,76
Suelo-cemento (2.4 kg /m ²)	1350	0,49
Arcilla compactada 10cm de espesor	1350	0,12

Fuente: Moscoso et al. 2007

3.4. Producción de peces

Una desventaja de usar el reservorio es que ocupan tierras potencialmente productivas en estas zonas periurbanas, donde los

valores de la tierra son muy altos. Por tanto estos pequeños reservorios se propusieron como sistemas acuícolas que permiten compensar la pérdida de tierras agrícolas y proporcionar a la familia peces como fuente nutricional adicional para consumir o vender.



Figura 8: Tilapia cosechada en los reservorios

Los resultados preliminares fueron bastante satisfactorios para el cultivo de tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*). La tilapia es una especie resistente y muy bien aceptada por la población local. En climas subtropicales como el de Lima, el crecimiento de la tilapia del Nilo durante los meses más cálidos es alentador y similar al obtenido en los climas tropicales. Muchas de las tilapias con reversión sexual con un peso inicial de menos de 2 g pueden ser cultivados durante el año en densidades de 3 peces/m² para alcanzar un tamaño comercialmente aceptable de 250 g al final del verano. Con 450 kg de alimento de peces se logró producir 400 kg de tilapia en un reservorio de 500 m² con una productividad mayor de 0.73 kg/m². El costo estimado de alevinos y alimento fue de US\$ 470, permitió ingresos por ventas de US\$ 880.

Cuadro 2: Resultados de los análisis de calidad sanitaria y ambiental de las aguas en las zonas agrícolas de Lima Este

Código	Parámetro	Punto de muestreo	Muestreo	Metales				Coliformes termo tolerantes (MP/100 mL)	Protozoos					Helminthos							
				Cadmio mg/L	Cromo mg/L	Piomo mg/L	Arsénico mg/L		Mercurio mg/L	Blastocystis hominis org./L	Endolimax nana org./L	Entamoeba coli org./L	Giardia lamblia org./L	Iodamoeba butschlii org./L	Acaris lumbricoides org./L	Hymenolepis nana org./L	Strongyloides sp. org./L				
Unidad			SS mg/L	DBO mg/L																	
NA	Lugar/Componente																				
	Universidad Peruana Unión de Naña:																				
NA-A1	Agua de canal	Garita 1 - puerta principal	M1	99	7.4	0.002	0.003	0.052	43.4	0.2	4.9E+05	5	8	20	15	0	3	0	1	0	
			M2	15	5.1	<0.001	<0.002	0.009	17.3	0.1	3.3E+02	3	11	24	9	0	2	0	1	1	1
			M3	13	8.7	<0.001	<0.002	0.011	31.1	<0.1	1.3E+05	2	3	13	7	0	0	0	1	1	1
NA-A2	Agua de reservorio	Riego espaldá Fam. Masmari	M1	21	5.9	<0.001	<0.002	0.010	32.0	0.1	1.7E+03	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0
			M2	18	6.2	<0.001	<0.002	0.009	21.6	0.1	1.3E+01	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0
			M3	19	3.9	<0.001	<0.002	0.009	20.9	<0.1	1.3E+03	0	1	2	1	0	0	0	0	0	0
CA	Parcelas agrícolas de Cerapongo:																				
CA-A1	Agua de canal	Parcela Raymundo Yaulis	M1	32	2	0.001	<0.002	0.023	32.5	<0.1	3.3E+04	5	8	9	2	0	0	0	0	1	1
			M2	51	7.5	<0.001	<0.002	0.009	25.7	<0.1	7.0E+05	3	6	11	3	0	0	0	0	0	1
			M3	36	3.0	0.002	<0.002	0.093	37.4	0.2	7.0E+04	2	3	6	5	0	0	0	0	0	1
CA-A2	Agua de reservorio	Reservorio Raymundo Yaulis	M1	48	14.6	<0.001	<0.002	0.009	22.3	<0.1	2.2E+02	0	3	0	0	0	0	0	0	1	0
			M2	150	20.8	<0.001	<0.002	0.034	48.0	<0.1	6.8E+00	5	5	10	0	0	0	0	0	0	0
			M3	25	16.0	<0.001	<0.002	0.010	26.2	<0.1	4.6E+01	3	0	9	0	0	0	0	0	0	0
NI	Parcelas agrícolas de Nievería:																				
NI-A1	Agua de canal	Parcela Sr. Serna	M1	18	11.8	<0.001	<0.002	0.012	24.9	<0.1	3.3E+05	9	15	30	11	0	1	1	2	1	
			M2	33	13.8	<0.001	<0.002	0.010	25.5	<0.1	8.0E+05	2	8	20	7	0	1	0	0	2	
NI-A2	Agua de reservorio	Reservorio Sr. Serna	M1	66	22.6	<0.001	<0.002	<0.009	30.2	<0.1	1.3E+03	3	0	9	0	0	0	0	0	0	
			M2	49	20.0	<0.001	<0.002	0.009	26.6	<0.1	7.9E+01	1	0	3	0	0	0	0	0	0	
			M3	56	17.4	<0.001	<0.002	0.009	22.1	<0.1	3.3E+04	0	0	4	0	0	0	0	0	0	
Ecas de Calidad Ambiental para Agua (DS 002-2008-MINAM):																					
Categoría 3 - Riego de vegetales			15	0.005	0.100	0.050	50	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<1		
Tallo Alto																					
Tallo bajo																					

3.5. Segunda evaluación de la calidad del agua, suelos y productos agrícolas

Los resultados de los análisis sanitarios de las aguas se muestran en el cuadro 2, en donde se añaden los Estándares de Calidad Ambiental para Aguas Naturales (ECA) promulgados por el Ministerio del Ambiente (Decreto Supremo 002-2008-MINAM).

Los Estándares de Calidad del agua (ECA) en el Perú establecen que el agua natural utilizada para el riego de vegetales no debe tener más de 15 miligramos de DBO5 por litro (MINAM, 2008), valor que está por debajo de los encontrados en las aguas de los reservorios de Carapongo y Nievería utilizados en el riego agrícola. Es entendible que estas aguas tengan niveles algo mayores de DBO por efectos de la **eutrofización durante los días en que el agua es retenida** y favorecida por los restos de alimento y heces de los peces cultivados. Por tanto este valor **técnicamente no sería un riesgo para la salud y el ambiente**, ya que la materia orgánica existente se utiliza como fuente de nutrientes para los cultivos regados.

Por otro lado todos los **valores determinados para cadmio, cromo, plomo, arsénico y mercurio están por debajo de los establecidos por los ECAs**. A excepción del plomo en dos muestras de agua tomadas en los canales de riego de Ñaña y Carapongo, valores puntuales que al parecer se presentan eventualmente y que en todo caso podrían indicar descargas mineras o industriales esporádicas. En general consideramos que actualmente estos parámetros no constituyen ningún riesgo a la salud y el ambiente.

Las concentraciones de **coliformes fecales en las aguas de los canales siguen siendo altas**, como se pudo detectar desde 2006, valores que en esta evaluación del 2013 llegan hasta 800,000 NMP/100 ml, mientras que los ECAs establecen límites de 1,000 NMP/100 ml para el riego de vegetales de tallo corto como las hortalizas. Por suerte también los resultados han permitido confirmar que las aguas de los **reservorios** construidos hace 6 años muestran **valores aceptables entre 7 y 17,000 CF/100 ml**, salvo un caso de 33,000 en el reservorio de Nievería, que podría estar relacionado con el **vertimiento de excretas** por los pobladores de los asentamientos humanos vecinos o con periodos de retención menores a los recomendados.

Las aguas de los **canales mantienen niveles tan altos** como 65 protozoos y 5 huevos de helmintos parásitos humanos por litro de

agua. En cambio en las **aguas de reservorios no se encuentran helmintos y los protozoarios han descendido a 20/L**. Es probable que el manejo del efluente de los reservorios facilite la salida por rebose, en cuyo caso los protozoarios salen del reservorio antes de morir. Es por tanto importante insistir en la recomendación de **no extraer el agua de los reservorios por rebose**, ya que estos parásitos flotan en el agua.

Las **hortalizas** evaluadas muestran **altos niveles de coliformes fecales** aun cuando se riegan con agua de reservorio, que como se mostró en el cuadro 2 tiene mejor calidad, lo que indica que existen otras fuentes de contaminación como excretas de los asentamientos humanos vecinos que ahora son más que en 2006. Del mismo modo, todas las muestras de hortalizas tienen **presencia de protozoos, no así de helmintos**, lo que indica que actualmente el mayor riesgo a la salud está vinculado a estos organismos. Si bien las **lechugas regadas con agua de reservorio muestran menos presencia de protozoos parásitos que aquellas regadas directamente con el agua de canal**, estas no alcanzan el requerimiento microbiológico mínimo para consumo humano. Por último, ninguna de las muestras de los **peces de ambos reservorios** supera el límite medio de 50,000 UFC/g de organismos aerobios mesófilos, adicionalmente los niveles de *Staphylococcus aureus* están por debajo de las 100 UFC/g y hay ausencia de *Salmonella* spp. y parásitos humanos, requisitos establecidos por la norma (SANIPES, 2010).

A diferencia de la primera evaluación, en esta oportunidad el monitoreo permitió identificar los riesgos sanitarios existentes en esta zona agrícola, por tanto se **elaboró un Plan de Seguridad en Saneamiento (PSS) para controlar estos riesgos**, de modo que los productos puedan ser **comercializados en el mercado en buenas condiciones de calidad sanitaria**.

4. Conclusiones y lecciones aprendidas

4.1. Conclusiones

Más del 97% de las muestras de agua de canales de riego mostraron niveles muy por encima de los límites máximos permitidos de coliformes

fecales. Entre 17% y 31% de las muestras de lechuga y rábano regados con estas aguas también estaban por encima de los límites permitidos.

La construcción de pequeños reservorios constituyó una opción viable para reducir los parásitos humanos, tales como protozoarios y helmintos, siempre que el agua de los canales se almacene cerca de 10-14 días. Esta agua almacenada y el agua de río no tratadas fueron comparadas como fuentes de riego para hortalizas, mostrando que el reservorio elimina del agua de riego todos los parásitos de procedencia humana y reduce los coliformes fecales a menos de 1,000 UFC/100ml. Cuando el rábano y la lechuga fueron regados con agua del reservorio tenían hasta un 97% menos de coliformes fecales, valor muy por debajo de los límites permitidos, mientras que los parásitos prácticamente estaban ausentes en ambos cultivos.

Además, el riego con agua almacenada también ha tenido un efecto beneficioso en la tasa de crecimiento y uniformidad de la cosecha, con un mayor porcentaje de productos comercializables que cuando se usaba el agua del río.

En la medida que los reservorios ocupan una parte de las tierras productivas, se propuso la crianza de peces para compensar esta pérdida y además proporcionar un producto proteico para consumir o vender. Con 450 kg de alimentos de peces es posible producir 400 kg de tilapia del Nilo en un reservorio de 500 m² con una productividad mayor de 0.73 kg/m². El costo estimado fue de US\$ 470 y los ingresos por ventas de US\$ 880.

Un monitoreo realizado después de 6 años permitió confirmar que el uso de los reservorios continuaba siendo una herramienta viable para mejorar la calidad del agua que llega contaminada del río para el riego de las hortalizas. Sin embargo hay problemas emergentes como los protozoarios parásitos humanos que deben ser removidos mediante técnicas que deben ser enseñadas a los agricultores.

4.2. Lecciones aprendidas

El reservorio resulta ser un medio efectivo para mejorar los ingresos por la venta de verduras y peces de buena calidad, que mejora la salud humana y conserva el ambiente. Estas ventajas económicas son atractivas para otros agricultores de la zona, que han expresado su interés en la construcción de reservorios en sus parcelas para ofertar productos de mejor calidad a mayor precio.

Los cambios de uso de tierra que se producen muy rápidamente en la zona, especialmente la conversión de tierras agrícolas en las zonas edificadas es un factor clave que influirá en la asimilación del uso de reservorios. Algunos propietarios ya están haciendo una agricultura de subsistencia, en espera de mejores precios para vender sus propiedades. Para motivar a que los agricultores busquen una producción de alimentos saludables, será necesario apoyar el desarrollo de exigencias e incentivos, a través de regulaciones ambientales y mayores oportunidades de mercado. Se espera seguir trabajando con los actores locales y tomadores de decisiones, para sensibilizar a los responsables de la protección y gestión de los recursos hídricos, de la producción de alimentos inocuos y de la salud pública, con una perspectiva a largo plazo sobre desarrollo sostenible.

Referencias bibliográficas

INEI. 2015. *“Perú: población total al 30 de junio, por grupos quinquenales de edad, según departamento, provincia y distrito”* (in Spanish). Lima, Peru: Instituto Nacional de Estadística e Informática. <http://www.inei.gob.pe/estadisticas/indice-tematico/poblacion-y-vivienda/>.

MINAM. 2008. *“Estándares de Calidad Ambiental para Aguas Naturales (ECA)”* promulgados por el Ministerio del Ambiente mediante el Decreto Supremo 002-2008-MINAM. Lima, Perú.

Moscoso, J., H. Juarez, and T. Alfaro. 2007. *“Uso de reservorios para mejorar la calidad sanitaria del agua para el riego agrícola en el Cono Este de Lima”* Lima, Peru: Programa de Cosecha Urbana del Centro Internacional de la Papa (CIP) y ONG CESAL. Lima, Perú.

Moscoso, J., H. Juarez, and T. Alfaro. 2008. *“The Use of Reservoirs to Improve the Quality of Urban Irrigation Water.”* Urban Agriculture Magazine No. 20. Resource Centre on Urban Agriculture and Food Security - RUAF Foundation. The Netherlands. More information: <http://www.ruaf.org>

OMS, 1989. *“Guidelines for the Safe Use of Wastewater and Excreta in Agriculture and Aquaculture.”* Organización Mundial de la Salud. Ginebra.

OPS. 2014. *"Plan de Seguridad en Saneamiento para el Estudio de Caso de la Zona agrícola del Cono Este de Lima, como parte del Proyecto Prueba del Manual de Planes de Seguridad de Saneamiento en Uso de Aguas Residuales en Lima, Perú"*. 92 pp. Organización Panamericana de la Salud, Organización Mundial de la salud, Lima, Perú.

SANIPES. 2010. *"Protocolo de calidad establecido en el Manual de Indicadores y criterios de Seguridad Alimentaria e Higiene para Alimentos y piensos de origen pesquero y acuícola aprobado el 2010, y que aplican para los productos hidrobiológicos crudos (frescos)"*. Servicio Nacional de Sanidad Pesquera (SANIPES) del Instituto Tecnológico de la Producción (ITP).Lima, Perú.

CASO 5

Reutilización del agua en el riego de parques y jardines, y en cisternas de inodoros en Brasilia, Brasil (Brasil)

M. R. Felizatto, F. C. Nery, A. S. Rodrigues y C. M. Silva¹

Resumen

En el presente caso se describe un proyecto de reutilización del agua en Brasilia, Brasil, y se evalúan sus resultados operativos y económicos. El experimento de reutilización del agua se desarrolló durante 11 años (2000–2011) en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) del centro de rehabilitación del hospital Sarah (CAGIF), ubicado en las márgenes del lago Paranoá. Los resultados obtenidos a partir de las concentraciones de efluentes del CAGIF cumplieron con las normas más estrictas sobre la reutilización del agua en el riego de parques y jardines, y la alimentación de cisternas de inodoros, de acuerdo con las directrices estadounidenses y brasileñas, a excepción de la variable TSS, las variables DBO5, DQO, TSS, PT y NT registraron un valor promedio de 7 mg/l; 15 mg/l; 8 mg/l; 0,12 mg/l, y 5,9 mg/l, respectivamente. En cuanto a las variables microbiológicas, como coliformes totales y coliformes fecales, los resultados del efluente final siempre fueron “no detectables”. Los resultados económicos demuestran la viabilidad del proyecto en un transcurso de 20 años.

Palabras clave: reutilización del agua, resultados operativos de PTAR, análisis económico y financiero de PTAR, lago Paranoá, aplicaciones en Brasil

¹ Felizatto, M. R. ✉ · Nery, F.C. · Rodrigues, A. S. · Silva, C.M.; CAESB (Compañía de Saneamiento Ambiental del Distrito Federal), Brasilia, DF, Brasil
Correo electrónico: maurofelizatto@caesb.df.gov.br

En: Hiroshan Hettiarachchi and Reza Ardakanian (eds). *Uso seguro de las aguas residuales en la agricultura: ejemplos de buenas prácticas* ©UNU-FLORES 2016

1. Introducción

El hospital Sarah es un referente brasileño en la salud del aparato locomotor. La sede está ubicada en el centro de Brasilia, donde no hay espacios verdes aledaños que permitan la creación de técnicas adecuadas para el tratamiento de personas con discapacidades físicas graves. En la década de los años noventa, la situación se agravó debido al aumento significativo del número de pacientes con lesiones medulares como consecuencia, sobre todo, de los accidentes de tránsito.

Como solución a esta realidad, cerca del año 2000, se creó el CAGIF (Centro de Asistencia a Personas con Discapacidades Físicas Graves) en las afueras del centro de Brasilia. El edificio, que ocupa una superficie aproximada de 80.000 m², está situado en las márgenes del lago Paranoá, donde las condiciones para la implementación de este proyecto son excepcionales. Su proximidad al lago propicia la práctica de deportes acuáticos, así como de otras terapias y métodos que se han aplicado con éxito en el tratamiento de pacientes con discapacidades. El nuevo centro funciona aparte del hospital y no ofrece los mismos servicios técnicos especializados de diagnóstico y tratamiento, como quirófano, rayos X o laboratorios, por lo que estos se siguen prestando en el hospital Sarah-Brasilia (Lima, 1996).

El lago Paranoá se creó de manera artificial en el 1959 a fin de aumentar la humedad del clima seco de la meseta central brasileña, fomentar las actividades recreativas y generar electricidad. En el transcurso de los años, se transformó en una postal de la capital federal. En la década de los años sesenta, se construyeron dos plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), plantas Norte y Sur, donde se trata un volumen de aguas residuales de una población equivalente a 225.000 personas, mediante el proceso de lodos activados convencionales (LAC). La acelerada ocupación urbana de la cuenca y el tratamiento inadecuado de las aguas residuales contribuyeron al desarrollo de un proceso de eutrofización del lago Paranoá (Felizatto y colaboradores, 2000). En la década de los años ochenta, la gran proporción de algas indicó que el lago estaba fuera de control, por lo que el estado trófico del lago pasó a ser eutrófico (CEPIS, 1990).

Se invirtieron trescientos millones de dólares en la mejora de la calidad del agua, que se destinaron a la construcción de dos nuevas plantas avanzadas para la remoción biológica de nutrientes (Randall y colaboradores, 1992; van Haandel and Marais, 1999; WRC, 1984).

La PTAR Brasilia Sur ha estado en funcionamiento desde 1993, y la PTAR Brasilia Norte, desde 1994; su capacidad de tratamiento de aguas residuales es de una población equivalente a 1.000.000 de habitantes. En la actualidad, las dos PTAR tratan el 90% de las aguas residuales de la cuenca. La disminución en la carga de fósforo en el lago, o más bien su remoción, lo que es un factor limitante en la eutrofización de lagos, ha sido un éxito desde que las dos nuevas plantas iniciaron sus operaciones. El éxito en los años noventa del programa de limpieza del Paranoá confirma la apreciación sociocultural de las distintas posibilidades recreativas del lago, que una vez se consideró eutrófico y ahora pretende alcanzar el estado mesotrófico (Felizatto y colaboradores, 2000).

La PTAR del CAGIF se construyó en un lugar sin red cloacal, debido a la propuesta de la Compañía de Saneamiento Ambiental de Brasilia (CAESB). La idea era poner en práctica el concepto de *efluente cero*, en el que se tratarían todas las aguas residuales. El agua recuperada se utilizaría para el riego de parques y jardines, y la alimentación de las cisternas de inodoros.

En este caso se presenta el diseño integrado de la gestión de aguas residuales, el tratamiento y el reúso del agua que se utiliza en el CAGIF, ubicado en Brasilia, Distrito Federal, Brasil.

Para tales fines, se ofrece una descripción detallada del desempeño operativo de la planta de tratamiento y la calidad del efluente producido, y se comparan estos resultados con las normas brasileñas y estadounidenses sobre la reutilización del agua. Asimismo, se analiza el proyecto desde un punto de vista económico y financiero, y se calculan los costos unitarios de construcción, operación y mantenimiento (USD/m³), y equivalencia económica a través de las siguientes herramientas: relación costo-beneficio (C/B), retorno, valor actual neto (VAN) y tasa interna de retorno (TIR).

2. Materiales y métodos

2.1. PTAR del CAGIF

El proceso que se adoptó en la PTAR del CAGIF es el tratamiento avanzado de aguas residuales (WPCF, 1989; Asano y colaboradores,

2007), en el que se combinan procesos biológicos con operaciones unitarias para producir un efluente que sirve para regar parques y jardines (espacios verdes), y alimentar cisternas de inodoros.

La planta de tratamiento se proyectó y construyó para atender a una población de 1250 habitantes, lo que significa que puede procesar un caudal diario promedio de 250 m³/día. La unidad es compacta, y se construyó bajo tierra con hormigón armado. En la figura 1 se muestra el diagrama de flujo de la PTAR. La planta del CAGIF dispone de las siguientes unidades: 1) proceso biológico terciario: una variante de lodos activados complementarios donde se utiliza un reactor para la remoción biológica de nitrógeno y fósforo mediante el proceso PHOREDOX o BARDENPHO® modificado (WRC, 1984; Randall y colaboradores, 1992); 2) dos sedimentadores con retorno de lodos (de la superficie) a un tanque anaeróbico; 3) tanque de desinfección con solución de hipoclorito de sodio; 4) coagulación con una solución de sulfato de aluminio; 5) filtración con filtro de arena a presión, operación que se realiza en flujo ascendente y retrolavado mediante fluidificación; 6) adsorción con filtro de carbón activado granular a presión, operación que se realiza en flujo descendente y retrolavado mediante fluidificación, y 7) segunda desinfección (en la tubería). La edad del lodo se efectuó mediante la remoción del lodo espesado de los clarificadores secundarios (de la superficie) y la colocación en el digestor aerobio de lodos (DAL) a intervalos regulares. Luego de 15 días de digestión se transporta el lodo a la PTAR Brasilia Norte, donde se deshidrata y se desechan los biosólidos resultantes.

En caso de que el agua se vierta en el lago Paranoá, las concentraciones del efluente tratado no deben superar los valores siguientes: 1) TSS: 10 mg/l; 2) DBO₅: 10 mg/l; 3) NTK: 4 mg/l; 4) PT: 0,3 mg/l; 5) coliformes fecales totales con una eliminación del 99 al 100 %, de acuerdo con las recomendaciones de la CAESB. La calidad del efluente final siempre se basó en los valores de referencia recomendados por la CAESB, aunque no se vertiera en el lago Paranoá (*efluente cero*).

Se recolectaron muestras de afluente, efluente biológico (salida de los sedimentadores) y efluente final de la siguiente manera: una vez a la semana, se tomaban muestras cada dos horas durante un período de 24 horas.

Las variables químicas y microbiológicas analizadas fueron: 1) alcalinidad total; 2) surfactante aniónico; 3) materia orgánica: demanda bioquímica de oxígeno al quinto día (DBO₅), demanda química de

oxígeno (DQO) y total de sólidos en suspensión (TSS); 4) microbiología: coliformes totales (CT) y coliformes fecales (CF), y 5) nutrientes: nitrógeno amoniacal (NH_4^+), nitrógeno total Kjeldahl (NTK), nitrógeno nitrificado (NO_x), fósforo total (PT) y ortofosfato (PO_4^{-2}). No se realizó un análisis de parásitos (huevos de helmintos) en la planta de tratamiento. Todos los análisis estuvieron a cargo de un laboratorio contratado por el CAGIF.

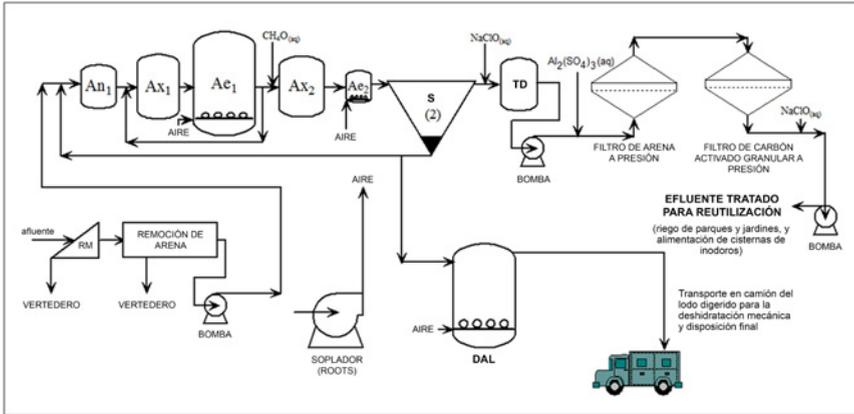


Figura 1: Diagrama de flujo de la PTAR del CAGIF (Felizatto, 2001)

Leyenda: An₁: tanque anaeróbico 1; Ax₁: tanque anóxico 1; Ax₂: tanque anóxico 2; Ae₁: tanque aerobio 1; Ae₂: tanque aerobio 2; S: sedimentador; TD: tanque de desinfección, RM: rejilla manual; DAL: digestor aerobio de lodos.

Según el estudio de Libânio y colaboradores (2007), PRODES es un programa que fue creado por la Agencia Nacional de Aguas (ANA) en el 2001, que aplica un proceso de certificación basado en el desempeño a fin de fomentar la construcción de PTAR y su funcionamiento adecuado. Los datos que PRODES exige de manera periódica incluyen el caudal de agua residual tratada, las cargas orgánicas del afluente y la eficacia de eliminación de los principales indicadores (DBO, TSS, NT o PT y CF). En Brasil, este programa también se conoce como el "programa de compra de aguas residuales tratadas". Conforme al programa, las PTAR se clasifican en nueve categorías (de "A" a "I"), donde "A" corresponde a las plantas menos complejas, y se ordenan alfabéticamente de acuerdo con el grado de complejidad de la planta y su capacidad de eliminar la materia orgánica, los nutrientes y los coliformes (CF). En la actualidad, en Brasil es muy común utilizar el

programa PRODES/ANA como referencia para evaluar el desempeño de las PTAR y se las clasifica en una escala de "A" a "I", donde "I" corresponde al máximo desempeño. En el presente caso se pretendió clasificar a la PTAR del CAGIF conforme a las directrices de PRODES/ANA a través de los valores alcanzados por la planta de tratamiento.

2.2. Normas de reutilización del agua

En las directrices de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) (2004), se incluyen los siguientes modos de reutilización del agua: 1) urbano, 2) industrial, 3) agrícola, 4) ambiental y recreativo, 5) alimentación de las aguas subterráneas y 6) aumento de las fuentes de suministro de agua potable.

Los sistemas de reutilización urbana permiten obtener agua reciclada no potable para distintos fines, como, por ejemplo, 1) riego de parques públicos y centros de recreación, campos deportivos, patios de escuelas y campos de juego, medianas y cunetas de carreteras, y jardines de centros y edificios públicos; 2) riego de jardines de residencias unifamiliares y multifamiliares, limpieza general y otras actividades de mantenimiento; 3) riego de jardines de centros comerciales, oficinas y plantas industriales; 4) riego de campos de golf; 5) usos comerciales, como lavaderos de vehículos, lavanderías, lavado de ventanas, agua para mezclar plaguicidas, herbicidas y fertilizantes líquidos; 6) aplicaciones paisajísticas ornamentales y decorativas, como fuentes, piscinas reflectantes y cascadas; 7) control del polvo y producción de hormigón en proyectos de construcción; 8) protección contra incendios a través de hidrantes que utilizan agua reciclada, y 9) alimentación de cisternas de inodoros y urinarios en edificios comerciales e industriales (EPA, 2004).

Además, los sistemas de reutilización pueden abastecer a los grandes complejos industriales o industrias que utilizan agua, así como a edificios residenciales, industriales y comerciales a través de los "sistemas de distribución dual". En los "sistemas de distribución dual", el agua reciclada se distribuye mediante una red paralela de tuberías independientes de la red de agua potable. El sistema de distribución de agua reciclada se transforma en otro servicio de agua, aparte de la red cloacal y el agua potable. Los sistemas de agua reciclada funcionan, se mantienen y gestionan de una manera similar al sistema de agua potable (EPA, 2004). El centro CAGIF cuenta con un

“sistema de distribución dual” del agua, que especialmente se utiliza para alimentar las cisternas de inodoros. Dicho sistema dispone de un mecanismo de separación de las dos redes a través de un dispositivo de “conexión cruzada”.

El desarrollo de proyectos de reutilización planificada del agua en los Estados Unidos empezó a principios del siglo XX. El estado de California fue pionero en la regulación de la recuperación y reutilización del agua. Las primeras leyes entraron en vigor en 1918. Los primeros sistemas de reutilización se crearon para el abastecimiento de agua de riego en los estados de Arizona y California a fines de la década de los años veinte. En 1940 se empezó a utilizar agua reciclada, así como aguas residuales cloradas en aceñas. Desde 1960 en adelante, se desarrollaron sistemas públicos de reutilización urbana en Colorado y Florida (Asano y Levine, 1996).

En 1965, el Ministerio de Salud de Israel emitió normas que autorizaban la reutilización de efluentes secundarios para el riego de cultivos hortícolas, excepto que se tratase de vegetales que se consumían crudos.

En 1968, se emprendió una exhaustiva investigación sobre la reutilización directa como fuente de agua potable, que se plasmó con la implementación de la primera y única planta de recuperación de agua en Windhoek, Namibia: la planta de recuperación de agua Goreangab. Se trata del primer caso concreto en el que se utiliza agua recuperada para abastecer la red de suministro de agua potable de esta municipalidad (Lahnsteiner y Lempert, 2007). Hubo un período durante este experimento en el que hasta un tercio del agua que consumía la ciudad era agua recuperada. En la actualidad, funciona al 26 % de su capacidad y puede que alcance un máximo del 35 % (Lahnsteiner y Lempert, 2007; du Pisani, 2005).

California cuenta con una larga trayectoria en la reutilización y recuperación de las aguas residuales. Su primera norma data de 1918. Durante todos estos años, se produjeron cambios; en la tabla 1 se muestran las directrices actuales (EPA, 2004; EPA, 2012).

En 1989, en Florida, se adoptó la directriz de “reutilización de agua recuperada y aplicaciones terrestres”, que fue modificada en 1990 por el Departamento de Florida de Regulación Ambiental. En la tabla 2, se muestra el estándar de calidad y tratamiento, incluidas las modificaciones propuestas para el uso no potable del agua recuperada (EPA, 2004; EPA, 2012).

Tabla 1: Criterios de calidad y tratamiento de California para la reutilización del agua

Tipo de aplicaciones	Límite de coliformes totales (NMP/100mℓ)	Tratamiento requerido
Cultivos de forraje, fibras y oleaginosas; riego superficial de huertos y viñedos	-	Primario
Pasturas para animales de ordeño, estanques ornamentales, riego de parques y jardines (campos de golf, cementerios, etc.)	23	Oxidación y desinfección
Riego superficial de cultivos alimenticios, embalses recreativos con acceso restringido	2,2	Oxidación y desinfección
Riego por aspersión de cultivos alimenticios, riego de jardines (parques, parques infantiles, etc.) Alimentación de cisternas de urinarios e inodoros	2,2	Oxidación, coagulación, clarificación, filtración ^a y desinfección

Leyenda: ^aLa turbiedad del efluente filtrado no puede superar la media de 2 unidades de turbiedad durante cualquiera de los períodos de 24 horas.

La EPA, en colaboración con la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID), publicó lineamientos sobre la reutilización del agua en 1992, a modo de guía para las distintas oficinas regionales en algunas ciudades estadounidenses y en los estados que aún no disponen de leyes. El conjunto de instrucciones de la EPA sobre la recuperación y reutilización del agua abarca diversos tipos de aplicaciones urbanas no potables: industriales, agrícolas y la reutilización potable indirecta para la recarga de aguas subterráneas. Además se incrementó el número de fuentes de suministro de agua

superficial. En la tabla 3 se muestra un resumen de los criterios de la EPA (EPA, 2004; EPA, 2012). Cabe mencionar que los indicadores microbiológicos hacen referencia a los coliformes fecales, no totales. Además, no se efectúa ningún planteo respecto del control de virus, al igual que el estado de California.

Tabla 2: Criterios de calidad y tratamiento de Florida para la reutilización del agua

Tipo de aplicaciones	Requisitos de calidad del agua	Tratamiento requerido
Áreas de acceso público restringido ^a	Col. fecales 200 NMP/100 ml TSS 20 mg/l BOD ₅ 20 mg/l	Desinfección secundaria
Áreas de acceso público ^b Riego de cultivos alimenticios ^c Alimentación de cisternas de inodoros ^d Protección contra incendios Fines estéticos Control del polvo	Col. fecales no detectables NMP/100 ml TSS 5 mg/l DBO ₅ 20 mg/l	Desinfección secundaria Filtración
Infiltración terrestre rápida	Col. fecales 200 NMP/100 ml TSS 20 mg/l DBO ₅ 20 mg/l N total 12 mg/l	Desinfección secundaria

Legenda:

^a Productores de césped, bosques, forrajes, pasturas o áreas similares.

^b Césped residencial, campos de golf, cementerios, parques, jardines, medianas de carreteras o áreas similares.

^c Solo se permite si el alimento se pela, cocina o recibe un proceso térmico antes de ser consumido.

^d No se permite si los residentes tienen acceso al sistema de cañerías.

Hasta la fecha, en Brasil no se ha implementado ninguna norma. Sin embargo, en la tabla 4 se informa acerca de los valores de las directrices brasileñas con respecto a la reutilización urbana no restringida del agua no potable, que incluye las aplicaciones que pueden poner en

riesgo la salud pública y, por lo tanto, requieren un nivel más alto de tratamiento. Estos valores de referencia se tomaron de la Agencia Nacional de Aguas (ANA, 2005) y la Asociación Brasileña de Normas Técnicas (ABNT, 1997).

Tabla 3: Criterios de calidad y tratamiento de la EPA para la reutilización del agua

Tipo de aplicaciones	Requisitos de calidad del agua	Tratamiento requerido
Reutilización urbana Riego paisajístico de toda clase (campos de golf, parques, cementerios, etc.) Lavado de vehículos Alimentación de cisternas de inodoros Uso en sistemas de protección contra incendios y aires acondicionados comerciales Otras aplicaciones acceso o exposición similar al agua.	pH = 6 – 9 DBO ₅ ≤ 10 mg/l UNT ≤ 2 Col. fecales no detectables NMP/100 ml Cl ₂ residual 1 mg/l (mínimo)	Secundario Filtración Desinfección

Tabla 4: Criterios de calidad brasileños para la reutilización urbana no restringida del agua no potable

Variable	ANA (2005)	ABNT(1997)
BOD ₅ (mg/l)	≤ 10,0	-
TSS (mg/l)	≤ 5,0	-
Turbiedad (UNT)	≤ 2,0	< 5,0
Coliformes fecales (MPN/100ml)	No detectables	< 200
Cl ₂ residual (mg/l)	-	0,5 - 1,5

2.3. Análisis económico y financiero

El “método de valor equivalente” ayuda a tomar decisiones cuando existen varias alternativas que requieren una medida de desempeño común. Los costos y beneficios se producen en diferentes momentos y, por lo tanto, tienen valores distintos. Los métodos de análisis financiero son herramientas que nos permitirán evaluar el total de dichos costos y beneficios utilizando una medida común, como las siguientes: valor actual neto (VAN), valor futuro neto (VFN), relación costo-beneficio (C/B), valor anual uniforme equivalente (VAUE) y tasa interna de retorno (TIR) (Ardalan, 2000).

El valor actual neto (VAN) es la diferencia neta entre los costos y los beneficios actuales. Otro método para evaluar la viabilidad de un sistema o comparar varios sistemas es calcular el valor actual neto de los costos y beneficios, y obtener la relación costo-beneficio (C/B). Si esta relación es mayor a uno, el proyecto es rentable (Ardalan, 2000).

Un método sencillo para obtener una evaluación rápida de las alternativas es calcular cuánto tiempo se demora en recuperar la inversión inicial. El tiempo, en cualquier unidad, que lleva recuperar la inversión inicial se llama período de retorno. En este método, se designa el diagrama de flujo neto de caja y, luego, mediante un simple cálculo aritmético, se suman los costos y beneficios año tras año hasta que el total sea igual a la inversión inicial. Desde luego que el período de retorno no tiene en cuenta el valor del dinero en el tiempo. Además, solo es exacto cuando la tasa de interés es cero. Incluso con esta limitación, muchos analistas consideran que este método es un medio de comparación fácil, rápido y útil (Ardalan, 2000).

TIR es un método útil para comparar las ventajas financieras de sistemas alternativos mediante un diagrama de flujo de caja. Calculamos esa tasa específica de interés para el sistema que alcance un valor actual neto igual a cero. Esta tasa se llama tasa interna de retorno (TIR) y se indica con i^* . Si esta tasa es mayor que la tasa mínima que establezca el inversionista o gerente de proyectos, el proyecto es aceptable. Esta tasa mínima se denomina tasa mínima aceptable de retorno (TMAR). No existe una fórmula matemática para calcular la TMAR, por lo que debe realizarse mediante prueba y error. Por suerte, hay programas informáticos con los que se puede hacer este cálculo fácilmente. La mayoría de las hojas de cálculo del mercado, como Quattro Pro, Excel, etc., tienen las funciones para calcular la tasa interna de retorno (Ardalan, 2000).

3. Resultados y discusión

3.1. Resultados del desempeño operativo

Los datos analizados corresponden a los últimos dos años de operación de la PTAR del CAGIF (2010-2011), donde se muestran niveles de remoción de alrededor 95 % para las variables que representan materia orgánica (DBO₅, DQO y TSS) y para los nutrientes, nitrógeno y fósforo, 83 % y 93 %, respectivamente. Como se muestra en la tabla 5, también se indica que la capacidad de remoción es de 6,86 y 7,80 unidades logarítmicas para los coliformes fecales y coliformes totales, respectivamente.

Table 5: Desempeño según el valor total de remoción de la PTAR del CAGIF (2010-2011)

Variable	Valor (mín.)	Valor (máx.)	Valor promedio
DBO ₅	88,51	98,13	95,71
DQO	87,64	97,76	95,21
TSS	90,00	98,64	95,52
PT	80,00	98,77	92,61
NT	28,36	94,59	83,19
CT	6,52	8,45	7,80
CF	6,32	7,52	6,86

Leyenda: Todas las unidades se expresan en %, excepto las "unidades logarítmicas" correspondientes a CT y CF.

Luego de interpretar los datos que se muestran en la tabla 5, la PTAR del CAGIF se puede clasificar dentro de la categoría "I", el máximo nivel para una planta de tratamiento brasileña, que cuenta con un proceso de tratamiento secundario avanzado, seguido de la remoción de nutrientes (fósforo o nitrógeno) y desinfección con un mínimo de 5 unidades logarítmicas para la eliminación de coliformes fecales; las tasas totales

de eliminación son: DBO y TSS: 90 %; PT: 85 % o NTK: 80 %. Cuando la planta se ubica en la categoría "I" solo se debe considerar un nutriente: PT o nitrógeno total Kjeldahl (NTK). Esta categoría comúnmente se denomina planta de remoción biológica de nutrientes (PRBN). En el presente estudio también se incluyó un objetivo de eliminación total de la DQO del 90 %, el mismo valor utilizado para la evaluación de la DBO5.

Al analizar los valores estándares de las concentraciones de efluentes detalladas en las tablas 2, 3, 4 y 5, se puede observar que las normas brasileñas de la ANA son las más restrictivas de las variables analizadas: DBO₅, TSS y coliformes fecales. Los valores estándares propuestos por la ANA (2005) se tomaron de los estipulados por el estado de Florida y la EPA, y siempre se usan los valores más restrictivos.

Los resultados de las concentraciones de las variables analizadas se muestran en la tabla 6 y corresponden al efluente final de la PTAR del CAGIF. En la tabla 6, se puede observar que los valores de DBO casi siempre son inferiores a los recomendados por la ANA (2005): 10 mg/l. La variable TSS no cumple con el valor recomendado (≤ 5 mg/l). En la figura 2, se muestran los datos de las concentraciones de DBO₅, DQO, TSS y NT correspondientes al efluente final, a través del diagrama de caja, también llamado diagrama de caja y bigotes.

Table 6: Concentration of Final Effluent from CAGIF WWTP (2010-2011)

Variable	Valor (mín.)	Valor (máx.)	Valor promedio
DBO ₅	3	12	7
DQO	7	26	15
TSS	4	12	8
PT	0,05	0,32	0,12
NT	2,2	21,8	5,9
NTK	1,40	21,60	5,22
CT	-	-	Ausente
CF	-	-	Ausente

Legenda: Toda las concentraciones se expresan en mg/l, excepto CT y CF (NMP/100ml)

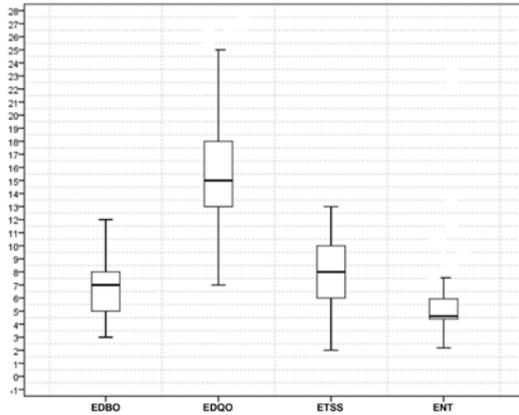


Figura 2: Diagrama de caja de las variables analizadas del efluente final: DBO₅, DQO, TSS y NT. **Leyenda:** La letra "E" delante de las abreviaturas de las variables indica que los datos corresponden al efluente final.

En el diagrama de caja de la figura 3, se muestran los datos de las concentraciones de fósforo total (el PT está expresado en mg/l) del efluente final de la PTAR del CAGIF. En la figura 3 se observa que casi todos los valores son inferiores a 0,3 mg/l, el valor de referencia recomendado por la CAESB en caso de que el efluente se vierta en el lago Paranoá. En 11 años de funcionamiento continuo, nunca se vertió el efluente final en el lago Paranoá; toda el agua reciclada siempre se ha reutilizado en el CAGIF para regar parques y jardines o alimentar las cisternas de inodoros.

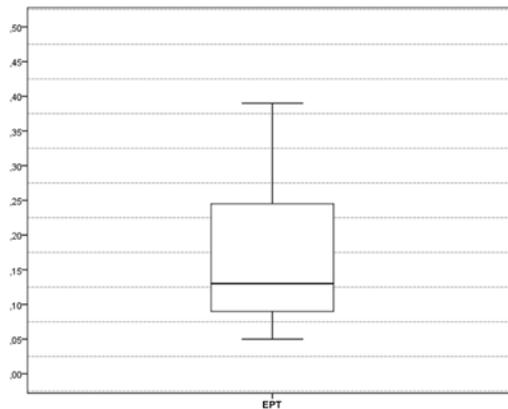


Figura 3: Diagrama de caja del PT del efluente final. **Leyenda:** La letra "E" delante de la abreviatura de la variable indica que los datos corresponden al efluente final.

3.2. Resultados del análisis económico y financiero

En el estudio de Fernandes y colaboradores (2006), se informa sobre los costos operativos, de ejecución y mantenimiento de la PTAR del CAGIF; además se indica la viabilidad económica y financiera a través de las siguientes herramientas: relación C/B, período de retorno, VAN y TIR. El año base que se utilizó para efectuar los cálculos fue el 2004. Los valores de todo el estudio están expresados en la moneda brasileña, el "real" (BRL). En el presente trabajo, estos valores se convirtieron en dólares estadounidenses; se utilizó como factor de conversión aquel que era la media en el 2004, es decir, 1,00 USD a 2,65 BRL.

En la figura 4, se ilustra el balance hídrico correspondiente al 2004, en los casos donde se observó. Cuando el agua recuperada se reutiliza para regar parques y jardines, y alimentar cisternas de inodoros, el reciclado es de aproximadamente el 42 %, lo que solo corresponde al agua que se reusa en las cisternas de inodoros (Fernandes y colaboradores, 2006). Cuando el agua reciclada no se reutiliza en las cisternas de inodoros, se debe abastecer con agua potable de la CAESB, y, en este caso, el resultado en la facturación es el costo del consumo de agua potable más un costo de servicio de aguas residuales del 100 %, lo que significa que el gasto de agua es siempre el doble del valor equivalente al consumo de agua potable. El caudal promedio tratado en el período analizado fue de 102 m³/día, lo que corresponde al 41 % del caudal estipulado en el diseño (250 m³/día).

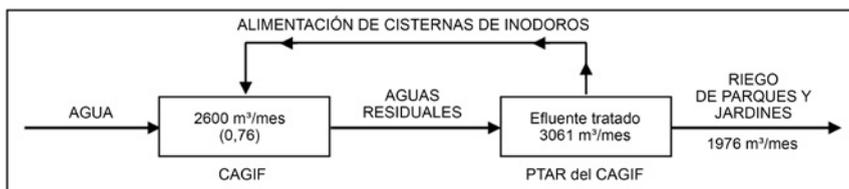


Figura 4: Diagrama de bloques del equilibrio hídrico del CAGIF con reutilización de agua en el riego de parques y jardines, y la alimentación de cisternas de inodoros; año base, 2004 (Fernandes y colaboradores, 2006).

En la tabla 7 se indican los valores aproximados de la construcción de la PTAR del CAGIF, lo que se traduce en un costo unitario de 157 USD/hab. o 785 USD/(m³/día). El costo unitario per cápita es superior a 91 USD/hab., y es el valor más alto de costo unitario per cápita de las

189 plantas de tratamiento brasileñas que se construyeron entre los años 2000 y 2001 (Nunes y colaboradores, 2005).

Tabla 7: Costo de construcción de la PTAR del CAGIF^a
(año base, 2004 – 1,00 USD = 2,65 BRL)

Etapa de construcción	Costo (USD)
Construcción civil (movimiento de tierra, trabajos de albañilería, armazones de hierro, estructuras e impermeabilización)	113.585,00
Equipos (sopladores, bombas centrífugas, bombas medidoras, bombas sumergibles, filtro de arena a presión y filtro de carbón activado a presión)	68.679,00
Red hidráulica (tuberías, registros/válvulas, conexiones, etc.)	7924,00
Diseño arquitectónico e ingeniería, supervisión y responsabilidad técnica	6038,00
Total	196.226,00

^aFuente: Fernandes y colaboradores (2006).

En la tabla 8, se describen los componentes de los costos operativos de la PTAR del CAGIF correspondiente al año 2004, lo que arrojó valores de 73,4 % y 26,6 %, como costos fijos y variables, respectivamente. El costo unitario volumétrico resultante de operación y mantenimiento es de 2,00 USD/m³, de cuatro a seis veces más que los valores registrados en las grandes plantas de tratamiento, 0,30 a 0,50 USD/m³, conforme a la CAESB (2016).

El alto costo unitario volumétrico se debe al factor de escala; además, las PTAR pequeñas suelen operar con costos unitarios mayores que los de las PTAR más grandes. Además, en el costo unitario también inciden la baja utilización de capacidades (41 %) de la planta de tratamiento y el costo fijo alto (73,4 %).

La viabilidad económica del proyecto se calculó con una TMAR del 10 % a un plazo de 20 años. En la tabla 6, se muestran los resultados. El proyecto de reutilización del agua del CAGIF se puede considerar viable de acuerdo con los métodos utilizados y los valores que se observan en la tabla 9.

Tabla 8: Costos de operación y mantenimiento de la PTAR del CAGIF^a
(año base, 2004 – 1,00 USD = 2,65 BRL)

DESCRIPCIÓN	COSTOS (USD)		
	Anuales	Mensuales	%
1. Mano de obra			59,7
1.1 Operarios	31.000,00	2583,33	(41,4)
1.2 Ingenieros supervisores	13.735,00	1144,58	(18,3)
2. Producto básico (electricidad)	5790,00	482,50	7,7
3. Material			4,9
3.1 Sulfato de aluminio	168,00	14,00	(0,2)
3.2 Hipoclorito de sodio	1860,00	155,00	(2,5)
3.3 Medio de filtración	1620,00	135,00	(2,5)
4. Servicios			20,0
4.1 Análisis de laboratorio	10.236,00	853,00	(13,7)
4.2 Transporte de lodos	3168,00	264,00	(4,2)
4.3 Deshidratación	1584,00	132,00	(2,1)
5. Mantenimiento			7,7
5.1 Construcción civil	3204,00	267,00	(4,3)
5.2 Equipos	2532,00	211,00	(3,4)
Total	74.897,00	6.241,42	100

^aFuente: Fernandes y colaboradores (2006)

Tabla 9: Resultados del análisis económico y financiero para la reutilización del agua en el CAGIF, Brasilia (Brasil). Período analizado: 20 años

Métodos	Valor
C/B	3,27
Retorno	3 años y 4 meses
VAN	445.483,00 USD
TIR	30 %

4. Conclusión

De acuerdo con el análisis de los datos de desempeño de la planta de tratamiento de aguas residuales del CAGIF, se concluye que:

- La planta de tratamiento se considera el proceso más avanzado según la referencia brasileña (PRODES/ANA). La remoción de materia orgánica es superior al 90 % (DBO5, DQO y TSS), fósforo total hasta el 85 %, NTK por encima del 80 % y 5 unidades logarítmicas para la eliminación de coliformes fecales.
- La calidad del efluente final no cumplió con los requerimientos de TSS, que exigen las directrices más estrictas sobre la reutilización del agua en riego de parques y jardines, y alimentación de cisternas de inodoros. Los datos que se analizaron en el estudio demuestran que la remoción biológica de nutrientes, junto con la coagulación, filtración y desinfección para el tratamiento de aguas residuales, no permite obtener efluentes con un TSS inferior a 5 mg/l. Hoy en día es común utilizar procesos de separación con membranas en plantas de recuperación de agua para mejorar el desempeño y obtener agua reciclada con valores bajos de TSS y turbiedad. La ultrafiltración es el proceso de separación con membranas más utilizado en la actualidad.
- Los resultados económicos indicaron que la PTAR tuvo un alto costo de construcción, operación y mantenimiento debido a la baja utilización de capacidades y a que se procesa un caudal inferior al estipulado en el diseño. No obstante, el proyecto de reutilización del agua del CAGIF demostró viabilidad

Agradecimientos

A la CAESB, por alentar siempre a sus técnicos a que realicen estudios avanzados sobre el tratamiento de aguas residuales, y al centro CAGIF del hospital Sarah, por brindar la oportunidad y participar directamente en su proyecto de reutilización del agua durante 11 años consecutivos. Queremos brindar un agradecimiento especial a los operarios de la PTAR del CAGIF, Gilberto Oliveira Souza, Wagner Paulo de Lima, Wilson Jorge Junior y Wilson Pereira, por su continua cordialidad en los once años.

Referencias

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (1997). NBR 13969: Projeto, Construção e Operação de Unidades de Tratamento Complementar e Disposição Final dos Efluentes de Tanques Sépticos: procedimentos.

Agência Nacional de Águas (ANA). (2005). Conservação e Reúso da Água em Edificações. Brasil, Prol Editora Gráfica.

Ardalan, A. (2000). Economic & Financial Analysis for Engineering & Project Management. Publicación de Technomic.

Asano, Takashi and Audrey D. Levine. (1996). Wastewater Reclamation, Recycling and Reuse: Past, Present and Future. *Water Science & Technology* 33, 10–11. doi: 10.1016/0273-1223(96)00401-5.

Asano, Takashi, Franklin Burton, Harold L. Leverenz, Ryujiro Tsuchihashi y George Tchobanoglous. (2007). Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications. Nueva York, McGraw-Hill.

CAESB. Intranet CAESB – Custos Operacionais da ETEs da POE. [Fecha de consulta: 27 de enero del 2016] Recuperado de: <http://www.caesb.gov.br>.

CEPIS. (1990). Metodologías Simplificadas para la evaluación de Eutroficación en Lagos Cálidos Tropicales. Programa Regional CEPIS/HPE/OPS.

Felizatto, M.R., Itonaga, L.C.H., Gobatto Cavalcanti, C. y Teixeira Pinto, M.A. (2000). Statistical tendency analysis of Lake Paranoalimnological data (1992-1999) and its trophic state classification based on CEPIS methodology. Proceedings of SIDISA 2000: International Symposium on Sanitary and Environmental Engineering, Trento, Italia.

Felizatto, M.R. (2001). ETE CAGIF: Projeto Integrado de Tratamento Avançado e Reúso Direto de Águas Residuárias. 21o Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Anais, João Pessoa, Brasil.

Fernandes, G. T., Felizatto, M. R. y Souza, M. A. A. (2006). Análise Econômica de Projeto Integrado de Tratamento e Reúso de Água – O caso da ETE CINR (Brasília-DF). VIII Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Anais.

Lahnsteiner, J. Y Lempert, G. (2007). Water management in Windhoek, Namibia. *Water Science & Technology* 55, 1–2.

Libânio, P.A.C., Nunes, C.M., de Oliveira, E.F.C.C., Soares, S.R.A., Brito, M.C.S.O.M. (2007). Implantação e Operação de Estações de Tratamento de Esgotos; Experiências no Âmbito do Programa Despoluição de Bacias Hidrográficas (PRODES). 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Anais, Belo Horizonte, Brasil.

Lima, J.F. 1996. Centro de Apoio ao Grande Incapacitado Físico – Ante Projeto. Associação das Pioneiras Sociais (APS).

Nunes, C. M., Libânio, P. A. C., Ayrimoraes, S. R. (2005). Custos Unitários de Implantação de Estações de Tratamento de Esgotos a partir da base de dados do Programa de Despoluição de Bacias Hidrográficas – PRODES. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Anais, Campo Grande, Brasil.

du Pisani, P.L. (2005). Direct Reclamation of Potable Water at Windhoek's Goreangab Reclamation Plant. S. J. Khan, A.I. Schäfer, M.H. Muston. (Eds.) En *Integrated Concepts in Water Recycling*.

Randall, Clifford W., James L. Barnard y H. David Stensel. (1992). Design and Retrofit of Wastewater Treatment Plants for Biological Nutrient Removal. En *Water Quality Management Library, Vol. 5*. Publicación de Technomic.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2004). Guidelines for Water Reuse. Washington D.C., Municipal Support Division Office of Wastewater Management Office of Water.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2012). Guidelines for Water Reuse. Washington D.C., Municipal Support Division Office of Wastewater Management Office of Water.

van Haandel y A. e Marais, G. (1999). O Comportamento do Sistema de Lodo Ativado - Teoria e Aplicações para Projetos e Operação. Campina Grande, Brasil, Editorial de la Universidad Federal de Paraíba.

WPCF. (1989). *Water Reuse – Manual of Practice* (2.º edición). Alexandria, VA, Water Pollution Control Federation.

WRC. (1984). *Theory, design and operation of nutrient removal activated sludge processes*. Pretoria, Sudáfrica, Water Research Commission.

SECTION II:
ASPECTOS SANITARIOS Y
MEDIOAMBIENTALES

CASO 6

Buenas prácticas de riego en zonas irrigadas con aguas residuales de Ouardanine, Túnez (Túnez)

Olfa Mahjoub¹, Mohamed Mekada² y Najet Gharbi³

Resumen

La reutilización de las aguas residuales tratadas (ART) para riego en Ouardanine data de la década de los noventa. A principios del primer decenio del 2000, los agricultores solicitaron la instalación de un dispositivo de filtración en la salida de la planta de tratamiento con el fin de eliminar los sólidos en suspensión. Posteriormente, el gobierno construyó un embalse e instaló una batería de filtros aguas arriba de la zona de riego. En campos abiertos, se sustituyó el riego superficial de árboles frutales por riego por goteo para, por un lado, reducir el consumo de agua, y por el otro, disminuir el contacto de los trabajadores, el suelo y las frutas con las ART. El riego restringido se respeta plenamente, ya que solo se cultivan plantas en las que se permite esta práctica de riego, como forraje y árboles frutales. A fin de aprovechar los nutrientes presentes en las ART, se creó un vivero donde se producen diferentes clases de plantas que representan un valioso beneficio económico. Pese a los importantes avances, los agricultores aún no logran valorar la carga de nutrientes que poseen las ART. En lo que respecta a la salud, ni los servicios de salud pública, ni los propios

¹ Olfa Mahjoub ✉; Instituto Nacional de Investigaciones en Ingeniería Rural, Aguas y Bosques (INRGREF), Túnez; Correo electrónico: olfama@gmail.com

² Mohamed Mekada; Grupo de Desarrollo Agrícola (GDA) de Ouardanine, Túnez

³ Najet Gharbi; Departamento de Ingeniería Rural y Uso del Agua; Ministerio de Agricultura, Recursos Hídricos y Pesca (DG/GREE), Túnez

En: Hiroshan Hettiarachchi and Reza Ardakanian (eds). *Uso seguro de las aguas residuales en la agricultura: ejemplos de buenas prácticas* ©UNU-FLORES 2016

agricultores han exigido la aplicación de alguna vacuna; estos últimos sostienen que han controlado la situación, sin que se produjeran casos de contaminación accidental. Interrumpir las prácticas de riego antes de la cosecha es difícil de respetar, ya que los melocotoneros necesitan mucha agua al final de la campaña agrícola. En consecuencia, se implementó un plan adecuado de manipulación de las frutas después de la cosecha para proteger a los consumidores. Asimismo, se espera que el papel de los servicios de extensión sea más eficaz.

Palabras clave: buenas prácticas de riego, biosólidos, filtración, restricción en cultivos

1. Introducción

Los recursos hídricos convencionales cada vez son más escasos. El cambio climático y la contaminación generada por las actividades humanas han reducido considerablemente la cantidad de agua existente. Dadas estas circunstancias, los países áridos y semiáridos deben confiar en los recursos hídricos no convencionales para el riego de sus cultivos. En todo el mundo, las aguas residuales se consideran un recurso alternativo. El manejo de este recurso sigue siendo delicado y suele presentar fallas. Es preciso aplicar prácticas específicas, especialmente, cuando no se efectúa el tratamiento o este no alcanza a reducir la carga de contaminación a un nivel aceptable que garantice la reutilización segura.

Las medidas que se apliquen en el campo pueden desempeñar un papel importante cuando se trata de reducir los riesgos relacionados con la reutilización de las aguas residuales, en especial, en países donde el tratamiento está bastante descentralizado o es poco eficaz. La participación de los organismos públicos y de los usuarios finales en la reutilización de las aguas residuales tratadas (ART) se considera una buena práctica porque puede ayudar a brindar un mejor servicio (Keraita y colaboradores, 2010). Se puede contribuir al ejercicio de buenas prácticas desde otros ámbitos, como el papel que juegan las instituciones y la aplicación de las leyes cuando las hay.

A principios de la década de los sesenta, Túnez empezó a reutilizar las ART para el riego de plantaciones de cítricos en La Soukra, al noreste del país. En la década de los ochenta, los resultados de

investigaciones revelaron que existe la posibilidad de que se contaminen los suelos y los cultivos cuando se reutilizan las ART. En 1989, a modo de exigir una restricción en la reutilización se establecieron las normas nacionales, que se basaron en las directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Se fijó un límite de contaminantes químicos y biológicos para asegurar la reutilización segura (Guardiola-Claramonte y colaboradores, 2012). En las especificaciones de la ley de 1995, se exigía la implementación de las buenas prácticas para proteger la salud de los agentes involucrados, como los agricultores y trabajadores en el campo. Hasta la fecha, no se han publicado directrices oficiales sobre las buenas prácticas.

En Túnez, los efluentes de 26 de las 110 plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) existentes se destinan al riego de tierras agrícolas. En la actualidad, hay alrededor de 28 sistemas de riego, pero solo 17 están en funcionamiento. La tasa promedio de intensificación fue de un 46 % en los últimos 10 años (DGGREE, 2014). Por consiguiente, son pocas las zonas de riego que intentan cumplir con los requisitos de reutilización segura en la agricultura. Una de las zonas de riego más pujante está ubicada en la región de Ouardanine donde el paisaje se ha transformado en el transcurso de 18 años gracias a la reutilización de las ART. En Ouardanine, las ART representan el único recurso hídrico alternativo de la región, lo que obliga a la población a adaptarse a las condiciones imperantes para garantizar su seguridad alimentaria. La zona de Ouardanine se considera un caso exitoso de reutilización de las aguas residuales en Túnez. No obstante, hay muy pocas o ninguna publicación en la que se presente el estudio de caso a las grandes comunidades de Investigación y Desarrollo (I&D) para mostrar los logros y las oportunidades de mejora.

El objetivo general de este caso es resaltar las buenas prácticas que respaldan el éxito alcanzado en la reutilización de las ART en la agricultura en la zona de riego de Ouardanine. El artículo se centra en el estudio de caso de un agricultor que ha cultivado melocotones por más de 15 años. Asimismo, se destacarán las lecciones aprendidas y las posibles mejoras. El caso se basa en la revisión bibliográfica y en una entrevista con un agricultor (presidente del Grupo de Desarrollo Agrícola) y las partes interesadas, además de las observaciones de campo.

2. Contexto general y antecedentes

El distrito de Ouardanine está situado a 130 km de la capital, Túnez. Se encuentra ubicado en la gobernación de Monastir, en la parte centro-oriental de Túnez (figura 1). El clima de la región es semiárido, y se registra un déficit hídrico aproximado de 1000 mm/año. El acuífero Sahline-Ouardadine que yace debajo de la región es salino (4,3 g/l) y está sobreexplotado (110 %) (CNEA, 2008); por consiguiente, ya no se utiliza para riego. Además, la región de Ouardanine no dispone del agua del dique Nebhana que se utiliza exclusivamente para regar tierras agrícolas en el centro de Túnez.

La actividad agrícola en la región se basa en la agricultura de secano. El 97 % de las plantaciones está conformado por olivos que se riegan con el sistema de meskat, el sistema tradicional de captación del agua de lluvia. La reutilización de aguas residuales se considera el único recurso hídrico alternativo para emplear en la agricultura de riego intensivo (Vally Puddu, 2003), especialmente, en la región de Ouardanine.



Figura 1: Ubicación de Túnez, gobernación de Monastir y distrito de Ouardanine

Desde el punto de vista ambiental, Ouardanine ha sufrido durante mucho tiempo los efectos de las descargas de aguas residuales sin tratar en el arroyo Oued Guelta, lo que conllevó a la degradación de las zonas rurales (Hydro-plante, 2002). Ante la súplica constante de los agricultores, la Oficina Nacional de Saneamiento (ONAS), como productora de las ART de Túnez, empezó a tratar los efluentes en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de Ouardanine. A

partir de la petición de los agricultores, el Ministerio de Agricultura y Recursos Hídricos encomendó la ejecución de un estudio para la planificación del riego de 50 ha de tierra agrícola para un grupo de 40 agricultores (CRDA, 2015).

La zona de riego de Ouardanine se delimitó en 1994, y las prácticas de riego empezaron en 1997. En la actualidad, la zona de riego cubre alrededor de 75 ha. Las plantaciones irrigadas con efluentes secundarios consisten en su mayoría de árboles frutales, que ocupan unas 34 ha donde se cultiva melocotón, granada, higo, manzana y níspero. También existen cultivos forrajeros, como alfalfa y cebada (CRDA, 2015).

Al momento de la instalación, la zona de Ouardanine solía consumir el 40 % de las ART producidas (4000 m³ aprox.). En la actualidad, consume alrededor de 140.000 m³ de agua/año (2014-2015). La gestión del agua está a cargo del Grupo de Desarrollo Agrícola (GDA) (DGGREE, 2015).

3. La planta de tratamiento de aguas residuales de Ouardanine

La PTAR de Ouardanine se construyó en 1993. Capta los efluentes de 17.000 ciudadanos y tiene una capacidad de tratamiento de 1000 m³/día (figuras 2 y 3). Emplea un sistema de tratamiento en lagunas de oxidación. La PTAR trata 882 m³/día en verano con una capacidad máxima de 1010 m³/día (DGGREE, 2015). En la actualidad, la población de Ouardanine es de 21.814 habitantes, distribuidos en unas 6312 viviendas (Instituto Nacional de Estadísticas, 2015), lo que explica su próxima remodelación en el 2016.



Figura 2: PTAR de Ouardanine (Google Earth, 2015)



Figura 3: Clarificador secundario en la PTAR de Ouardanine (con autorización de O. Mahjoub, 2015)

La PTAR está ubicada en la región de Oued El Guelta, cerca de la zona de riego, lo que representa una ventaja. En realidad, uno de los obstáculos que plantea la reutilización del agua en Túnez es la gran distancia que existe entre las tierras agrícolas y las PTAR (DGGREE, 2014). Las aguas residuales sobre todo son de origen doméstico, aunque participan algunas industrias (mataderos, sector de perfumería, almazaras, lavaderos de vehículos, etc.) que han causado inconvenientes en la planta de tratamiento, con el consecuente deterioro de la calidad del ART destinada al riego (DGGREE, 2015).

La PTAR de Ouardanine produce alrededor de 350 m³/día de lodos residuales húmedos, que generalmente se esparcen en lechos de secado (figura 4). No existe una autorización oficial que permita usar los biosólidos en la agricultura, aunque se hayan establecido claramente las normas nacionales en el 2002 (NT 106.20 [2002]). El esparcimiento de biosólidos en suelos agrícolas está en fase de prueba.

La gestión de biosólidos es un aspecto importante para el medio ambiente, ya que aún no está permitido su uso a gran escala como fertilizante en tierras agrícolas. Por otro lado, los biosólidos producidos se vierten en el arroyo Oued El Guelta (figura 5) y la zona aledaña a la PTAR, lo que ocasiona problemas de drenaje. Un aumento en el nivel de la capa freática entre los años 2002 y 2004 (Vally Puddu, 2003) ha generado el perecimiento de los árboles frutales. En los próximos años, se planea realizar el dragado del arroyo.



Figura 4: Lodos residuales en lechos de secado en la PTAR de Ouardanine (con autorización de O. Mahjoub, 2015)



Figura 5: Vertido de efluentes tratados y sin tratar, y lodos residuales en el arroyo Oued El Guelta (con autorización de O. Mahjoub, 2015)

4. Buenas prácticas para la reutilización en la agricultura

Las directrices de la OMS publicadas en el 2006 se crearon con la finalidad de proteger la salud, mediante la aplicación de varias medidas y conceptos (OMS, 2006). En Túnez, los servicios de extensión y administradores de servicios de abastecimiento de agua aún no

han traducido estas directrices en acciones simples y prácticas que se implementen en el campo. En lo que respecta a la reutilización de las ART en la agricultura, las directrices de la OMS rezan que las buenas prácticas de riego dependen del volumen de agua, la calidad del agua, las características del suelo, la selección de cultivos, las técnicas de riego, la filtración y las prácticas de gestión (OMS, 2006). A continuación, se analizan estos aspectos a modo de describir las buenas prácticas aplicadas en la zona de riego de Ouardanine.

4.1. Calidad de las aguas residuales tratadas

La calidad del recurso hídrico define las aplicaciones subsiguientes y los riesgos inherentes. Dados los distintos tipos de reutilización de las ART en los países en desarrollo, se recomienda que se analicen la cantidad y la calidad en función de las posibles aplicaciones de reutilización y los requisitos de calidad (PNUMA, 2005) a fin de garantizar la aceptabilidad por parte de los usuarios finales, por un lado y por el otro, de mitigar los riesgos para los agentes involucrados y el medio ambiente.

En Túnez, las PTAR existían antes del establecimiento de las zonas de riego. En consecuencia, la calidad del ART que se destina al riego de cultivos puede que cumpla o no con los requisitos de calidad para la reutilización aguas abajo, lo que implica diferentes riesgos para los usuarios finales y consumidores, si no se gestiona correctamente. La mejora de la calidad del ART tras el tratamiento secundario convencional se puede lograr gracias a varias opciones conocidas como "no tratamiento", que se suelen aplicar en los países donde no se dispone de tratamiento (OMS, 2006).

La PTAR de Ouardanine produce un efluente que recibe tratamiento biológico secundario, y se puede usar exclusivamente para el riego restringido sobre la base del Código de Aguas, los decretos correspondientes y las normas nacionales. El control de la calidad del ART en Ouardanine, medido durante el desarrollo del programa de investigación y por las autoridades regionales, indicó que la salinidad es moderada (1,7-1,9 g/l), lo que implica que debe aplicarse una restricción al riego de ligera a moderada (Ayers y Westcot, 1985). Los parámetros químicos y biológicos se encuentran casi todos dentro de los valores de las normas tunecinas de reutilización, excepto por un exceso en el total de sólidos en suspensión (TSS: 41,7 mg/l frente a

30 mg/l) y la demanda química de oxígeno (DQO: 92 mg O₂/l frente a 90 mg/l) (Bahri y Mahjoub, 2007; CRDA, 2015). Sin embargo, el valor de DQO que superó considerablemente el umbral se midió en el 2014 (DGGREE, 2014). Además, la Comisión Regional para el Desarrollo Agrícola (CRDA) informó valores altos de sólidos en suspensión (CRDA, 2015). Las almazaras y los mataderos que vierten sus efluentes en el sistema de alcantarillado también pueden generar inconvenientes en el proceso de tratamiento y deteriorar la calidad del ART (presencia de plumas, sustancias oleosas, etc.). Las concentraciones de metales pesados en el ART se encuentran por debajo de los valores umbrales fijados por las normas nacionales de reutilización (Bahri y Mahjoub, 2007; DGGREE, 2015). Es posible que algunos elementos registren algunas veces concentraciones altas, como el cromo (Cr), que se ha detectado hasta 7,3 mg/l en el 2003, lo que quizás se deba a las descargas de las industrias textiles. Se hallaron concentraciones altas de Cr, hasta 76 mg/kg de materia seca, en suelos fertilizados con biosólidos, en comparación con los valores recomendados por la Comisión Europea (60 mg/kg de materia seca) (Berglund y Claesson, 2010).

Desde luego que la PTAR no parece ser tan eficiente como se creía a la hora de ofrecer ART de una calidad que cumpla con las normas y expectativas de los agricultores. El ART necesita mayores mejoras para que sea adecuada para el riego. Para este fin, se instalaron una planta de filtración y un embalse, que se describen a continuación.

4.2. Embalse

La instalación de un embalse aguas abajo de la PTAR para captar efluentes ofrece la posibilidad de almacenar agua para los períodos del año cuando no se vierten efluentes a fin de satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos. Además, tiene la ventaja de ser un tratamiento complementario que posiblemente mejore la calidad del ART al reducir la carga de agentes patógenos (Jiménez y colaboradores, 2010).

En Ouardanine, se creó aguas arriba un embalse con una capacidad de 500 m³, a unos 5 m de altura, para asegurar la distribución por gravedad del ART a la zona de riego. La mala calidad del ART vertida en el embalse solía generar el depósito de lodos y la obstrucción de los sistemas de riego. El dragado del embalse solía ser un problema, que ocasionaba daños ambientales.

En el 2007, la CRDA construyó un embalse de 1000 m³ con el objetivo de regular la cantidad de ART que se distribuía a la zona de riego y adaptarse a las necesidades de los cultivos (figura 6). La finalidad del embalse también era mejorar la calidad del ART, ya que permitía el asentamiento de los sólidos en suspensión y la eliminación de microorganismos. El mantenimiento y la limpieza del embalse y la estación de bombeo están a cargo de los empleados de la CRDA y se realizan una vez al año (CRDA, 2015).



Figura 6: Embalse de 1000 m³ y mantenimiento de la estación de bombeo en Ouardanine (con autorización de O. Mahjoub, 2015)

4.3. Filtración

Se sabe que la filtración de los efluentes biológicos secundarios permite la remoción de materia particulada residual y agentes patógenos, como huevos de helmintos y quistes de protozoos (Jiménez, 2007). Se pueden adoptar distintos medios de filtración para eliminar alrededor de 1 unidad logarítmica de virus y bacterias patógenas.

En Ouardanine, los efluentes a la salida de la PTAR siempre han presentado sólidos flotantes en suspensión que no quedan atrapados en el depósito de decantación. Los agricultores detectaron la presencia de materiales que obstruían los goteros de riego. Como resultado, algunos de ellos han abandonado el riego por goteo o han quitado las boquillas. En consecuencia, no se logró el objetivo inicial de reducción de agentes patógenos, y las prácticas de ahorro de agua se tiraron por la borda porque se les echaba gran cantidad de agua a las plantas.

A fin de reducir la carga de partículas en suspensión, se colocó una malla en la salida para realizar la filtración gruesa (figura 7). Los trabajadores de la PTAR están encargados de las tareas de reemplazo y mantenimiento de este dispositivo. Este sistema ha estado instalado desde el 2003. En la actualidad, la malla se ha reemplazado por un tamiz desmontable cubierto con una malla metálica que se ha colocado en el 2004 (figura 7).

A fin de mejorar la calidad del ART, la CRDA instaló una batería de filtros que constan de un filtro granular, un filtro de arena y un tamiz filtrante a la salida del embalse (figura 7). Con el objeto de evitar fallas en el sistema de filtración, se debe cambiar el material utilizado para la filtración (arena) regularmente, cada tres años. Se produjo la contaminación con huevos de helmintos durante la campaña agrícola del 2015, y se debió interrumpir el suministro de agua de riego por 25 días, lo que afectó de manera significativa la programación del riego. Esta experiencia indica que no debe considerarse a la filtración como un proceso de tratamiento, y debe estar acompañada de un proceso de tratamiento eficaz dentro de la PTAR. En caso de que se produzca un hecho similar, los agricultores exigirían soluciones alternativas para el almacenamiento de mayores volúmenes de agua, de manera que no se vean afectadas la producción ni calidad de los cultivos.



Figura 7: Malla colocada en la salida de la PTAR en Ouardanine en el 2003 (izquierda), y tamiz y malla colocados en el 2004 (derecha) (con autorización de O. Mahjoub, 2003, 2015)

La instalación de un filtro de menor porosidad, aunque procesara el 50 % del caudal inicial, fue sugerencia del agricultor para reducir el riesgo del paso de agentes patógenos. El presidente del GDA estuvo

dispuesto a adaptar su programación del riego a este nuevo sistema de filtración mediante la fijación de prioridades según el tipo de cultivo y plantas que se deba regar: granada, plántulas y plantaciones jóvenes en el vivero.



Figura 8: Batería de filtros a la salida del embalse (con autorización de O. Mahjoub, 2015)

4.4. Restricciones de la reutilización en los cultivos

La restricción en los cultivos es una de las medidas de protección sanitaria que se aplican en los campos para reducir el riesgo de contaminación en los consumidores expuestos, especialmente, en los alimentos que se consumen crudos (OMS, 2006). En Túnez, el Ministerio de Agricultura en 1994 determinó claramente los cultivos que se pueden regar con ART. Se trata, en su mayoría, de árboles frutales, cereales, plantas forrajeras y cultivos industriales.

En Ouardanine, se solían cultivar exclusivamente olivos. La introducción de las ART en la región resultó en una modificación significativa de los patrones de cultivo y la situación socioeconómica. En la actualidad, se cultivan cereales (cebada: 2 ha), plantas forrajeras (alfalfa: 1 ha), olivos (olivos: 6 ha de aceitunas de mesa y 15 ha de aceite de oliva) y árboles frutales (34 ha) (CRDA, 2015). Estos últimos son sobre todo melocotones y otras frutas, como granada, higo y manzana.

El agricultor que entrevistamos es el presidente del GDA. Posee una superficie cultivada de 6 ha, que se divide en 1 ha de cebada y 1 ha de alfalfa irrigadas mediante riego por surcos mejorado, 2 ha de granada y 2 ha de melocotón (figura 9). En invierno, solo se riega el forraje, mientras que en verano el volumen de ART producida parece

ser suficiente para regar toda la superficie, siempre y cuando no se produzcan interrupciones.



Figura 9: Melocotoneros irrigados en la zona de Ouardanine en invierno (izquierda) y verano (derecha) (con autorización de O. Mahjoub, 2015)

En Túnez se permite por ley el riego de cultivos industriales con ART. El arbusto *Pelargonium graveolens*, más conocido como geranio, se cultiva de manera intercalada con los granados (figura 10). El geranio se cultiva en la zona irrigada con ART de Ouardanine. De esta planta se aprovechan su follaje y flores, que se usan para la destilación y la producción de perfumes. También se producen destilados y aceites esenciales para fines curativos y culinarios. A modo de cumplir con las normas de reutilización segura del ART, el agricultor utiliza el riego por goteo para evitar la contaminación del follaje. Precisó que lo vende en ramilletes en el mercado local y resaltó su alto valor económico. No obstante, se debería hacer algún análisis microbiológico para garantizar que el follaje no presente contaminación bacteriana.



Figura 10: Plantas de *Pelargonium graveolens* que se cultivan de manera intercalada con los granados (con autorización de O. Mahjoub, 2015)

Además de los geranios, se cultivan rosas en invernaderos donde se usa el método de riego por goteo. En viveros también se producen rosas, olivos y otras plantas (figuras 11 y 12).



Figura 11: Rosas cultivadas en invernaderos y regadas con ART mediante riego por goteo (con autorización de O. Mahjoub, 2015)



Figura 12: Plantas en el vivero regadas con ART (incluidos olivos, manzanas, rosas, etc.) (con autorización de O. Mahjoub, 2015)

4.5. Métodos y programación del riego

Los métodos de riego se consideran una manera eficaz de evitar la contaminación química y biológica del suelo, de los cultivos y de los usuarios finales, así como una medida de protección sanitaria. La OMS clasificó los métodos de riego como opciones de "no tratamiento" (OMS, 2006).

En Ouardanine, la red de riego que se ha montado en la zona tiene 2,3 km de longitud. La zona cuenta con válvulas y equipos de riego. En las plantaciones de cereales y forrajes se aplica un método mejorado de riego superficial. Durante un transcurso mayor a 15 años, el agricultor entrevistado ha adoptado distintos sistemas de riego; su más reciente incorporación incluye un gotero integrado que vierte 4 l/h. El agricultor piensa que es muy importante que los árboles reciban la cantidad adecuada de agua para garantizar la buena calidad y producción de melocotones.

El gobierno otorga incentivos para alentar a los agricultores que están dispuestos a adoptar técnicas de ahorro de agua. Se puede subsidiar hasta el 60 % del costo de inversión del sistema de riego cuando se abandonan las técnicas tradicionales de riego, como el riego por surcos, y se adoptan métodos que permiten ahorrar más agua, como el riego por aspersión o goteo.

4.6. Distribución del agua

El GDA de Ouardanine está encargado de la gestión del agua de riego en la zona de riego. Asimismo comercializa el agua y mantiene la infraestructura para los 36 agricultores existentes. La cantidad de agua distribuida se reparte de acuerdo con el tamaño de la tierra, la cantidad de árboles y su edad. En caso de que haya escasez de agua, las plantaciones jóvenes y los viveros tienen prioridad. No obstante, se pueden sobrepasar las necesidades hídricas, en especial, antes del período de cosecha, porque los agricultores creen que las frutas requieren más agua (CRDA, 2015).

5. Uso de biosólidos en la agricultura

A fines de la década de los ochenta, se evaluaron las oportunidades de utilizar biosólidos en la agricultura en Túnez y, en los noventa, se utilizó como fertilizante (Bahri y Houmane, 1987; Bahri, 1995). Debido a las preocupaciones asociadas a la salud, en 1998 el Ministerio de Salud Pública prohibió el uso de biosólidos en la agricultura hasta la implementación de las normas nacionales en el 2002. Desde ese

entonces, el vertido de biosólidos se ha transformado en un problema ambiental complejo. La falta de seguimiento o de imposición de su uso ha generado la acumulación de lodos en las zonas aledañas a las PTAR. En la actualidad, la aplicación de biosólidos en tierra agrícola está limitada a parcelas experimentales, que constituyen proyectos piloto.

El suelo de la zona de Ouardanine está formado por limo con arcilla y arena, arcilla con limo y arena, o arcilla con arena. El agricultor considera que la calidad del suelo es pobre y que necesita enmiendas orgánicas para mejorar la fertilidad. El alto precio del abono hecho de biosólidos es una buena alternativa a los fertilizantes orgánicos. En Ouardanine, los biosólidos se han utilizado como fertilizantes desde el 2009 para rehabilitar el subsuelo. En la actualidad, se está reparando una superficie de 1 ha bajo la supervisión regular del Ministerio de Agricultura como uno de los proyectos de demostración. El uso de biosólidos se realiza conforme a las normas nacionales. Se espera esparcir una cantidad aproximada de 6 t/ha durante 5 años.

El agricultor siente curiosidad sobre el efecto que tendrá la aplicación conjunta de ART y biosólidos desde el punto de vista de la cantidad de fertilizantes y su impacto en el suelo, la producción y la calidad de las frutas.

6. Posibles áreas de mejora

6.1. Recuperación/reciclado de nutrientes

Los fertilizantes son cada vez más costosos, lo que se traduce en altos costos de producción. La reutilización de las aguas residuales ofrece la ventaja de que aporta una cantidad considerable de nutrientes que, por mucho tiempo, se utilizaron en los países en desarrollo de todo el mundo.

En Ouardanine, los agricultores riegan con ART y aplican la dosis de agua solo en función de las necesidades hídricas de los cultivos, sin tener en cuenta la carga fertilizante. Este enfoque no les permite aprovechar los nutrientes que aportan las ART. Por lo general, el fósforo está presente en concentraciones bajas, por lo que se necesita la fertilización complementaria con minerales. Aunque el nitrógeno

está presente en concentraciones altas, el agua subterránea se puede contaminar si el ART no se gestiona correctamente. Hasta la fecha, los agricultores de Ouardanine no disponen de indicadores ni de herramientas para evaluar la cantidad de fertilizantes presentes en las ART. Por lo tanto, se necesita más orientación en este sentido.

6.2. Control de la calidad del ART

Sobre la base de las normativas nacionales, se debe efectuar con mayor frecuencia el control regular de la calidad del suelo y del ART que se usa para riego a fin de garantizar la reutilización más segura del ART.

6.3. Programación del riego

Es posible que el agricultor aún sobreestime las necesidades hídricas de los cultivos para garantizar la buena calidad y producción. Se deben realizar más investigaciones para optimizar el uso del ART en función del agua, los fertilizantes y las acumulaciones de sal.

6.4. Protección sanitaria y control médico

La vacunación es una medida preventiva que mitiga el riesgo de contaminación con agentes patógenos. En Ouardanine, los comentarios de los agricultores y los registros de la campaña agrícola del 2014/2015 (DGGREE, 2015) permitieron conocer que no hay un control sanitario ni régimen de vacunación para los empleados de la Comisión Regional para el Desarrollo Agrícola (CRDA, Ouardanine) o los agricultores de la Asociación de Agricultores. Los agricultores sostuvieron que nunca se produjeron problemas importantes debido a la contaminación microbiológica.

El control de la salud de los agricultores es responsabilidad del Departamento de Higiene y Protección Ambiental (DHMPE) del Ministerio de Salud Pública, que está encargado del control de la calidad microbiológica de los efluentes, incluidos los cultivos. Se comprobó que la aplicación de vacunas no es una práctica regular en la zona para prevenir posibles enfermedades microbiológicas relacionadas con los

agentes patógenos. Los agricultores confirmaron que no hubo problemas sanitarios en la zona gracias a las demás medidas preventivas.

6.5. Cese del riego antes de la cosecha

El cese del riego puede reducir la carga de agentes patógenos que puedan pasar al suelo y a los productos irrigados, ya que favorece la eliminación de bacteria y virus.

Conforme a las normas tunecinas de reutilización y las especificaciones pertinentes, los agricultores deben detener las prácticas de riego dos semanas antes de la cosecha. Según los comentarios del agricultor, el tiempo de espera entre el riego y la cosecha no se puede respetar en el caso del forraje y los melocotones. Cuando se trata del forraje destinado al pastoreo, se ha demostrado que se puede eliminar el 99 % de los virus después de dos días de exposición al sol (Feigin y colaboradores, 1991), lo que podría evitar la contaminación de los animales. En lo que respecta a los melocotones, los agricultores consideran que es importante practicar el riego intensivo al final de la campaña agrícola para obtener una fruta de mejor calidad y mayor producción; por lo tanto, parece que el riego no se interrumpirá. Es posible que esto implique un mayor consumo de agua y riesgos para la salud. Se debe brindar mayor orientación a los agricultores en este sentido.

6.6. Papel del servicio de extensión

El servicio de extensión no parece asumir un compromiso suficiente con los agricultores de la región. Se dice que las mejoras que se observan en la zona son producto de las iniciativas de los propios agricultores. Se debe incrementar el papel del servicio de extensión para un riego más seguro. Es preciso establecer una mayor confianza en la relación entre los agricultores y las partes interesadas locales.

6.7. Comercialización de las frutas

Las frutas que se producen en Ouardanine se venden en los mercados locales y regionales, y no se las diferencia de aquellas regadas con

agua convencional. Sin embargo, los consumidores locales parecen identificar a los melocotones regados con ART de Ouardanine. Algunos consumidores son reacios o “sienten asco” por las frutas regadas con ART, por lo que se debe generar conciencia y hacer cumplir las buenas prácticas de cosecha, embalaje, etc. en el campo, para modificar esta visión. Las partes interesadas hablan de establecer un sistema de trazabilidad de los productos para garantizar su seguridad y, por otro lado, proteger la salud de los clientes.

7. Conclusiones y Recomendaciones

En Túnez, la zona de Ouardanine irrigada con ART se considera un estudio de caso exitoso. Este logro se debe a la aplicación de las buenas prácticas para la reutilización segura en la agricultura. La reutilización del ART en esta zona ha generado varios beneficios para la población rural y toda la región en distintos planos (ambiental, económico, sanitario, etc.). Esto ha limitado la descarga de aguas residuales sin tratar en masas de agua y recursos naturales protegidos. Asimismo favoreció el desarrollo de la actividad económica que mejoró la calidad de vida de la población y contribuyó a la prosperidad de la región. Aplicar buenas prácticas de reutilización del ART en la región de Ouardanine fue una ventaja. No obstante, se pretende realizar diversas mejoras para el desarrollo de la actividad agrícola, mientras se tienen en cuenta los distintos impactos del proyecto.

El presidente del GDA, como representante de la comunidad de agricultores de la región, busca asumir un mayor compromiso y recomienda varias medidas, entre las que se incluyen las siguientes:

- La incorporación de un sistema de riego subsuperficial para el riego sin restricciones que permita avanzar hacia normas más permisivas y mayor diversidad de cultivos.
- El establecimiento de un acuerdo entre todas las partes interesadas a nivel local (productores de ART, administradores de servicios y usuarios finales) para garantizar el suministro continuo de ART durante el período de riego y evitar cualquier variación que pueda repercutir en la producción.

- La optimización del riego, la fertilización de los cultivos, y el desarrollo de indicadores de eficiencia hídrica, nutrientes y consumo de agua con respecto a la calidad del ART, los biosólidos y el suelo.

8. Agradecimientos

Los autores quisieran agradecer a MM. Mahmoud Charfeddine, Moufid Zarga y Nabil Majdoub de la CRDA de Monastir por su disposición, debates enriquecedores y apoyo en la realización del presente trabajo.

Referencias

Ayers, R. S. y D. W. Westcot. (1985). *Water Quality for Agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 29*, 174 Rev. 1, Roma.

Bahri, A. y B. Houmane. (1987). Effet de l'Épandage des Eaux Usées Traitées et des Boues Résiduaires sur les Caractéristiques d'un Sol Sableux de Tunisie. *Science du Sol* 25(4), 267–78.

Bahri, A. (1995). Environmental impacts of marginal waters and sewage sludge use in Tunisia. Artículo presentado en el taller panafricano *African Women in Science and Engineering - A vision for the 21st Century*, Universidad de Lund, Suecia.

Bahri, A. y O. Mahjoub. (2007). *Projet PISEAU I. Action de recherche: Utilisation agricole des boues résiduaires. Elaboration des norms. Informe final.* Institution de la Recherche et des Etudes Supérieures Agricoles, Institut National de Recherche en Génie Rural, Eaux et Forêts, Túnez.

Berglund, K. y H. Claesson. (2010). A Risk Assessment of Reusing Wastewater on Agricultural Soils - A Case Study on Heavy Metal Contamination of Peach Trees in Ouardanine, Tunisia. Tesis de maestría, N.º de Informe: TWVR - 10/5004. ISSN: 1101-9824. Universidad de Lund, Suecia.

CNEA. (2008). *Etude sur l'Etat de la Désertification pour une Gestion Durable des Ressources Naturelles en Tunisie.* Informe en la tercera fase [Fecha de la última consulta: febrero del 2008]. Recuperado de: http://www.chm-biodiv.nat.tn/sites/default/files/rapport_desertif.pdf.

CRDA. (2015). Experiencia del GDA de Ouardanine en la reutilización de las aguas residuales tratadas (en árabe).

DGGREE. (2014). Evaluation de la Situation de la Réutilisation des Eaux Usées en Agriculture (en árabe). Informe sin publicar.

DGGREE. (2015). Rapport sur la Situation des Périmètres Irrigués par les Eaux Usées Traitées. Campagne 2014/2015.

Guardiola-Claramonte M., T. Sato, R. Choukr-Allah y M. Qadir. (2012). Wastewater production, treatment and reuse around the Mediterranean Region: Current status and main drivers. Redouane Choukr-Allah, Ragab Ragab y Rafael Rodriguez-Clemente (Eds.). En *Integrated Water Resources Management in the Mediterranean Region: Dialogue Towards New Strategy*, 139–174.

Hydro-plante. (2002). *Etude d'Assainissement et de Recalibrage de l'Oued El Guelta*. Dossier d'exécution, Túnez.

Jiménez, B. (2007). Helminth ova control in sludge: A review. *Water Science & Technology* 56(9), 147–55.

Jiménez, B., D. Mara, R. Carr y F. Brissaud. (2010). Wastewater Treatment for Pathogen Removal and Nutrient Conservation: Suitable Systems for Use in Developing Countries. P. Drechsel, C. A. Scott, L. Raschid-Sally, M. Redwood y A. Bahri (Eds.). En *Wastewater Irrigation and Health. Assessing and Mitigating Risk in Low-Income Countries*, 149–170. Ottawa, Canadá: IWMI e IDCR.

Keraita, B., F. Konradsen, y P. Drechsel. (2010). Farm-Based Measures for Reducing Microbiological Health Risks for Consumers from Informal Wastewater-Irrigated Agriculture. P. Drechsel, C. A. Scott, L. Raschid-Sally, M. Redwood y A. Bahri (Eds.). En *Wastewater Irrigation and Health. Assessing and Mitigating Risk in Low-Income Countries*, 189–208. Ottawa, Canadá: IWMI e IDCR.

Instituto Nacional de Estadística. (2015). Census of population and housing in 2014, Tunisia. [Fecha de consulta: 15 de enero del 2016] Recuperado de: <http://www.ins.nat.tn/indexen.php>.

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2005). *Water and Wastewater Reuse: An Environmentally Sound Approach for Sustainable Urban Water Management*. Osaka, Japón: PNUMA y UNEP and Global Environment Centre Foundation.

Vally Puddu, M. (2003). Diagnostic Technico-économique de la Réutilisation des Eaux usées Traitées dans le Périmètre de Ouardanine (Monastir-Tunisia). Túnez: INRGRF.

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2006). *WHO Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater. Volume II: Wastewater in Agriculture*. Ginebra, Suiza. OMS-PNUMA-FAO.

CASO 7

Efectos de más de 100 años de riego con aguas residuales de la Ciudad de México en el valle del Mezquital (México)

Christina Siebe, María Chapela-Lara, Mario Cayetano-Salazar, Blanca Prado¹ y Jan Siemens²

Resumen

El valle del Mezquital es un ejemplo único de reutilización de aguas residuales debido a su tamaño (90.000 ha) y temporalidad (más de 100 años). Varios grupos de investigación han recopilado información sobre esta región. El objetivo de este caso es resumir las principales lecciones aprendidas. Este sistema de tratamiento a través de suelo y acuífero (SAT) se implementó como un mecanismo de drenaje de la cuenca cerrada de México para evitar inundaciones en la Ciudad de México. Se ha ampliado en respuesta al aumento de la población de la ciudad y los volúmenes de descarga de aguas residuales. El agua residual es un recurso valioso en la región semiárida al norte de la Ciudad de México y su reutilización permite la producción, sobre todo, de plantas forrajeras y maíz, con cosechas que sobrepasan la media. A los fines de investigar los efectos del riego con aguas residuales, se tomaron muestras de campos regados durante diferentes períodos y se supervisaron casos aislados de riego de manera reiterada. Los resultados confirman que el riego con aguas residuales contribuye a

¹ Christina Siebe ✉ · María Chapela-Lara · Mario Cayetano-Salazar · Blanca Prado
Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México; e-mail: siebe@unam.mx

² Jan Siemens; Instituto de la Ciencia del Suelo y la Conservación de Suelos, Universidad de Giessen, Giessen, Alemania

En: Hiroshan Hettiarachchi and Reza Ardakanian (eds). *Uso seguro de las aguas residuales en la agricultura: ejemplos de buenas prácticas* ©UNU-FLORES 2016

la alimentación de las aguas subterráneas de $25 \text{ m}^3/\text{s}^{-1}$ (2,16 millones de $\text{m}^3/\text{día}^{-1}$). Si bien la productividad promedio del maíz se ha incrementado de $2 \text{ t}/\text{ha}^{-1}$ con la agricultura de secano a $10 \text{ t}/\text{ha}^{-1}$, los campos reciben nitrógeno en exceso, que se lixivia como nitrato (hasta $108 \text{ kg}/\text{ha}^{-1}$ en el maíz) o se emite como óxido nitroso (hasta $0,34 \text{ mg N m}^{-2} \text{ hora}^{-1}$ en los campos de maíz). Los metales pesados se acumulan en los primeros 20 cm del suelo. Sin embargo su disponibilidad para las plantas es pequeña debido a los valores del pH alcalino y a que el suelo contiene materia orgánica en cantidades de moderadas a altas. Asimismo, los compuestos farmacéuticos se acumulan en la capa superficial del suelo, y se observó un incremento en la presencia de genes de resistencia a antibióticos. Además, en la década de los noventa se llevó a cabo un estudio epidemiológico en la zona, que reveló una gran prevalencia de infección por helmintos en los niños de la zona de riego en comparación con los de una zona aledaña donde se practicaba la agricultura de secano.

Hasta el 2015, solo se aplicaban las aguas residuales sin tratar en los campos, pero en el 2016 empezará a funcionar una gran planta de tratamiento de aguas residuales. Por consiguiente, será posible vigilar los cambios en las aguas residuales, el suelo y la calidad de los cultivos para evaluar el resultado del tratamiento y su efecto en la salud pública y los procesos ambientales. El carácter experimental de nuestro estudio y la recopilación de muestras permiten investigar los efectos a largo plazo del riego con aguas residuales y obtener información sólida a partir de la cual redactar directrices sobre el uso seguro de las aguas residuales en la agricultura.

Palabras clave: riego, aguas residuales sin tratar, contaminación ambiental, productividad, salud humana

1. Introducción

El valle del Mezquital, ubicado 80 km al norte del área metropolitana de la Ciudad de México, es un ejemplo de un sistema de tratamiento de suelo y acuífero de bajo costo, donde se captan $52 \text{ m}^3/\text{s}^{-1}$ (4,49 millones de $\text{m}^3/\text{día}^{-1}$) de aguas residuales sin tratar y escorrentía dentro de la cuenca cerrada de México, que luego se utiliza para regar tierra agrícola (figura 1). Al principio del siglo XX, el agua vertida se

utilizaba, en primer lugar, para generar electricidad en dos plantas ubicadas dentro del valle. Su uso para riego se autorizó oficialmente aguas abajo de estas plantas en 1912. A medida que el agua vertida se incrementaba también se extendía la superficie de tierra regada, que, en la actualidad, llega a unas 90.000 ha y beneficia a más de 46.000 personas en tres distritos de riego (DR), a saber: DR-003 Tula, DR-100 Alfajayucan y DR-112 Ajacuba (figura 1) (Conagua, 2010).

Los principales cultivos son alfalfa y maíz, pero también se producen avena forrajera, colza, centeno y algunos vegetales, como calabacín, coliflor y chiles. La producción promedio de maíz de 10 t/ha⁻¹ está por encima de la media nacional, que se obtiene con la agricultura de secano (2 t/ha⁻¹) y en aquella donde se utiliza agua de pozo para riego (8,6 t/ha⁻¹) (Conagua, 2010).

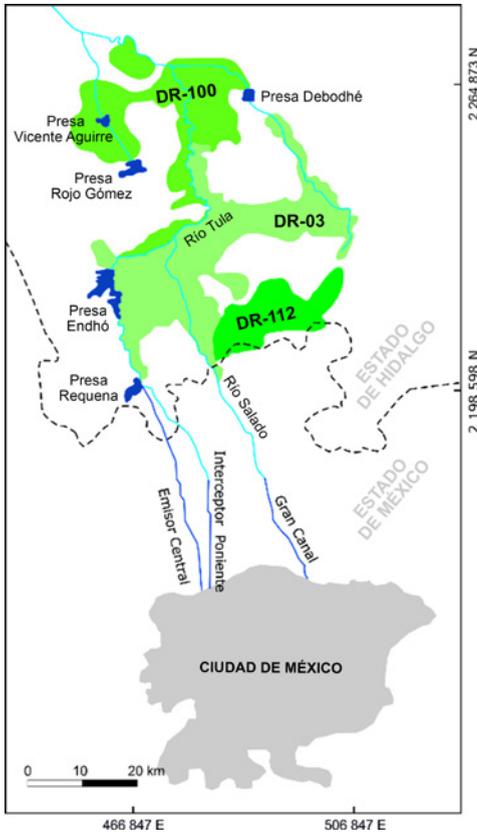


Figura 1: Ubicación del valle del Mezquital, norte de la Ciudad de México y los tres distritos de riego (DR): DR-003 (Tula), DR-100 (Alfajayucan) y DR-112 (Ajacuba) donde se utiliza agua residual sin tratar de la Ciudad de México; las concentraciones promedio y las desviaciones estándar de los distintos metales pesados y metaloides (N=9) (Guédron y colaboradores, 2014) y los rangos de concentración de los compuestos farmacéuticos (N=12) (Siemens y colaboradores, 2008) medidos en el agua residual vertida en el valle del Mezquital se encuentran en UTM 14Q

Las aguas residuales son, sobre todo, de origen doméstico; contienen un promedio total de sólidos en suspensión de 295 mg/l⁻¹ y 264 mg/l⁻¹, demanda química de oxígeno de 527 y 475 mg/l⁻¹ y una demanda bioquímica de oxígeno de 240 y 180 mg/l⁻¹ en las estaciones secas y lluviosas, respectivamente (Jiménez y Landa, 1998; Jiménez y Chávez, 1997). Poseen concentraciones elevadas de materia orgánica (COT: 35-188 mg/l⁻¹), nitrógeno total (37-38 mg/l⁻¹) y fósforo (2,7-3 mg/l⁻¹), pero también contienen sales solubles (principalmente NaCl y NaHCO₃), por lo que tienen una conductividad eléctrica de 1,4-1,7 μS/cm-1. Lo preocupante son las concentraciones elevadas de coliformes fecales (de 105 a 108 unidades formadoras de colonias, UFC/100 ml), *Streptococcus faecalis* (102 a 106 UFC/100 ml), *Clostridium perfringens* (103 a 106 UFC/100 ml), bacteriófagos somáticos (102 a 106 unidades formadoras de placas, UFP/ml), *Giardia* spp. (450 a 10.000 quistes/l) y huevos de helmintos (1,8 a 23 huevos de helmintos/l) (Navarro y colaboradores, 2015). En cada riego los suelos también reciben metales pesados y compuestos farmacéuticos en pequeñas concentraciones (Guédron y colaboradores, 2014; Gibson y colaboradores, 2007; Siemens y colaboradores, 2008) (tabla 1).

En esta región se llevaron a cabo varias investigaciones para analizar los efectos del riego con aguas residuales. En este caso se pretende describir el sistema actual de tratamiento a través de suelo y acuífero (SAT), así como revisar los principales hallazgos de los diferentes grupos de investigación en lo concerniente al suelo, los cultivos, la calidad del agua subterránea y la salud pública en la zona. Se hace hincapié en los resultados de las muestras tomadas en campos regados durante diferentes períodos en el siglo pasado, lo que no solo permite comprender los efectos a largo plazo de esta práctica, sino también sirve para prever el comportamiento de los distintos suelos y las propiedades de los cultivos en el futuro. Además, se informan los resultados de la observación de los casos aislados de riego, lo que sirve para comprender el funcionamiento del sistema actual de tratamiento de suelo y acuífero, y brindar recomendaciones para mejorar las prácticas de gestión actuales y mitigar el daño ambiental.

Al final del caso, se analiza el posible impacto de una nueva planta de tratamiento de aguas residuales

Tabla 1: Concentraciones promedio y desviaciones estándar de los distintos metales pesados y metaloides (N=9) (Guédron y colaboradores, 2014) y rangos de concentración de los compuestos farmacéuticos (N=12) (Siemens y colaboradores, 2008) medidos en el agua residual vertida en el valle del Mezquital.

Elemento/ sustancia	Grupo de clasificación anatómica, terapéutica, química (ATC2) de la OMS	Concentración en aguas residuales
Al (mg/l)	-	0,82 ± 0,03
As (mg/l)	-	0,013 ± 0,007
Cd (mg/l)	-	0,001 ± 0,001
Cr (mg/l)	-	0,015 ± 0,001
Cu (mg/l)	-	0,038 ± 0,002
Mn (mg/l)	-	0,37 ± 0,01
Ni (mg/l)	-	0,019 ± 0,003
Pb (mg/l)	-	0,14 ± 0,01
Se (mg/l)	-	0,005 ± 0,006
Zn (mg/l)	-	0,80 ± 0,01
HgT* (mg/l)	-	363,4 ± 18,1
Trimetoprima (µg/l)	Antibióticos de uso general	0,11 – 0,32
Claritromicina (µg/l)		0,07 – 0,12
Eritromicina (µg/l)		<0,01 – 0,08
Metoprolol (µg/l)	Agentes betabloqueantes	0,21 – 3,10
Ibuprofeno (µg/l)	M1: antiinflamatorios y productos antirreumáticos	0,22 – 0,54
Naproxeno (µg/l)		2,84 – 6,74
Diclofenaco (µg/l)	C10: agentes que reducen los lípidos séricos	0,25 – 0,55
Sulfasalazina (µg/l)		0,29 – 0,44
Bezafibrato (µg/l)	C10: agentes que reducen los lípidos séricos	0,03 – 0,10
Gemfibrozilo (µg/l)		<0,01 – 0,22

*HgT: mercurio total particulado

2. Descripción del sistema actual de tratamiento de suelo y acuífero

El valle del Mezquital presenta un clima semiárido, con precipitaciones anuales promedio de 700 mm en el sur y menos de 400 mm en el norte. La mayoría de las lluvias ocurren entre junio y septiembre. La evapotranspiración anual promedio es de 1800 mm. Antes de la adopción del sistema de riego actual con aguas residuales, se corría el riesgo de que haya sequías cuando se cultivaba el maíz durante la estación lluviosa, y la producción anual promedio era inferior a las 2 t/ha-1. También se cultivaba trigo, cebada y frijoles, pero la mayoría de la tierra se destinaba a pasturas extensivas para el alimento de ovejas (Melville, 1990).

El riego de las plantas forrajeras se realiza por inundación, y el maíz se riega por surcos. Esto permite asegurar la producción durante la estación lluviosa y cultivar en la estación seca. El sistema de uso de la tierra es la rotación entre alfalfa y maíz; la alfalfa se cultiva de 3 a 5 años, seguidos de 2 años en los que se alterna entre maíz en el ciclo primavera-verano y otro cultivo (como avena forrajera, cebada o centeno) en el ciclo otoño-invierno. Al final, el maíz se sustituye por colza o verduras, como calabacín, coliflor o chiles. Dado que la temperatura mensual promedio no fluctúa más de 2 °C en el transcurso del año (16 a 18 °C), la alfalfa se puede cortar cada 45 días, es decir, 10 veces al año, lo que representa una producción promedio de 100 t/ha-1 de biomasa fresca por año (25 t/ha-1 de masa seca; Siebe, 1998; Conagua, 2010).

Los suelos de los piedemontes extendidos y la parte más baja del valle se formaron a partir de depósitos aluviales y coluviales del período Cuaternario, que cubren depósitos de toba volcánica de fines del período terciario. Se pueden encontrar tres tipos de suelo: leptosoles, feozems y vertisoles (Siebe, 1994a). Los suelos leptosoles presentan una textura franco a franco-limosa, son de escasa profundidad, de menos de 25 cm de toba volcánica, recubierta de una capa enriquecida con carbonato cálcico (caliche). Los feozems son suelos franco-arcillosos de mediana profundidad (25 a 70 cm), mientras que los vertisoles son, por lo general, más profundos (100 a 120 cm) y poseen una textura más rica en arcilla (tabla 2). Todos estos suelos presentan un pH neutro a ligeramente alcalino, capacidades de intercambio catiónico (CIC) de medias a altas y contenido medio de materia orgánica (tabla 2).

Particularmente, los suelos feozems y vertisoles, que cubren más del 65 % del valle, tienen gran capacidad filtrante y amortiguadora (Siebe, 1994a).

Tabla 2: Características promedio de los suelos en el valle del Mezquital

Tipo de suelo	Profundidad (cm)	Arcilla (%)	pH	Materia orgánica (%)	CIC (cmol.kg ⁻¹)
Leptosol	23	23	7,5	3,8	20 – 32
Feozem	65	32	7,3	3,6	16 – 30
Vertisol	100	44	7,1	4,4	25 – 45

Fuente: Siebe 1994a

El valle del Mezquital tiene un acuífero de tres niveles, y el que se encuentra más cerca de la superficie se recarga en más del 90 % mediante las aguas residuales infiltradas de acuerdo con estudios de isótopos (Payne, 1975). Se calculó que la recarga artificial de las aguas subterráneas es de 25 m³/s⁻¹ (2,16 millones de m³/día⁻¹) (British Geological Survey, 1998).

En el estudio de Jiménez y Chávez (2004) se analizó la eficacia de la eliminación de contaminantes del agua de riego a través de la infiltración en el suelo en tres pozos diferentes. Tratamiento a través de suelo y acuífero (SAT) es especialmente eficaz en la eliminación de agentes patógenos (>99,9 % de eliminación), como Salmonella spp., quistes de E. histolytica, Shigella spp., huevos de helmintos y coliformes fecales. Asimismo, remueve por completo el xileno, etilbenceno, tetracloroetileno y cloroformo. Se elimina el total de partículas en suspensión, y la demanda bioquímica de oxígeno se reduce en más del 97 %. Los metales pesados, como Fe, Mn y Cr, se eliminan en un 88 %, mientras que el Cu, Pb, As y Hg se eliminan en un 52 a 80 %. Sin embargo, se comprobó que las sales solubles, en especial los nitratos, se lixivian del suelo y llegan al agua subterránea (1,5 a 77 mg/l⁻¹ de nitratos; Jiménez y Chávez, 2004). Recientemente también se midió la presencia de varios contaminantes nuevos en las aguas residuales

(tabla 1) y, algunos de ellos, en especial, los compuestos ácidos, como naproxeno, ibuprofeno, diclofenaco y sulfasalazina, también se encontraron en aguas subterráneas poco profundas en concentraciones que oscilan entre 0,21 y 2; 0,51 y 0,6; 0,04 y 0,13; y 0,31 y 0,78 $\mu\text{g}/\text{l}^{-1}$, respectivamente (Siemens y colaboradores, 2008).

El agua subterránea recargada cumple con el promedio regional correspondiente a los criterios mexicanos de calidad del agua, y se utiliza tras la cloración para proveer de agua a más de 700.000 habitantes de la región. Sin embargo, los coliformes totales y fecales, y las concentraciones de sodio, nitrato, mercurio y plomo superan los límites máximos permisibles en algunos pozos y en períodos particulares de muestreo, según lo informado por varios autores, por lo que se debe considerar la filtración por membranas para su potabilización (Jiménez y Chávez, 2004).

2.1. Impactos en la salud pública

En la década de los noventa, el Instituto Nacional de Salud Pública (INSP) en colaboración con la Escuela de Higiene y Medicina Tropical de Londres llevaron adelante un estudio epidemiológico en la zona para investigar la prevalencia de infecciones gastrointestinales en las familias de los agricultores (Blumenthal y colaboradores, 1991-92; Blumenthal y colaboradores, 2000; Blumenthal y colaboradores, 2001; Cifuentes, 1998). En el estudio se consideraron las familias de agricultores de las comunidades del valle del Mezquital que utilizaban aguas residuales para riego y se las comparó con las familias de agricultores de las zonas donde se practicaba la agricultura de secano. Entre los impactos en la salud humana, las infecciones intestinales por helmintos representaron el mayor riesgo por la exposición a aguas residuales sin tratar. El riego con aguas residuales también se asoció con un mayor riesgo de infecciones por *Entamoeba histolytica* en niños, mientras que la prevalencia de otras infecciones gastrointestinales, como las producidas por *Giardia lamblia*, solo se relacionaron en parte con la exposición a aguas residuales sin tratar, dado que las prácticas de higiene deficientes a raíz de la situación de pobreza de las zonas no regadas también incidieron en la prevalencia de infecciones gastrointestinales (Cifuentes y colaboradores, 1991; Cifuentes y colaboradores, 2000; Siebe y Cifuentes, 1995).

2.2. Efectos en el suelo y la calidad de los cultivos

Como se indicó antes, los suelos de la región tienen muy buena capacidad de sorción, debido a su textura franco a limosa, la materia orgánica en cantidades de moderadas a altas y a sus valores del pH neutro a ligeramente alcalino. El muestreo de los campos que se han regado durante diferentes períodos, a saber: 0, 12, 23, 35, 50, 84 y 99 años, ha demostrado que el riego con aguas residuales incrementa el contenido de materia orgánica del suelo en más del 60 % durante los primeros 30 a 40 años, hasta que se alcanza un nuevo equilibrio entre el aumento de la producción de biomasa y su descomposición (figura 2a). El incremento de la materia orgánica refuerza aún más la capacidad de sorción de estos suelos, ya que la materia orgánica humidificada tiene la capacidad de adsorber no solo nutrientes, sino también contaminantes.

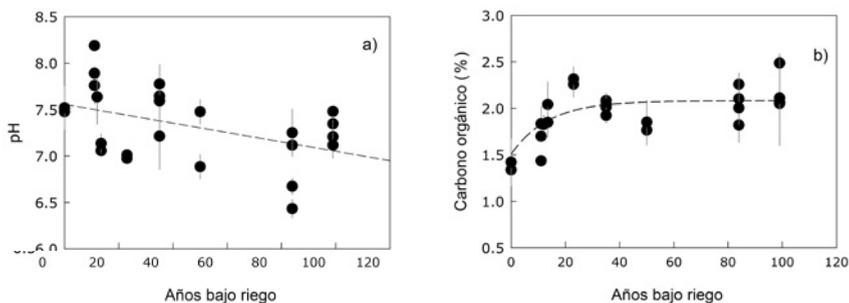


Figura 2: Comportamiento de a) los valores del pH y b) el contenido de carbono orgánico del suelo en los primeros 30 cm del suelo con tiempo de riego (Chapela-Lara 2011). Las barras de error son 2 desviaciones estándar.

Los valores del pH tienden a disminuir ligeramente con el paso del tiempo alrededor de 1 unidad de pH, aunque la pendiente del modelo ajustado de regresión no es significativa, lo que revela la gran capacidad de amortiguación de estos suelos. No obstante, la reducción en el pH puede atribuirse a los protones producidos por la nitrificación del nitrógeno amoniacal que ingresa al suelo con el agua residual, como se ha demostrado en varios casos de riego (Hernández y colaboradores, 2016).

El estudio de campos regados durante períodos diferentes también ha revelado que los metales pesados se acumulan en la capa superficial

del suelo, donde se adhieren sobre todo a la materia orgánica de este (Siebe, 1994b; Siebe y Cifuentes, 1995; Chapela-Lara, 2011; Guédron y colaboradores, 2014). El contenido de metales en el suelo aumenta de manera lineal con el tiempo (figura 3).

Se ha investigado la capacidad de adsorción del suelo en experimentos por lote en el laboratorio; se comprobó que esta era muy alta (Siebe y Fischer, 1996) y aumenta con el riego, lo que se atribuye al incremento en el contenido de materia orgánica en el suelo.

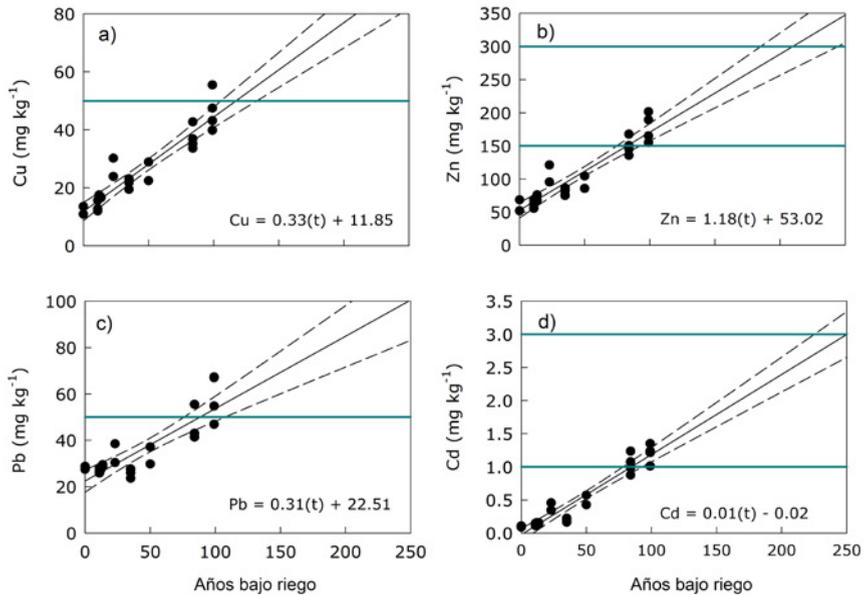


Figura 3: Comportamiento de los contenidos totales de a) Cu, b) Zn, c) Pb y d) Cd en el suelo con tiempo de riego (Chapela-Lara 2011).

Las líneas horizontales verdes indican las concentraciones de referencia de metales pesados o los períodos establecidos por la Unión Europea para suelos agrícolas; si se sobrepasan estos períodos, es preciso realizar otros estudios para evaluar la movilidad y disponibilidad de los contaminantes en las plantas (McGrath y colaboradores, 1994). También se muestra una proyección de un incremento lineal en el tiempo (la línea negra con las líneas de puntos representan una confianza del 95 %).

En los suelos regados durante 100 años, los contenidos totales de Cu, Zn, Pb y Cd alcanzaron los valores umbrales más bajos establecidos por las normas de la Unión Europea para suelos agrícolas (figura 3). El análisis de la alfalfa y los granos de maíz confirmó que los cultivos absorben estos metales en cantidades pequeñas, y que las concentraciones aumentan con el tiempo bajo riego. Sin embargo,

aún no se alcanzan los límites máximos permisibles para la alfalfa, a saber: 0,5; 10, 20 y 50 mg/kg⁻¹ de peso seco (PS) para Cd, Pb, Cu y Zn, respectivamente (OMS, 1996) (figura 4).

Los modelos ajustados de regresión dan un indicio de cuándo se espera que se sobrepasen estos límites máximos permisibles, es decir dentro de 304 a 406 años para el Cd, 515 a 995 años para el Cu, 400 a 500 años para el Zn y más de 14.200 años para el Pb. Por otro lado, los modelos ajustados también se pueden usar para calcular las concentraciones que estos elementos no deben sobrepasar en el agua residual, a fin de que el aporte esté equilibrado con la absorción del cultivo y no se acumule en los suelos con el tiempo. Tal como se puede observar en la tabla 3, estas concentraciones son de una a dos magnitudes más pequeñas que las establecidas en las guías mexicanas para la calidad del agua de riego (Diario Oficial de la Federación, 1997).

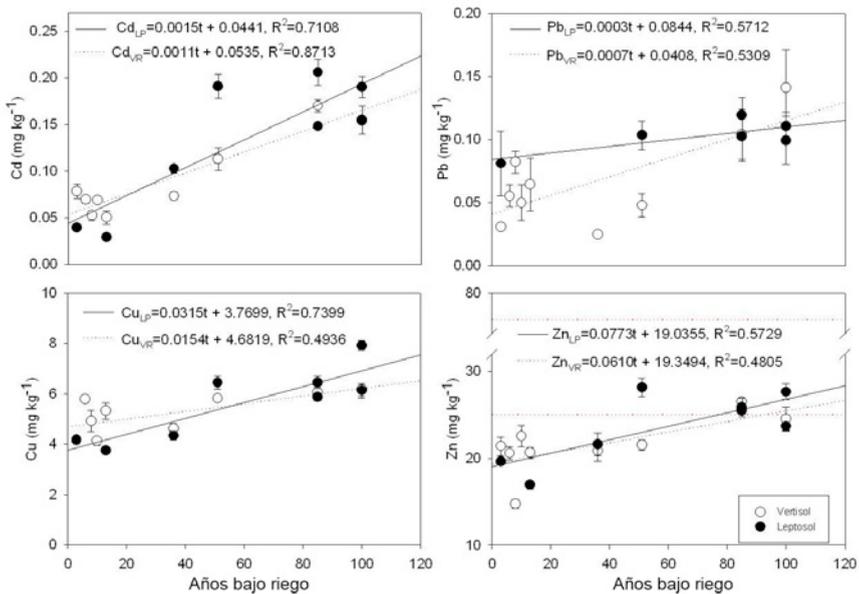


Figura 4: Concentraciones de metales pesados en la alfalfa en campos regados con aguas residuales durante diferentes periodos de duración (Cayetano-Salazar, 2012). VR: datos de los suelos vertisoles; LP: datos de los suelos leptosoles.

Tabla 3: Concentraciones aproximadas de metales pesados en las aguas residuales no acumulados en el suelo a lo largo del tiempo y comparación con las concentraciones máximas permisibles de acuerdo con las normas mexicanas

Metal	Concentración en agua de riego según tipo de suelo:		Límites máximos permisibles en agua de riego (mg/l)
	Vertisol (mg/l)	Leptosol (mg/l)	
Cu	0,03	0,021	0,5
Zn	0,075	0,053	20,0
Pb	0,015	0,011	0,6

Fuente: Diario Oficial de la Federación 1997

Asimismo, se analizaron las muestras de los campos regados durante diferentes períodos para determinar las concentraciones de varios compuestos farmacéuticos, como antibióticos, así como genes de resistencia a antibióticos (Dalkmann y colaboradores, 2012). Las concentraciones de ciprofloxacina, sulfametoxazol y carbamazepina aumentaron durante los primeros 20 a 30 años. Luego las concentraciones se mantuvieron más o menos constantes en 1,4 µg/kg (ciprofloxacina), 4,3 µg/kg (sulfametoxazol) y 5,4 µg/kg (carbamazepina). El diclofenaco, naproxeno y bezafibrato no se acumulan en los suelos. Se trata de compuestos ácidos que tienen una carga negativa en el pH alcalino de los suelos y, por lo tanto, no quedan retenidos en el suelo.

Los genes de resistencia a fluoroquinolonas *qnrS* y *qnrB* solo se hallaron en dos de los suelos regados, mientras que las concentraciones relativas de genes de resistencia a sulfadiazinas, como los genes *sul 1* y *sul 2*, eran mayores en los suelos regados que en los suelos no regados. Los valores absolutos de los genes *sul* aumentaban a medida que se prolongaba el tiempo de riego junto con la presencia de *Enterococcus spp.*, ARNr 23S y el total de ARNr 16S. El incremento en las concentraciones totales de antibiótico en el suelo no está acompañado de un aumento en la abundancia relativa

de los genes de resistencia investigados. No obstante, el riego con aguas residuales incrementa la concentración absoluta de los genes de resistencia en los suelos debido a un aumento a largo plazo en la biomasa microbiana total.

2.3. Impactos del alto aporte de nitrógeno en el sistema

El riego con aguas residuales aporta nitrógeno en exceso a los cultivos. El aporte promedio anual de N a la alfalfa es de 527 kg N ha^{-1} , y al maíz es de 326 kg N ha^{-1} (Siebe, 1998). La alfalfa es un cultivo que no depende de fuentes de N del suelo, ya que crece en simbiosis con las bacterias que pueden fijar el N atmosférico. El maíz se suele fertilizar con urea o sulfato de amonio con lo cual el cultivo recibe de 120 a 180 kg/ha^{-1} de manera complementaria. Hemos investigado el destino de las grandes cantidades de N que ingresan a este agroecosistema mediante la supervisión de casos aislados de riego (Hernández y colaboradores, 2016; González-Méndez y colaboradores, 2015) y el cálculo de los equilibrios de agua y N. Hemos hallado que en cada riego se incorporan al suelo un volumen de agua intersticial de hasta 3,5; es decir, 2,5 veces más de agua de lo que el suelo puede retener. El excedente de agua se escurre rápido tras el riego por el subsuelo, y el 5 % llega al acuífero. Dentro del suelo hay vías preferenciales por donde circula el agua, que transportan los solutos velozmente hacia las capas más profundas. El nitrógeno ingresa a los campos en forma de amonio (56 %) o N orgánico (44 %); parte del amonio se adsorbe de manera temporal en los minerales arcillosos, pero otra parte se transforma de inmediato en nitrato y se lixivia hacia las capas más profundas del suelo y la zona insaturada más allá de las raíces. Parte del nitrógeno se desnitrifica y emite como N_2O , o incluso quizás como N_2 , a la atmósfera. En el estudio de González-Méndez y colaboradores (2015), se informan emisiones promedio de N_2O de 0,06 y $0,34 \text{ mg N m}^{-2} \text{ hora}^{-1}$ de los campos de alfalfa y maíz regados con aguas residuales, respectivamente. Asimismo, las emisiones de CO_2 se incrementan en los suelos regados con aguas residuales cuando se los compara con los suelos de la agricultura de secano ($77,5$ frente a $16,6 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) debido al incremento de la actividad microbiana en los suelos regados (González-Méndez y colaboradores, 2015).

3. Desafíos futuros

El problema más agudo en lo que respecta al sistema actual de tratamiento a través de suelo y acuífero (SAT) en el valle del Mezquital se relaciona con el mayor riesgo de infecciones gastrointestinales. Se ha llevado a cabo la gestión de riesgos sobre todo a través de la restricción de cultivos, por ejemplo, solo se permiten las plantas forrajeras y granos o vegetales de tallo largo, y se prohíben todos los vegetales que están en contacto directo con el agua residual y el suelo y, en especial, aquellos que se consumen crudos. El riesgo de degradación del suelo a través de la acumulación de sales solubles desaparece gracias al riego excesivo, lo que permite que las sales se lixivien de la zona de la raíz y se realice la alimentación de aguas subterráneas mencionada.

A fin de afrontar las limitaciones de higiene que surgen a partir del riego con aguas residuales sin tratar y satisfacer los requisitos ya establecidos desde la década de los noventa en las normas mexicanas, se está construyendo una gran planta de tratamiento de aguas residuales, que debería empezar a funcionar en el 2016 (Conagua, 2011). Se tratarán $23 \text{ m}^3/\text{s}^{-1}$ (1,99 millones de $\text{m}^3/\text{día}^{-1}$) de aguas residuales urbanas del área metropolitana de la Ciudad de México mediante un sistema biológico aerobio de lodos activados; durante la estación lluviosa, tendrá la capacidad de tratar $12 \text{ m}^3/\text{s}^{-1}$ (1,04 millones de $\text{m}^3/\text{día}^{-1}$) complementarios de escorrentía mediante el tratamiento fisicoquímico avanzado. Los costos de la inversión son de 751,1 millones de USD, donde el gobierno federal aporta el 49 % y los inversores privados el 51 %. Los costos de funcionamiento aproximados son de 85,3 millones de USD por año (el equivalente a 0,12 USD/ m^3 para el agua residual con tratamiento biológico y 0,07 USD/ m^3 para el agua residual con tratamiento fisicoquímico). Estos costos se cobrarán a los consumidores del área metropolitana de la Ciudad de México en sus facturas de agua potable.

Entre los beneficios previstos se encuentran la reducción de los riesgos para la salud, en especial, de las infecciones por helmintos, y una disminución importante del contenido de materia orgánica y las partículas en suspensión; por otro lado, se espera que la mayor parte del N y P solubles se mantenga en los efluentes para que se pueda reciclar a través del riego. Se supone que la cloración del efluente reducirá aún más los riesgos para la salud. Es probable que también se puedan cultivar

vegetales que se consumen crudos. Dado que estos tienen un precio de mercado mucho mayor, se espera que también aumente el ingreso de los agricultores. La disminución de las partículas en suspensión en las aguas residuales también permitirá la práctica del riego por goteo, lo que mejora significativamente la eficacia del uso del agua. El aporte de nitrógeno también debe corresponder con las necesidades de los cultivos en este sistema de uso de la tierra. Por consiguiente, la mejora de la eficacia en el uso del agua y la reducción en la carga de N también deben impedir la lixiviación de nitratos y las emisiones de N_2O .

Sin embargo, es importante destacar que, en el mediano plazo, este sistema ya no contribuirá a la recarga artificial de acuíferos. En el futuro, será preciso recurrir a otras fuentes de agua potable para los habitantes del valle. Asimismo, es necesario tomar medidas importantes para evitar la salinización del suelo, ya que es muy probable que el tratamiento de agua incremente las concentraciones de sales solubles. Se debe tener un cuidado especial para conservar el contenido de materia orgánica en el suelo para evitar la movilización de los contaminantes que se encuentran retenidos en ella. Otro desafío será el manejo de los lodos que se producen durante el tratamiento del agua. El plan actual es confinar el lodo seco, pero también se está analizando la posibilidad de usarlo como enmienda del suelo, en caso de que el lodo cumpla con las concentraciones umbrales para contaminantes orgánicos e inorgánicos establecidas en la legislación mexicana (Diario Oficial de la Federación, 2003). Esta situación implica que no se atenuarán los riesgos ambientales de eutrofización y contaminación mencionados, sino que quizás se incrementen, dado que las cargas de nutrientes y contaminantes serán mucho mayores y ocurrirán en intervalos más breves, lo que ocasionará un mayor desequilibrio. Otra preocupación es la formación de trihalometanos como consecuencia de la cloración, al entrar en contacto con los compuestos orgánicos que quedan en el agua y que no se eliminan por completo con el tratamiento de las aguas residuales.

4. Lecciones aprendidas y necesidad de investigaciones futuras

Sin lugar a dudas, el sistema agrícola actual ha mejorado la productividad de los cultivos en esta región semiárida. La infiltración de aguas residuales ha favorecido la recarga del acuífero, lo que

constituye un recurso hídrico valioso para los habitantes. El tratamiento de suelo y acuífero es muy eficaz a la hora de eliminar los agentes patógenos, los sólidos en suspensión, la materia orgánica y la mayoría de los contaminantes. Sin embargo, no sucede lo mismo con las sales solubles y otros tipos de metales solubles, como los complejos organometálicos de Pb, los compuestos orgánicos de carga negativa o solubles y sus metabolitos. El riego por inundación aporta nitrógeno en exceso a los suelos y, aunque el sistema actual utiliza el nitrógeno de manera bastante eficiente, el agua subterránea recargada está contaminada con nitratos. Varios contaminantes, como los metales pesados y algunos productos farmacéuticos, se acumulan en la capa superficial del suelo en el mediano plazo y son absorbidos por los cultivos en pequeñas cantidades. El estudio de los suelos regados durante diferentes períodos indica que, a largo plazo, el sistema actual de TSA no es sostenible. Además las investigaciones epidemiológicas han revelado que los agricultores y sus familias que viven dentro de los distritos de riego con aguas residuales corren mayores riesgos de sufrir infecciones gastrointestinales, especialmente, por patógenos que sobreviven en el ambiente en forma de quistes.

Todos estos hallazgos son una señal clara de que es necesario mejorar el sistema de gestión actual. En primer lugar, se debe prestar atención a las medidas de higiene que los agricultores deben tomar. También se debe optimizar la cantidad de agua y nutrientes que se vierte en los campos. Para obtener la información necesaria y cumplir con este objetivo, se pueden realizar estudios de campo donde se evalúen las diferentes prácticas de manejo y se controle el equilibrio de agua y nutrientes. El estudio de campos regados durante diferentes períodos arroja información útil que hace posible el establecimiento de pautas para el uso más seguro del agua residual en esta región y otros lugares con suelos similares.

Las operaciones iniciales de la nueva planta de tratamiento de aguas residuales ofrecen una oportunidad única de evaluar si se justifican la gran inversión y los gastos de explotación como medida para reducir la incidencia de infecciones gastrointestinales. En la actualidad, nuestro grupo de trabajo está realizando un estudio epidemiológico con el fin de comparar la incidencia de diarrea en los niños menores de 5 años en las comunidades que están expuestas a aguas residuales sin tratar y que pronto empezarán a utilizar aguas residuales tratadas para regar sus cultivos. Por nuestra parte, seguiremos supervisando los campos

para medir el impacto de los cambios de la calidad del agua en la materia orgánica del suelo y el equilibrio de nitrógeno del sistema. Asimismo, se le prestará especial atención al comportamiento de los metales pesados y los contaminantes orgánicos, como productos farmacéuticos, en la interrelación entre el suelo, el acuífero y los cultivos. En este caso, es preciso investigar la relevancia del aumento de genes de resistencia respecto a los tratamientos con antibióticos.

Referencias

- Blumenthal, U.J., B. Abisudjak, E. Cifuentes, S. Bennett, y G. Ruiz-Palacios. (1991–1992). Recent epidemiological studies to test microbiological quality guidelines for wastewater use in agriculture and aquaculture. *Public Health Reviews* 19(1–4), 237–242.
- Blumenthal, U.J., D.D. Mara, A. Peasey, G. Ruiz-Palacios, y R. Stott. (2000). Guidelines for the microbiological quality of treated wastewater used in agriculture: Recommendations for revising WHO guidelines. *Bulletin of the World Health Organization* 78(9), 1104–16.
- Blumenthal, U.J., B. Abisudjak, E. Cifuentes, S. Bennett, y G. Ruiz-Palacios. 2001. The risk of enteric infections associated with wastewater reuse: The effect of season and degree of storage of wastewater. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene* 95(2), 131–37.
- British Geological Survey (BGS) y Comisión Nacional del Agua (can). (1998). Impact of wastewater reuse on groundwater in the Mezquital Valley, Hidalgo State, México. Informe final. Keyworth, Nottinghamshire: NERC.
- Cayetano-Salazar, M. (2012). Transferencia suelo-planta de metales pesados en parcelas regadas con agua residual en el Valle del Mezquital. (Tesis de maestría). UNAM.
- Chapela-Lara, M. (2011). Variación temporal en el contenido de metales pesados regados con aguas residuales. (Tesis de maestría). UNAM.
- Cifuentes, E. (1998). The epidemiology of enteric infections in agricultural communities exposed to wastewater irrigation: Perspectives for risk control. *International Journal of Environmental Health Research* 8(3), 203–13.
- Cifuentes, E., U. Blumenthal, G. Ruiz-Palacios, y S. Bennett. (1991–1992). Health impact evaluation of wastewater use in Mexico. *Public Health Reviews* 19, 243–250.

Cifuentes, E., M. Gomez, U. Blumenthal, M.M. Tellez-Rojo, I. Romieu, G. Ruiz-Palacios, y S. Ruiz-Velazco. 2000. Risk factors for Giardia intestinalis infection in agricultural villages practicing wastewater irrigation in Mexico. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene* 62(3), 388–92.

Conagua (Comisión Nacional del Agua). (2010). Estadísticas agrícolas de los distritos de riego. Año 2007–2008. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.

Conagua, 2011. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Atotonilco. Folleto emitido por la Comisión Nacional del Agua. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.

Dalkmann, P., M. Broszat, C. Siebe, E. Willashek, T. Sakinic, J. Huebener, W. Amelung, E. Grohmann, y J. Siemens. (2012). "Accumulation of Pharmaceuticals, Enterococcus, and Resistance Genes in Soils Irrigated with Wastewater for Zero to 100 Years in Central Mexico." *PLoS ONE* 7(9), e45397. doi:10.1371/journal.pone.0045397.

Norma Oficial Mexicana. (1997). Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. *Diario Oficial de la Federación*, México: NOM 001-ECOL-1996

Norma Oficial Mexicana. (2003). Protección ambiental.-Lodos y biosólidos.-Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. *Diario Oficial de la Federación*, México: NOM-004-SEMARNAT-2002.

Gibson, R., E. Becerril-Bravo, V. Silva-Castro, y B. Jiménez. (2007). Determination of acidic pharmaceuticals and potential endocrine, disrupting compounds in wastewaters and springwaters by selective elution and analysis by gas chromatography-mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 1169, 31–39.

González-Méndez, B., R. Webster, S. Fiedler, E. Loza-Reyes, J.M. Hernández, LG. Ruíz-Suárez, y C. Siebe. (2015). Emissions of greenhouse gases from cropland irrigated with waste water: a case study in the Mezquital Valley of Mexico. *Atmospheric Environment* 101, 116–24.

Guédron, S., C. Duwig, B.L. Prado, D. Point, M. G. Flores, y C. Siebe. (2014). (Methyl) mercury, arsenic and lead contamination of the world's largest wastewater irrigation system: irrigation district of Mezquital valley (Hidalgo state – Mexico). *Soil Water Air Pollution*, 225(8), 2045–64.

Hernández, J. L., B. Prado, M. Cayetano-Salazar, W. A. Bischoff y C. Siebe C. (2016). Ammonium-nitrate dynamics in the critical zone during single waste water irrigation events. *Journal of Soils and Sediments* (en preparación).

Jiménez, B. y A. Chávez. (1997). Treatment of Mexico City Wastewater for Irrigation Purposes. *Environmental Technology* 18, 721–30.

Jiménez, B., y A Chávez. (2004). Quality assessment of an aquifer recharged with wastewater for its potential use as drinking source: "El Mezquital Valley" case. *Water Science and Technology* 50, 269–76.

Jiménez, B., y Landa, L.H. 1998. Physical-chemical and bacteriological characterization of wastewater from Mexico City. *Water Science and Technology* 37, 1-8.

McGrath, S.P., A.C. Chang, A.L. Page, y E. Witter. (1994). Land application of sewage sludge: scientific perspectives of heavy metal loading limits in Europe and the United States. *Environmental Reviews* 2, 108–18.

Melville, E.G.K. (1994). *A Plague of Sheep: Environmental Consequences of the Conquest of Mexico*. Cambridge y Nueva: Cambridge University Press.

Navarro, I., A. Chávez, J.A. Barrios, C. Maya, E. Becerril, S. Lucario, y B. Jiménez. (2015). Wastewater reuse for irrigation. Practices, Safe Reuse and Perspectives. Case 2. En Muhammad Salik Javaid (Ed.), *Irrigation and Drainage. Sustainable Strategies and Systems*. InTech.

Payne, B. (1975). La interacción del agua de riego con el agua subterránea y el río Tula en el Valle del Mezquital. Informe final. Sección de Hidrología Isotópica del OIEA.

Siebe, C. (1994a). Akkumulation, Mobilität und Verfügbarkeit von Schwermetallen in langjährig mit städtischen Abwässern bewässerten Böden in Zentralmexiko. Hohenheimer Bodenkundliche Hefte 17. Hohenheim: Hohenheim Verlag.

Siebe, C. (1994b). Acumulación y disponibilidad de metales pesados en suelos regados con aguas residuales en el distrito de riego 03, Tula, Hidalgo, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 10, 15–21.

Siebe, C. (1998). Nutrient inputs to soils and their uptake by alfalfa through long-term irrigation with untreated sewage effluent in Mexico. *Soil Use and Management* 13, 1– 5.

Siebe, C., y E. Cifuentes. (1995). Environmental Impact of Wastewater Irrigation in Central Mexico- An overview. *International Journal of Environmental Health Research* 5(2), 161-73.

Siebe, C., y W.R. Fischer. (1996). Adsorption of Pb, Cd, Cu and Zn by two soils of volcanic origin under long term irrigation with untreated sewage effluent in Central Mexico. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 159, 357–64.

Siemens, J, G. Huschek, C. Siebe, and M. Kaupenjohann. "Concentrations and mobility of human pharmaceuticals in the world's largest wastewater irrigation system, Mexico-City-Mezquital Valley." *Water Research* 42 2008, 2124–34.

Organización Mundial de la Salud (OMS). (1996). *Trace elements in human nutrition and health*. Ginebra: OMS.

CASO 8

Tratamiento ecológico de aguas residuales para la reutilización en la agricultura (India)

Ravinder Kaur¹

Resumen

Las lagunas de oxidación y los procesos de lodos activados constituyen las dos tecnologías de tratamiento de aguas residuales que más se han implementado en la India. Sin embargo, estos procesos son costosos, y su mantenimiento y funcionamiento son complejos. En vista de estas limitaciones, en los últimos años, se le ha prestado mayor atención a la tecnología de humedales artificiales. Sin embargo, el índice de adopción de la tecnología de humedales para el tratamiento de aguas residuales en países en desarrollo ha sido bajo debido a que se cree que estas tecnologías necesitan mucho espacio. En general, se ha comprobado que los sistemas de humedales en reactores de carga semicontinua con menor tiempo de retención hidráulica (TRH) requieren una superficie más pequeña de tierra, lo que parece ser más aceptable en los países en desarrollo. Teniendo en cuenta esto, se implementó una planta de tratamiento de aguas residuales municipales, con reactores de carga semi-continua (TRH <1 día), tecnología de humedales de flujo subterráneo vertical y una capacidad de 1500 l/día., en el sitio de captación de aguas residuales de la parcela del Instituto de Investigaciones Agrícolas de la India (IARI, por sus siglas en inglés). La planta piloto ha estado en funcionamiento desde noviembre del 2009,

¹ Ravinder Kaur ✉

Director de proyectos, Water Technology Centre, y director (interino), Indian Agricultural Research Institute (IARI), Nueva Delhi, India
Correo electrónico: rk132.iari@gmail.com; pd_wtc@iari.res.in

En: Hiroshan Hettiarachchi and Reza Ardakanian (eds). *Uso seguro de las aguas residuales en la agricultura: ejemplos de buenas prácticas* ©UNU-FLORES 2016

y constantemente se evalúa su eficacia en la remoción de nutrientes y metales pesados (contaminantes). La eficacia en la reducción masiva de contaminantes a largo plazo del sistema piloto se demostró a través de su capacidad de disminuir la turbiedad de las aguas residuales y las concentraciones de nitrato, fosfato y potasio en hasta un 81 %, 68 %, 48 % y 47 %, respectivamente. En términos generales, los sistemas de humedales con vegetación ofrecen mayores ventajas que aquellos sin vegetación. La capacidad de remoción de nutrientes parece ser mayor en los humedales que utilizan la variedad *Phragmites karka*. Por otro lado, se observó que los sistemas que usan la variedad *Typha latifolia* se asocian con un mayor potencial de oxidación y, por consiguiente, con una eficacia superior en la reducción del sulfato (50,51 %). Asimismo, estos humedales se relacionan con una eficacia de remoción de Ni (62 %), Fe (45 %), Pb (58 %), Co (62 %) y Cd (50 %) significativamente superior. En un análisis de huella ecológica y sostenibilidad donde se compararon los sistemas de humedales experimentales con una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) convencional hipotética se demostró que los primeros presentaban un nivel de sostenibilidad 1500 veces superior. Sobre la base de estas experiencias, recientemente se ha ampliado el sistema e incorporado un humedal de flujo horizontal subsuperficial con una capacidad de 2,2 millones de l/día para tratar las aguas residuales de la colonia Krishi Kunj, que se encuentra junto a la parcela del Instituto de Investigaciones Agrícolas de la India (IARI). El sistema ampliado ofrece el potencial de regar 132 ha de tierra de la mencionada parcela.

Palabras clave: humedales artificiales, energía, presupuesto ecológico, sostenibilidad, fitorremediación

1. Antecedentes

La escases de agua dulce, la generación de mayores volúmenes de aguas residuales, la degradación de los recursos de agua dulce y la inseguridad alimentaria asociada, producto de la rápida urbanización e industrialización, están impulsando el uso de agua de calidad marginal en la agricultura en muchos países. La reutilización de las aguas residuales en la agricultura está cobrando una rápida popularidad en todo el mundo, ya que cierra el círculo

entre la demanda de agua y la eliminación de las aguas residuales, y se transforma en un recurso fertilizante para los agricultores de bajos recursos. Sin embargo, debido a la falta de instalaciones de tratamiento adecuadas y concientización en los países en desarrollo, la aplicación no planificada de aguas residuales crudas está aumentando el riesgo de sostenibilidad agrícola y salud ambiental y pública. Por consiguiente, para la disposición agrícola segura (con ganancias óptimas), el tratamiento seguro, económico y eficaz de las aguas negras es uno de los problemas más desafiantes que se enfrenta en todo el mundo.

Las lagunas de oxidación y los procesos de lodos activados constituyen los dos métodos más comunes de tratamiento de aguas residuales municipales de la India. Estos procesos son costosos y requieren de un mantenimiento y funcionamiento complejo. Además, debido al diseño inadecuado, el escaso mantenimiento, las frecuentes interrupciones en el suministro eléctrico y la falta de profesionales técnicos, estas plantas convencionales de tratamiento de aguas residuales no funcionan correctamente y, por lo tanto, permanecen cerradas la mayor parte del tiempo. En vista de estas limitaciones, en los últimos años, la tecnología de humedales artificiales (Mitsch y Gosselink, 2007) ha recibido mayor atención. Sin embargo, la tasa de adopción en los países en desarrollo ha sido bastante baja (Denny, 1997), principalmente debido a la creencia general de que estas tecnologías requieren grandes extensiones de tierra. Se ha comprobado que los sistemas de humedales con menor tiempo de retención hidráulica (TRH) suelen requerir una superficie de tierra más pequeña. Además, se ha informado que los reactores de carga semicontinua (con mayor tiempo de detención) se asocian no solo con áreas de tratamiento menores (Mehrdadi y colaboradores, 2009), sino también con una mayor capacidad de remoción de contaminantes. Se ha observado que esta particularidad ha incidido en una mayor aceptabilidad en los países en desarrollo, como la India. Sin embargo, estos sistemas de humedales alimentados por lotes, con un TRH de <1 día, hasta el momento, no se han probado de manera extensiva en países tropicales en vías de desarrollo.

Teniendo en cuenta los datos mencionados, se creó una planta piloto basada en la tecnología de humedales artificiales en la parcela regada con aguas residuales del Instituto de Investigaciones Agrícolas de la India (IARI) con el objetivo de evaluar a) su eficacia

en la remoción de contaminantes y potencial de incrementar el suministro de agua de riego en la parcela del IARI y b) la huella ecológica y sostenibilidad en comparación con una planta de tratamiento de aguas residuales convencional.

2. La iniciativa pionera

En vista de las limitaciones mencionadas, entre el 2009 y el 2011, se conceptualizó y desarrolló una planta de tratamiento de aguas residuales ecológica, de bajo consumo energético, descentralizada, novedosa, sobre la base de un modelo de negocio integrado. Luego entre el 2011 y el 2013, se amplió a los fines de gestionar las aguas residuales urbanas provenientes de las colonias Krishi Kunj y Loha Mandi y su reutilización para riego y acuicultura en el recinto del Instituto de Investigaciones Agrícolas de la India (IARI).

2.1. Situación previa a la iniciativa

El recinto del IARI se encuentra ubicado en el corazón del Territorio Capital Nacional (TCN), Nueva Delhi (India), y lo atraviesa una red de desagües de aguas residuales, cuya descarga total llega a ser de 700 ha-m/año (o 20 millones de l/día) aproximadamente. Estos desagües reciben los efluentes domésticos e industriales que se generan en las zonas residenciales adyacentes y dentro del recinto del IARI, así como de una combinación compleja de unidades industriales y comerciales de los alrededores de la microcuenca del IARI.

Antes de la implementación de la iniciativa, las aguas residuales urbanas (sin tratar), que se producían en las colonias Krishi Kunj y Loha Mandi, atravesaban la parcela del IARI y luego se mezclaban con el desagüe cercano de Loha Mandi (una rama del canal de desagüe Najafgarh) y el río Yamuna. Se determinó que las aguas residuales están asociadas con niveles de turbiedad interestacional de 200 a 1000 UNT; niveles de DBO de 230 a 730 ppm; fosfato de 3 a 28 ppm; nitrato de 0,1 a 12 ppm; sulfato de 11 a 99 ppm; níquel de 0,1 a 1,3 ppm; cromo de 1,5 a 2,3 ppm; plomo de 0,05 a 0,28 ppm; zinc de 0,31 a 4,65 ppm y hierro de 0,41 a 23,60 ppm. Además de fomentar la reproducción

masiva de mosquitos en la zona de la parcela y los barrios urbanos, se informó que la acumulación continua del agua residual ocasionaba la degradación del suelo y del agua subterránea de las parcelas del IARI. En un minucioso análisis de la contaminación total con metales pesados en la zona de la parcela (por donde circulaban las aguas residuales urbanas sin tratar), se comprobó que algunos metales presentaban valores que superaban los límites permisibles en 1,53 veces en el caso del cromo total (253,27 mg/kg), 0,97 veces para el zinc (393,63 mg/kg), 3,09 veces para el cobre (122,65 mg/kg) y 1,30 veces para el plomo (80,44 mg/kg) en los suelos de la parcela y en 11,5 veces para el cromo (1,25 ppm) presente en el agua subterránea del lugar.

Por consiguiente, aunque había un torrente voluminoso de aguas residuales (descarga diaria de 2,2 millones de litros) que circulaba por la zona de la parcela, que podría acortar la brecha entre la demanda total de agua para riego de parcelas (1800 millones de litros/año) y el suministro de aguas subterráneas disponibles (1280 millones de litros/año), su uso era restringido debido a la presencia de muchos contaminantes orgánicos e inorgánicos y metales pesados.

2.2. Objetivos específicos de la iniciativa

Ante la reinante crisis hídrica y, por otro lado, la disposición de una cantidad voluminosa de aguas residuales urbanas sin tratar en la zona de la parcela, que se podría reciclar y reutilizar para el riego seguro de parcelas (tras el tratamiento correspondiente), se emprendió un estudio con los siguientes objetivos:

- Identificar una tecnología de tratamiento de aguas residuales urbanas descentralizada, de bajo consumo energético, bajo costo y novedosa.
- Comparar su huella ecológica con una planta de tratamiento de aguas residuales convencional (hipotética) de características similares.
- Evaluar el impacto del agua residual tratada de esta manera en la salud del suelo y los productos agrícolas.
- Integrar la tecnología de tratamiento de aguas residuales con un modelo de negocio apropiado para lograr la autosostenibilidad a largo plazo y la adopción a gran escala en las zonas urbanas y periurbanas.

2.3. Proceso de implementación

La tecnología fue implementada siguiendo las siguientes etapas:

Etapa I (piloto)

La iniciativa propuesta parte de un proyecto piloto que comprende 16 celdas de tratamiento de aguas residuales a pequeña escala (mesocosmos, cada una con capacidad de 500 litros), que consisten en reactores de carga semicontinua de flujo vertical subsuperficial, que se implementaron en 2009. En las celdas se dispuso cuatro unidades de tres ejemplares de plantas emergentes (*Phragmites karka*, *Acorus calamus* y *Typha latifolia*) en lechos con materiales estratificados y diversificados, o bien se dejaron sin vegetación como referencia para comparar la eficacia en la reducción de metales y nutrientes, y de este modo, identificar los materiales y la vegetación que mejor responden a la hora de eliminar contaminantes. Los mesocosmos estaban conectados a tuberías de entrada de la línea principal de vertido de afluentes (aguas residuales), a través de válvulas de esfera para poder mantener hidráulicamente un nivel de agua máximo de 15,24 cm por encima de los materiales, cada vez que ingresaba el agua. En la figura 1 se puede observar una representación esquemática del diseño y el recorrido del flujo del proyecto piloto. Se analizaron periódicamente las muestras de los afluentes y efluentes por triplicado, conforme a los procedimientos estándar de cálculo, con el debido control de calidad que se realizó a través de la normalización cuidadosa, la medición del blanco del procedimiento y las muestras duplicadas.

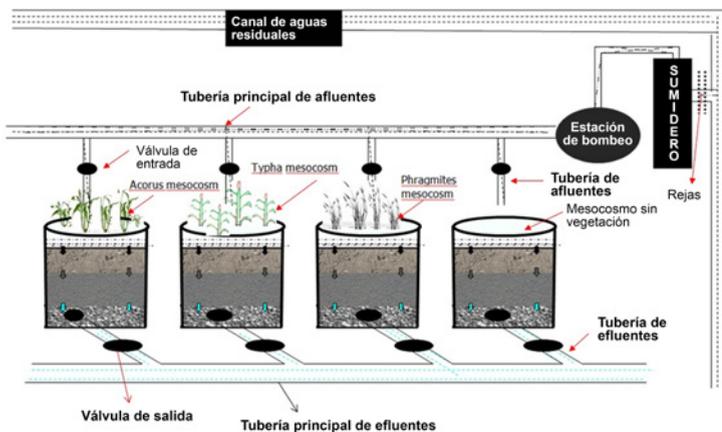


Figura 1: Diseño de un sistema piloto de tratamiento de aguas residuales urbanas

La evaluación a largo plazo (del 2009 al 2011) de la eficacia en la reducción de contaminantes de estos sistemas permitió demostrar que los sistemas que incorporaron los ejemplares de *Typha latifolia* presentaron más ventajas que los demás sistemas, en especial, en cuanto a la capacidad de remoción de nitrato (90,74 %), fosfato (77,65 %) y potasio (48,57 %). Los humedales con la variedad *Typha latifolia*, que se asociaron con el potencial de reducción de oxidación (PRO) más alto, también se vincularon con una mayor eficacia en la reducción de sulfato (65,41 %). En general, los sistemas que incorporaron grava y plantas *Typha latifolia* se caracterizaron por presentar una capacidad de remoción significativamente superior de níquel (70-74 %), plomo (53-63 %) y otras trazas metálicas. Asimismo se observó que estos sistemas eran los mejores captadores de cromo y se relacionaron con tasas de reducción de DBO y PRO considerablemente superiores, por lo que resultaron ser los sistemas de tratamiento de aguas residuales más prometedores.

Asimismo, se evaluaron los impactos ambientales a largo plazo del riego con aguas residuales tratadas y sin tratar en la salud del suelo, el rendimiento de los cultivos, el vigor de las semillas y la contaminación de los granos (durante las dos estaciones Rabi y Kharif).

Etapa II (ampliación)

Posteriormente, la tecnología validada se amplió en marzo del 2011 para tratar las aguas residuales urbanas de las colonias Krishi Kunj y Loha Mandi.

Mientras tanto, durante el 2010 y el 2011, se realizó un informe detallado temporal en el que se evaluaron la cantidad y calidad de las aguas residuales (es decir, la carga de contaminantes interestacional y total) provenientes de las colonias Krishi Kunj y Loha Mandi, junto con el perfil de calidad del suelo de la parcela, variable en términos de espacio (como se detalla en la sección "Situación previa a la iniciativa").

La información recaudada sobre la calidad del agua y el suelo luego se utilizó para crear el diseño específico de la planta de tratamiento de aguas residuales (de febrero a marzo del 2011) y calcular el tiempo de retención hidráulica (TRH) óptimo para descontaminar 2,2 millones de litros por día de aguas residuales entrantes y alcanzar los niveles permisibles de contaminantes para su aplicación segura en la agricultura. Los TRHs mencionados, se optimizaron para las distintas tasas de carga de contaminantes observadas en el proyecto. La construcción

del diseño optimizado empezó en septiembre del 2011 (posterior a un contrato de trabajo que se terminó en marzo del 2011) y finalizó en abril del 2013.



Figura 2: Vista panorámica de la planta de tratamiento ecológico de aguas residuales municipales (ampliada) y los componentes

La planta de tratamiento de aguas residuales consta de 3 celdas de tratamiento (80 m x 40 m), donde se realiza la remoción de contaminantes metálicos, orgánicos y de nutrientes (tratamientos secundarios y terciarios), 2 pozos de aguas residuales y 1 desarenador, donde se efectúa el tratamiento primario o preliminar (figura 2). Las aguas tratadas se recogen en tres sumideros individuales, ubicados en el lado de la salida de cada celda de tratamiento. Los sumideros están conectados entre sí para que todo el caudal del agua tratada circule por gravedad a un sumidero colector común, ubicado junto a un tanque grande de recolección de aguas tratadas (80 m x 40 m x 2 m). La planta está emplazada en una superficie de 1,42 ha. Los pozos de aguas residuales, el desarenador, la primera celda de tratamiento de aguas residuales y el tanque de recolección de aguas tratadas empezaron a funcionar en septiembre del 2012, mientras que las otras 2 celdas de tratamiento y parte de la red de riego del IARI lo hicieron en mayo del 2013.

A fin de ahorrar energía en todo el sistema, se implementó el mecanismo de circulación por gravedad de las aguas residuales desde el desarenador hasta el sumidero colector de aguas tratadas. Cada celda de tratamiento está estratificada con un lecho de gravas de distintos tamaños y cantidades donde se planta la vegetación emergente e hiperacumuladora *Typha latifolia* a la profundidad, intensidad y distancia indicadas en el diseño. Las plantas del humedal tienen la capacidad de trasladar el oxígeno de sus hojas, a los tallos y rizomas y expulsarlo a través de su sistema de raíces, hacia la rizósfera, por lo que no es necesario que los oxigenadores (que consumen mucha energía) estén encendidos las 24 horas, como se los suele utilizar en las plantas de tratamiento convencionales. Como resultado de este aporte de oxígeno ambiental a las celdas de tratamiento, se produce la bioaumentación natural de una población muy alta de microorganismos autóctonos (que suelen estar presentes en las aguas residuales) en la zona de las raíces de las plantas del humedal, donde se efectúa la mayoría de las transformaciones orgánicas e inorgánicas (por ejemplo, nutrientes y metales). De este modo, se descarta la necesidad de incorporar bioinoculantes externos o algún producto químico, lo que convierte a todo el proceso de tratamiento de aguas residuales en un sistema totalmente ecológico, de bajo consumo energético y que no genera lodos. Se regula el flujo de las aguas residuales en cada celda de tratamiento para que haya un flujo completamente subsuperficial, que no genere acumulación, olores desagradables, reproducción de mosquitos o algún contacto directo con las aguas residuales. Por consiguiente, con el agua residual desplazándose a la velocidad y profundidad estipulada en el diseño, a través de la masa de raíces de la vegetación emergente, e interactúa con los microorganismos autóctonos y el medio varios contaminantes orgánicos e inorgánicos, al igual que metales pesados, presentes en las aguas residuales son transformados, captados o removidos en la zona de tratamiento, entonces se descontamina el agua residual. Por último, el agua residual tratada se recoge en un tanque de recolección de aguas tratadas de 80 m x 40 m x 2 m donde se bombea por medio de un elevador y un juego de hidrantes, hacia la red de riego de la parcela del Instituto de Investigaciones Agrícolas de la India.

Etapa III (evaluación técnica y económica y puesta en funcionamiento)

La planta de tratamiento de aguas residuales urbanas que se ha implementado, la primera (y más grande) de este tipo en el país (véase la imagen de Google Maps), se ha vigilado continuamente para determinar su capacidad de remoción de nutrientes y metales desde septiembre del 2012, y se abrió al público tras su validación a largo plazo e inauguración formal por parte de los ministros de agricultura del estado el 2 de julio del 2014.

A fin de integrar un buen modelo de negocio con la tecnología propuesta descentralizada de tratamiento de aguas residuales y lograr que el sistema sea completamente autosostenible, se cortaron las plantas emergentes hiperacumuladoras de las celdas de tratamiento y se analizó su potencial, desde el punto de vista técnico y económico, para fabricar tablero de aglomerado, como sustituto de la madera (figura 3), en colaboración con un socio privado.



Figura 3: Transformación de la biomasa recolectada en tablero de aglomerado: un modelo de negocio que genera dinero de la basura y se integra con la iniciativa de tratamiento de las aguas residuales urbanas

Por último, se evaluaron los beneficios económicos y los gastos de capital y explotación de la iniciativa propuesta con respecto a una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) convencional (hipotética).

Además, se realizó un análisis del consumo energético donde se empleó una técnica integral de contabilidad ambiental (Odum, 1996)

para evaluar la eficiencia ecológica y la sostenibilidad de la iniciativa propuesta y compararlas con las de la planta convencional en función de varios índices de energía, como la relación de carga ambiental (RCA), el índice de sostenibilidad energética (ISE) y el porcentaje renovable (PR).

3. Resultados significativos de la iniciativa

3.1. Eficacia del tratamiento

La supervisión a largo plazo de la capacidad de tratamiento de la PTAR implementada permitió conocer su excepcional desempeño (figura 4), en especial, en lo que respecta a la turbiedad (99 %), DBO (87 %), nitrato (95 %), fosfato (90 %), plomo (81 %) y hierro (99 %), y también en función de otros contaminantes, como níquel (59 %), zinc (58 %) y sulfato (48 %), que normalmente se encontraban en concentraciones moderadas en los sistemas de aguas residuales urbanas.

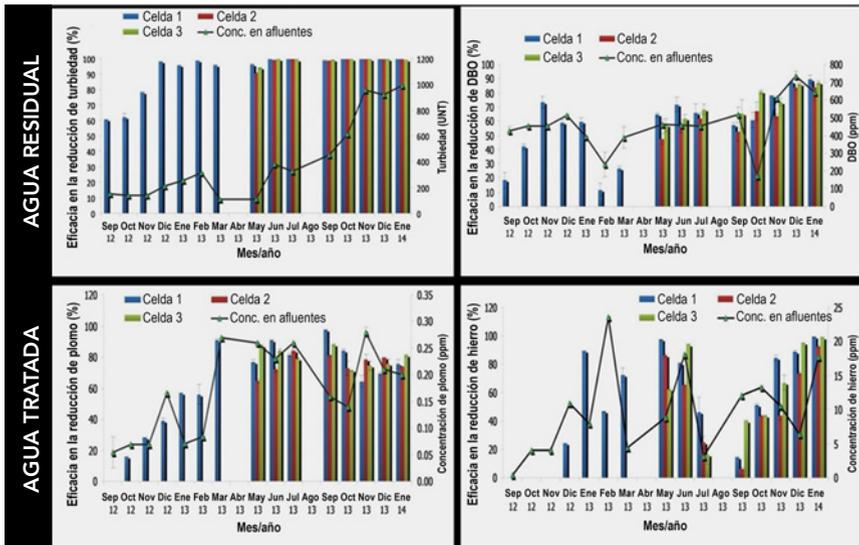


Figura 4: Eficacia en la reducción de contaminantes de la iniciativa propuesta de tratamiento de aguas residuales urbanas.

En un análisis donde se compararon las muestras de aguas residuales tratadas con las del agua subterránea de la parcela del IARI se demostró (figura 5) que el agua residual tratada (con la leyenda: E-STP) se asoció con valores mejores o idénticos de CE, pH, turbiedad, nitrato, sulfato, fosfato y concentraciones de metales que los del agua subterránea de zonas aledañas a la parcela (a saber: SPU, MB-1A y STP).

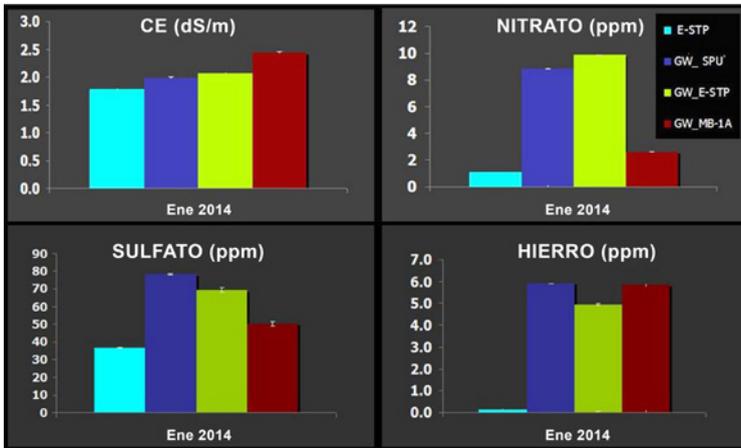


Figura 5: Calidad del agua residual tratada (E-STP) en comparación con el agua subterránea local de la parcela del Instituto de Investigaciones Agrícolas de la India.

3.2. Evaluación del impacto

3.2.1. Salud del suelo

La aplicación continua de aguas residuales tratadas, en vez de aguas residuales sin tratar, en el sitio del proyecto generó una reducción significativa de las concentraciones totales y biodisponibles de hierro, plomo y níquel en el suelo (figura 6). El cromo biodisponible en el suelo también disminuyó de un nivel inicial de $5,71 \pm 0,88$ mg/kg a $1,57 \pm 0,07$ mg/kg en el lapso de dos años. Por consiguiente, el riego continuo con aguas residuales tratadas condujo a reducciones significativas en la carga de contaminantes del suelo. Sin embargo, este resultado no se asoció con un agotamiento de los micronutrientes del suelo ni con efectos adversos debido a la conductividad eléctrica del suelo, y el

porcentaje de sodio intercambiable, que se mantuvieron dentro de los límites seguros.

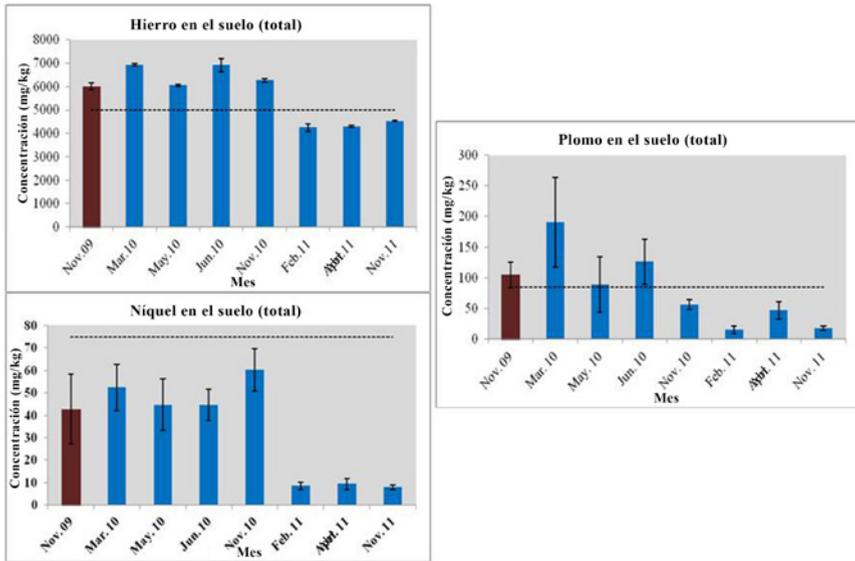


Figura 6: Impacto ambiental a largo plazo del riego con aguas residuales tratadas en la salud del suelo

3.2.2. Salud y calidad de los cultivos

También se evaluó el impacto del agua residual tratada y sin tratar en la salud y calidad del trigo y el arroz en función de los parámetros de las plantas y las semillas, los patrones de translocación de cada metal y el riesgo de captación de los metales en los granos. El impacto positivo del tratamiento de las aguas se podría expresar mejor en función del peso de prueba o el peso de 100 semillas de arroz, ya que se determinó que era significativamente inferior en los cultivos regados con aguas residuales. Además, pese a que no se observó una diferencia importante en cuanto al número total de brotes y la longitud de las panojas entre las plantas regadas con aguas residuales tratadas y sin tratar, la cantidad total de brotes improductivos y semillas huecas por panoja fue significativamente superior en el arroz regado con aguas residuales. Estas diferencias no se pudieron apreciar demasiado en un cultivo que consume poca agua, como el trigo. Sin embargo, se

observó que algunos brotes estaban infectados de termitas y hongos, tanto en los cultivos de trigo como de arroz, y estos eran mayores en las microparcels regadas con aguas residuales.

3.2.3. Translocación de los metales y contaminación de los granos

Los patrones de translocación de cada metal en las plantas de trigo y arroz revelaron que existe un mayor riesgo de captación de metales en el trigo. El análisis indicó que el riesgo general de los metales para la salud (como se puede observar en el índice de riesgo de la figura 7) debido al consumo de granos de trigo producidos con aguas residuales sin tratar en los suelos históricamente contaminados con metales fue de 1,6 veces más que el generado por el consumo de arroz. Entre el 45 y 60 % de este riesgo para la salud se debió a la contaminación con plomo. En general, se observó que los granos producidos con las aguas residuales tratadas con *Phragmites karka* (captadora de plomo) se asociaron con un riesgo para la salud de 44 a 58 % menor. Desde el punto de vista de la salud, los productos agrícolas del sitio de captación de aguas residuales aún no eran aptos para el consumo humano, en especial, debido a la elevada contaminación de los granos con plomo, hierro, níquel y manganeso. Sin embargo, estos riesgos se encontraban muy por debajo de los registrados en años anteriores, sobre todo, debido a la aplicación continua de aguas residuales tratadas.

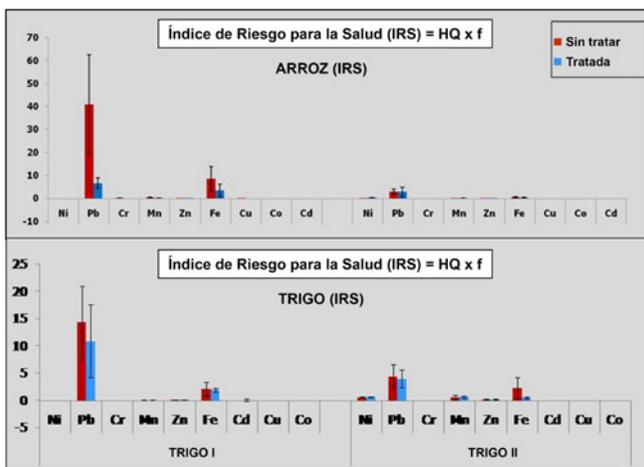


Figura 7: Impacto de las aguas residuales tratadas y sin tratar en los riesgos para la salud de los consumidores debido a la presencia de metales en los granos

3.2.4. Beneficios

En un análisis de la energía de la iniciativa propuesta (tabla 1), se comprobó que los recursos renovables constituyeron el 54,24 % del consumo energético total, mientras que la otra mitad (el 45,76 %) se satisfizo mediante recursos no renovables adquiridos, como la construcción, la electricidad y el mantenimiento. En la categoría de recursos renovables (locales + adquiridos), los recursos renovables locales (gratuitos) hicieron el mayor aporte de energía (77,69 %). Los recursos renovables adquiridos, como los materiales y la vegetación, que requieren tareas de mantenimiento, constituyeron solo el 12 % del consumo energético total, por lo que representaron un porcentaje pequeño en el de consumo energético de todo el sistema. En la categoría de recursos no renovables adquiridos, los servicios adquiridos que requirieron abundante mano de obra, como la construcción (63,26 %, con una supuesta vida útil de 20 años) y el mantenimiento anual (36,47 %) fueron los que más aportaron, mientras que la electricidad fue la que menos contribuyó (0,27 %).

Tabla 1: Presupuesto energético de la iniciativa propuesta en comparación con la PTAR convencional

APORTES	ENERGÍA SOLAR (seJ/año)	
	Iniciativa propuesta	PTAR convencional
Recursos renovables locales	$1,14 \times 10^{16}$	$1,82 \times 10^{16}$
Recursos renovables adquiridos	$3,27 \times 10^{15}$	0,00
Recursos no renovables adquiridos	$3,97 \times 10^{16}$	$7,68 \times 10^{17}$
Recursos adquiridos	$4,30 \times 10^{16}$	$7,68 \times 10^{17}$
Consumo total de recursos	$5,44 \times 10^{16}$	$7,87 \times 10^{17}$

A diferencia de la iniciativa propuesta, se observó que la PTAR convencional (hipotética) se asoció con un consumo energético de recursos no renovables adquiridos mucho mayor (98,26 %). El aporte del consumo energético total por parte de los recursos no renovables en una PTAR convencional fue de 83 veces más que en la iniciativa propuesta. Entre los recursos no renovables adquiridos, los costos operativos, como mantenimiento (48,10 %) y electricidad (28,31 %), hicieron el mayor aporte (76,41 %), donde el 23,59 % restante lo aportó la construcción (con una supuesta vida útil de 20 años).

La comparación de la iniciativa propuesta con una PTAR convencional reveló ventajas claras en cuanto al consumo eléctrico, ya que se observó que el consumo de energía eléctrica fue menos del 1 % en comparación con la planta de tratamiento convencional. Además, el análisis indicó que la iniciativa propuesta requirió un mantenimiento más sencillo, ya que el sistema no necesita otros productos y depende, en gran medida, de la acción ecológica de los microbios (autóctonos) y las plantas para su funcionamiento.

Por lo tanto, en cuanto a la contabilidad de costos estándar, se halló que la iniciativa propuesta se asoció con 0,545 crore de rupias por millones de l/día de gastos de capital (CAPEX) y alrededor de 0,607 crore de rupias por kilolitro (kl) del total de costos de explotación y mantenimiento. En comparación con la PTAR convencional (tabla 2), se observó que la iniciativa propuesta se asoció con costos de tratamiento de un 50 a 65 % más bajos.

Tabla 2: Sostenibilidad de la iniciativa propuesta en comparación con la PTAR convencional

Índices de energía	Iniciativa propuesta	PTAR convencional
Relación del rendimiento energético	0,70	0,01
Relación de la carga ambiental	1,37	42,19
Porcentaje renovable	0,54	0,02
Índice de sostenibilidad energética	0,51	0,00034

En una comparación del sistema de tratamiento ecológico con la PTAR convencional se demostró que la tecnología propuesta presenta un requerimiento energético por debajo del 1 %, no necesita la aplicación de ningún producto químico, no genera lodos, sus costos de tratamiento son de un 50 a 65 % inferiores y no requiere mano de obra capacitada.

3.3. Sostenibilidad de la iniciativa del proyecto

La eficiencia ecológica y el análisis de sostenibilidad de la iniciativa propuesta, en función de varios índices de energía (tabla 2), demostraron que utiliza 27 veces más recursos renovables que una PTAR convencional, por lo que es 1500 veces más sostenible que una PTAR convencional. Además, se halló que la iniciativa propuesta generó 33 veces menos de tensión ambiental en comparación con la PTAR convencional.

Por otro lado, la vegetación colocada en cada celda del sistema de tratamiento de aguas residuales en pleno funcionamiento se puede recolectar (una vez cada dos meses) y generar 36 toneladas de biomasa seca por año (figura 3). Con esta materia prima se puede fabricar tablero de aglomerado (resistente a las termitas e impermeable) (9000 m²/año, precio de mercado 200-250 rupias/m²) o se puede vender a los fabricantes locales de tablero de aglomerado (a 2000 rupias/t) como materia seca, lo que se traduce en ingresos anuales máximos de 18 lakh por año; de este modo la iniciativa propuesta permitiría integrar un modelo de negocio perfecto que genera dinero de la basura.



Figura 8: Vista satelital del sitio del proyecto (a) antes y (b) después de la iniciativa propuesta

4. Conclusiones

La iniciativa propuesta podría representar una fuente de agua superficial de buena calidad de unos 660 millones de litros por año y, por consiguiente, se interrumpiría la práctica de comprar agua superficial contaminada (a 18,5 lakh de rupias por año) del desagüe Bhuli-Bhatiyaari, para satisfacer la demanda de agua de riego de la parcela del IARI. Además de generar ahorros anuales de unos 18,5 lakh de rupias y acortar una brecha anual (de 520 millones de litros) entre la demanda de agua de riego y la oferta en la parcela del IARI, la iniciativa podría impulsar un plan eficaz de saneamiento y gestión de las aguas residuales urbanas que no genera malos olores ni mosquitos en la zona. De hecho, el sitio del proyecto, que solía ser totalmente inaccesible (figura 8), ahora se parece a un ecoparque, y los residentes suelen utilizarlo como sitio favorito para correr o caminar por las mañanas. La planta ya ha generado ahorros tangibles importantes debido a que se interrumpió la compra de agua superficial contaminada para regar la parcela del IARI. Desde el punto de vista intangible, se espera que el uso frecuente de la fuente de agua tratada, junto con la fuente de agua subterránea existente, recargue los acuíferos que se están agotando, no solo en el IARI, sino también en las zonas urbanas aledañas. A largo plazo, se prevé que no solo reduzca el consumo energético total con respecto a la extracción de aguas subterráneas, sino también que mejore de manera significativa la calidad del suelo y las aguas subterráneas, y la productividad en las parcelas del IARI.

Referencias

- Denny, P. (1997). Implementation of constructed wetlands in developing countries. *Water Science and Technology* 35, 27-34.
- Mitsch, W.J. y J.G. Gosselink. (2007). *Wetlands*. 4.ta edición. Nueva York: John Wiley.
- Mehrdadi, N., A. Rahmani, A.A. Azimi, y A. Torabian. (2009). Study of operation subsurface flow wetland in batch flow system for municipal wastewater treatment. *Asian Journal of Chemistry* 21(7), 5245-50.
- Odum, II.T. (1996). *Environmental Accounting: ENERGY and Decision Making*. Nueva York: John Wiley.

CASO 9

Productividad de la caña de azúcar irrigada con efluentes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cañaveralejo en Cali, Colombia

C. A. Madera-Parra, A. Echeverri y N. Urrutia¹

Resumen

En el Valle del Cauca, al sudoeste de Colombia, se utiliza el agua superficial y subterránea para regar los cultivos de caña de azúcar a razón de 100 m³/t de azúcar producida. Se llevaron a cabo experimentos preliminares para determinar el efecto en el rendimiento de la caña de azúcar (variedad CC-8592) irrigada con efluentes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cañaveralejo (PTAR-C) en Cali. Durante un año, se regó una parcela de 0,36 ha con dos fuentes de agua: los efluentes de la PTAR-C y agua subterránea. Se realizó un experimento con bloques aleatorios para evaluar el efecto de la calidad del agua de riego en el crecimiento, la productividad y la producción de caña de azúcar. De acuerdo con los resultados obtenidos, los efluentes cumplen con las normas de calidad del agua para uso agrícola (Ayers y Westcot, 1985). Además, según el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) (1954), ambos tipos de agua de riego se clasificaron como C2S1. El crecimiento del cultivo fue similar al esperado para la región y la variedad estudiada. Las variables de productividad fueron ligeramente superiores a los valores esperados (145 t/ha de caña de azúcar, 16,9 % de sacarosa y

¹ C. A. Madera-Parra ✉ · A. Echeverri · N. Urrutia;
Escuela EIDENAR, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia
Correo electrónico: carlos.a.madera@correounivalle.edu.co

En: Hiroshan Hettiarachchi and Reza Ardakanian (eds). *Uso seguro de las aguas residuales en la agricultura: ejemplos de buenas prácticas* ©UNU-FLORES 2016

17,6 % de grados Brix). No se hallaron diferencias entre las parcelas irrigadas con ambas fuentes de agua. Por consiguiente, se puede concluir que la reutilización de efluentes para riego es viable para la productividad de cultivos, pero se deben seguir estudiando otros aspectos, como los indicadores de sociedad del suelo.

Palabras clave: rendimiento del cultivo, riego, reutilización, caña de azúcar, productividad, aguas residuales

1. Introducción

Solo el 0,003 % de la cantidad total de agua de la Tierra se considera apta para las actividades humanas. De esta cantidad, los países desarrollados utilizan alrededor del 35 % para la agricultura, mientras que los países en desarrollo consumen más del 70 % (FAO, 2007), dado que producen la mayoría de los alimentos del mundo. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (2008) sugiere que se adopten medidas de conservación del agua en el sector agrícola en vista del incremento esperado de la producción en los próximos 50 años. Entre las alternativas presentadas por la FAO (2008), se mencionan la captación y almacenamiento de agua lluvia, la agricultura de secano, el aumento de la productividad del agua y la reutilización de las aguas residuales.

En las últimas décadas, se le ha dado importancia a la gestión integral de los recursos hídricos, lo que ha planteado la posibilidad de reutilizar aguas residuales para riego en América Latina (Argentina, Chile, Perú y México), Europa (Alemania), África (Sudáfrica, Túnez, Sudán), Asia (Israel, Kuwait, Arabia Saudita, India y China) y América del Norte (Parreiras, 2005). En Colombia, el uso de aguas residuales tratadas no es una práctica común, debido a su escaso tratamiento y el desconocimiento parcial sobre los posibles impactos en el medioambiente. De acuerdo con Madera (2005), en Colombia, solo se trata el 8 % de las aguas residuales domésticas antes de descargarse en los cuerpos de agua naturales, lo que ha dado lugar a la reutilización indirecta de las aguas residuales. Cali, la tercera ciudad más poblada de Colombia, cuenta con la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cañaveralejo (PTAR-C), donde se efectúan dos modalidades de tratamiento: el tratamiento primario convencional (TPC) y avanzado (TPA).

El cultivo de la caña de azúcar es la principal actividad agrícola en el Valle del Cauca. La superficie sembrada con este cultivo es de 208.254 ha, es decir, el 5 % del área total sembrada en Colombia (CENICAÑA, 2010). La demanda de agua de riego varía aproximadamente entre 300 y 400 mm/año (Torres y colaboradores, 2004), lo que implica una presión considerable en las fuentes de agua superficial y subterránea de la región. El objetivo de este estudio fue evaluar el impacto en la productividad de la caña de azúcar (variedad CC-8592) irrigada con efluentes de la PTAR-C en las condiciones climáticas de la región del Valle del Cauca, al sudoeste de Colombia.

2. Materiales y métodos

El estudio se realizó dentro de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cañaveralejo, situada en la región nordeste de la ciudad de Cali, en la margen izquierda del río Cauca (3° 28' 7" N, 76° 28' 40" O).

2.1. Diseño experimental

El diseño experimental utilizado para la investigación fue bloques completos al azar. Se establecieron tres bloques con nueve surcos de caña de azúcar cada uno. Los surcos tenían 100 m de largo por 1,5 m de ancho, y entre los bloques había 18 m de separación (figuras 1 y 2).

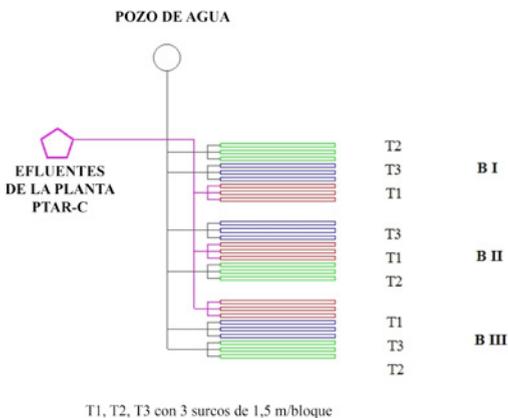


Figura 1: Diseño general de experimentos (no está a escala)
B: bloque; T1, T2, T3: tratamientos



Figura 2: Vista general del diseño experimental

El factor investigado fue la calidad del agua de riego. Como fuentes de agua se utilizaron el agua subterránea y los efluentes de la PTAR-C, que opera bajo la modalidad de TPA. Los tratamientos experimentales se constituyeron de la siguiente manera: T1: riego con efluentes de la planta PTAR-C, T2: riego con agua subterránea y T3: riego con agua subterránea y la aplicación de fertilizantes químicos (urea, superfosfato triple y cloruro potásico). Las dosis administradas se describen en la Tabla 1. En la Tabla 2, se indica el estado nutricional inicial del suelo para cada bloque. Por otro lado, se establecieron los siguientes parámetros de investigación: producción de caña de azúcar (t/ha), sacarosa (%), azúcares reductores (%) y grados Brix (*Br). En la Tabla 3, se especifican las variables, las frecuencias de muestreo y las técnicas de medición.

2.2. Preparación del suelo y frecuencia de riego

El suelo era del orden Inceptisol con propiedades vérticas (Vertic Endoaquept), textura arcillolimosa y estructura en bloques angulares de acuerdo con la descripción del campo y el estudio del suelo regional (IGAC, 1980). Las parcelas de cultivo se nivelaron, labraron, gradaron y surcaron. Se empleó el método de riego por surcos mediante el uso de tuberías cerradas en el sistema de conducción y tuberías de compuertas en el sistema de distribución a nivel de campo. La frecuencia de riego

Tabla 1: Dosis aplicadas de fertilizantes para T3 (bloque de 0,045 ha⁻¹)

Bloque	REQUISITO NUTRICIONAL (kg)			FERTILIZANTE (kg)		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Urea 46% de N	Superfosfato triple 46% P ₂ O ₅	Cloruro de potasio 60% K ₂ O
I	4,5	0,0	0,0	9,8	0,0	0,0
II	4,5	2,0	3,4	9,8	4,4	5,7
III	4,5	0,0	0,0	9,8	0,0	0,0
Total	13,5	2,0	3,4	29,5	4,4	5,7

Tabla 2: Propiedades químicas y macronutricionales del suelo y sus razones catiónicas

Bloque	pH	Ca	K	Mg	Na	CEC ₇	Ca/ Mg	Mg/ K	Ca+ Mg/K	EC	ESP	OM	P: Brayll	N- NH ₄	N- NO ₃
	Und	cmol kg ⁻¹						μmho cm ⁻¹	%	gr kg ⁻¹	mg kg ⁻¹				
I	7,41	23,52	0,33	9,5	0,25	29,55	2,5	29	100	274	0,74	35,93	29,46	14,96	13,19
II	7,42	21,21	0,26	8,93	0,25	26,6	2,4	34	116	215	0,82	25,09	6,62	11,21	9,02
III	7,41	23,88	0,31	8,93	0,26	30,2	2,7	29	106	222	0,78	33,74	18,74	8,52	16,17
Prome- dio	7,41	22,87	0,30	9,12	0,25	28,78	2,5	31	107	237	0,78	31,59	18,27	11,56	12,79

Tabla 3: Variables de respuesta y control

	PARAMETRO	UNIDAD	MUESTREO	TÉCNICA
Cultivo	Producción	Tonela- da/hec- tárea	Pesaje en campo de toda la pro- ducción	Pesaje en campo con una balanza Fairbanks con capa- cidad de 500 kg (precisión: 0,25 kg)
	Sacarosa	%	Molienda de 10 tallos por tratamiento y ex- tracción de 100 ml de sacarosa para análisis de laboratorio	Cromatografía líquida
	Azúcar reductor	%		Cromatografía líquida
	Grados Brix	%		Refractometría
Agua	pH	-	Una muestra de 1 litro de cada calidad de agua en cada riego, recolectada en la salida de la tubería de com- puertas	Potenciómetro
	CEw	dSm ⁻¹		Potenciómetro
	Calcio	mEq L ⁻¹		Espectrofotometría
	Magnesio	mEq L ⁻¹		Espectrofotometría
	Sodio	mEq L ⁻¹		Espectrofotometría
	Bicarbonatos	mEq L ⁻¹		Análisis volumétrico
	Cloruros	mEq L ⁻¹		Análisis volumétrico
	Sulfatos	mEq L ⁻¹		Análisis volumétrico
	Nitritos	mg L ⁻¹		Digestión, titulación
	Nitratos	mg L ⁻¹		Digestión, titulación
	N-NH3	mg L ⁻¹		Titulación
Fosfatos (PO ₄)	mg L ⁻¹	Digestión, titulación		

se basó en el balance hídrico diario. Se realizaron cinco riegos (324 mm en total) durante el período de crecimiento fisiológico del cultivo (de agosto del 2009 a agosto del 2010).

2.3. Técnicas de análisis de datos

Los resultados se analizaron según el diseño experimental (bloques completos al azar). Se empleó la prueba de Anderson-Darling para verificar la normalidad de los datos. Se aplicó el análisis de varianza ANOVA de un factor para determinar si había diferencias entre los tratamientos (con el software MINITAB 15). El modelo matemático considerado fue el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + A_i + B_j + E_{ij}$$

donde Y_{ij} es la variable de respuesta; μ , la media de la población; A_i , el efecto del tratamiento i ; B_j , el efecto del bloque j , y E_{ij} , el error experimental asociado con el tratamiento i en el bloque j .

3. Resultados y discusión

3.1. Calidad del agua de riego

En la Tabla 4, se presentan las características de las dos fuentes de agua de riego (agua subterránea y efluentes de la PTAR-C). Los valores corresponden al promedio de los análisis realizados en los cinco riegos aplicados durante la investigación. Hubo diferencias en las concentraciones de nitrógeno amoniacal, nitrógeno total, fosfatos y fósforo total en relación con los efluentes de la PTAR-C, los cuales presentaron los valores más altos, incluso por encima de los valores de referencia para riego de la FAO reportados por Ayers y Westcot (1985). En el caso de los nitratos, los valores en los efluentes y en el agua subterránea fueron superiores que los valores de referencia de la FAO.

Table 4: Calidad del agua de riego (promedio)

PARÁMETRO	UNI-DAD	AGUA SUB-TERRÁNEA	D. E.	EFLUENTES	D. E.	RANGO*
pH	-	6,98	0,36	6,7	0,27	6,0 – 8,5
Conductividad eléctrica	dS m ⁻¹	0,45	0,11	0,6	0,05	0 – 3
Calcio	mEq L ⁻¹	1,88	0,23	1,6	0,19	0 – 20
Magnesio	mEq L ⁻¹	0,91	0,12	0,8	0,11	<5
Sodio	mEq L ⁻¹	2,35	0,11	1,7	0,16	<3
Bicarbonato	mEq L ⁻¹	3,57	0,91	3,1	0,77	<10
Cloruro	mEq L ⁻¹	1,21	0,71	1,0	0,81	0 – 30
Sulfato	mEq L ⁻¹	0,79	0,96	1,0	0,95	0 – 20
RAS	-	1,99	0,04	1,5	0,13	0 – 15
Nitritos	mg L ⁻¹	1,95	2,68	1,7	2,20	<5
Nitratos	mg L ⁻¹	14,34	14,62	53,7	54,2	<5
N-NH3	mg L ⁻¹	2,67	1,92	15,8	10,3	0 – 5
Nitrógeno total	mg L ⁻¹	20,94	14,2	75,2	53,7	<30
Fósforo total	mg L ⁻¹	1,22	1,19	5,0	1,1	<2
Fosfatos (PO ₄)	mg L ⁻¹	0,53	0,95	2,1	1,43	0 – 2

* Rango de valores normales de acuerdo con Ayers y Westcot (1985)

Los valores altos de nutrientes son característicos del agua residual tratada, y este es uno de los posibles beneficios de su reuso para riego. Sin embargo, representan un potencial riesgo de contaminación de las aguas subterráneas, en especial, en suelos con texturas suaves y en zonas donde los métodos de riego son ineficientes (por ejemplo, el riego por inundación).

El pH del agua de riego está dentro del rango de referencia de la calidad del agua para irrigación. La conductividad eléctrica se encuentra, en ambos casos, por debajo del valor límite ($<0,7 \text{ dSm}^{-1}$), lo que indica un bajo riesgo de salinización. Los valores de relación de absorción de sodio (RAS) frente a los valores de EC_w indican un leve riesgo de sodicidad en ambos casos (Ayers y Westcot, 1985), lo que implica un posible daño a la estructura del suelo, debido a la dispersión de los agregados del suelo por los iones de Na. Por esta razón, existe el peligro de sodicidad, aun cuando el contenido de Na en el agua de riego no alcance los niveles considerados como tóxicos (3 meq L^{-1}). Además, de acuerdo con el USDA (1954), ambos tipos de agua de riego se clasifican como C2S1, es decir, son de salinidad media y aptas para el riego de cultivos moderadamente sensibles a las sales. Además, tienen un bajo contenido de sodio, que sin embargo puede llevar a problemas de acumulación en cultivos sensibles, como algunas frutas y aguacate.

Desde el punto de vista agronómico, se observó que el agua residual tratada no se diferencia del agua subterránea dado que, según el USDA (1954) y Ayers y Wescot (1985), ambos tipos de agua tienen las mismas características y no están potencialmente asociadas con riesgos de salinización del suelo. El peligro de sodicidad es medio y podría representar problemas en suelos con un alto contenido de Na o Mg ya que aumentaría el efecto de dispersión de dichos iones (García y colaboradores, 2002). Los suelos en la región cañera de Colombia tienen, por lo general, buena fertilidad, pero algunas regiones poseen un alto contenido de Mg y Na. El efecto combinado de la condición natural de estos suelos y el peligro de sodicidad media de los efluentes podría dañar aún más la estructura del suelo a raíz del efecto de dispersión del Na y el Mg.

3.2. Rendimiento de la caña de azúcar, los azúcares y los grados Brix

En la Tabla 5, se presentan los resultados obtenidos de producción (P), sacarosa (S), azúcares reductores (AR) y grados Brix (°Bx) para los tratamientos experimentales. La prueba de Anderson-Darling indicó que los datos de todas las variables siguieron la distribución normal ($p > 0,05$). Se puede observar que la producción promedio de caña de azúcar medida en toneladas por ha (TCH) estuvo por encima de los valores esperados en la región; producción superior al rango de 110 a 130 TCH, según lo reportado por Cenicaña (2010).

Tabla 5: Respuesta de producción promedio

BLOQUE	T	P (t/ha)	S (%)	AR (%)	°Bx (%)
B1	T1	146,1	15,3	2,2	17,3
	T2	135,7	18,6	1,6	17,4
	T3	128,8	18,6	1,8	15,7
B2	T1	144,7	17,5	0,4	17,8
	T2	117,7	15,4	0,7	16,8
	T3	123,3	18,4	0,4	19,1
B3	T1	147,2	18,1	0,97	17,8
	T2	147,2	17,1	0,92	17,4
	T3	148,5	15,4	0,92	17,1
Promedio de T1		146	17	1,2	17,6
Promedio de T2		133,5	17	1,1	17,2
Promedio de T3		133,6	17,5	1	17,3

B: bloque; T: tratamiento; P: producción de caña de azúcar; S: sacarosa; AR: azúcar reductores; °Bx: Grado Brix

Si el valor de 120 TCH se considera como promedio regional, en el tratamiento T1 la producción de caña de azúcar aumentó en un 21,6 %. Si el límite superior del rango de producción se adopta como referencia, el aumento en la producción fue de 12,3 % (Figura 3). De acuerdo con el análisis de varianza, no hubo diferencias significativas relacionadas con el tratamiento (p -value = 0,197) o entre bloques p -value = 0,097).

Según estos resultados, la aplicación de efluentes aumentó la producción de caña de azúcar por encima del valor obtenido para T3 (es decir, el uso de agua subterránea más fertilizantes químicos, que es el tratamiento común en la región). Sin embargo, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas (p -value = 1,97) entre los tratamientos y los bloques (p -value = 0,97). El uso de los efluentes generó una producción similar a la informada por el sector cañero; además, tiene una ventaja adicional representada por los posibles ahorros de fertilizantes químicos que aportan macronutrientes (N, P, K).

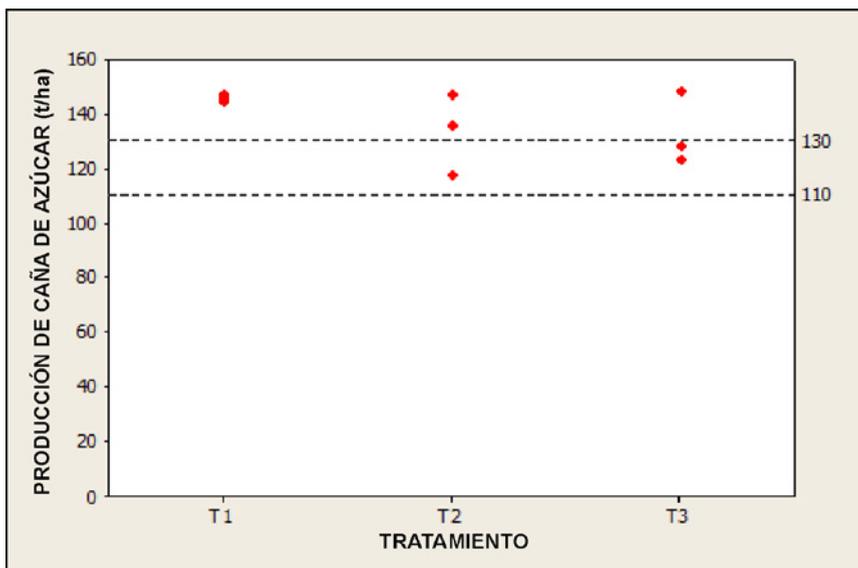


Figura 3: Producción de caña de azúcar por tratamiento

Asimismo, el contenido promedio de sacarosa (%) en todos los tratamientos es superior a los valores típicos del Valle de Cauca, 11,5 a 13,5 %, reportados por Larrahondo (1995). Los valores promedio para cada tratamiento son similares entre sí, pero se debe destacar que

en T1 (aplicación del agua residual), se observó el contenido más bajo de sacarosa (3 %), a pesar de lograr la producción de caña de azúcar más alta. Sin embargo, el análisis de varianza, no evidenció diferencias significativas entre los tratamientos (p -value = 0,945) ni entre los bloques (p -value = 0,924) (Figura 4). A partir de este análisis, se puede afirmar que la aplicación de aguas residuales no afectó de manera negativa la producción de sacarosa. Los valores experimentales por encima del rango regional se pueden explicar llevando a cabo el experimento en el suelo que, por lo general, no se cultiva y que demostró tener buena fertilidad en el comienzo del estudio.

En el caso de los azúcares reductores (AR), el valor promedio en todos los tratamientos está dentro del rango normal establecido para la región, que, de acuerdo con Larrahondo (1995), es entre el 1 y 5 %. Los valores promedio obtenidos son similares entre los tratamientos (Figura 4). Según el análisis de varianza, no hubo diferencias entre los tratamientos (p -value = 0,612), pero sí se encontraron diferencias significativas entre los bloques (p -value = 0,003).

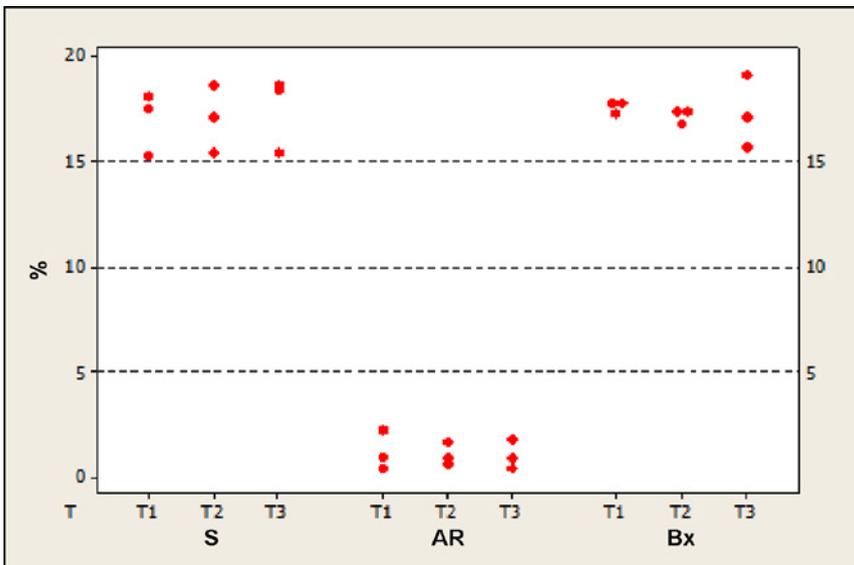


Figura 4: Sacarosa (S), azúcares reductores (AR) y grados Brix (Bx) (%)

En lo que respecta a la producción de caña de azúcar y sacarosa, los valores promedio de los grados Brix son superiores, en todos los

tratamientos, al rango de valores comunes para el Valle del Cauca, que, según Larrahondo (1995), se encuentran entre el 10 y 16 %. Los niveles obtenidos para esta variable son similares, pero en T1 el valor es un poco más alto que en los otros dos tratamientos (Figura 4). En el análisis estadístico realizado, no se detectaron diferencias significativas entre los tratamientos (p -value = 0,874) o entre los bloques (p -value = 0,500). Con este análisis, se confirma nuevamente que la reutilización de los efluentes de la PTAR-C para el riego de la caña de azúcar (CC-8597) no afectó de manera negativa los grados Brix.

Dado que el estado nutricional del suelo era homogéneo al comienzo de esta investigación (Tabla 2), los resultados obtenidos para las cuatro variables de respuesta estudiadas demuestran que la productividad de la caña de azúcar se vio afectada de manera positiva. Con niveles por encima de los valores deseados establecidos por el sector cañero. Sin embargo, estos resultados pueden estar asociados al hecho que fue el primer ciclo de producción del suelo, por ende, se esperaban indicadores más altos de productividad y producción.

Los valores de productividad hallados fueron similares a los reportados por Silva (2008), quien empleó la misma agua, suelo y variedad de caña de azúcar, pero en parcelas. Este autor obtuvo un rendimiento de 133 t/ha⁻¹ de caña de azúcar. Respecto a la sacarosa, los resultados de esta investigación son más altos que los hallados por Silva (2008), quien obtuvo un 4,1 % de sacarosa. Asimismo, no hubo diferencias significativas en la producción de caña de azúcar (TCH) o en la sacarosa (%) entre los tratamientos estudiados. La productividad de la variedad de caña de azúcar no estuvo afectada, lo que demuestra que es viable utilizar los efluentes de la PTAR-C para regar los cultivos de caña de azúcar debido a las concentraciones más altas de nutrientes del suelo y las plantas.

4. Conclusión

La producción de caña de azúcar (TCH) no se vio afectada por el uso de efluentes de la PTAR-C como agua de riego. Por el contrario, se obtuvieron valores ligeramente más altos (133 a 145 t/ha) que el rango común en la región (110 a 130 t/ha).

El reuso de los efluentes de la PTAR-C no incidió en la producción de caña de azúcar: los valores de sacarosa, grados Brix y azúcares

reductores se mantuvieron dentro de los rangos esperados para el Valle del Cauca, a saber: 11,5 a 13,5 % para la sacarosa, 10 a 16 % para los grados Brix y 1 a 5 % para los azúcares reductores.

De acuerdo con los resultados de productividad obtenidos, se concluye que los efluentes de la PTAR-C cubrieron los requisitos nutricionales del cultivo (nitrógeno, fósforo y potasio) en el primer ciclo de cultivo.

Los efluentes de la PTAR-C representan una posible alternativa para el riego de la caña de azúcar en condiciones de buena fertilidad del suelo y bajos niveles de Na y Mg para evitar los posibles efectos de dispersión de los agregados del suelo. Se deben realizar estudios complementarios para evaluar el peligro de sodicidad del suelo y la contaminación de aguas subterráneas.

Por último, como recomendación o lección aprendida de esta investigación, es necesario llevar a cabo proyectos de investigación con un período de recolección de datos más prolongado para identificar posibles daños en las características físicas o químicas del suelo irrigado con los efluentes de la PTAR-C.

Agradecimientos

Esta investigación fue respaldada económicamente por EMCALI E.I.C.E. ESP (la empresa de servicios públicos de Cali). Los autores quieren expresar su agradecimiento al ingeniero José A. Ceron y al Sr. Juan F. Moreno de EMCALI por su apoyo durante las actividades de investigación.

Referencias

Ayers, R. S. y D. B. Westcot (1985). "Water Quality for Agriculture". Boletín de Riego y Drenaje N.º 29, Rev. 1. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).

CENICAÑA. (2010). "Informe Anual 2009". CENICAÑA

FAO. (2007). Water at a Glance – The Relationship between Water, Agriculture, Food Security and Poverty. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

FAO. (2008). Agua para la Alimentación, Agua para la vida: Una Evaluación Exhaustiva de la Gestión del Agua en la Agricultura. Colombo: Instituto Internacional del Manejo del Agua.

García, A., A. González, and A. Torrente. 2002. "Propiedades químicas y físicas de los suelos magnésicos del Valle del Cauca (Colombia)". Suelos Ecuatoriales 30(2):74–141.

Instituto Geográfico Agustín Geográfico (IGAC). (1980). Estudio Semi-detallado de Suelos del Valle Geográfico del Río Cauca. Bogotá: IGAC.

Larrahondo, J. E. (1995). "Calidad de la caña de azúcar". En El Cultivo de la Caña en la Zona Azucarera de Colombia, 337–354. Cali: Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia.

Madera, C. (2005). "Reuso de Agua Residual: Aspectos sobre la Calidad Necesitan Mayor Atención". Fecha de consulta: mayo del 2014. http://pacificosur.rirh.net/legal_vista.php?id=5.

Parreiras, S. (2005). "Tratamento de esgoto por disposição no solo". Informe presentado en "O Curso sobre Tratamento de Esgoto por Disposição no Solo", Belo Horizonte, 30 de mayo del 2005.

Silva, J. (2008). "Reuso del Efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cañaveralejo PTAR-C en el Riego de Caña de Azúcar". Tesis doctoral. Universidad del Valle. Cali.

Torres, A. J. S., V. R. Cruz y T. F. Villegas. (2004). "Avances Técnicos para la Programación y el Manejo del Riego en Caña de Azúcar", 2.º ed. Technical Series N.º 33. Cali: Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia.

Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA). (1954). "Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils". Regional Salinity Laboratory, Washington, D.C.

CASO 10

Acumulación de metales pesados en los cultivos de cereales y leguminosas mediante el riego con aguas residuales y la utilización de fertilizantes de fosfato (Pakistán)

G. Murtaza, M. Bilal Shakoor y Nabeel Khan Niazi¹

Resumen

El riego de cultivos alimenticios con aguas residuales no tratadas es una práctica cada vez más frecuente tanto en Pakistán como en el resto del mundo. Debido a esto, es necesario implementar estrategias de gestión para una producción agrícola segura en suelos contaminados. En Pakistán, la disponibilidad de agua se ha reducido de 1299 m³ per cápita en 1996-97 a 1100 m³ per cápita en el 2006, y se prevé que llegará a menos de 700 m³ per cápita en el 2025. Por consiguiente, el riego de cultivos alimenticios con aguas residuales se ha convertido en una práctica relevante. Se llevó a cabo un estudio de campo para examinar la fitodisponibilidad de tres metales pesados cadmio [Cd], cobre [Cu] y zinc [Zn] en dos cultivos de cereales (trigo, maíz) y leguminosas (garbanzo, soja verde) como consecuencia del uso de aguas residuales o fertilizante de fosfato durante dos años seguidos. En cinco tratamientos con fertilizantes, es decir, de control, se recomendó aplicar nitrógeno (N) solo y en combinación con tres niveles de fósforo (P): la mitad de la dosis, la dosis completa y 1,5 veces la dosis recomendada

¹ G. Murtaza ✉ · M. Bilal Shakoor · Nabeel Khan Niazi
Instituto de Ciencias del Suelo y el Medioambiente, Universidad de Agricultura,
Faisalabad, Pakistán; Correo electrónico: gmurtazuaf@gmail.com

En: Hiroshan Hettiarachchi and Reza Ardakanian (eds). *Uso seguro de las aguas residuales en la agricultura: ejemplos de buenas prácticas* ©UNU-FLORES 2016

de P, designadas como N0P0, N1P0, N1P0,5, N1P1 y N1P1,5 respectivamente. Se determinaron las concentraciones de Cd, Cu, Zn y P en los tejidos de varias partes de las plantas (raíz, paja y granos). Si bien la mayor producción de biomasa se obtuvo con la aplicación de la mitad de la dosis recomendada de P, las concentraciones de metales pesados en los cultivos, por lo general, disminuyeron al aumentar los niveles de P. Las concentraciones de metales en los tejidos se incrementaron cuando se aplicó solo N. La translocación y la acumulación de Zn y Cu fueron sistemáticamente superiores a las del Cd. El patrón de acumulación de Cd fue diferente entre las especies de plantas. Hubo una mayor acumulación de Cd en las dicotiledóneas que en las monocotiledóneas, en especial, en sus granos. El orden de acumulación de Cd en los granos fue el siguiente: maíz > garbanzo > soja verde > trigo. En la paja de la soja verde y el garbanzo, se encontró, además, una concentración de Cd en los tejidos más elevada que los límites permitidos. Las dos especies de leguminosas se comportaron de manera similar, mientras que las especies de cereales difirieron unas de otras en cuanto a la acumulación de Cd. Las concentraciones de iones metálicos fueron mucho más altas en las raíces, seguido por la paja y los granos. Al aumentar la dosis de P aplicada al suelo, también se incrementaron las concentraciones de P y metales extraíbles en el suelo después de la cosecha. Pese a que el fertilizante P aportó una cantidad considerable de metales, todas las dosis de P aplicadas disminuyeron de manera eficaz la fitodisponibilidad de los metales en los suelos irrigados con aguas residuales. Asimismo, suministrar la mitad de la dosis recomendada de fertilizante P fue la solución más factible para reducir la absorción de metales del suelo por las plantas. Estos hallazgos se pueden aplicar de numerosas maneras para una producción agrícola más segura de especies de monocotiledóneas cuando los cultivos se riegan con aguas residuales que contienen metales pesados.

Palabras clave: aguas residuales municipales, cereal, leguminosa, absorción de metales, fertilizante de fosfato

1. Introducción

En las últimas décadas, muchas sociedades experimentaron una aceleración del desarrollo económico impulsada por una urbanización

e industrialización a gran escala. Indudablemente, esto implicó una mayor demanda de metales y, como consecuencia, condujo a intensas emisiones antropogénicas a nivel ambiental. La contaminación de los suelos con metales tóxicos se ha convertido, particularmente, en un problema medioambiental y agrícola a nivel mundial, puesto que repercute en la salud de los cultivos, el ganado y los seres humanos (Huang y colaboradores, 2012).

Tanto las fuentes naturales (erosión de material parental, vulcanismo) como las fuentes antropogénicas han provocado la emisión generalizada de metales pesados en el suelo y el agua (Purushotham y colaboradores, 2013). El uso agrícola de plaguicidas, herbicidas y fertilizantes, residuos sólidos urbanos, lodos residuales, irrigación con aguas residuales, quema de combustibles fósiles, actividades de fundición/minería, automóviles, incineración de residuos y eliminación de residuos son las principales causas antropogénicas de contaminación de los suelos con metales pesados (Murtaza y colaboradores, 2011). El cadmio es un elemento químico no esencial de particular relevancia como contaminante de la cadena alimenticia debido a su mayor solubilidad y biodisponibilidad, así como a su inherente toxicidad elevada, incluso en concentraciones bajas, tanto para las plantas como para los seres humanos (Sarwar y colaboradores, 2010). Por otro lado, si bien el Zn y el Cu, en concentraciones bajas, son micronutrientes esenciales importantes para las plantas, cuando se encuentran en concentraciones más altas, se convierten en contaminantes tóxicos importantes. A raíz de sus características químicas similares, el Cd, el Cu y el Zn interactúan en sistemas suelo-planta y pueden incidir de manera recíproca en su biodisponibilidad (Kim y colaboradores, 2010).

En las plantas, la presencia de metales a niveles tóxicos altera varios de los procesos metabólicos, bioquímicos y fisiológicos, incluyendo fotosíntesis y respiración (Ekmekçi y colaboradores, 2008), absorción de nutrientes minerales, translocación y metabolismo (Sarwar y colaboradores, 2010), elongación celular y actividad de varias enzimas (Gopal y Rizvi, 2008). Como consecuencia, las plantas adoptan varias estrategias para dividir y trasladar distintas proporciones de metales a diferentes partes (es decir, la raíz, el tallo y los granos). Debido que los cultivos de cereales y leguminosas varían en cuanto a su morfología, densidad radicular, estructura genética y tendencia a la absorción de metales, translocación y acumulación (Nuruzzaman y colaboradores,

2006), es de suma importancia estudiar las diversas respuestas a la toxicidad de los metales de estas dos grandes clases de cultivos.

El nitrógeno y los fertilizantes de fosfato, además de aportarles nutrientes a las plantas y aumentar la producción de alimentos, también afectan el pH del suelo, la fuerza iónica, la carga superficial, la formación de complejos, la composición de la rizósfera y la actividad microbiana del suelo (Zhang y colaboradores, 2010). Los cambios en la gestión del suelo y los cultivos de cereales y leguminosas para obtener altos rendimientos también pueden influir inadvertidamente en la fitodisponibilidad del Cd, el Cu y el Zn y, por ende, ingresar en la cadena alimenticia (Grant, 2011).

En Pakistán, el fosfato diamónico (DAP) y la urea son los dos principales fertilizantes que, por lo general, se utilizan para satisfacer la demanda de P y N de los cultivos. Por tal motivo, su efecto en el comportamiento, biodisponibilidad y acumulación de metales en las especies de cultivos sembrados en suelos contaminados es de particular importancia para una producción agrícola segura (McGowen y colaboradores, 2001). Los cultivos de cereales y leguminosas son dos fuentes valiosas y extendidas de alimento para los seres humanos y de pienso y forraje para los animales. Sin embargo, el uso cada vez más frecuente de aguas residuales para riego ha provocado la contaminación de muchos suelos agrícolas con metales, lo que es muy peligroso para los cultivos. Por consiguiente, este estudio se condujo con el fin de evaluar la fitodisponibilidad y la acumulación de Cd, Cu y Zn en los cultivos de cereales y leguminosas, como consecuencia del uso de fertilizante P y el riego con aguas residuales municipales.

2. Materiales y métodos

2.1 Sitio experimental

El área de estudio se situó en una zona suburbana de Faisalabad, Pakistán, donde se vienen utilizando las aguas residuales municipales no tratadas para regar los cultivos de cereales, mijos, piensos y vegetales desde hace más de 30 años.

2.2 Cultivos

Se condujo un experimento práctico de dos años, desde el 2006 hasta el 2008, para investigar la absorción de metales en diferentes plantas monocotiledóneas (trigo y maíz) y dicotiledóneas (garbanzo y soja verde) irrigadas con aguas residuales o abonadas con fertilizantes de fosfato. El área de investigación se dividió en cuatro parcelas ($18,2 \times 13,6 \text{ m}^2$), donde se sembraron por separado trigo (variedades Bhakkar-2002 y AS-2002 de *Triticum aestivum* L.), garbanzo (variedades Bittal-98 y Punjab-2000 de *Cicer arietinum* L.), maíz (variedades Sahiwal-2002 y Monsanto 6525 de *Zea mays* L.) y soja verde (variedades NIAB-92 y NIAB-2006 de *Vigna radiata* L.), de acuerdo con las respectivas épocas de siembra, entre el 2006-07 y el 2007-08.

En el experimento, se empleó un diseño de parcela dividida con tres réplicas en un terreno que se había regado durante mucho tiempo con aguas residuales municipales, situado en la granja agrícola de la Universidad de Agricultura, en Uchkera, Faisalabad, Pakistán. Se sembraron 125 kg/ha^{-1} de semillas de trigo, 60 kg/ha^{-1} de semillas de garbanzo, 40 kg/ha^{-1} de semillas de maíz y 25 kg/ha^{-1} de semillas de soja verde. Las características fisicoquímicas del suelo (Tabla 1) se determinaron con métodos estándares.

2.3 Tratamientos con fertilizantes

Las dosis de fertilizante no se basaron en los valores medidos de P del suelo, sino que se siguieron las recomendaciones habituales del fertilizante de nitrógeno y fosfato (NP) aplicado en suelos normales. Se emplearon la urea (46 % de N) y el DAP (46 % de P_2O_5 y 18 % N) como fuente de N y P (Tabla 2). El aporte de metales a través del DAP se detalla en la Tabla 3.

2.4 Aguas residuales

En la Tabla 4, se describen las propiedades químicas de las aguas residuales municipales utilizadas para riego. En la tabla 5, se especifica la cantidad total de metales incorporada al suelo mediante el riego

Tabla 1: Propiedades fisicoquímicas del suelo utilizado en este estudio

Parámetro del suelo	Valor
Arena (%)	65
Limo (%)	25
Arcilla (%)	10
Textura	Franco-arenoso
pH _s	7,65
CE _e (dS/m)	1,9
MO (%)	1,2
CaCO ₃ (%)	0,9
HCO ₃ ⁻ (mmolc/L)	1,3
Cl ⁻ (mmolc/L)	5,0
Ca ²⁺ + Mg ²⁺ (mmolc/L)	2,1
Na ⁺ (mmolc/L)	16,0
K ⁺ (mmolc/L)	0,38
RAS (mmol/L) ^{1/2}	15,70
Extraíbles con AB-DTPA	
Cd (mg/kg)	0,42
Zn (mg/kg)	6,66
Cu (mg/kg)	1,57
P (mg/kg)	18
Total de metales (HNO₃ y HClO₄; 1:4)	
Cd (mg/kg)	5,8
Zn (mg/kg)	8,64
Cu (mg/kg)	69,6

CE_e: conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada del suelo;

MO: materia orgánica;

RAS: relación de absorción de sodio

con aguas residuales. El volumen total de aguas residuales municipales suministrado en cada unidad experimental se calculó usando la ecuación de Manning para canales abiertos (Akgiray, 2005):

$$Q = A/n \times R^{2/3} \times S^{1/2}$$

donde Q = caudal ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$); A = área de la sección transversal (m^2); n = coeficiente de rugosidad de Manning (0,08); R = radio hidráulico (m) y S = pendiente del canal (m/m)

Tabla 2: Tratamientos con fertilizantes aplicados en cada cultivo

Tratamiento (F)		N y P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)			
		Trigo	Garbanzo	Maíz	Soja verde
Control	N ₀ P ₀	0-0	0-0	0-0	0-0
N+0.0 P (recomendado)	N ₁ P ₀	113-0	23-0	120-0	23-0
N+0.5 P (recomendado)	N ₁ P _{0.5}	113-57	23-28	120-57	23-28
N+1.0 P (recomendado)	N ₁ P _{1.0}	113-113	23-58	120-113	23-58
N+1.5 P (recomendado)	N ₁ P _{1.5}	113-170	23-85	120-170	23-85

Tabla 3: Aporte total de metales (mg/ha) a través de la enmienda de fertilizante DAP

Cultivos	Tratamientos	APORTES DE METALES (mg/ha ⁻¹)		
		Cd (16 mg/kg DAP)	Zn (313 mg/kg DAP)	Cu (42,6 mg/kg DAP)
Trigo y maíz	N ₁ P _{0.5}	1993	38671	5182
	N ₁ P _{1.0}	3986	77343	10365
	N ₁ P _{1.5}	5980	115616	15548
Garbanzo y soja verde	N ₁ P _{0.5}	956	19136	2392
	N ₁ P _{1.0}	2033	38272	5182
	N ₁ P _{1.5}	2974	57409	7853

La contaminación con patógenos (bacterias y virus) está asociada, principalmente, con aguas residuales domésticas. Se establece que el contenido de coliformes y huevos de Helminthos deben ser ≤ 10 y $\leq 0,01 \text{ ml}^{-1}$ respectivamente. De acuerdo con Ensink y colaboradores (2004), el contenido de coliformes fecales en las aguas residuales de Faisalabad fue de $6,3 \times 10^7$ y $>1 \times 10^8$, y de huevos de helmintos de 100 y 763, respectivamente. Las aguas residuales son una mezcla de descargas domésticas e industriales que no se caracterizaron por su contaminación biológica.

2.5 Cosecha y análisis

Los cultivos se cosecharon en la etapa de madurez reproductiva. Las concentraciones de Cd, Cu y Zn se determinaron con un espectrofotómetro de absorción atómica (AA) (Thermo Electron, serie Solar, Waltham, EE. UU.), seguido de una digestión diácida ($\text{HNO}_3 + \text{HClO}_4$; 3:1) de muestras por triplicado (AOAC, 1920). Las concentraciones de fósforo se calcularon con un espectrofotómetro ultravioleta-visible (Thermo Electron, Waltham, EE. UU.) y se normalizaron con una serie de soluciones estándares proporcionadas por el fabricante.

Tabla 4: Características químicas seleccionadas de las aguas residuales no tratadas utilizadas para el riego de los cultivos durante este estudio

Parámetro	Rango	Media*	DE**
pH	7,3 - 7,9	7,47	0,17
CE (dS/m)	2,64 - 3,13	2,95	0,18
TSS (mmol _c /L)	26,4 - 31,2	29,50	0,03
DBO (mg/L)	4,0 - 988	-	-
DQO (mg/L)	42 - 2676	-	-
Na ⁺ (mmol _c /L)	16,5 - 27	21,75	3,45
K ⁺ (mmol _c /L)	0,3 - 0,8	0,56	0,15
Ca ²⁺ +Mg ²⁺ (mmol _c /L)	3,2 - 7,4	6,15	1,26
HCO ₃ ⁻ (mmol _c /L)	7,0 - 10,0	8,17	0,99
Cl ⁻ (mmol _c /L)	5,7 - 13,0	11,0	2,39
SO ₄ ²⁻ (mmol _c /L)	7,4 - 19	11,16	3,98
RAS (mmol/L) ^{1/2}	8,82 - 21,30	12,78	3,80
RCS (mmol _c /L)	0,6 - 6,80	2,05	1,90
Cd (mg/L)	Traces - 0,002	0,001	0,01
Cr (mg/L)	0,05 - 1,62	0,715	0,55
Cu (mg/L)	0,001 - 0,026	0,01	0,01
Ni (mg/L)	0,03 - 1,25	0,471	0,38
Pb (mg/L)	0,04 - 0,70	0,313	0,06
Zn (mg/L)	0,01 - 0,072	0,033	0,02

* (Media de seis observaciones, n = 6) ** DE: desviación estándar

CE: conductividad eléctrica; TSS: total de sólidos en suspensión; RAS: relación de absorción de sodio; RCS: residuo de carbonato de sodio; DBO: demanda biológica de oxígeno; DQO: demanda química de oxígeno

Tabla 5: Aporte total de metales mediante el riego con aguas residuales

Cultivos	Aporte de metales a través de las aguas residuales (mg/ha, estación ¹)		
	Cd (0,002 mg/l)	Zn (0,033 mg/l)	Cu (0,01 mg/l)
Trigo y maíz	914	21031	4571
Soja verde y garbanzo	609	14020	3047

2.6 Análisis estadístico

El análisis estadístico se llevó a cabo con el paquete estadístico "Statistix 8.1" que emplea el método de la diferencia mínima significativa (DMS) para comparar las medias.

3. Resultados

3.1 Producción de biomasa de las plantas

Las especies de cultivo y los tratamientos con fertilizantes tuvieron un efecto positivo significativo ($p < 0,05$) en los rendimientos de granos y paja del trigo (Tabla 6). En relación con el tratamiento de control (N0P0), todos los niveles de P aumentaron el rendimiento de trigo, mientras que la aplicación de N solamente disminuyó el rendimiento de granos (4937 kg/ha^{-1}). Los rendimientos más altos de granos (5661 kg/ha^{-1}) y paja (7801 kg/ha^{-1}) se registraron en la especie de cultivo BKR-02.

En el caso del maíz, los tratamientos tuvieron una influencia significativa ($p < 0,05$) en el rendimiento de granos y paja. Los mayores rendimientos de granos (3031 kg/ha^{-1}) y paja (8370 kg/ha^{-1}) se obtuvo con el tratamiento N1P1,5, mientras que el tratamiento de control (N0P0) alcanzó el rendimiento más bajo.

En lo que respecta a la soja verde, los tratamientos con fertilizantes y las especies de cultivos ($p < 0,05$) aumentaron de manera positiva el rendimiento de granos (Tabla 6). La especie NIAB-06 tuvo un rendimiento de granos un 5,2 % más alto (2048 kg/ha^{-1}) que la especie NIAB-92 (1948 kg/ha^{-1}). Todos los tratamientos con fósforo incrementaron el rendimiento de granos.

En cuanto al garbanzo, los fertilizantes, las especies de cultivo y sus interacciones tuvieron una influencia positiva ($p < 0,05$) en el rendimiento de granos y paja (Tabla 6). La especie Bital-98 produjo una mayor cantidad de granos (2243 kg/ha^{-1}) y paja (4037 kg/ha^{-1}) que la especie P-2000.

Tabla 6: Efecto de los tratamientos con fertilizantes y las especies de cultivo en la producción de biomasa (kg/ha) de los cultivos de cereales y leguminosas

Tratamiento	TRIGO		MAÍZ		GARBANZO		SOJA VERDE	
	BKR-02	AS-02	S-02	M-6520	Bital-98	P-2000	NIAB-92	NIAB-06
Granos								
N _i P ₀	5575±121 ^{bc}	5010±146 ^{de}	2358±349	2936±25 ^{cd}	2073±23 ^c	1607±35 ^f	1863±29 ^{efg}	1924±43 ^{def}
N _i P ₀	5090±58 ^{de}	4784±23 ^e	2491±57 ^f	3016±13 ^c	1926±35 ^d	1541±48 ^f	1757±28 ^g	1773±21 ^{fg}
N _i P _{0,5}	6007±182 ^a	5236±105 ^{cd}	2631±40 ^e	3162±37 ^b	2445±13 ^a	1754±23 ^e	2046±39 ^{bcd}	218±57 ^{ab}
N _i P _{1,0}	5914±133 ^{ab}	5150±218 ^{cde}	2678±52 ^{de}	3221±62 ^{ab}	2365±35 ^a	2192±40 ^b	2071±31 ^{abc}	2211±40 ^a
N _i P _{1,5}	5721±53 ^{ab}	5209±37 ^{cd}	2764±15 ^{cd}	3299±15 ^a	2405±35 ^a	2073±46 ^c	2004±49 ^{cde}	2149±101 ^{ab}
Paja								
N _i P ₀	7382±207 ^b	5887±82 ^c	8176±23 ^{cd}	8067±21 ^d	4385±115 ^b	3960±27 ^c	1985±185 ^a	2144±25 ^a
N _i P ₀	7203±188 ^b	6113±185 ^c	8202±46 ^{bcd}	8209±80 ^{bcd}	4837±53 ^a	4119±66 ^{bc}	2360±163 ^a	2213±170 ^a
N _i P _{0,5}	8479±67 ^a	7057±120 ^b	8288±43 ^{abc}	8304±14 ^{abc}	3973±242 ^c	3455±56 ^d	2272±183 ^a	2313±59 ^a
N _i P _{1,0}	8372±150 ^a	6146±202 ^c	8332±30 ^{abc}	8370±50 ^a	3907±144 ^c	3255±47 ^c	2140±109 ^a	2249±71 ^a
N _i P _{1,5}	7568±92 ^b	5954±185 ^c	8388±67 ^a	8352±70 ^{ab}	3083±157 ^d	3123±76 ^d	2168±55 ^a	2296±102 ^a

Los valores se expresan como las medias ± del error estándar de la media (n = 3); los valores de DMS de los granos y la paja de los cultivos son 145 y 201 (trigo); 62 y 53 (maíz); 82,7 y 135 (garbanzo) y 104 y 245 (soja verde).

3.2 Concentraciones de metales en las plantas

El incremento de los niveles de P en combinación con la dosis de N recomendada (113 kg/ha^{-1}) disminuyó las concentraciones de metales. La menor cantidad de metales se acumuló en la variedad de trigo AS-02, a diferencia de la variedad de maíz híbrido M-6525, que acumuló más Cd y menos Cu en todas las partes de la planta en comparación con la variedad S-02.

Las concentraciones de metales en los tejidos de las leguminosas disminuyeron significativamente ($p < 0,05$) al aumentar los niveles de P. Por lo tanto, las concentraciones más altas de Zn en los tejidos de las plantas se registraron en el control y N_1P_0 para el garbanzo y la soja verde, respectivamente. La especie NIAB-92 (soja verde) absorbió cantidades más altas de metales frente a la especie NIAB-06 (Tablas 7, 8, 9). Se detectó un porcentaje más alto de Zn en los granos (2,6 %), la paja (11,3 %) y la raíz (21 %) que en la especie NIAB-06.

3.3 Concentraciones de P en las plantas

Las diferencias en los contenidos de P en el trigo y el maíz variaron de manera significativa ($p < 0,05$) con las especies de cultivo, los tratamientos con fertilizantes y sus interacciones (Tabla 10). Con relación a al tratamiento de control y la adición de N solamente, la aplicación de fertilizante de fosfato aumentó en gran medida los contenidos de P en las plantas. A excepción del contenido de P en la paja, las especies de cultivo, por lo general, difirieron de forma considerable en sus contenidos de P. En cuanto al tratamiento de control, (N_0P_0), la aplicación de N solamente (N_1P_0) aumentó el contenido de P en los tejidos de las plantas de maíz, pero lo disminuyó en las plantas de trigo

El efecto de los tratamientos con fertilizantes, las especies de cultivo y su interacción fueron todos significativos ($p < 0,05$) en los contenidos de P en los tejidos de ambas especies de leguminosas (Tabla 10). En comparación con el control, la aplicación de N solamente (N_1P_0) también incrementó de manera significativa el contenido de P en los tejidos de ambos cultivos de leguminosas.

Tabla 7: Efecto de los tratamientos con fertilizantes y las especies de cultivo en la concentración de Cd (mg/kg) en la raíz, la paja y los granos de los cultivos de cereales y leguminosas

Tratamiento	TRIGO			MAÍZ			GARBANZO			SOJA VERDE		
	BKR-02	AS-02	S-02	M-6520	Bitail-98	P-2000	NIAB-92	NIAB-06				
Granos												
N ₀ P ₀	0,046±0,003 ^{cd}	0,042±0,003 ^{cd}	0,110±0,006 ^{de}	0,110±0,013 ^a	0,140±0,006 ^{ab}	0,130±0,015 ^{abc}	0,041±0,006 ^c	0,014±0,025 ^a				
N ₁ P ₀	0,054±0,003 ^{bc}	0,063±0,003 ^{cd}	0,140±0,015 ^{cd}	0,140±0,023 ^a	0,130±0,003 ^{ab}	0,150±0,012 ^{ab}	0,073±0,015 ^{bc}	0,050±0,012 ^c				
N ₁ P _{0,5}	0,056±0,000 ^b	0,085±0,003 ^a	0,150±0,009 ^{cde}	0,150±0,011 ^{ab}	0,150±0,012 ^{ab}	0,160±0,026 ^a	0,143±0,012 ^a	0,053±0,009 ^c				
N ₁ P _{1,0}	0,064±0,003 ^b	0,080±0,006 ^a	0,140±0,020 ^{cde}	0,140±0,014 ^{ab}	0,150±0,007 ^{ab}	0,120±0,007 ^{abc}	0,133±0,007 ^a	0,139±0,027 ^{ab}				
N ₁ P _{1,5}	0,035±0,003 ^d	0,038±0,002 ^d	0,090±0,009 ^e	0,090±0,027 ^{bc}	0,100±0,003 ^c	0,110±0,015 ^{bc}	0,133±0,003 ^a	0,132±0,006 ^a				
Paja												
N ₀ P ₀	0,195±0,009 ^{bc}	0,169±0,010 ^{cd}	0,280±0,006 ^{abc}	0,260±0,016 ^{bc}	0,220±0,006 ^c	0,400±0,006 ^b	0,895±0,012 ^{bc}	0,760±0,032 ^c				
N ₁ P ₀	0,255±0,009 ^{abc}	0,245±0,003 ^{ab}	0,260±0,015 ^a	0,260±0,013 ^{bc}	0,250±0,003 ^c	0,260±0,006 ^b	0,911±0,009 ^{bc}	0,875±0,062 ^c				
N ₁ P _{0,5}	0,289±0,015 ^{abc}	0,235±0,012 ^a	0,220±0,009 ^{cd}	0,330±0,010 ^{bc}	0,160±0,012 ^a	0,180±0,006 ^a	1,240±0,080 ^a	1,105±0,058 ^{ab}				
N ₁ P _{1,0}	0,263±0,012 ^a	0,271±0,018 ^{ab}	0,220±0,020 ^{cd}	0,290±0,037 ^{ab}	0,120±0,007 ^a	0,120±0,012 ^a	0,425±0,069 ^d	0,457±0,068 ^d				
N ₁ P _{1,5}	0,244±0,020 ^d	0,157±0,044 ^{abc}	0,191±0,009 ^d	0,270±0,010 ^{bc}	0,100±0,003 ^a	0,100±0,012 ^a	0,320±0,075 ^d	0,326±0,061 ^d				
Raíz												
N ₀ P ₀	0,247±0,018 ^{ef}	0,208±0,015 ^{ef}	0,770±0,028 ^{ab}	0,870±0,076 ^a	0,610±0,074 ^b	0,420±0,103 ^g	0,608±0,053 ^c	0,548±0,064 ^c				
N ₁ P ₀	0,212±0,018 ^f	0,273±0,005 ^{cde}	0,570±0,007 ^{bc}	0,890±0,151 ^a	0,720±0,062 ^{ef}	0,450±0,135 ^{de}	1,086±0,066 ^{ab}	0,730±0,080 ^c				
N ₁ P _{0,5}	0,286±0,031 ^c	0,275±0,017 ^{cd}	0,500±0,012 ^{ab}	0,730±0,073 ^{ab}	0,450±0,044 ^d	0,410±0,090 ^c	0,839±0,038 ^{bc}	0,881±0,031 ^{bc}				
N ₁ P _{1,0}	0,631±0,024 ^a	0,176±0,026 ^g	4,460±0,018 ^c	0,700±0,135 ^{abc}	0,390±0,027 ^{bc}	0,390±0,068 ^{ab}	1,406±0,194 ^{bc}	0,804±0,232 ^c				
N ₁ P _{1,5}	0,379±0,041 ^b	0,139±0,066 ^h	0,460±0,005 ^c	0,550±0,074 ^{bc}	0,250±0,021 ^a	0,250±0,023 ^{abc}	0,850±0,192 ^a	0,542±0,065 ^{bc}				

Los valores se expresan como las medias ± del error estándar de la media (n = 3); los valores de DMS del grano, la paja y la raíz son 0,005, 0,02 y 0,03 (trigo); 0,02, 0,05 y 0,07 (maíz); 0,02, 0,035 y 0,09 (garbanzo) y 0,009, 0,20 y 0,25 (soja verde).

Tabla 8: Efecto de los tratamientos con fertilizantes y las especies de cultivo en la concentración de Zn (mg/kg) en la raíz, la paja y los granos de los cultivos de cereales y leguminosas

Tratamiento	TRIGO			MAÍZ			GARBANZO			SOJA VERDE		
	BKR-02	AS-02	S-02	M-6520	Bitail-98	P-2000	NIAB-92	NIAB-06				
Granos												
N ₀ P ₀	40,90±0,59 ^{ab}	45,10±0,50 ^e	31,80±0,79 ^a	27,70±1,24 ^{bc}	39,30±1,18 ^a	35,90±0,35 ^{ab}	33,60±0,74 ^a	32,90±0,66 ^{bcd}				
N ₁ P ₀	42,00±0,53 ^a	43,80±1,03 ^{de}	34,10±1,13 ^{ab}	26,60±0,76 ^{bc}	38,10±0,87 ^a	36,90±0,98 ^{ab}	36,60±0,97 ^{abc}	34,00±0,89 ^{ab}				
N ₁ P _{0,5}	39,60±0,67 ^{bc}	39,30±0,47 ^{bcd}	25,50±2,09 ^{cd}	25,30±1,54 ^{cde}	36,50±0,97 ^{ab}	36,90±1,00 ^{bc}	32,10±1,34 ^{bcd}	31,40±0,46 ^{b-e}				
N ₁ P _{1,0}	37,80±0,47 ^{cde}	36,80±0,25 ^{cde}	23,00±2,03 ^{cde}	24,40±0,45 ^{cde}	34,30±1,32 ^{bc}	34,10±1,21 ^{cd}	31,30±0,88 ^{cde}	29,40±1,50 ^{ef}				
N ₁ P _{1,5}	32,20±0,95 ^e	34,50±0,38 ^{cde}	20,30±2,22 ^e	21,30±0,46 ^{de}	29,70±0,64 ^d	32,40±0,53 ^d	30,50±0,32 ^{de}	26,80±0,89 ^f				
Paja												
N ₀ P ₀	24,80±1,97 ^{fg}	23,90±0,89 ^g	28,60±1,03 ^a	27,10±0,68 ^{bc}	21,90±0,72 ^e	25,50±1,03 ^{de}	31,70±2,41 ^a	26,90±1,17 ^a				
N ₁ P ₀	28,90±1,30 ^a	25,40±0,30 ^b	30,80±0,84 ^{ab}	25,90±0,94 ^c	21,30±0,52 ^e	23,50±0,45 ^{cd}	32,60±1,19 ^a	27,90±1,37 ^a				
N ₁ P _{0,5}	24,20±0,78 ^{bc}	20,30±0,79 ^{def}	21,40±0,47 ^{de}	22,80±1,09 ^d	24,70±0,75 ^{cd}	30,20±0,45 ^a	32,10±2,30 ^a	29,50±1,30 ^a				
N ₁ P _{1,0}	22,50±0,29 ^{bcd}	15,90±0,84 ^g	20,30±0,67 ^{de}	20,30±0,67 ^{de}	25,50±0,92 ^{cd}	28,60±1,00 ^{ab}	31,50±1,74 ^a	27,70±2,49 ^a				
N ₁ P _{1,5}	21,10±0,78 ^{bcd}	13,70±0,42 ^{ef}	19,10±1,03 ^e	19,20±0,67 ^e	26,50±0,65 ^{bc}	28,50±0,58 ^{ab}	33,30±0,96 ^a	33,30±1,35 ^a				
Raíz												
N ₀ P ₀	46,30±1,70 ^{ab}	39,20±1,45 ^{cd}	22,90±1,01 ^{bc}	21,60±0,98 ^c	34,80±0,99 ^{ab}	35,10±2,71 ^a	22,70±3,17 ^{ab}	18,80±0,62 ^{ab}				
N ₁ P ₀	46,30±1,15 ^{ab}	41,30±1,23 ^{bcd}	25,50±0,78 ^{ab}	22,80±0,49 ^{bc}	33,20±1,31 ^{ab}	30,30±0,84 ^{bc}	20,70±0,92 ^{ab}	18,40±1,93 ^{ab}				
N ₁ P _{0,5}	46,90±2,22 ^{ab}	49,00±4,74 ^a	26,30±0,23 ^a	25,40±1,14 ^{ab}	32,00±0,46 ^{ab}	27,20±0,51 ^{cde}	23,70±3,02 ^a	17,10±1,67 ^b				
N ₁ P _{1,0}	40,10±0,92 ^{cd}	42,40±0,72 ^{bc}	24,80±0,52 ^{ab}	24,90±0,95 ^{ab}	26,80±1,98 ^{cde}	24,40±1,12 ^{de}	23,20±2,34 ^{ab}	19,10±1,71 ^{ab}				
N ₁ P _{1,5}	35,70±1,63 ^{de}	31,90±1,81 ^e	23,80±0,47 ^{abc}	24,60±1,27 ^{ab}	27,20±0,79 ^{cd}	22,90±1,32 ^e	22,20±2,03 ^{ab}	18,50±0,95 ^{ab}				

Los valores se expresan como las medias ± del error estándar de la media (n = 3); los valores de DMS del grano, la paja y la raíz son 2,2, 1,6 y 2,1 (trigo); 1,92, 1,45 y 1,72 (maíz); 1,34, 1,45 y 1,54 (garbanzo) y 1,52, 1,80 y 1,62 (soja verde).

Tabla 9: Efecto de los tratamientos con fertilizantes y las especies de cultivo en la concentración de Cu (mg/kg) en la raíz, la paja y los granos de los cultivos de cereales y leguminosas

Tratamiento	TRIGO			MAÍZ			GARBANZO			SOJA VERDE		
	BKR-02	AS-02	S-02	M-6520	Bitail-98	P-2000	NIAB-92	NIAB-06				
Granos												
N ₀ P ₀	4,60±0,10 ^b	4,70±0,15 ^a	2,46±0,09 ^a	1,91±0,09 ^b	5,40±0,77 ^a	5,10±0,16 ^a	9,44±0,19 ^c	5,84±0,24 ^a				
N ₁ P ₀	4,70±0,23 ^b	5,30±0,12 ^b	2,39±0,06 ^a	1,86±0,07 ^b	5,40±0,70 ^a	5,10±0,15 ^a	9,34±0,35 ^c	5,59±0,32 ^a				
N ₁ P _{0,5}	4,20±0,09 ^{cd}	4,40±0,06 ^{bc}	2,36±0,07 ^a	1,68±0,09 ^{bc}	4,50±0,20 ^{ab}	4,40±0,16 ^{ab}	8,50±0,15 ^c	5,77±0,51 ^{ab}				
N ₁ P _{1,0}	4,10±0,12 ^{cde}	4,00±0,15 ^{cde}	1,31±0,17 ^d	1,54±0,07 ^{cd}	3,60±0,23 ^{bc}	3,80±0,18 ^{bc}	7,83±0,47 ^c	5,57±0,22 ^b				
N ₁ P _{1,5}	3,80±0,12 ^{de}	3,70±0,09 ^e	1,09±0,09 ^e	1,33±0,02 ^d	2,40±0,62 ^c	2,70±0,23 ^c	7,28±0,22 ^c	5,65±0,26 ^b				
Paja												
N ₀ P ₀	5,40±0,23 ^b	5,20±0,18 ^b	4,63±0,19 ^a	3,64±0,50 ^c	4,73±0,41 ^a	3,52±0,57 ^a	10,40±0,15 ^{ab}	9,96±0,58 ^{abc}				
N ₁ P ₀	6,40±0,55 ^{ab}	5,40±0,50 ^b	4,28±0,21 ^{abc}	3,54±0,31 ^c	4,23±0,19 ^a	3,58±0,10 ^a	9,19±0,42 ^{bc}	9,23±0,88 ^{bc}				
N ₁ P _{0,5}	6,40±0,18 ^{ab}	7,10±0,64 ^a	4,56±0,17 ^{ab}	3,70±0,23 ^c	3,87±0,54 ^a	3,46±0,10 ^a	11,54±0,32 ^a	9,45±0,90 ^{abc}				
N ₁ P _{1,0}	6,20±0,38 ^{ab}	6,03±0,18 ^{ab}	4,29±0,20 ^{abc}	3,71±0,20 ^c	3,97±0,41 ^a	3,34±0,11 ^a	10,41±0,43 ^{ab}	8,97±0,82 ^{bc}				
N ₁ P _{1,5}	6,10±0,26 ^{ab}	5,90±0,44 ^{ab}	4,01±0,20 ^{abc}	3,75±0,15 ^{bc}	4,27±0,27 ^a	3,22±0,02 ^a	10,31±0,35 ^{ab}	8,03±0,84 ^c				
Raíz												
N ₀ P ₀	14,10±0,29 ^{ab}	10,10±0,32 ^c	14,08±0,78 ^a	12,23±1,09 ^{abc}	11,30±1,92 ^{ab}	12,40±0,74 ^{ab}	11,79±0,09 ^{ab}	11,93±0,39 ^{ab}				
N ₁ P ₀	14,80±0,62 ^a	12,30±1,16 ^{bc}	12,23±0,34 ^{bcd}	11,83±0,55 ^{abc}	11,80±1,07 ^{ab}	13,10±0,90 ^{ab}	12,59±0,32 ^a	11,78±0,70 ^{ab}				
N ₁ P _{0,5}	11,10±1,45 ^c	11,00±1,60 ^c	12,71±0,44 ^{ab}	12,90±1,44 ^{a-d}	10,60±1,33 ^{abc}	11,70±0,23 ^b	11,89±0,67 ^b	11,22±1,35 ^{ab}				
N ₁ P _{1,0}	11,00±0,85 ^c	10,10±0,62 ^c	10,39±0,87 ^{cd}	9,53±1,27 ^{bcd}	9,10±0,45 ^{bc}	11,20±0,62 ^{ab}	10,86±0,73 ^{ab}	10,53±0,66 ^{ab}				
N ₁ P _{1,5}	9,20±0,32 ^c	9,00±0,40 ^c	9,20±0,28 ^d	8,68±1,52 ^d	9,20±1,33 ^{bc}	7,20±1,16 ^c	10,47±0,32 ^a	10,31±0,66 ^{ab}				

Los valores se expresan como las medias ± del error estándar de la media (n = 3); los valores de DMS del grano, la paja y la raíz son 0,15, 0,5 y 1,2 (trigo); 0,22, 0,58 y 1,35 (maíz); 0,29, 0,43 y 1,07 (garbanzo) y 1,85, 1,15 y 1,47 (soja verde).

Tabla 10: Efecto de los tratamientos con fertilizantes y las especies de cultivo en la concentración de P (mg/kg) en la raíz, la paja y los granos de los cultivos de cereales y leguminosas

Tratamiento	TRIGO			MAÍZ			GARBANZO			SOJA VERDE		
	BKR-02	AS-02	S-02	M-6520	Bital-98	P-2000	NIAB-92	NIAB-06				
Granos												
N ₀ P ₀	3554±17 ^b	3484±17 ^b	3794±31 ^e	4091±83 ^c	3890±17 ^d	4343±06 ^f	4691±13 ^e	4588±14 ^f				
N ₁ P ₀	3548±36 ^b	3438±34 ^b	3785±23 ^e	4074±21 ^{bc}	4064±24 ^c	4566±33 ^e	4858±26 ^d	4662±23 ^e				
N ₁ P _{0,5}	3904±40 ^a	3954±55 ^a	3853±47 ^{de}	4224±42 ^{ab}	4351±39 ^b	4869±22 ^d	5019±17 ^a	4878±12 ^{cd}				
N ₁ P _{1,0}	3881±36 ^a	3821±43 ^a	3959±55 ^{cd}	4319±50 ^a	4525±20 ^a	5053±22 ^c	5031±16 ^a	4917±13 ^{bc}				
N ₁ P _{1,5}	3826±27 ^a	3825±87 ^a	3961±26 ^{cd}	4330±23 ^a	4568±16 ^a	5135±39 ^c	5045±08 ^a	4949±23 ^b				
Paja												
N ₀ P ₀	803±9 ^e	784±13 ^e	1198±25 ^{de}	1368±36 ^e	2975±18 ^c	3163±16 ^b	3580±21 ^{def}	3390±19 ^f				
N ₁ P ₀	774±15 ^e	917±15 ^d	1518±41 ^{cd}	1485±111 ^{cd}	2915±12 ^c	3136±84 ^b	3508±42 ^{ef}	3460±32 ^f				
N ₁ P _{0,5}	1409±18 ^a	1043±17 ^c	1627±38 ^c	1585±25 ^c	3336±9 ^a	3352±10 ^a	3819±28 ^{b-e}	3669±16 ^{c-e}				
N ₁ P _{1,0}	1380±16 ^a	986±29 ^{cd}	1955±36 ^b	1927±45 ^b	3423±12 ^a	3408±30 ^a	4031±25 ^b	3883±18 ^{bcd}				
N ₁ P _{1,5}	1310±60 ^b	998±27 ^c	1939±9 ^a	2149±33 ^b	3427±19 ^a	3431±26 ^a	4095±13 ^a	3905±24 ^{bc}				
Raíz												
N ₀ P ₀	1296±13 ^d	1141±11 ^f	1253±46 ^d	1337±35 ^{bcd}	1695±08 ^g	1737±43 ^{fg}	1745±25 ^f	1646±23 ^h				
N ₁ P ₀	1009±17 ^g	993±14 ^g	1303±10 ^{cd}	1467±37 ^{bc}	1844±27 ^{ef}	1889±32 ^{de}	1781±51 ^e	1680±38 ^g				
N ₁ P _{0,5}	1642±16 ^a	1355±13 ^c	1363±137 ^{bcd}	1537±29 ^b	1970±09 ^d	2141±34 ^c	1900±33 ^c	1781±19 ^e				
N ₁ P _{1,0}	1531±24 ^b	1268±24 ^{de}	1483±99 ^{bc}	1825±53 ^a	2143±17 ^{bc}	2248±19 ^{ab}	2005±31 ^b	1885±21 ^d				
N ₁ P _{1,5}	1351±14 ^c	1228±18 ^e	1781±70 ^a	1935±71 ^a	2258±30 ^a	2199±27 ^{abc}	2037±15 ^a	1896±14 ^c				

Los valores se expresan como las medias ± del error estándar de la media (n = 3); los valores de DMS del grano, la paja y la raíz son 35,3, 44,3 y 23,7 (trigo); 85, 92 y 175 (maíz); 57, 62,2 y 92,5 (garbanzo) y 42, 58 y 315 (soja verde).

3.4 Translocación de metales

Los factores de translocación (FT) de todos los metales medidos (Cd, Cu y Zn) fueron más altos en el tratamiento N1P0 y disminuyeron al aumentar los niveles de P (Tabla 11) para todas las especies de plantas. La media del FT se redujo en el siguiente orden: soja verde (1,77) > garbanzo (1,20) > trigo (1,14) > maíz (1,03).

3.5 Análisis del suelo después de la cosecha

Después de cosechar todos los cultivos, se realizó un análisis del suelo en el que se detectó que la aplicación de P había provocado aumentos en el contenido de metales extraíbles con el método AB-DTPA (Cd, Cu y Zn) y de P en el suelo, correspondiente al nivel de P aplicado (figura 1). Si bien el contenido de Cu y Zn extraíble con el método AB-DTPA se incrementó levemente con el P, los valores no fueron significativos ($p > 0,05$). Por otro lado, la disponibilidad de Cd y P aumentó en gran medida cuando se elevaron los niveles de P en el suelo. Como en el caso del Cu y Zn, aunque los valores de pH aumentaron ligeramente al agregar P, las diferencias no fueron notables. Además, cuando se comparó con el tratamiento de control, los niveles disminuyeron con la aplicación de N solamente (N_1P_0).

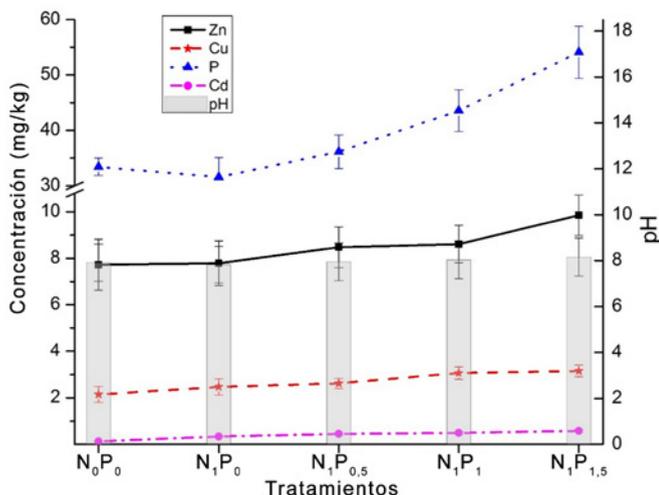


Figura 1: Efecto de los tratamientos con fertilizantes en la concentración de Cd, Zn, Cu y P extraíble con el método AB-DTPA y el nivel de pH después de la cosecha

4. Discusión

La cosecha de granos para todos los cultivos aumentaron con el incremento en la aplicación del fertilizante DAP junto con las dosis recomendada de nitrógeno (Tabla 7). Sin embargo, la biomasa se redujo al añadir la combinación de N y P, esto podría deberse a la adición de metales contenidos en el fertilizante P y algún tipo de fitotoxicidad que se genere.

Si bien se espera un aumento del rendimiento de los cultivos después de la administración del fertilizante, debido a los efectos beneficiosos de los nutrientes aplicados en el crecimiento y el metabolismo de las plantas, el porcentaje de aumento depende de la especie de planta o la variedad específica cultivada (Nuruzzaman y colaboradores, 2006). La aplicación de P promueve al desarrollo de las raíces, la fotosíntesis y la madurez del cultivo, induce la resistencia de la planta a las enfermedades, mejora la eficacia en el uso del agua, la fijación de N, la translocación de azúcar y, en consecuencia, el rendimiento de los cultivos (Guan y colaboradores, 2013). El uso de la mitad de la dosis recomendada de P, como lo hicieron los agricultores, parece ser una opción económica para la producción de cultivos de cereales y leguminosas en los suelos irrigados con aguas residuales. La disminución observada en el rendimiento de la biomasa a raíz del suministro de N solamente (N_1P_0) podría deberse a una combinación de absorción elevada de metales, la consecuente fitotoxicidad de estos metales, así como de una deficiencia innata de P en estos suelos calcáreos (Siebers y colaboradores, 2014). Los niveles más altos de Cd en los granos de trigo y garbanzo se registraron con el tratamiento N_1P_1 y en los granos de maíz y la soja verde, con el tratamiento $N_1P_{0,5}$, mientras que los niveles más bajos se observaron con el tratamiento $N_1P_{0,5}$ (tabla 7). Cuando se aplicó la dosis más alta de P, el rendimiento de la biomasa también decreció, lo que provocó, en cierta medida, una menor absorción y acumulación de metales en los tejidos. Ante la presencia de niveles más altos de P, podrían predominar diferentes procesos para transformar los metales fácilmente disponibles en tipos menos disponibles. Con niveles bajos de metales, al parecer, los procesos de las plantas controlan la absorción de los metales, mientras que, en niveles altos, las reacciones de los suelos fueron las principales responsables de la absorción de los metales. La mayor acumulación de Cd en los tejidos a bajos niveles podría corresponder a reacciones de intercambio de iones con Cd y a la competencia de los iones del fertilizante en los sitios de sorción o a la acidificación del suelo (Grant,

Tabla 11: Factores de translocación de metales (FT) de cuatro especies de cultivo y dos variedades por especie

Metal	Tratamiento	TRIGO		MAÍZ		GARBANZO		SOJA VERDE	
		BKR-02	AS-02	S-02	M-6520	Bital-98	P-2000	NIAB-92	NIAB-06
Cd	N ₀ P ₀	0,98	1,01	0,51	0,57	0,59	0,91	0,91	1,16
	N ₁ P ₀	1,46	1,33	0,70	0,84	0,80	1,26	1,52	1,41
	N ₁ P _{0,5}	1,21	1,59	0,74	0,76	0,69	0,83	1,61	1,31
	N ₁ P _{1,0}	0,74	1,12	0,80	0,71	0,69	0,62	0,53	0,74
	N ₁ P _{1,5}	0,52	1,06	0,61	0,58	0,53	0,70	0,40	0,85
Zn	N ₀ P ₀	1,42	1,76	2,15	2,04	1,76	2,47	2,88	3,01
	N ₁ P ₀	1,53	1,68	2,24	2,12	1,79	2,69	3,04	3,26
	N ₁ P _{0,5}	1,36	1,51	1,78	1,89	1,95	2,57	2,71	3,14
	N ₁ P _{1,0}	1,22	1,15	1,75	1,80	1,83	2,22	2,69	2,73
	N ₁ P _{1,5}	1,09	1,07	1,55	1,60	1,75	2,02	2,50	2,52
Cu	N ₀ P ₀	0,71	0,98	0,50	0,45	0,82	0,65	1,47	1,30
	N ₁ P ₀	1,08	1,17	0,58	0,63	0,90	0,82	1,68	1,38
	N ₁ P _{0,5}	0,95	1,05	0,54	0,59	0,83	0,69	1,63	1,36
	N ₁ P _{1,0}	0,94	0,99	0,52	0,55	0,79	0,64	1,51	1,25
	N ₁ P _{1,5}	0,75	0,87	0,43	0,42	0,71	0,61	1,37	1,11

2011). Está bien documentado que el fosfato reduce el nivel de Cd en la solución del suelo y su movilidad al formar precipitados de metales con productos de baja solubilidad, como Cd_2PO_3 , $\text{Cd}_3(\text{PO}_4)_2$, $\text{Cd}(\text{OH})_2$ o CdCO_3 , que tienden a ser recalcitrantes y, por lo general, no están disponibles para las plantas (Huang y colaboradores, 2012).

La disminución de Cd en los tejidos también se puede deber a la sorción de Cd inducida por el P en el suelo (Siebers y colaboradores, 2014), una mayor carga superficial o la coadsorción de P y Cd como par iónico (Grant, 2011).

La inmovilización de los metales a dosis muy altas de P, por lo general, superiores a las utilizadas para la producción de cultivos, podría ocurrir por la adsorción y/o precipitación/coprecipitación de metales inducidos por P (Grant, 2011). Asimismo, se han reportado en otras investigaciones que, después de aplicar fertilizantes P en el suelo, las concentraciones de Cd en las plantas y en los sitios de sorción han disminuido (Huang y colaboradores, 2012). En la mayoría de estos estudios, la disminución de la fitodisponibilidad de Cd se podría relacionar con una alta disponibilidad de P, que disminuye la absorción de Cd al interferir con la translocación de Cd desde las raíces hasta los tallos o al favorecer la capacidad del suelo o sus componentes para adsorber o precipitar el Cd (Mar y colaboradores, 2012).

A menudo, las interacciones antagonistas entre el P y el Zn son significativas en los sistemas suelo-planta, en especial, cuando se aplica solo uno de ellos (P o Zn) a través de una enmienda de fertilizante (Lambert y colaboradores, 2007). Las interacciones entre los dos elementos son complejas dado que el P interfiere con la absorción del Zn. Además, el P aumenta el rendimiento de las plantas y, por lo tanto, causa sitios de sorción en la dilución del suelo de las concentraciones de Zn en los tejidos. Los aumentos inducidos por el fósforo en el rendimiento de los cultivos también podrían incrementar la capacidad del cultivo para eliminar el zinc del suelo, al favorecer el crecimiento radicular o mejorar el flujo de masa y la transpiración (Lambert y colaboradores, 2007). El aumento de la desorción de Cd en el suelo podría reforzar la fitodisponibilidad de Cd y, como consecuencia, provocar una mayor competencia entre el Zn y el Cd por su absorción y translocación en las plantas (Grant y colaboradores, 1998). De este modo, las interacciones entre Zn, Cd y P pueden tener un efecto significativo en su acumulación general en los tejidos de las plantas (Imtiaz y colaboradores, 2006). Asimismo, tras aplicar P y Zn en

el suelo, los sitios de sorción también pueden interactuar para reducir el contenido de Cu en los tejidos, que se cree que ocurre en el sitio de absorción, posiblemente, con la precipitación de Cu en la superficie radicular (Fageria y colaboradores, 2001).

El tratamiento solo con nitrógeno aumentó la concentración de los metales evaluados en los tejidos (Cd, Cu y Zn) dado que este tratamiento reduce de manera significativa el pH del suelo (Figura 1), e influye en la composición de la rizósfera, la actividad microbiana y el crecimiento radicular (Wangstrand y colaboradores, 2007). Los fertilizantes a base de amonio (urea, $\text{NH}_4\text{:N}$) aumentaron la fitodisponibilidad de los metales más que los fertilizantes a base de nitrato debido a la reducción del pH del suelo. Esta reducción se debió, posiblemente, a nitrificación, absorción de NH_4^+ por parte de las plantas y eliminación de H^+ a través de las raíces, lo que causó un aumento de los niveles de iones de hidrógeno (H^+) en el suelo (Avci y Deveci, 2013). Las concentraciones medias de los metales se incrementaron de la siguiente manera: Cd (maíz > garbanzo > soja verde > trigo); Cu (soja verde > trigo > garbanzo > maíz) y Zn (trigo > garbanzo > soja verde > maíz). Debido a que la soja verde y el maíz se cosecharon en verano, las altas concentraciones de Cd pueden deberse, en parte, a la elevada evapotranspiración (Prasad, 2004). Estas diferencias en la acumulación de metales podrían corresponder a las diferencias morfológicas y genéticas entre las especies y las variedades (Nuruzzaman y colaboradores, 2006). En muchas especies de plantas, hubo una mayor formación de raíces y exudación de un número de grupos químicos, como citrato y malato, como una forma de aumentar la disponibilidad de P (Jones y Oburger, 2011).

Los granos de trigo, garbanzo, soja verde y maíz acumularon, respectivamente, 4,8, 3,3, 7,7 y 3,76 veces menos de Cd que las raíces, y 3,8, 1,3, 7,0 y 1,5 veces menos Cd que la paja. Las concentraciones más altas de metales siempre se encontraron en las raíces de las plantas, independientemente de la especie. Una serie de factores, incluidos los anatómicos, bioquímicos y fisiológicos, puede contribuir a la acumulación y la distribución de los metales en las partes superiores de las plantas. Dado que los metales estuvieron limitados, sobre todo, a las raíces, esto sugiere que el enlace por medio de las cargas negativas de los tejidos conductores, los sitios pécticos y los grupos histidilos de las paredes celulares (Hall, 2002) puede ser importante y que el movimiento ascendente puede estar relacionado con la

cinética de saturación. Algunas proteínas de unión a iones metálicos en las raíces también se consideran responsables de la limitación (Lux y colaboradores, 2011).

Al parecer, no existe ninguna política nacional vigente sobre el uso sostenible de las aguas residuales en Pakistán. Se han formulado leyes y normas sobre el tratamiento y la eliminación de las aguas residuales en el país, pero su implementación es el verdadero problema a raíz de la falta de recursos y mano de obra calificada. El resultado es que, si bien existe sobre el papel una capacidad administrativa necesaria y adecuada, su eficacia, en la práctica, está gravemente amenazada debido a estas deficiencias. En el sector público, es obligatorio implementar un sistema de evaluación de impacto ambiental (EIA), pero no es realizado frecuentemente. Por otro lado, se abrieron laboratorios ambientales en todas las provincias, pero funcionan con la mínima cantidad de personal, y los presupuestos son inadecuados, incluso para sus equipos de rutina y necesidades de sustancias químicas. De manera similar, se conformaron tribunales ambientales, pero su capacidad para tratar los casos informados es extremadamente limitada, dado que se asignó el mínimo personal en solo dos provincias para supervisar los casos de todo el país.

5. Conclusión

Si bien los fertilizantes DAP son una fuente importante de metales incorporados a los suelos agrícolas, la aplicación de P en todos los niveles fue eficaz para disminuir la fitodisponibilidad de tres metales (Cd, Cu y Zn) presentes en suelos calcáreos irrigados con las aguas residuales municipales. La opción más viable desde el punto de vista económico para reducir la toxicidad por metales en los cultivos incluyó el uso de solo la mitad de la dosis recomendada del fertilizante de fosfato. Pese a que este estudio se limitó a cuatro especies de plantas, estos hallazgos iniciales se pueden aplicar de varias maneras para una producción agrícola más segura de especies de monocotiledóneas cultivadas en suelos irrigados con aguas residuales municipales no tratadas.

6. Recomendaciones futuras

Se deben aclarar los conocimientos previos de los factores que afectan la movilidad, la disponibilidad, la bioacumulación y los mecanismos de absorción de metales pesados de los cereales y las leguminosas debido a las diferencias en su fisiología y morfología de las raíces. Asimismo, se ha demostrado en estudios previos que los metales pesados se pueden translocar a los granos/semillas por medio de diferentes tejidos (Murtaza y colaboradores, 2015; Murtaza y colaboradores, 2016). Sin embargo, se deben realizar más investigaciones sobre su dinámica, en especial, en los cultivos de cereales y leguminosas importantes.

1. La cantidad elevada de metales beneficiosos (Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni y Zn) en la biomasa cosechada (cereales y leguminosas) se puede "diluir" hasta niveles aceptables al combinar la biomasa contaminada con materia limpia (libre de metales) en fórmulas de fertilizante y forraje.
2. La inmovilización química en el lugar de los metales pesados no solo es una estrategia de recuperación económica que estabiliza los metales pesados en el suelo contaminado, sino también puede mejorar la fertilidad del suelo y, a la larga, aumentar el crecimiento de las plantas. Las enmiendas orgánicas (compost) contienen un alto porcentaje de materia orgánica humidificada y podrían disminuir la biodisponibilidad de los metales pesados en el suelo porque tienen una mayor superficie y, por lo tanto, aportan sitios de gran absorción, aunque sea temporalmente, lo que permite recuperar la vegetación.
3. Se observó que la función de los fertilizantes NPK y las enmiendas orgánicas, como el estiércol de granja, o de los aditivos inorgánicos, como la cal, el yeso, las zeolitas y los óxidos de hierro, fue efectiva para disminuir la transferencia de metales a los cultivos. La mayoría de estos materiales se encuentran fácilmente en grandes cantidades y su incorporación al suelo es sencilla si solo está contaminada la capa vegetal. Sin embargo, es posible que sea necesario repetir la aplicación. Además, la eficacia depende en gran medida de las condiciones del suelo y se debe evaluar con regularidad.
4. Otros métodos eficaces para reducir la transferencia de metales en la cadena alimenticia incluyen la rotación de cultivos y la siembra de cultivos industriales o bioenergéticos. Se deben hacer

más investigaciones sobre la selección de cultivos conforme a un sistema de agricultura irrigada con aguas residuales para brindarles las recomendaciones finales a los agricultores.

5. Hoy en día, es obligatorio el tratamiento de las aguas industriales/ municipales a través de procesos físicos, químicos y biológicos para el uso seguro de las aguas residuales, además de la creación de leyes estrictas y la realización de campañas de concientización nacionales. Por otra parte, es necesario el desarrollo de capacidades para llevar a cabo investigaciones relacionadas con el tratamiento, la gestión y el uso seguro de las aguas residuales. Esto se puede lograr mediante la organización de reuniones con los grupos de agricultores, incluida la prensa impresa y digital.

7. Agradecimientos

Los autores quisieran agradecer a la Comisión de Educación Superior (CES) de Pakistán por su apoyo financiero. También queremos expresar nuestro agradecimiento al Dr. Manzoor Qadir del Instituto para el Agua, el Medioambiente y la Salud de la Universidad de las Naciones Unidas (UNU-INWEH) de Ontario, Canadá, por su valiosa cooperación durante todo el estudio y el análisis crítico de este documento.

Referencias

Akgiray O. (2005). "Explicit solutions of the Manning equation for partially filled circular pipes". *Canadian Journal of Civil Engineering*, 32:490–499.

Avcı H, Deveci T. (2013). "Assessment of trace element concentrations in soil and plants from cropland irrigated with wastewater". *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 98:283–291.

Ekmekci Y., Tanyolac D. y Ayhana B. (2008). "Effects of cadmium on antioxidant enzyme and photosynthetic activities in leaves of two maize cultivars". *Journal of Plant Physiology*, 165:600–611.

Ensink J. H. J., Simmons R. W. y van der Hoek W. (2004). "Wastewater use in Pakistan: The cases of Haroonabad and Faisalabad". En *Wastewater Use in Irrigated Agriculture: Confronting the Livelihood and Environmental Realities*, editado por Scott, C. A., Faruqui, N. I. y Raschid, L., 91–99. Wallingford: CAB International.

Fageria N. K., Baligar V. C., Jones C. A. (2001). "Growth and mineral nutrition of field crops". CRC Press.

Gopal R., Rizvi A. H. (2008). "Excess lead alters growth, metabolism and translocation of certain nutrients in radish". *Chemosphere*, 70:1539–1544.

Grant C. A. (2011). "Influence of phosphate fertiliser on cadmium in agricultural soils and crops". *Agriculture and Agri-Food Canada*, 54:143–155.

Grant C., Buckley W., Bailey L., Selles F. (1998). "Cadmium accumulation in crops". *Canadian Journal on Plant Science*, 78:1–17.

Guan G., Tu S., Li H., Yang J., Zhang J., Wen S., Yang L. (2013). "Phosphorus fertilization modes affect crop yield, nutrient uptake, and soil biological properties in the rice-wheat cropping system". *Soil Science Society of America Journal*, 77:166–172.

Hall J. (2002). "Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance". *Journal of Experimental Botany*, 53:1–11.

Huang H., Li T., Gupta D., He Z., Yang X-e, Ni B., Li M. (2012). "Heavy metal phytoextraction by *Sedum alfredii* is affected by continual clipping and phosphorus fertilization amendment". *Journal of Environmental Sciences*, 24:376–386.

Imtiaz M., Alloway B. J., Memon M. Y., Khan P., Siddiqui S. H., Aslam M., Shah SKH. (2006). "Zinc tolerance in wheat cultivars as affected by varying levels of phosphorus". *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 37:1689–1702.

Jones D. L., Oburger E. (2011). "Solubilization of phosphorus by soil microorganisms". En *Phosphorus in Action*, 169–198. Springer.

Kim K. R., Owens G., Naidu R., Kwon S. L. (2010). "Influence of plant roots on rhizosphere soil solution composition of long-term contaminated soils". *Geoderma*, 155:86–92.

Lambert R., Grant C., Sauva S. B. (2007). "Cadmium and zinc in soil solution extracts following the application of phosphate fertilisers". *Science of The Total Environment*, 378:293–305.

Lux A., Martinka M., Vaculík M., White P. J. (2011). "Root responses to cadmium in the rhizosphere: a review". *Journal of Experimental Botany*, 62:21–37.

Mar S. S., Okazaki M., Motobayashi T. (2012). "The influence of phosphate fertiliser application levels and cultivars on cadmium uptake by Komatsuna (*Brassica rapa* L. var. *perveridis*)". *Soil Science and Plant Nutrition*, 58:492–502.

McGowen S., Basta N., Brown G. (2001). "Use of diammonium phosphate to reduce heavy metal solubility and transport in smelter-contaminated soil". *Journal of Environmental Quality*, 30:493–500.

Murtaza G., Javed W., Hussain A., Wahid A., Murtaza B. y Owens G. (2015). "Metal uptake via phosphate fertiliser and city sewage in cereal and legume crops in Pakistan". *Environmental Science and Pollution Research International*, 22:9136–9147.

Murtaza G., Javed W., Hussain A., Qadir M. y Aslam M. (2016). "Soil applied zinc and copper suppress cadmium uptake and improve the performance of cereals and legumes". *International Journal of Phytoremediation* (aceptado).

Murtaza G., Haynes R. J., Naidu R., Belyaeva O. N., Kim K. R., Lamb D. T. y Bolan N. S. (2011). "Natural attenuation of Zn, Cu, Pb and Cd in three biosolids-amended soils of contrasting pH measured using rhizon pore water samplers". *Water Air Soil Pollution*, 221:351–363.

Nuruzzaman M., Lambers H., Bolland M. D. y Veneklaas E. J. (2006). "Distribution of carboxylates and acid phosphatase and depletion of different phosphorus fractions in the rhizosphere of a cereal and three grain legumes". *Plant Soil*, 281:109–120.

Prasad R. (2004). "OFDM for wireless communications systems". En *Artech House Universal Personal Communications* (series).

Purushotham D., Rashid M., Lone M. A., Rao A. N., Ahmed S., Nagaiah E., Dar F. A. (2013). "Environmental impact assessment of air and heavy metal concentration in groundwater of maheshwaram watershed, Ranga Reddy district, Andhra Pradesh". *Geological Society of India*, 81:385–396.

Sarwar N., Malhi S. S., Zia M. H., Naeem A., Bibi S. y Farid G. (2010). "Role of mineral nutrition in minimizing cadmium accumulation by plants". *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 90:925–937.

Siebers N., Godlinski F., Leinweber P. (2014). "Bone char as phosphorus fertiliser involved in cadmium immobilization in lettuce, wheat, and potato cropping". *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 77:75–83

Wangstrand H., Eriksson J., Öborn I. (2007). "Cadmium concentration in winter wheat as affected by nitrogen fertilization". *European Journal of Agronomy*, 26:209–214.

Zhang F., Shen J., Zhang J., Zuo Y., Li L., Chen X. (2010). "Chapter one – rhizosphere processes and management for improving nutrient use efficiency and crop productivity: implications for China". *Advances in Agronomy*, 107:1–32.

SECCIÓN III:
CUESTIONES RELATIVAS
A LAS POLÍTICAS Y LA
IMPLEMENTACIÓN

CASO 11

Ayuda del Gobierno a los agricultores que utilizan aguas residuales para riego: el caso del Gobierno sudafricano en Lebowakgomo, provincia de Limpopo, que apoya a los agricultores que producen vegetales (Sudáfrica)

T. Gomo¹

Resumen

En vista de la merma de los recursos de agua dulce, se ha utilizado el agua residual para mejorar la producción de alimentos a través del riego. Los Gobiernos de todo el mundo han creado e implementado políticas que promueven la reutilización segura de las aguas residuales, pero en los países en desarrollo, la falta de recursos ha dificultado la implementación de estas políticas. En Sudáfrica, el Gobierno ha brindado los medios para lograr el vertido seguro de efluentes en fuentes de agua (Ley Nacional de Aguas 36 de 1998); además, ha publicado las pautas y políticas que respaldan la reutilización de las aguas residuales para riego (Boletín Oficial 36820, Aviso 665, 6 de septiembre del 2013). En el presente estudio, que aún está en curso, se evalúa el esfuerzo que el Gobierno ha realizado a través de sus distintos departamentos para promover la reutilización segura de las aguas residuales a lo largo del río Chuenes. La planta de tratamiento de Lebowakgomo deposita las aguas residuales tratadas en el río Chuenes. Hasta el momento, en el estudio, se incluyeron tres agricultores de la vera del río Chuenes,

¹ T. Gomo 

Department of Agriculture & Rural Development, Engineering Services P. Bag X028
Chuenespoort, 0745, Sudáfrica; Correo electrónico: gomotaziva@gmail.com

En: Hiroshan Hettiarachchi and Reza Ardakanian (eds). *Uso seguro de las aguas residuales en la agricultura: ejemplos de buenas prácticas* ©UNU-FLORES 2016

que han recibido la asistencia de los departamentos del Gobierno. Los resultados preliminares indican que la planta de tratamiento de aguas residuales funciona al 200 % de su capacidad, y no se evalúa la calidad del agua que se vierte al río. Los agricultores no se registraron para utilizar aguas residuales como lo exige la ley, y la comunidad desaprueba a los agricultores que aplican estas aguas en sus cultivos. Existe una legislación que rige la reutilización de las aguas residuales, pero no se aplica.

Palabras clave: aguas residuales para riego, ayuda del Gobierno, educación comunitaria

1. Introducción

El agua para la producción de alimentos es cada vez más escasa debido al incremento de la demanda para otros usos, como domésticos, industriales y ambientales (Perry, 2005; Gomo y colaboradores, 2014), que generan mayores beneficios económicos y sociales. En la mayoría de las ocasiones, esta situación ha obligado a agricultores alrededor del mundo, en especial en las zonas periurbanas, a utilizar las aguas residuales de las grandes ciudades y pueblos para regar sus cultivos. Sin embargo, en los países en desarrollo donde no se dispone de recursos para el tratamiento adecuado de las aguas residuales, el uso de estas aguas representa mayores riesgos para la salud. Algunos Gobiernos de los países en desarrollo han instaurado políticas y empezaron a implementar pautas que promueven el uso seguro de las aguas residuales para riego. Sin embargo, el problema ha sido la ejecución de dichas políticas y normas, sobre todo, debido a la falta de recursos.

Este ha sido el caso de Sudáfrica, donde las aguas residuales se vierten en los ríos y arroyos, y luego los agricultores las extraen río abajo para producir alimentos. Un buen ejemplo de ello es el río de Chuenespoort en Lebowakgomo, en la provincia de Limpopo.

En el presente caso se describen los esfuerzos que el Gobierno de Sudáfrica ha hecho para ayudar a los agricultores a utilizar las aguas residuales para riego y se centra en la situación de Lebowakgomo y los agricultores de la zona. Aún se está trabajando en el estudio, por lo que los resultados solo son de carácter preliminar.

2. Ayuda del Gobierno en la reutilización de aguas residuales para la agricultura

El Gobierno de Sudáfrica ha tomado diversas medidas para ayudar a los agricultores que utilizan aguas residuales para riego. La Ley Nacional de Aguas 36 de 1998 abordó diversas zonas grises que han existido antes de la independencia sobre los derechos de los agricultores a utilizar el agua. Esto incluyó a los agricultores minifundistas de pueblos pequeños. La Ley también apuntó a regular la descarga de aguas residuales en recursos de agua limpia y el uso de aguas residuales en la producción de alimentos en el Artículo 37, inciso 1), apartado a.

Como resultado de este artículo de la Ley, el Gobierno ha podido emitir normas pertinentes al uso de aguas residuales para riego, la más reciente ha sido el *Aviso 665 del Boletín Oficial 36820, del 6 de septiembre del 2013*. A través de estas normas y políticas, el Gobierno ha ayudado a asegurar que se controlen la calidad del agua tratada que se vierte en los recursos hídricos y la reutilización del agua residual en el riego. En la tabla 1 de abajo, se muestra la calidad del agua residual que está permitida utilizar en riego por día.

El Gobierno de Sudáfrica también ha solicitado el registro de todo agricultor que utilice aguas residuales y el mantenimiento de registros de la cantidad, que se debe medir por semana, y la calidad, que se debe controlar por mes. Cada usuario de aguas residuales debe estar registrado ante un organismo regulador de la zona donde pretende aplicar el riego y debe recibir un certificado. El riego con aguas residuales no debe efectuarse sobre algún acuífero importante identificado y se debe aplicar respetando los siguientes límites (*Aviso del Gobierno de Sudáfrica 665 en el Boletín Oficial 36820, 6 de septiembre del 2013*):

- A 50 m de distancia, como mínimo, de una línea de inundación centenaria o hábitat ribereño, o a 100 m, como mínimo, de una corriente de agua, o en un radio de más de 500 m, como mínimo, de un pozo de agua que se utiliza para consumo humano o del ganado.
- En tierra que no se encuentre sobre un acuífero importante.
- En un radio de 500 m de distancia, como mínimo, de los límites de un humedal.

El Gobierno también ha implementado una legislación que asegura que se registren todas las plantas de tratamiento de aguas residuales y

Tabla 1: Calidad del agua residual que se puede utilizar para riego en Sudáfrica

VARIABLES	LÍMITES POR DÍA		
	50 m ³	500 m ³	2,000 m ³
pH	No inferior a 6, ni superior a 9 unidades de pH	No inferior a 6, ni superior a 9 unidades de pH	No inferior a 5,5, ni superior a 9,5 unidades de pH
Conductividad eléctrica	No superar 200 milisiemens por metro (mS/m)	No superar 200 milisiemens por metro (mS/m)	No superar 70 milisiemens por encima del recurso hídrico, hasta un máximo de 150 milisiemens por metro (mS/m)
Sólidos en suspensión			No superar 25 mg/l
Cloruro como cloro libre			No superar 0,25 mg/l
Fluoruro			No superar 1 mg/l
Jabón, aceite y grasa			No superar 2,5 mg/l
Demanda química de oxígeno	No superar 5000 mg/l tras la remoción de las algas	No superar 400 mg/l tras la remoción de las algas	No superar 75 mg/l
Coliformes fecales	No superar 100.000 UFC en 100 ml	No superar 100.000 UFC en 100 ml	No superar 1000 UFC en 100 ml
Amoníaco (ionizado y no ionizado) como nitrógeno			No superar 3 mg/l
Nitrato/nitrito como nitrógeno			No superar 15 mg/l
Ortofosfato como fósforo			No superar 10 mg/l
Tasa de adsorción de sodio (TAS)	No ser superior a 5 en las aguas residuales industriales biodegradables	No ser superior a 5 en las aguas residuales industriales biodegradables	

todas las semanas se controle la calidad del agua vertida en los recursos hídricos. Asimismo el establecimiento y ubicación de cualquier planta de tratamiento de aguas residuales también están regulados mediante la legislación. Cuando se pretende verter el agua residual tratada en un recurso hídrico, se establecen límites especiales y generales, como se muestra en la tabla 2.

Con estas políticas y normas, además de otras que no se han descrito en el presente documento, el Gobierno de Sudáfrica ha podido ayudar hasta cierto punto a los agricultores que usan aguas residuales para riego. Sin embargo, pese a la existencia de estas políticas positivas y la ayuda económica que el gobierno ha brindado a los agricultores, la ejecución ha sido deficiente debido, sobre todo, a la falta de recursos y habilidades técnicas. Un ejemplo de ello son los agricultores ubicados a lo largo del río Chuenes en Lebowakgomo.

3. Lugar del estudio

Lebowakgomo es un pueblo pequeño ubicado a aproximadamente a 50 km del sureste de Polokwane, la capital provincial de la Provincia de Limpopo en Sudáfrica. El pueblo se encuentra en la localidad municipal de Lepelle-Nkumpiy tiene una población de 35,000 habitantes aproximadamente (SA population statics, 2012). La ubicación geografica del pueblo es $24^{\circ}15'30.76''S$, $29^{\circ}38'59.7''E$.



Figura 1:
Ubicación de
Lebowakgomo en
Sudáfrica

Tabla 2: Límites especiales y generales para la descarga de aguas residuales tratadas en un recurso hídrico en Sudáfrica

SUSTANCIA/PARÁMETRO	LÍMITE GENERAL	LÍMITE ESPECIAL
Coliformes fecales (en 100 ml)	1000	0
Demanda química de oxígeno (mg/l)	75	30
pH	5,5-9,5	5,5-7,5
Amoníaco (ionizado y no ionizado) como nitrógeno (mg/l)	6	2
Nitrato/nitrito como nitrógeno (mg/l)	15	1,5
Cloruro como cloro libre (mg/l)	0,25	0
Sólidos en suspensión (mg/l)	25	10
Conductividad eléctrica (mS/m)	70 mS/m por encima del recurso hídrico y hasta un máximo de 150 mS/m	50 mS/m por encima del ambiente receptor de agua hasta un máximo de 100 mS/m
Ortofosfato como fósforo (mg/l)	10	1 (mediana) y 2,5 (máximo)
Fluoruro (mg/l)	1	1
Jabón, aceite o grasa (mg/l)	2,5	0
Arsénico disuelto (mg/l)	0,02	0,01
Cadmio disuelto (mg/l)	0,005	0,001
Cromo disuelto (mg/l)	0,05	0,02
Cobre disuelto (mg/l)	0,01	0,002
Cianuro disuelto (mg/l)	0,02	0,01
Hierro disuelto (mg/l)	0,3	0,3
Plomo disuelto (mg/l)	0,01	0,006
Manganeso disuelto (mg/l)	0,1	0,1
Mercurio y sus compuestos (mg/l)	0,005	0,001
Selenio disuelto (mg/l)	0,02	0,02
Zinc disuelto (mg/l)	0,1	0,04
Boro (mg/l)	1	0,5

El río Chuenes es un pequeño río perenne que nace en las montañas que circundan al dique Chuenespoort, atraviesa Lebowakgomo y desemboca en el río Oliphants. Cuando el río pasa por Lebowakgomo, recibe parte del agua residual tratada de la planta de tratamiento del pequeño pueblo. Los agricultores extraen agua a lo largo de un fragmento del río antes y después de la descarga del agua residual en el río. El agua residual tratada en la planta es, en su mayoría, de origen doméstico y quizás puede ser un factor que contribuye a su estado perenne.

3.1 La planta de tratamiento de aguas residuales de Lebowakgomo

La planta está ubicada en las afueras del pueblo de Lebowakgomo. La capacidad de diseño de la planta es de 90 megalitros (ML) por mes, pero en la actualidad procesa entre 180 y 270 ML por mes. La planta trata las aguas de las secciones A, P, Q y S de las zonas residenciales. Las aguas de las secciones F y B se tratan en lagunas de oxidación y un humedal en otra planta de tratamiento, que vierte sus aguas en un humedal artificial.

La planta recibe los desechos a través de un sistema de tuberías subterráneas y cuando llegan a esta se criban para eliminar los sólidos. Los sólidos se extraen de forma manual y se entierran dentro del recinto de la planta. A continuación, el volumen de aguas residuales se mide a través de un vertedero triangular, que se muestra en la figura 2, a medida que se desplaza hacia el tanque de lodos activados.



a) Aquí llegan las aguas residuales, y se extraen los desechos sólidos de forma manual



b) Vertedero triangular utilizado para medir el volumen de las aguas residuales que llegan

Figura 2: Cribado de los desechos sólidos y vertedero triangular en la planta de tratamiento de aguas residuales de Lebowakgomo

Luego del proceso de lodos activados, el agua residual fluye hacia el clarificador donde se asientan los sólidos, y el líquido circula hacia el tanque de cloración. Se agrega cloruro al agua antes de verterla al río Chuenes. Por lo general, no se controla la calidad del agua después del tratamiento.

Una vez que el agua se vierte al río, varios agricultores utilizan el agua para riego río abajo. Se seleccionaron y entrevistaron tres agricultores que recibieron ayuda del gobierno a los efectos de este estudio. Estos agricultores producen vegetales, principalmente, para las comunidades locales y el pueblo de Lebowakgomo; aunque tienen el objetivo de abastecer el mercado de la gran ciudad de Polokwane a 50 km.

3.2 Agricultores que reciben ayuda

Los tres agricultores escogidos son los propietarios de la parcela Chuene, la parcela del proyecto de investigaciones agrícolas Sekonya y la cooperativa primaria agrícola Mohla donde producen vegetales en 2, 4 y 3 hectáreas, respectivamente. La ayuda que el Gobierno ha brindado a estos agricultores incluye el suministro de infraestructura para riego, como cercas, tanques, mangueras y servicios de extensión agrícola. El alcance de otro tipo de ayuda aún debe verificarse en este estudio en curso.

3.2.1 Parcela Chuene

La parcela Chuene se sitúa junto al río Chuenes y consta de 2 ha, donde se producen vegetales, como tomate, cebolla y espinaca. Los productos se venden en el mercado local de Lebowakgomo, ubicado a unos 8 km y la comunidad aledaña de Mamaolo.

El agricultor ha recibido la ayuda del Gobierno para cercar su parcela, comprar semillas y recibir servicios de extensión del Gobierno a través del Departamento de Agricultura. El agricultor es consciente de que el agua del río es agua residual, pero sigue usándola porque puede disponer de ella con facilidad. El agricultor no está dispuesto a registrarse como usuario del agua para evitar tener que pagar por su consumo, aunque es consciente de que necesita registrarse, pero desconoce en qué oficina debe hacerlo.

El agricultor ha enfrentado dificultades con la comunidad de Mamaolo, ya que no quería comprar sus productos porque le generaban desconfianza. Algunas personas saben que el agua proviene de la planta de tratamiento de aguas residuales, pero otras rechazan los vegetales porque se han cometido suicidios en distintas partes de ese tramo del río. Algunos pobladores, incluso, han hablado con el agricultor para advertirle sobre el agua.

Como resultado, el agricultor ha reducido la producción porque tiene miedo de la comunidad y, en algunas ocasiones, sus equipos han sufrido hechos vandálicos. El agricultor también ha realizado una perforación para suplir las necesidades de agua de riego y usar en momentos cuando no utiliza el agua del río debido a los problemas con la comunidad. En la figura 3 se muestra la parcela Chuenes con una pequeña verdulería en el lugar y parte del río Chuenes donde el agricultor extrae el agua mediante un sistema portátil que va por el suelo.



Figura 3: Parcela Chuene

3.2.2 Parcela del proyecto de investigaciones agrícolas Sekonya

La parcela del proyecto de investigaciones agrícolas Sekonya ocupa 3 ha donde se producen vegetales con riego por goteo. El agricultor saca el agua del río Chuenes y la bombea a un tanque de almacenamiento de acero de 60.000 l que le concedió el Gobierno a través del Departamento de Desarrollo Rural. Luego el agricultor riega sus cultivos con un sistema de riego por goteo en la parcela donde produce verduras, como tomate, espinaca, repollo, para abastecer el mercado de Lebowakgomo.

El agricultor es consciente de que el agua que utiliza es agua residual, pero dado que es de fácil acceso y económica, la utiliza para la producción. El agricultor no es un usuario de agua registrado, pese a que existe una ley que lo obliga a hacerlo. En la figura 4 se pueden observar parte de la parcela y la infraestructura que le otorgó el Gobierno.



Figura 4: Parcela del proyecto de investigaciones agrícolas Sekonya

El agricultor también ha enfrentado problemas con la comunidad, ya que no apoya su proyecto debido a que se utilizan aguas residuales. Esto ha generado una merma en la producción de la parcela.

3.2.3 Parcela de la cooperativa primaria agrícola Mohla

La parcela Mohla está situada a unos 12 km del pueblo de Lebowakgomo a la vera del río Chuenes. La cooperativa está en manos de tres integrantes de la comunidad de Malemang. La cooperativa ha recibido el apoyo del Gobierno en forma de equipos de riego, capacitación y servicios de extensión agrícola, así como insumos de

producción. Los principales vegetales que se producen son espinacas, calabazas, pimientos verdes y zanahorias, que se destinan al mercado de Lebowakgomo.

Los agricultores utilizan los métodos de riego por aspersión y surcos con el agua del río Chuenes. Los agricultores son conscientes de que se trata de agua residual, pero no están registrados como usuarios de agua. La comunidad de Malemang también les ha causado problemas por el uso de las aguas residuales y, en algunas ocasiones, han decidido comprar vegetales en los grandes supermercados del pueblo de Lebowakgomo. Las medidas de la comunidad han generado una merma en la producción de la parcela. En la figura 5 se muestran algunos de los vegetales que se cultivan en la parcela Mohla.



Figura 5: Parcela de la cooperativa primaria agrícola Mohla

4. Conclusión

Es preciso destacar que se trata de un estudio en curso y que las conclusiones son solo preliminares. En el informe final del estudio se ofrecerán conclusiones determinantes. En el presente estudio, se concluye que el Gobierno de Sudáfrica reconoce la importancia de las aguas residuales y ha implementado políticas para respaldar el uso seguro del agua residual en la producción de alimentos. El Gobierno también ayuda a los agricultores que desean utilizar el agua residual para la producción de alimentos, pero debido a la falta de recursos, las políticas no se han ejecutado.

Los agricultores utilizan el agua residual porque es de fácil acceso y económica, aunque no se registraron como se lo exige la ley, probablemente, porque no desean pagar por su consumo. Los

agricultores son conscientes de que deberían registrarse como usuarios de agua. La planta de tratamiento de aguas residuales no tiene la capacidad de evaluar la calidad del agua que se vierte en el río Chuenes.

Todos los agricultores que se ubican junto al río Chuenes enfrentan problemas similares con las comunidades que desapruueban el uso de aguas residuales en la producción de alimentos. Es posible que se necesiten implementar otras medidas para educar a la comunidad sobre el uso de aguas residuales en la producción de alimentos.

Referencias

Gomo, T., Senzanje, A., Mudhara M. y Dhavu K. (2014). Assessing the performance of smallholder irrigation and deriving best management practices in South Africa. *Irrigation and Drainage Systems* 63, 419–429.

Perry, C. (2005). Irrigation reliability and the productivity of water: A proposed methodology using evapotranspiration mapping. *Irrigation and Drainage Systems* 19, 211-221.

Gobierno de Sudáfrica. (1998). The National Water Act 36 of 1998.

Gobierno de Sudáfrica. (2013). "Government Notice 665 in Government Gazette 36820, 6 September 2013."

Censo de Sudáfrica. (2012). Población de Sudáfrica.

CASO 12

Retos en la implementación de normas para el reúso de aguas tratadas en riego caso Bolivia (Bolivia)

Juan Carlos Rocha Cuadros ¹

Resumen

El estudio está basado en los trabajos patrocinados por PROAGUAS - COTRIMEX para el establecimiento de un reglamento para el reúso de las aguas tratadas en riego y considera las etapas de estudio de las leyes y normativa vigentes, la propuesta de parámetros de control, la relación con las guías de la OMS y la sostenibilidad de la aplicación del contenido del reglamento a través de la implementación de subsidios al sistema de riego en su conjunto.

De todas las etapas mencionadas, se hace referencia a las dificultades que se ha encontrado y las propuestas que se han realizado para sortear las mismas y llegar hasta la etapa de formulación del reglamento.

Palabras Clave: Reúso de aguas tratadas; Bolivia; Implementación de normas; riego; sostenibilidad

1. Introduction

Durante ya muchos años en Bolivia, se han realizado esfuerzos para contar con un área agrícola bajo riego que pueda de alguna manera ser suficiente para alimentar a la población del país. En este contexto,

¹ Juan Carlos Rocha Cuadros 

University of San Simon, Cochabamba, Bolivia; Correo electrónico: jcr4@entelnet.bo

En: Hiroshan Hettiarachchi and Reza Ardakanian (eds). *Uso seguro de las aguas residuales en la agricultura: ejemplos de buenas prácticas* ©UNU-FLORES 2016

diferentes agencias de cooperación han invertido sus recursos en el establecimiento de una base profesional que maneje el riego desde una perspectiva técnica, especialmente en medianos y grandes proyectos de riego y paralelamente el establecimiento de oficinas de acompañamiento a la implementación de proyectos de riego desde el punto de vista social.

Como parte de esta tarea, se han realizado levantamientos de la infraestructura de riego construida en Bolivia, a fin de tener una figura completa acerca del estado de riego, así se tienen varias publicaciones entre ellas "Sistematización sobre tratamiento y reúso de aguas residuales".

En el transcurso del trabajo de levantamiento, se pudo notar que existía otro tipo de riego, aquel que no tenía obras de cabecera específicamente construidas para ese efecto, especialmente en la zona andina de Bolivia, donde el recurso agua es naturalmente escaso. Ello llevo a la tarea de también identificar aquellas poblaciones que hacían uso de aguas negras para el riego, sean estas tratadas o no, habiendo llegado a la conclusión que la mayor parte de las poblaciones con escasez de agua, hacen uso de aguas negras no tratadas y en aquellos municipios donde existe una PTAR, la misma no funciona adecuadamente por falta de mantenimiento y por tanto, la situación es idéntica a las que riegan con aguas negras no tratadas.

Este panorama, ha llevado a las autoridades encargadas del riego en Bolivia a intentar plantear una reglamentación que tenga en cuenta no solo opciones técnicas de tratamiento de agua, sino también la sostenibilidad de las medidas a ser tomadas, dada la falta de operación y mantenimiento vistas en varias municipalidades.

2. El riego con aguas negras tratadas o no tratadas en Bolivia.

La cooperación triangular entre México, Alemania y Bolivia (COTRIMEX), ha venido incentivando la investigación y la presentación de propuestas para el uso de las aguas tratadas en riego. Durante los años 2012 a 2014, ha realizado el levantamiento en la zona andina de 111 sistemas de riego que usan aguas negras con o sin tratamiento, y los hallazgos más importantes se resumen a lo siguiente:

- Existen 84 PTAR en los municipios levantados.
- De las 84 PTAR, 31 de ellas no funcionan debido a problemas de operación y mantenimiento.
- De las 53 PTAR restantes, la eficiencia de tratamiento es menos de 50%, lo cual no las hace aptas para riego.
- Todos los efluentes se usan en riego de hortalizas.

La realidad del riego con aguas negras, tratadas o no, impulsó la formación de una comisión mixta, formada por ministerios y reparticiones del Estado que tienen que ver con esta temática, además de la cooperación internacional. Conjuntamente llegaron a plasmar un plan con cuatro líneas estratégicas de acción:

- Estrategias de capacitación.
- Estrategias del Marco Regulatorio.
- Estrategias de Financiamiento.
- Estrategias de comunicación.

3. Estrategias del Marco Regulatorio

El desarrollo de la Reglamentación en esta materia, ha seguido ya pasos como la etapa de propuesta, en la que se define la necesidad de contar con reglamentación específica; la de preparación a cargo de un consultor y la etapa de discusión a cargo de un comité donde se incluyen a los viceministerios que tienen que ver con el tema de reúso del agua tratada, las diferentes reparticiones del Estado dependientes de los viceministerios y la cooperación internacional como apoyo y transferencia de experiencias.

A las etapas antes mencionadas, le siguen encuestas, aprobación y publicación de la propuesta, que aún no se han realizado.

La acción que corresponde a la propuesta, se ha desarrollado tomando en cuenta los siguientes puntos específicos:

- Estudio de normativa actual relacionada
- Propuesta para la selección de parámetros
- Relación con guías OMS
- Sostenibilidad/generación de incentivos

3.1. Estudio de Normativa actual

Una de las mayores dificultades de hacer una nueva reglamentación, consiste en compatibilizar la normativa actual con el objetivo que se persigue. En el caso de Bolivia, existe la Ley 1333 de Medio Ambiente que por su carácter legal, está por encima de cualquier reglamento que se pretenda hacer.

Muchas veces el compatibilizar las Leyes con los reglamentos implica compromisos que si bien no van en contra de lo estipulado en la Ley, responden más bien a interpretaciones que permitan lograr un compromiso entre partes. En particular, existe dentro la Ley de Medio Ambiente el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

El Reglamento indicado, regula los lanzamientos de aguas residuales a cuerpos de agua y contiene una clasificación en cuatro clases de cuerpos de agua, para cada una de las clases existen 80 parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos y 25 de ellos llamados parámetros básicos son de cumplimiento obligatorio.

Desde la promulgación de la Ley 1333, se ha hecho muy poco para clasificar los cuerpos de agua y los parámetros son muy exigentes en cuanto a la calidad, de manera tal que su aplicación es poco menos que imposible, de hecho, si se toma en cuenta la tecnología y la calidad de aguas tratadas por las plantas de las ciudades más importantes, el cumplimiento total a la reglamentación vigente no es posible. Sin embargo, existe también un cuadro de parámetros transitorios, (hasta que se clasifiquen los ríos) que son menos exigentes y de ello se valen los operadores de las plantas de tratamiento o los proyectistas para el cumplimiento de la Ley 1333.

Véase entonces, que existe al interior de la Ley de Medio Ambiente, una manera de interpretar el cumplimiento de la misma a través del artículo transitorio, máxime si en toda la Ley la única mención al riego está contenida en la clasificación de los cuerpos de agua, y recaer en la categoría A, es decir, la más exigente, para esta categoría, la DBO_5 tiene que ser menor a 2 mg/l, los coliformes fecales entre 5 y 50 NMP/100 ml para el 80% de las muestras, los sólidos sedimentables menores a 10 mg/l entre otros parámetros.

Con la Ley Ambiental así desarrollada, algunos sectores como el minero, el industrial y el de hidrocarburos, han desarrollado reglamentos aplicables a esos sectores en particular, esto para permitir, un cumplimiento real que pueda ser controlado a través de mecanismos

propuestos en esos reglamentos. De cierta manera, los diferentes sectores, han demostrado que la aplicación de la Ley de Medio Ambiente debe ser adecuada para estos sectores en particular y han señalado un camino que puede también ser aplicado por otros sectores.

En el marco de la institucionalidad vigente, se han producido discusiones acerca de quien está a cargo de que. Los servidores públicos que trabajan en el Viceministerio de Medio Ambiente, son celosos del cumplimiento cuasi estricto de la Ley y son reacios a los cambios de parámetros en su concentración y obviamente exigen estudios que respalden cualquier cambio que se proponga. Sobre decir, que los parámetros actuales no tenían estudios estrictos ni nada parecido, lo que significa que la mayoría de los cuerpos de agua no están clasificados hasta ahora.

Se ha propuesto que las plantas de tratamiento, sean vistas como obras de cabecera para los sistemas de riego que utilicen estas aguas para sus fines. Esto puede definir quien se hace cargo del control ambiental de este tipo de aguas, en este caso correspondería al sector riego ser la cabeza delegada, ya que la Ley da la responsabilidad de todo aspecto ambiental al viceministerio de Medio Ambiente y Agua.

La propuesta implica una decisión política que debe asumir el sector riego si se quiere un cambio en la situación del riego con aguas negras de origen doméstico, ya que los sectores industrial, de hidrocarburos y minero tienen sus propias reglamentaciones. Es posible además, que dependiendo de la calidad de agua influente y el tipo de tratamiento, las aguas residuales provenientes de estos dos últimos sectores, puedan no ser aptas para riego; en cambio las de origen doméstico, tienen calidades que son parecidas en cuanto a su composición fisicoquímica y bacteriológica y por tanto pueden ser reguladas con una norma que atienda a las aguas tratadas de origen doméstico (municipal).

3.2. Propuesta para la selección de parámetros

Se ha tomado en cuenta diferentes experiencias de países que tienen normativa de riego. Sin embargo no se ha podido ver una aplicación uniforme de parámetros, en cambio se tiene una gama de parámetros adecuados a la realidad de cada país, pero con cierto énfasis en la aplicación de la normativa generada por la Agencia Ambiental de los Estados Unidos EPA.

En principio se ha tratado de elegir algunos parámetros que sean en lo posible representativos de la calidad de agua existente, de manera que puedan ser analizados con equipos portátiles, y que los resultados puedan estar listos a la brevedad posible.

La característica de que se puedan efectuar con equipos portátiles responde al hecho de que muchas comunidades, tienen plantas de tratamiento pero no cuentan con un laboratorio que pueda medir la eficiencia de tratamiento para poder corregir la operación en un caso dado. Pero también es posible que ciudades intermedias, ya cuenten con laboratorios que puedan servir de referencia a los análisis que se vaya a tomar en los pueblos más pequeños.

La discusión de cuantos parámetros se deben tomar en cuenta, ha llevado mucho tiempo primero, porque se querían mantener parámetros que a juicio de algunos participantes, no podían ser omitidos ya que están incluidos en la Ley de Medio Ambiente. Otros participantes querían añadir algún estudio, por ejemplo bio indicadores y otros querían un producto detallado basado en un estudio científico y que indique cual es el límite de valor más apropiado para cada parámetro.

Esto ha llevado a sustentar el estudio de parámetros en alguna norma ya establecida que sirva como guía y que no genere mayor discusión que no sea sino adaptar la misma a la realidad nacional. Así, se ha decidido sustentar la reglamentación en la experiencia de la EPA y la normativa empleada en México.

3.3. Relación con guías OPS/OMS

Una de las cosas que se ha intentado introducir a la propuesta de normativa, es la relacionada con las guías OMS respecto al reúso de aguas tratadas en riego. Se ha visto sin embargo, que solo las ciudades grandes y las intermedias podrían tener datos de salubridad que permitan la aplicación total de las guías propuestas.

Esta, es una dificultad que por ahora, no ha podido ser subsanada. Sin embargo, en muchas comunidades y pueblos pequeños, es posible que no se puedan implementar grandes plantas de tratamiento, y aquí, si ayudan las guías multibarreras propuestas desde la OMS. Esto implica un entrenamiento a las personas que manejan las PTAR y a las que usan las aguas tratadas. Con vista a ello, se ha propuesto una serie de incentivos que vayan a asegurar la sostenibilidad del riego con aguas tratadas.

4. Sostenibilidad y generación de incentivos

Uno de los requerimientos por parte de las autoridades en las que se ha hecho énfasis, ha estado referido a la sostenibilidad de las medidas contenidas en el reglamento, ya que es evidente que los campesinos ven al agua como un derecho adquirido, y en ello se basan las reglas de repartición de las aguas de riego.

No es una regla general el pagar por el agua de riego, puesto que la inversión en obras de cabecera, como son por ejemplo las represas, sobrepasan largamente la capacidad de repago de los campesinos. Es más bien una práctica común, que las obras de cabecera sean a fondo perdido y la organización de riego, se encargue del cumplimiento de los turnos de riego así como del cobro o la manera de trabajar para poder realizar las obras de mantenimiento de los canales.

Peor aún sucede con las aguas negras, estas que son un "desperdicio" son aprovechadas por el riego en su conjunto, ya sea como complemento a las aguas de riego con aguas claras, o como la fuente exclusiva de agua de riego y para ello, también funciona la organización de riego a partir de la salida de las plantas de tratamiento.

Como consecuencia de ello, el intentar un pago por el uso de agua residual tratada convenientemente para riego, se convierte en un desafío de sostenibilidad financiera y de comunicación.

Una de las ideas promocionadas a partir de la parte técnica que maneja el riego en Bolivia, ha sido la búsqueda de mecanismos que permitan en principio solventar el esquema de riego con agua tratada. De este modo se generó un subproyecto que intentase primero verificar aquellos lugares donde se riega con agua tratada y la situación en su conjunto, desde el funcionamiento de las plantas, los costos involucrados y el uso en riego que se da a las mismas.

Para el estudio se seleccionaron los sistemas de riego de: Patacamaya y El Alto (La Paz); Cochabamba, Punata y Cliza (Cochabamba); Sucre y Yotala (Chuquisaca); Tarija, Uriondo y San Lorenzo (Tarija); Betanzos y Puna (Potosí); Comarapa (Santa Cruz); además de Caracollo y Eucaliptus (Oruro).

Para todas las plantas de tratamiento involucradas, se ha desarrollado una metodología que involucra primero, la ubicación de la PTAR, y el área de influencia que tiene, se ha evaluado el método de tratamiento y su eficacia, se han determinado los costos que se presentan en la operación y mantenimiento de las plantas y como se solventan los mismos.

Nombre de la PTAR	Ubicación y área de influencia	Metodología de Tratamiento y eficiencia	Costos de tratamiento	Sostenibilidad de la PTAR
<p>Patacamaya</p>	<p>Cuenta con dos plantas de tratamiento. El Municipio Patacamaya se encuentra a 101 km. de la ciudad de La Paz. Los efluentes de las plantas de tratamiento descargan al río se usan en agricultura, principalmente plantas forrajeras.</p>	<p>Las dos PTAR comparten metodología similar de tratamiento, con: tratamiento preliminar (rejillas y desarenadores), tratamiento primario (tanques Imhoff) tratamiento secundario (filtros biológicos) y tratamiento terciario (lagunas de maduración). Para caudales similares de aprox 1.0 l/s DBO₅ entrada 1000 mg/l y colí fecal de entrada de 3E7 NMP/100 ml las eficiencias están en el orden de 82% y 98% para los dos parámetros.</p>	<p>No se tienen datos del costo de operación y mantenimiento de las PTAR solo se conoce que se paga por el consumo de electricidad.</p>	<p>El municipio se encarga de las PTAR y tiene 4 personas trabajando, además paga por la electricidad. EMAPA que es la empresa que da servicio cobra 4 Bs por el manejo del alcantarillado a cada usuario, pero a pesar que la tarifa debería tener una parte para la operación y mantenimiento de las PTAR, esto no se cumple.</p>
<p>El Alto – Puchukhollo</p>	<p>PTAR construida en 1998, sirve a la ciudad de El Alto provincia Murillo del Departamento de La Paz. La planta está en fase de ampliación y la ampliación comprende principalmente las adiciones de filtros percoladores y unidades de desinfección.</p>	<p>La planta se encuentra en una fase de ampliación y actualmente tiene dos series de lagunas, cada una con 6 lagunas y 3 filtros percoladores. El agua tratada se descarga al Río Seco. Toda el agua es usada en riego, es más, los campesinos han perforado el emisario y usan esas aguas para riego. La DBO5 de entrada es 456 mg/l eficiencia de 76.75% a la salida. La de coliformes es 7.3E7 a la entrada eficiencia de 99.8%. El Alto es ciudad industrial por lo que existen otros contaminantes a ser tomados en cuenta.</p>	<p>No existe un pago diferenciado para la operación y mantenimiento de la PTAR Puchukhollo, solo se paga por el servicio de agua potable del cual un porcentaje va al servicio de alcantarillado.</p> <p>Una encuesta³ determina que se paga de acuerdo al rango en m³ de agua consumida al mes. En promedio se paga 0.10 US\$/m³.</p>	<p>EPSAS tiene una planificación anual de costos para cada año. Esto comprende energía, personal análisis, mantenimiento, desechos y administración. Tomando en cuenta la producción de la PTAR que es aproximadamente 430 l/s, el costo involucrado es de 0.22 Bs/m³ (0.0315 US\$/m³)</p>

Nombre de la PTAR	Ubicación y área de influencia	Metodología de Tratamiento y eficiencia	Costos de tratamiento	Sostenibilidad de la PTAR
Alba Rancho – Cochabamba	<p>La ciudad de Cochabamba, drena sus aguas residuales a la planta de tratamiento ubicada en la zona de Alba Rancho, al sur de la ciudad.</p> <p>La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Alba Rancho ha entrado en operación el año 1986.</p>	<p>La Planta de Tratamiento cuenta con 4 lagunas primarias con un área de 13.7 Ha, 8 lagunas secundarias con un área de 21.9 Ha., además con toda una red de canales de distribución como canales de recolección y sus sistemas de medición de caudales.</p> <p>La eficiencia de remoción en DBO5 es de 68% para una concentración de entrada de 275 mg/l y en coliformes fecales es de 96.33% para una entrada de 5.8E7 NIMP/100 ml</p>	<p>No existe un pago diferenciado para la operación y mantenimiento de la PTAR Alba Rancho, parte del pago de alcantarillado cubre este rubro y SEMAPA que es el operador, reporta para el segundo trimestre de la gestión 2013, un costo promedio del servicio por alcantarillado de 4.92 Bs/m³. (0.7 US\$/m³).</p>	<p>SEMAPA tiene una planificación anual de costos para cada año. Esto comprende energía. Personal análisis, mantenimiento y administración.</p> <p>Tomando en cuenta la producción de la PTAR que es aproximadamente 463 l/s, el costo involucrado es de 0.18 Bs/m³ (0.026 US\$/m³)</p>
Punata Colque Rancho	<p>PTAR construida el año 2000 con un sistema de lagunas de estabilización. Posteriormente hacia el año 2007 la Universidad interviene instalando humedales. Los campesinos tienen organizado un sistema de riego con construcción de canales. Usan estas aguas como barbecho.</p>	<p>Originalmente esta PTAR tenía dos lagunas anaerobias en paralelo, seguidas cada una por una laguna facultativa y finalmente tres lagunas de maduración en paralelo. Posteriormente a este tren de tratamiento se añaden humedales con fines de investigación.</p> <p>La evaluación realizada por la UMSS el año 2012, reporta eficiencia del orden de 83% para la DBO5 (concentración inicial de 432 mg/l) y para coliformes fecales del orden del 90% (1.4 e6 UFC/100 ml concentración de entrada)</p>	<p>No se tienen datos del costo de operación y mantenimiento de las PTAR.</p>	<p>El municipio destina Bs. 45.000 para el alcantarillado incluyendo tres plantas de tratamiento de las cuales una es Colque Rancho.</p> <p>En esta zona, los regantes intervienen en el mantenimiento de la PTAR, ya que una vez por año, se encargan de realizar la limpieza de los predios de la PTAR. Son seis comunidades las que aprovechan estas aguas haciendo un total de 300 personas que usan las aguas por espacio de 2 horas.</p>

Nombre de la PTAR	Ubicación y área de influencia	Metodología de Tratamiento y eficiencia	Costos de tratamiento	Sostenibilidad de la PTAR
<p>El Campanario - Sucre</p>	<p>La Planta de Tratamiento de Aguas Servidas se encuentra ubicada en la comunidad de El Campanario, perteneciente al distrito de Yotala, en la región nor-oeste del departamento de Chuquisaca, a 11 Km de la ciudad de Sucre.</p>	<p>Esta planta cuenta con facilidades para pretratamiento consistente en rejillas, desarenadores, medidores de caudal, tratamiento primario con tanque Imhoff, secundario con filtros percoladores y lagunas de sedimentación secundaria y maduración además de facilidades para el tratamiento de lodos.</p> <p>La eficiencia de remoción en DBO₅ es de 76% para una concentración de entrada de 340 mg/l</p>	<p>No existe un pago diferenciado para la operación y mantenimiento de la PTAR El Campanario, parte del pago de alcantarillado cubre este rubro.</p> <p>La tarifa media por el servicio de agua potable y alcantarillado esta alrededor de 4 Bs/m³</p>	<p>ELAPAS tiene una planificación anual de costos para cada año. Esto comprende energía. Personal análisis, mantenimiento y administración.</p> <p>Tomando en cuenta la producción de la PTAR que es aproximadamente 132 l/s, el costo involucrado es de 0.62 Bs/m³ (0.089 US\$/m³)</p>

Un ejemplo resumen de los resultados encontrados se puede ver en el siguiente Cuadro: El ejemplo resumido en el Cuadro anterior, sirve para demostrar la muy poca importancia se le da al tratamiento de las aguas servidas. De hecho solo en las ciudades capitales la Entidad Prestadora de Servicios de Agua y Alcantarillado (EPSA), lleva una contabilidad de lo que se gasta en una PTAR.

Por tanto la sostenibilidad en las ciudades intermedias y pequeñas está ligada a lo que el municipio quiera invertir pero sólo como una parte del mantenimiento del alcantarillado total. De hecho en la mayor parte de los casos, no se asignan ni recurso monetario, ni personal, que atienda de manera exclusiva a una PTAR.

Se han propuesto ideas de cómo realizar la subvención² a las etapas de diseño, construcción y operación de los sistemas de riego con aguas tratadas.

En la etapa de diseño la subvención de 100% y además de la parte estrictamente técnica debe incluirse un fuerte componente social que permita la difusión de las metas de tratamiento y el uso de las multibarreras para controlar los riesgos en la cadena de producción hasta el consumo de productos regados con aguas residuales tratadas..

En la etapa de construcción se ha recomendado subvención hasta del 80%,y el resto del financiamiento vendría en un 15% por parte del municipio y 5% por parte de los regantes para permitir el empoderamiento del sistema de riego en su totalidad, es decir PTAR mas los canales de repartición de agua de riego. Por supuesto, se debe asegurar la sostenibilidad técnica, es decir debe estar claro cómo se va a controlar la eficiencia de la PTAR, cómo se organizara la operación y mantenimiento y además la asociación de regantes debe estar ya capacitada para el manejo de las aguas tratadas.

Para la etapa de operación y mantenimiento, se han propuesto incentivos que vayan en caso de las alcaldías o las entidades que manejan las plantas de tratamiento, a cubrir los costos de operación y mantenimiento siempre y cuando se cumplan con las metas de calidad, operación y mantenimiento de las PTAR y para los regantes se han propuesto incentivos en la comercialización de sus productos (productos verdes), siempre y cuando ellos cumplan con las guías multibarrera de manejo de aguas negras tratadas en riego agrícola.

² Sistematización sobre tratamiento y reúso de aguas residuales, Ministerio de Medio Ambiente y Agua, Octubre 2013

El inconveniente en este caso, deviene de la disponibilidad de financiamiento a las subvenciones que se han propuesto. Esta propuesta también requiere de la decisión política de las autoridades para el uso de recursos que cada año se devuelven al tesoro nacional debido al incumplimiento de la totalidad del gasto presupuestado de los municipios. Esta reinversión en los esquemas de riego con agua tratada, se la realizaría en el propio municipio con la ventaja de que las condiciones de salud y ambientales puedan ser mejoradas mediante incentivos y no por imposición regulatoria como ha sido la intervención de la Contraloría que ha obligado a los municipios al establecimiento de PTAR en algunas ciudades capitales.

5. Conclusiones

- Para la discusión técnica de las medidas que se proponen en un reglamento, ha sido muy útil el funcionamiento de la Comisión Mixta, donde están los tres viceministerios Saneamiento, Medio Ambiente y Riego además de la cooperación internacional, de manera que se tomen decisiones más abreviada en tiempos.
- Es necesario que exista por parte de las autoridades intermedias, una actitud proactiva al cambio, ya que son estas autoridades las que elevan sus informes a los que toman decisiones.
- Es necesario que la parte interesada, en este caso el sector riego, sea no solo la promotora, sino que, sea además el motor a todas las iniciativas, las reuniones, las decisiones y el cumplimiento de ellas. Para ello es necesario que su actuación quede enmarcada en un esquema de proyecto que puede tener cooperación internacional, como es el caso de Bolivia que cuenta con la COTRIMEX, donde se muestren metas que de alguna manera, las propias autoridades se comprometen a cumplir.
- Finalmente, tiene que haber compromiso político, tanto para efectivizar un nuevo reglamento al interior de la Ley existente como para permitir el financiamiento a las subvenciones que se proponen.

Bibliografía

Sistematización sobre tratamiento y reúso de aguas residuales, Ministerio de Medio Ambiente y Agua, Octubre 2013.

Estudio de Tarifas y Subsidios para las PTAR en Bolivia. Documento en revisión, COTRIMEX, 2015

Sustentabilidad y Autogestión de Sistemas de Riego, Salazar L. et. al., Abril 2010.

Guía de referencia para el reúso de las aguas residuales en riego agrícola, Cisneros M.C., Mayo 2013.

Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and graywater, Vol 2, WHO, 2006

Ley 1333, Ley de Medio Ambiente, Abril 1992

Reglamento Ambiental del Sector Industrial y Manufacturero, RASIM, D.S, 26736, Julio 2002

Reglamento Ambiental para Actividades Mineras, D.S. 24176, Diciembre 1995.

Reglamento Ambiental del sector Hidrocarburos, D.S. 26171, Mayo 2001.

Estudio de Identificación "Mejoramiento del Abastecimiento de Agua Potable Ciudad El Alto, Consultora RIMAC, 2013

CASO 13

Sistema comunitario de gestión de aguas residuales en zonas periurbanas del valle de Katmandú, Nepal (Nepal)

Uttam Raj Timilsina¹

Resumen

En este caso se intenta presentar la tendencia en la producción, la gestión y el uso de las aguas residuales a escala comunitaria en el valle de Katmandú (Katmandú, Lalitpur y Bhaktapur), Nepal. Asimismo se describe el estado actual de las prácticas de gestión, tecnologías y políticas, y los acuerdos institucionales destinados a abordar el desarrollo y la gestión de la infraestructura y los servicios de alcantarillado, así como las consecuencias en el medio ambiente, la salud y los medios de vida que surgen a partir de la producción y el uso de aguas residuales en las zonas periurbanas del valle de Katmandú. Se ha prestado atención específica al uso agrícola de las aguas residuales, los impactos en el entorno de producción agrícola y las personas que utilizan las aguas residuales en la producción de cultivos y vegetales de temporada. Al presentar la aplicación de las aguas residuales en la agricultura, se han observado las prácticas existentes de uso de aguas residuales en la agricultura por parte de los habitantes de la comunidad de Khokana como un estudio de caso exitoso. El caso finaliza con un análisis sobre la falta de conocimientos que existe en el país sobre

¹ Uttam Raj Timilsina ✉

Ingeniero superior de Gestión del Agua, Community Managed Irrigated Agriculture Sector Project (CMIASP-AF)/Profesor adjunto de Ingeniería Agrícola, Universidad de Agricultura y Silvicultura, Nepal; Correo electrónico: uttamrajtimilsina@gmail.com

En: Hiroshan Hettiarachchi and Reza Ardakanian (eds). *Uso seguro de las aguas residuales en la agricultura: ejemplos de buenas prácticas* ©UNU-FLORES 2016

el uso seguro de las aguas residuales, y se ofrece una evaluación de las necesidades de desarrollo de capacidades de las instituciones pertinentes que se interesan en la gestión y la reutilización de las aguas residuales. Los análisis expuestos en el caso indican que la gestión de las aguas residuales en el país está impulsada por el concepto de que el agua residual es una "molestia ambiental", más que un "recurso" que puede utilizarse de manera segura en la agricultura y otros ámbitos. Se ha demostrado que lo que motiva este concepto es la prevalencia de enfoques disciplinarios y sectoriales en el desarrollo del sector hídrico. En el país, se ha observado que el entorno político del sector hídrico, la legislación y las disposiciones normativas, en general, favorecen la promoción del uso seguro de las aguas residuales, a la vez que se identificaron brechas en los acuerdos institucionales y en el ámbito de las implementaciones. La brecha en el ámbito de las implementaciones se observa en la separación en el uso de las aguas residuales del diseño, el desarrollo y la gestión de los sistemas y servicios de aguas residuales. Sin embargo, la oportunidad está en considerar las aguas residuales como un recurso y fomentar su uso seguro como una manera de garantizar y contribuir a la seguridad del agua agrícola a escala local. Se ha comprobado que el sistema de conocimientos del país, así como la investigación y desarrollo sobre el sistema de aguas residuales, las prácticas y el uso seguro son extremadamente deficientes.

Palabras clave: aguas residuales, calidad del agua, periurbana, aplicación de políticas, comunitario

1. Contexto del país

Nepal es un país montañoso, sin salida al mar, de Asia meridional, ubicado entre las latitudes 26°22'N y 30°27'N y las longitudes 80°04'E y 88°12'E; al norte limita con China y al sur, este y oeste, con la India. Con una superficie terrestre total de 14.718 millones de ha, el país se caracteriza por una diversidad de topografía, geología y clima, lo que crea oportunidades y limitaciones en cuanto a los distintos usos de la tierra y patrones de medios de vida. Nepal es, sobre todo, un país montañoso, donde el 77 % de la superficie terrestre está ocupada por colinas y montañas, y solo el 23 % del territorio (región de Terai) está compuesto por llanuras que se extienden a lo largo de la frontera meridional. En un rango de 200 km, la

altitud varía de 64 m por encima del nivel del mar a 8848 m en la cumbre del Monte Everest.

La población total del país de acuerdo con el censo poblacional del 2011 es de 26,62 millones. La economía de Nepal se basa, en gran parte, en la agricultura, que contribuye a casi el 40 % del PBI y proporciona empleo a dos tercios de la población. La superficie cultivada del país es de 3 millones de ha, entre ellas, 1766 millones ofrecen la posibilidad de aplicar riego. En la actualidad, casi 1,33 millones de ha o el 44 % de la superficie cultivada cuenta con una planta de riego de algún tipo, pero solo el 17 % de dicha superficie puede disponer de agua para riego durante todo el año. Desde el punto de vista administrativo, el país está dividido en cinco regiones de desarrollo y 75 distritos. Los distritos se consideran unidades clave para la planificación del desarrollo y la prestación de servicios de apoyo y administración. La pobreza es ampliamente generalizada en el país, donde el 25,4 % de la población se encuentra por debajo de la línea de la pobreza de 1 dólar por persona y por día (NPC, 2010).

2. Estado y fuentes de producción de aguas residuales

Las aguas residuales en el valle de Katmandú son de origen doméstico, comercial e industrial. Básicamente, los sistemas de alcantarillado en el valle de Katmandú son una mezcla de redes cloacales con desagües pluviales; además es común la conexión ilegal de los sistemas cloacales a los desagües pluviales en muchas partes del valle de Katmandú. La eliminación directa de los desechos sólidos y líquidos a lo largo del curso del río, y la escorrentía de aguas pluviales, que se origina en zonas urbanas y tierras agrícolas, también ha sido responsable de la degradación significativa de la calidad del agua de los ríos y otras masas de aguas superficiales. Las aguas residuales de origen doméstico incluyen las aguas grises y las aguas negras, que se obtienen del lavado, la limpieza, la higiene personal y los usos sanitarios. Solo un pequeño número de hogares están conectados a las redes cloacales y, por lo tanto, la mayoría de las viviendas termina vertiendo las aguas residuales directamente en los ríos y otras masas de agua. El valle de Katmandú dispone de un sistema de alcantarillado de 232 km, pero solo el 40 %

de la población tiene acceso a este servicio (ICIMOD y colaboradores, 2007). Las industrias también generan otra fuente de aguas residuales. Se calcula que unas 4500 unidades industriales de diferentes tamaños funcionan en distintas partes del país. La concentración de industrias es grande en el valle de Katmandú. Se cree que cerca del 40 % de las industrias del país producen cantidades importantes de aguas residuales. Se cree que la producción conjunta de aguas residuales en los tres estados industriales del valle de Katmandú, Balaju, Patan y Bhaktapur, es de 800 m³/día. Las aguas residuales que se generan en la mayoría de las industrias se mezclan con el sistema de alcantarillado municipal, mientras que los desechos sólidos industriales se recogen y arrojan en pozos o en espacios abiertos.

No se dispone de datos confiables sobre el volumen total de aguas residuales que se genera en las distintas fuentes y en las zonas urbanas y rurales del país. Ante la ausencia de la información necesaria, se calculó el volumen diario de producción de aguas residuales sobre la base del consumo diario promedio de agua por persona, que en las zonas urbanas se considera que es de 75 litros por día y en las zonas rurales, de 40 litros por día, donde el 85 % de este volumen se convierte en aguas residuales domésticas (PNUMA, 2001). En la tabla 1 se detalla el volumen de aguas residuales generado y recolectado en el sistema de gestión de aguas residuales en cinco municipalidades del valle de Katmandú, que son las zonas más urbanizadas del país.

3. Estado de los servicios de tratamiento y gestión de las aguas residuales

En la tabla 2 se muestra el estado actual de algunas plantas de tratamiento de aguas residuales que funcionan en el valle de Katmandú y en otras zonas urbanas del país. En 1999, el Comité de Desarrollo Integrado de la Civilización del Bagmati (CDICB), que antes se conocía como el Comité de Alto Poder para la implementación y la supervisión del Proyecto de Rehabilitación/Construcción de Alcantarillados en la Zona del Bagmati, se constituyó con el objetivo de restablecer las condiciones ambientales en el río Bagmati y construir la planta de tratamiento de aguas residuales Guheshwori con la capacidad de diseño de 17,3 millones de litros/día (MLD) de aguas residuales.

Tabla 1: Producción de aguas residuales en las municipalidades del valle de Katmandú

DESCRIPCIÓN	MUNICIPALIDADES				
	Kath- mandu	Patan	Bhaktapur	Kirtipur	Madhyapur- Thimi
Volumen de aguas residuales domésticas generadas (MLD)	64.497	15.647	5971	3920	3069
Volumen de aguas residuales industriales generadas (MLD)	4515	1095	418	274	215
Total de aguas residuales generadas (MLD)	69.012	16.742	6389	4195	3284
Total de aguas residuales recolectadas (MLD)	34.506	8,371	3195	2097	1642

Source: ICIMOD, MOEST/GON and UNEP 2007

La planta, que se construyó con el objetivo de mejorar el ambiente del río Bagmati en el Templo Pashupatinath, ha estado en funcionamiento solo de manera irregular debido a los altos costos operativos y a los problemas de formación de espuma en el tanque de aireación.

En la tabla 2 se muestra claramente que casi todas las plantas de tratamiento de aguas residuales centralizadas y a gran escala instaladas en Katmandú no están en funcionamiento, o bien funcionan muy por debajo de su capacidad de diseño. Las razones, entre otras, han sido los altos costos de operación y mantenimiento del sistema. Como alternativa a las plantas centralizadas, se están fomentando opciones

Tabla 2: Plantas de tratamiento de aguas residuales existentes en el valle de Katmandú y otras zonas urbanas de Nepal

Ubicación	Tipo/Etapa	Capacidad MLD	Estado actual	Detalles del servicio
Dhobighat, Patan (valle de Katmandú)	1. ^{er} /laguna aerobia 2. ^{do} /laguna anaerobia 3. ^{er} /laguna facultativa 4. ^{to} /laguna aerobia	15,4	No funciona	Conexiones domiciliarias: 53.900 Alcantarillados: 61.650 Canal mixto: 44 km
Kodku, (valle de Katmandú)	1. ^{er} /laguna aerobia 2. ^{do} /laguna anaerobia 3. ^{er} /laguna facultativa 4. ^{to} /laguna aerobia	1,1	En funcionamiento parcial	Conexiones domiciliarias: 15.500 Alcantarillados: 20.443 Canal mixto: 11 km
Sallaghari, Bhaktapur (valle de Katmandú)	Laguna de aireado	2,4	No funciona	No se dispone de información
Hanumanghat, Bhaktapur (valle de Katmandú)	Laguna de oxidación	0,4	No funciona	
Guheswori, Katmandú (valle de Katmandú)	Laguna de oxidación	16,4	En funcionamiento parcial	Alcantarillados: 6 km Población cubierta: 53.000 Zona urbana: 21 ha
Estado industrial de Hetauda, Hetauda	Laguna de oxidación	1,1	En funcionamiento	Planta de tratamiento de aguas residuales industriales
Hospital Dhulikhel	Juncal (humedal artificial)	< 0,10	En funcionamiento	Sin tratamiento primario Tamaño del juncal: 261 m ² Población cubierta: 330
Municipalidad de Katmandú	Juncal (humedal artificial)	< 0,40	En funcionamiento	Sin tratamiento primario Tamaño del juncal: 362 m ² Población cubierta: 330

Ubicación	Tipo/Etapa	Capacidad MLD	Estado actual	Detalles del servicio
Escuela Internacional Malpi	Juncal (humedal artificial)	<0,25	En funcionamiento	Sin tratamiento primario Tamaño del juncal: 376 m ² Población cubierta: 850
Hospital SKM	Juncal (humedal artificial)	0,15	En funcionamiento	Tamaño del juncal: 141 m ² Población cubierta: 500
Universidad de Katmandú	Juncal (humedal artificial)	< 0,035	En funcionamiento	Sin tratamiento primario Tamaño del juncal: 587 m ² Población cubierta: 1300
Proyecto hidroeléctrico Middle Marshyangdi	Juncal (humedal artificial)	< 0,026	En funcionamiento	Sin tratamiento primario Tamaño del juncal: 298 m ² Población cubierta: 870
Municipalidad de Pokhara	Juncal (humedal artificial)	< 0,115	En funcionamiento	Sin tratamiento primario Tamaño del juncal: 3,308 m ² Población cubierta: 3830
Monasterio Kopan (valle de Katmandú)	Juncal (humedal artificial)	< 0,015	En funcionamiento	Sin tratamiento primario Tamaño del juncal: 150 m ² Población cubierta: 300
Municipalidad de Tansen	Juncal (humedal artificial)	< 0,030	En funcionamiento	Sin tratamiento primario Tamaño del juncal: 583 m ² Población cubierta: 1000
Planta de tratamiento de aguas residuales de la comunidad de Sunga (valle de Katmandú)	Juncal (humedal artificial)	50 m ³ /día	En funcionamiento	Planta de tratamiento de aguas residuales de la comunidad Tamaño del juncal: 150 m ² Población cubierta: 1200

para descentralizar la gestión de las aguas residuales por parte de las organizaciones de desarrollo involucradas en las cuestiones ambientales y de salud pública, como ONU-Hábitat, Organización de Salud Pública y Medio Ambiente (ENPHO), las municipalidades y los grupos comunitarios.

Pese a los esfuerzos en las últimas tres décadas, los organismos involucrados en la gestión ambiental y la salud pública, incluidos los órganos municipales en el valle de Katmandú, no han logrado gestionar el creciente volumen de aguas residuales. Los problemas se agravan cada año en las zonas urbanas debido al incremento en el volumen de aguas residuales producidas como resultado del crecimiento acelerado de la población urbana, la escasez de agua potable y la incapacidad del gobierno y las municipalidades de mejorar la infraestructura urbana y los servicios, especialmente, la ampliación de los sistemas de alcantarillado, así como los desagües pluviales y cunetas en las zonas urbanas. Por último, las aguas residuales se vierten en los ríos sin ningún tipo de tratamiento.

4. Uso y eliminación de las aguas residuales

En Nepal, la práctica de utilizar aguas residuales en la agricultura y otros ámbitos, y las consecuencias en el medio ambiente y la salud no están bien documentadas, pese al hecho de que la práctica de riego con aguas residuales es una tradición antigua que está intrínsecamente vinculada con la cultura y los medios de vida de las personas del valle de Katmandú. En el valle, en tierra agrícola ubicada en los centros y periferias urbanas, se sabe que los agricultores practican el riego con aguas residuales en superficies mucho más grandes (Rutkowski, 2004). La práctica de utilizar aguas residuales en el valle de Katmandú es, en gran parte, informal y no existen normas institucionales que rijan el uso de las aguas residuales, al menos por ahora. Los agricultores que practican el riego con aguas residuales obtienen el agua de distintas fuentes, que incluye aguas residuales municipales, ríos que transportan aguas residuales, y agua almacenada en lagunas y piletas que se crearon en las zonas urbanas, periurbanas y rurales del valle de Katmandú.

4.1. Estudio de caso de Khokana: sistema comunitario de gestión de las aguas residuales

En este estudio se presenta un caso exitoso de un sistema comunitario de gestión de aguas residuales, que se ha implementado en Khokana, un asentamiento Newar de origen medieval, ubicado en la municipalidad de Karyabinayak del distrito de Lalitpur. El asentamiento tradicional de Khokana, que incluye dos asentamientos, la aldea principal de Khokana y la pequeña Khokana (*Sano Khokana*) solo cubre unos 0,20 km². El sistema comunitario de tratamiento de aguas residuales, que se describe en este estudio de caso, se ubica en *Sano Khokana*, un pequeño asentamiento donde viven 229 personas en 39 casas. La agricultura es la principal fuente de sustento de la mayoría de los hogares en la aldea. Las personas de la aldea viven en viviendas colectivas tradicionales agrupadas en torno a un patio central, una característica típica de los asentamientos tradicionales Newar en el valle de Katmandú.

Los hogares de *Sano Khokana* recuperaban tradicionalmente los desechos sólidos y las aguas residuales a través de un sistema único de compostaje y reciclado de las aguas residuales. En los hogares tradicionales Newar, se han utilizado los métodos *Saaga* y *Nauga* antes del desarrollo de los sistemas modernos de alcantarillado y las letrinas de sifón. Para hacer un *Saaga*, se cavó un pozo de 90 cm x 90 cm x 70 cm, en un rincón de la propiedad, donde se arrojaron todos los desechos biodegradables, así como las aguas residuales producidas en la propiedad. Una vez que se llenó, se cubrió con heno y residuos agrícolas, que luego se convertirían en abono dentro de un período de 3 a 4 meses, que se podría utilizar en los campos agrícolas. El excedente de agua del *Saaga* se utilizó para regar pequeñas parcelas de vegetales dentro de la propiedad o se vertió en los desagües de aguas residuales, que luego se reciclarían para riego. Se cavó el otro pozo (*Nauga*) en el suelo de la casa, se le colocó una capa de ceniza y se lo utilizó como urinario. Las personas debían orinar sobre la ceniza, lo que se convertiría en un valioso fertilizante para aplicar en las parcelas. Estas prácticas tradicionales de gestión de los desechos sólidos y aguas residuales eran antihigiénicas, incontrolables, generaban olores y propiciaban la proliferación de moscas domésticas y otros insectos.

En 1981, el Ministerio de Desarrollo Local, en colaboración con UNICEF, financió la construcción de letrinas de pozo en 31 viviendas en *Sano Khokana*, pero solo algunas familias, en realidad, las utilizaron;

las demás continuaron con la práctica tradicional de defecación al aire libre y la gestión de desechos en *Saaga* y *Nauga* en la propiedad. Dado que la práctica de la gestión tradicional de desechos era antihigiénica, las personas eran propensas a sufrir distintos tipos de enfermedades. La iniciativa de construir letrinas de pozo no prosperó porque la capa freática en la zona es alta. Las personas temían que las letrinas se llenaran rápidamente y fuera necesaria la remoción frecuente de los lodos. Por lo tanto, conectaron los inodoros directamente a los desagües superficiales, que no estaban totalmente cubiertos, y se les practicaba un mantenimiento deficiente. Esta situación intensificó más el problema de la gestión de desechos en la aldea.

En el 2007, Lumanti, una ONG local que trabaja con los asentamientos informales, y ONU-Hábitat, que se encarga de las cuestiones de abastecimiento de agua y saneamiento en las ciudades de Asia para la vida sana, se unieron para ayudar a la comunidad a mejorar la gestión de los desechos sólidos y líquidos en la aldea. El desafío era desarrollar un sistema para la gestión de desechos sólidos y líquidos que se integrara y se basara en las prácticas tradicionales del pueblo de modo que lo aceptasen; al mismo tiempo, se les ofrecería una solución económica y sostenible al problema. Dado que casi el 80 % de los hogares tenían inodoros, que se habían construido con el apoyo del Ministro de Desarrollo Local y UNICEF, y la eliminación de las aguas negras de los inodoros era un problema ante la ausencia de tanques sépticos adecuados o de conexiones a sistemas de alcantarillados apropiados, se decidió crear un sistema de alcantarillado que conectara los inodoros de cada casa con un digestor centralizado de biogás. Se pensó que la instalación del digestor de biogás sería apropiada porque ofrecería no solo una alternativa para el manejo sanitario de los excrementos humanos y las aguas grises de los hogares, sino también una oportunidad para generar biogás para uso doméstico, además de recuperar el abono del digestor, que está listo para usarse en las tierras de cultivo.

Se integró un sistema de tratamiento de juncas (STJ) en el sistema a fin de tratar y recuperar los efluentes del digestor de biogás y las aguas residuales generadas por los hogares y utilizarlos en las parcelas para riego. Mantener una cantidad adecuada de agua en los desechos que se arrojaron al digestor de biogás era un requisito indispensable para el funcionamiento adecuado del digestor de biogás, por lo que se propuso un sistema para desviar el excedente de agua del sistema de alcantarillado al STJ. De este modo, se creó en la aldea un sistema

integrado de una planta de biogás con el STJ, que incluyó tres elementos esenciales que se transformaron en las bases para el éxito del sistema:

- i) Un sistema ecosanitario para la gestión de los desechos sólidos y líquidos que se basó en tecnología comprobada.
- ii) La inclusión de todos los hogares del pueblo en el sistema, donde se les ofrecía una solución sostenible a la gestión de los desechos líquidos y sólidos.
- iii) La recuperación de recursos que se inspiró en la práctica tradicional de recuperación de desechos sólidos y aguas residuales y un valor agregado de beneficios.

La planta de biogás instalada en *Sano Khokana* es un digestor anaeróbico tipo domo, de 20 m³ de capacidad y diseñado para un tiempo de retención de 45 días. El sistema comenzó a funcionar en agosto del 2007, mientras que el STJ empezó a operar al año siguiente, a partir de septiembre del 2008. El sistema ha estado en pleno funcionamiento y beneficiado a 37 hogares de la aldea. El lodo digerido de la planta de biogás se vierte en un lecho de secado de lodos. El agua del lecho de secado de lodos y el excedente de aguas residuales del sistema de alcantarillado se destina al STJ para el tratamiento. El STJ que se desarrolló en *Khokana* es un sistema de flujo horizontal con la capacidad de tratar 18,5 m³ de aguas residuales por día. El juncal mide 25 m de longitud por 9 m de ancho y tiene una capa de arena y grava de 70 cm de espesor. Las aguas residuales que se toman del sistema de alcantarillado y las aguas residuales provenientes del lecho de secado de lodos pasan por un reactor anaeróbico con deflectores y tres cámaras antes de ingresar a los juncales, lo que contribuye a la eficacia en el funcionamiento del sistema. Además de las aguas negras que se vierten en el digestor de biogás, los hogares también vierten todos los días montones de desechos sólidos biodegradables generados en el hogar. Las aguas residuales tratadas se recogen en una pequeña laguna, que luego se destinan al riego de la tierra de cultivo.

El costo total de desarrollo del sistema fue de 1.300.000 NPR (16.502 USD), que fue financiado por ONU-Hábitat en virtud del Programa Agua para las Ciudades de Asia. Los beneficiarios directos de la planta de biogás y el STJ fueron 229 personas de *Sano Khokana*, a quienes se les cobra los costos de operación y mantenimiento. La operación y gestión

del sistema está en manos de un grupo de usuarios. La comunidad local donó 325,16 m² de tierra para el desarrollo de infraestructura, con un valor de mercado actual de 3.000.000 NPR (38.086 USD). En la actualidad, cada hogar, cuya letrina está conectada al sistema, paga una cuota mensual de 30 NPR (0,38 USD) por la eliminación de las aguas residuales y negras. Cada uno de los cinco hogares que se benefician con la planta de biogás paga 200 NPR (2,54 USD) por mes. Los fondos recaudados se depositan en la cuenta del grupo de usuarios y se utilizan para pagar el salario de la encargada de la planta de biogás y del STJ, así como para cubrir los gastos de reparación y mantenimiento del sistema. La encargada del sistema es una mujer de la aldea, quien recibe 1500 NPR (19,04 USD) por mes. Ella es responsable de la operación y mantenimiento diario de la planta de biogás y de recoger todos los días los montones de desechos sólidos de los hogares y verterlos en el digestor.

El desarrollo del sistema de gestión integrado de aguas residuales ha mejorado enormemente el medio ambiente y saneamiento en *Sano Khokana*. Ha contribuido a la dignidad de las personas, ya que la aldea ahora está declarada como zona donde ya no se defeca al aire libre. El sistema ha descartado el problema de tener que vaciar los tanques sépticos cuando se llenaban, al menos una vez al año, lo que no solo generó un ahorro en los costos, sino también redujo la ingrata tarea inherente al proceso. El sistema también se ha planificado para tratar otros desechos domiciliarios y de cocinas, que se arrojan en la planta de biogás, lo que ha mejorado la limpieza de la zona de las viviendas. El gas generado en el digestor de biogás se distribuye en cinco hogares, cuyas necesidades energéticas para cocinar quedan prácticamente cubiertas con el suministro de gas durante todo el año. El abono de buena calidad con alto valor fertilizante, generado gracias a la planta de biogás, es un beneficio adicional para el pueblo. El agua tratada que se obtiene del STJ, que abunda en nutrientes, se almacena en una laguna y luego se recicla para riego. Este elemento de recuperación de recursos incorporado en el sistema ha sido un beneficio adicional para el pueblo. Las aguas residuales que solían verse de manera arbitraria antes del desarrollo del sistema ahora se recuperan para usos productivos. De acuerdo con la evaluación de higiene de la aldea realizada por Lumanti en el 2009, se determinó que la incidencia de enfermedades causadas por el saneamiento deficiente se redujo en casi el 90 %.

Existen siete sistemas comunitarios de riego con aguas residuales en un área pequeña de Khokana donde el tamaño de la superficie regada con cada sistema es apenas de 0,26 a 7,76 ha (tabla 3). La observación más evidente es la casi total dependencia de las aguas residuales para riego durante la estación seca cuando no se dispone de otras fuentes de agua para riego. En la zona de estudio, se comprobó que las aguas residuales en la estación seca se utilizan para la producción de vegetales, que es una fuente importante de ingreso para las personas de la zona.

Los agricultores también consideraron que el alto contenido de nutrientes de las aguas residuales hace un aporte positivo a la producción de cultivos. En un intento por analizar el contenido de nutrientes de las aguas residuales, el contenido promedio de nitratos fue de 6,95 mg/l, 4,9 mg/l y 3,5 mg/l en Saaga, en el canal de transporte y en las piscinas de almacenamiento de aguas residuales, respectivamente. De igual modo, las concentraciones de fósforo y potasa en los tres puntos fueron de 3 mg/l; 10,7 mg/l y 4,35 mg/l; y 42,9 mg/l; 149 mg/l y 27,7 mg/l, respectivamente. Estos nutrientes, que están presentes en las aguas residuales, son necesarios para los cultivos para su crecimiento, desarrollo y producción.

4.2. Uso de las aguas residuales del río Hanumante en el distrito de Bhaktapur

Existe un estudio sobre la práctica de utilizar las aguas residuales del río Hanumante en Bhaktapur, que es un afluente del río Bagmati. En el estudio, se documentaron las prácticas de uso con aguas residuales en 55 hogares de la zona rural donde viven, principalmente, pequeños agricultores que son propietarios de un promedio de 0,23 ha de tierra. El río Hanumante es el cauce principal en la zona y atraviesa el casco urbano de la ciudad de Bhaqktapur. El río transporta aguas residuales domésticas e industriales generadas en las zonas urbanas de Bhaktaur y Madhyapur-Thimi. Asimismo, el tramo del río se utiliza para arrojar los desechos sólidos. En la tabla 4, se brinda el análisis de la calidad del agua en siete tramos del río aguas arriba y aguas abajo. En dicho análisis, se comprueba claramente que los desechos orgánicos en el río son una de las principales causas de la degradación de la calidad del agua. Por otro lado, la gran concentración de coliformes fecales en el

Tabla 3: Cobertura de riego con aguas residuales en sistemas de gestión de aguas residuales en la comunidad de Khokana

S.N.	NOMBRE DEL SISTEMA	UBICACIÓN		N.º de hogares	Sup. total (ropanis)	COBERTURA DE RIEGO		FUENTE DE RIEGO ADICIONALES
		Dis-trito	Nombre del sistema			Cobertura en la estación lluviosa	Cobertura en la estación seca	
1	Nhaya Bhu Tacha Dha	1	Nhaya Bhu	30	25	Todo	60 %	Ninguna
2	Duney Chey Chuke Dha	1	Dhuney Chey, Nhaya Bhu	40	50	Todo	75 %	Ninguna
3	Lee Dha	2	Taa Jhaya	60	80	Todo	80 %	Gaa Phuku
		3	Kalnani, Gaa Bhu	35				
4	Ghashi Dha	4	Thala Chey	55	150	Todo	75 %	Kutu Phuku
		5	Kway Lacchi, Kutu Phuku	50				
5	Gha Dha	6	Nyah La, Nanicha	65	70	Todo	75 %	Ninguna
6	Nani Chukye Dha	6	Nanicha	6	5	Todo	75 %	Ninguna
7	Dhokashi Dha	7	Kway Iachhi	40	20	Todo	50 %	Fanga Phuku
		8	Dhokashi	20				
	Total			401	445			

agua del río revela que cualquier uso directo del agua del río, incluido el riego, sería peligroso para la salud de los seres humanos.

Cabe destacar que el 64 % de los hogares de zonas rurales utilizan las aguas residuales del río Hanumante para riego durante todo el año, mientras que el 34 % de ellos emplean el agua para riego solo en la época de lluvias monzónicas. Solo el 62 % de los agricultores tenían una bomba para sacar agua del río y regar sus cultivos. Las aguas residuales de la zona se emplean para regar las verduras, que constituyen una fuente importante de ingresos para los agricultores locales. Los agricultores comercializan sus productos en los mercados vecinos de Thimi, Bhaktapur y Katmandú. Los agricultores expresaron tener cada vez más problemas para vender sus verduras producidas con aguas residuales. El 67 % de los agricultores señalaron que los compradores se abstienen de adquirir las verduras cultivadas en la zona cercana al río Hanumante, debido a la práctica predominante de utilizar las aguas residuales para la producción de verduras. Por otra parte, el 33 % de los agricultores indicaron que no tenían ninguna dificultad para vender sus productos a los consumidores, aun cuando estos sabían que las verduras se cultivaban con aguas residuales.

También se estudió la experiencia de los agricultores que utilizaban las aguas residuales para riego en cuanto a los efectos que tenía esta práctica en la producción de los cultivos. Si bien solo el 20 % de los agricultores informaron una mayor productividad agrícola con el uso de las aguas residuales, el 80 % de ellos notaron una menor productividad agrícola con el uso de las aguas residuales. Los agricultores que notaron una disminución de la productividad de los cultivos debido al uso de las aguas residuales se lo atribuyeron al alto contenido de nutrientes en las aguas residuales. Los agricultores de la zona observaron el secado y el marchitamiento de los cultivos con el uso repetido de las aguas residuales.

La práctica tradicional de gestión de las aguas residuales en el valle de Katmandú y en otras partes del país ha ido desapareciendo rápidamente, debido a las cambiantes condiciones socioeconómicas de las personas y a la creciente sensibilización y concientización sobre la importancia de la salud y la higiene. En el pueblo Newar, se ha erradicado casi por completo la práctica de construir pozos de recolección de aguas residuales o Saagah en el patio de las viviendas, excepto en algunos hogares tradicionales situados en las zonas rurales. Las personas eligen cada vez más conectar los sanitarios y sistemas de

Tabla 4: Variación en la calidad del agua del río Hanumante empleada para el riego por parte de los agricultores

S.N	Parámetros	Unidad	ID de muestra							NCAN para riego
			1	2	3	4	5	6	7	
1	pH	-	7,68	7,36	6,97	6,99	7,03	7,06	7,19	6,5-8,5
2	CE	uS/cm	126	148	423	454	434	423	392	< 40ms/m
3	OD	mg/l	7	5,3	0	0	0,8	1,5	0,7	
4	Calcio	mg/l	9,6	15,2	39,2	44,8	46,4	40	42,4	
5	Magnesio	mg/l	2,91	4,86	13,1	0,97	7,29	2,43	5,34	
6	Cloruro	mg/l	7	7	29	29	28	26	23	< 100
7	TSS	mg/l	5	75	65	56	98	31	36	
8	SVS	mg/l	11	18	50	47	33	27	20	
9	Total de sólidos	mg/l	169	206	234	318	318	270	254	
10	DBO	mg/l	3,5	4,7	79,9	67,4	28,9	25,9	18,9	
11	DQO	mg/l	18,9	17,9	128	123	73,7	61,4	41,5	
12	Amoníaco	mg/l	0,4	2,6	21,6	25,1	17,8	15	11,5	
13	Nitrato	mg/l	3,39	2,02	0,81	0,81	0,91	0,41	<0,2	
14	Fósforo total	mg/l	0,09	0,17	1,3	1,58	1,71	1,16	0,82	
15	Sodio	mg/l	8,07	9,23	22,9	26,5	23,8	22,0	19,1	< 70 mg/l
16	Potasio	mg/l	3,52	4,11	15,6	16,9	14,9	14,1	9,49	
17	Cromo	mg/l	<0,02	<0,02	0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,1 mg/l
18	Plomo	mg/l	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,2 mg/l
19	Zinc	mg/l	0,05	0,09	0,21	0,1	0,05	0,13	0,07	<1,0 mg/l
20	Coliformes fecales	UFC /100 ml	DN PC	DN PC	DN PC	DN PC	DN PC	DN PC	DN PC	<1 unidad/100 ml

Nota: Muestras de 7 tramos del curso del río aguas arriba y aguas abajo NCAN: Norma de calidad del agua de Nepal (Fuente: Sada 2010)

aguas residuales al alcantarillado. Este cambio en la práctica ha llevado a la descarga directa de las aguas residuales en los ríos y las masas de agua abiertas, lo que trajo consigo el aumento de las cargas de contaminación en el río y otras masas de agua. Se observó que, en la actualidad, la práctica de uso de las aguas residuales en la agricultura está limitada a las generaciones mayores, mientras que los jóvenes se abstienen de manipular este tipo de agua. No obstante, los agricultores que recurren al método de riego con aguas residuales sienten que, con el cambio en la práctica de uso de las aguas residuales para fines agrícolas, se han venido perdiendo nutrientes importantes que se recuperaban y utilizaban en las tierras de cultivo.

5. Políticas y marco institucional para la gestión de las aguas residuales

5.1 Políticas y legislación

A falta de una política de gestión de las aguas residuales específica, las cuestiones relacionadas con la gestión de las aguas residuales se abordan conforme a estrategias y políticas sectoriales referidas al suministro y saneamiento del agua. Dos documentos que reflejan el compromiso nacional de mejorar los servicios de saneamiento y suministro de agua en el país son la Estrategia Sectorial de Saneamiento y Suministro de Agua en Zonas Rurales (2004) y la Política de Saneamiento y Suministro de Agua en Zonas Urbanas (2009). La Estrategia Sectorial de Saneamiento y Suministro de Agua en Zonas Rurales (2004) se basa en el compromiso nacional de brindar una cobertura total en los servicios de saneamiento y suministro de agua en el país, como se prevé en el Objetivo de Desarrollo del Milenio. La Política de Saneamiento y Suministro de Agua en Zonas Urbanas (2009) contempla una mejora de la prestación del servicio de agua en las zonas urbanas, incluidos los servicios y sistemas de aguas residuales, el fomento de las asociaciones público-privadas en el desarrollo de infraestructura y servicios, y la aplicación de normas nacionales para la eliminación y el uso seguros de las aguas residuales. En un intento por mejorar los servicios de saneamiento y suministro de agua, se

aprobaron las Normas Nacionales de Promoción de Saneamiento e Higiene (2005), donde se destacan los siguientes puntos:

- Mejorar la coordinación a nivel central entre los organismos relacionados con el saneamiento y el suministro de agua con la participación activa del Comité Nacional de Saneamiento y Agua Potable.
- Alentar la participación eficaz de las organizaciones no gubernamentales y el sector privado para ampliar la cobertura de los servicios de saneamiento y suministro de agua.
- Crear con los grupos de consumidores sistemas de alcantarillado con plantas de tratamiento.
- Prohibir la eliminación directa de las aguas residuales no tratadas en las masas de agua.

La legislación y las disposiciones normativas que abarcan las cuestiones relativas a la gestión de las aguas residuales y la protección de las masas de agua incluyen las siguientes: Ley de Protección del Medio Ambiente (1996), Ley de Autonomía Local (1999), Ley de Empresas Industriales (1993), Política Nacional de Humedales (2003), Ley Nacional de Saneamiento (1994), Ley de Plaguicidas (1992), Ley sobre Gestión de Desechos Sólidos y Movilización de Recursos (1988) y Ley sobre Recursos Hídricos (1992).

Ley sobre Gestión de Desechos Sólidos y Movilización de Recursos (1988): Esta ley se centra en la gestión de los desechos sólidos en las municipalidades de Katmandú, Bhaktapur y Lalitpur. Establece las disposiciones normativas para la implementación de actividades y la movilización de recursos para la gestión de los desechos sólidos en las áreas mencionadas. Además, se describen las disposiciones para la recolección, la manipulación y la eliminación de los desechos sólidos de manera que no causen daños ambientales en el área designada para la eliminación de los desechos sólidos. Se identifican y determinan las funciones y responsabilidades de los ciudadanos respecto de la recolección y la eliminación de los desechos sólidos.

5.2 Acuerdos institucionales para la gestión de las aguas residuales

El Ministerio de Saneamiento y Suministro de Agua (MSSA) tiene la responsabilidad general de elaborar políticas y planes de desarrollo,

así como de gestionar el suministro de agua, el saneamiento, el sector del transporte y el desarrollo de la infraestructura física relacionada en el país. El Ministerio creó una División de Saneamiento encargada de brindar asistencia técnica a las organizaciones bilaterales y multilaterales para delinear, supervisar y evaluar los programas de saneamiento, incluidos los sistemas de alcantarillado domiciliarios y pluviales en las zonas urbanas y rurales, excepto el sistema de desagüe en las carreteras.

El Departamento de Suministro de Agua y Alcantarillado (DSAA) bajo la supervisión del MSSA tiene la tarea de planificar y desarrollar los sistemas de saneamiento y suministro de agua, así como la infraestructura relacionada en el país. Las responsabilidades de este departamento abarcan los centros rurales y urbanos pequeños del país. La Empresa de Suministro de Agua de Nepal (ESAN) se constituyó como una empresa semiautónoma responsable del suministro de agua y el sistema de alcantarillado en los principales centros urbanos fuera del valle de Katmandú. En el valle de Katmandú, las tareas de desarrollo, funcionamiento y gestión de la infraestructura y los servicios de suministro de agua y sistemas de alcantarillado recaen en la empresa Kathmandu Upatyaka Khanepani Ltd. (KUKL), una institución creada a través de una asociación público-privada. La Ley de Autonomía Local (1999) establece las funciones del gobierno, municipalidades y Comités de Desarrollo de Aldeas (CDA) locales respecto del agua potable, el riego, el saneamiento y la conservación del agua. Se espera que el papel principal de los gobiernos locales sea el desarrollo de las instalaciones de saneamiento y agua mediante la creación de programas y planes locales, así como brindar materiales y apoyo financiero para el desarrollo de la infraestructura y los servicios por parte de la comunidad local.

5.3 Regulación sobre el uso de las aguas residuales en la agricultura y otros usos

Las regulaciones sobre el uso de las aguas residuales en la agricultura y otros usos son débiles a raíz de la falta de disposiciones normativas necesarias y de instituciones con autonomía que se encarguen del uso y la gestión de las aguas residuales. No se especifica ninguna información sobre la calidad de los efluentes para la eliminación de las aguas residuales en las masas de agua, pero en la tabla 5, se describen los criterios de calidad que, por lo general, informa la mayoría de los

Tabla 5: Normas de calidad del agua para diferentes usos informados por los organismos del sector del agua de Nepal

Parámetro	Potable	Vida acuática	Higiene	Agricultura
pH	6,5-9,2	6,5-8,5	6,5-9	6,5-9
TSD (mg/l)	1500	1000	1500	500-3000
SS (mg/l)	-	25	50	-
OD como O2 (mg/l)	-	6	3	3
Cl como Cl (mg/l)	600	500	1000	100-1000
SO4 como SO4	400	500	1000	1000
NO3-N como N (mg/l)	-	20	20	25
NO2-N como N (mg/l)	-	0,15	1,0	1,0
NH3-N como N (mg/l)	-	0,02	0,2	0,2
Total de PO4 como PO4 (mg/l)	0,1	0,1	0,2	0,2
DBO como O2 (mg/l)	4	4	6	10
F como F (mg/l)	3	1	1,5	1,5
Total de Hg	-	0,0001	0,001	0,001
Total de Cd	-	0,005	0,005	0,01
Total de Pb	0,05	0,05	0,05	0,1
Cr	-	0,05	0,05	0,1
Fenol	0,002	0,005	0,1	0,2
Total de cianuro	-	0,005	0,2	0,2
Coliformes totales (NMPN/100 ml)	-	-	1000	1000

Fuente: Sharma y colaboradores (2005)

organismos para los diferentes usos del agua. En el 2008, se formularon y publicaron las normas de calidad para el uso seguro de las aguas residuales en la agricultura, la acuicultura, los abrevaderos de animales, la recreación y el medio ambiente en el Boletín Oficial del Gobierno de Nepal (Sada, 2011).

No existe ningún acuerdo institucional para regular el uso de las aguas residuales en la agricultura, así como tampoco ninguna norma que permita garantizar la manipulación segura de las aguas residuales y los productos agrícolas. Teniendo en cuenta que el uso de las aguas residuales en la agricultura se incrementará en el país en el futuro, al menos en las zonas urbanas, como Katmandú, crear normas de irrigación con aguas residuales sería el primer paso fundamental para abordar el tema del uso de las aguas residuales en el sector agrícola.

6. Investigación sobre el uso y los sistemas de aguas residuales

En Nepal, la investigación y el desarrollo de los conocimientos, así como la difusión de los conocimientos pertinentes sobre la gestión de las aguas residuales, son tareas no sistemáticas que se completan en lugares muy dispersos. Los proyectos de investigación están limitados a un pequeño grupo de instituciones educativas y de investigación, organizaciones de desarrollo y los profesionales correspondientes, cuyas áreas se mencionan a continuación:

- análisis del estado de degradación de las masas de agua superficiales (ríos, lagos y estanques), incluidos los estudios limnológicos en las masas de agua superficial;
- evaluación del desempeño de la tecnología y la infraestructura relacionada con la gestión de las aguas residuales;
- consecuencias sanitarias y repercusiones en los medios de vida, y la dinámica de las enfermedades como resultado de la degradación de la calidad del agua;
- análisis interdisciplinario de los procesos y el resultado de la degradación de los sistemas de agua subterránea y superficial;
- opciones tecnológicas para descentralizar el tratamiento de las aguas residuales;

- investigación de las políticas sobre la gestión y el uso de las aguas subterráneas y superficiales.

Las organizaciones involucradas ocasionalmente en la investigación y desarrollo de los conocimientos de los sistemas de aguas residuales engloban a las universidades, unidades y organizaciones de investigación en los ministerios y departamentos gubernamentales con una responsabilidad independiente en las áreas de investigación y desarrollo, así como un grupo pequeño de organizaciones de desarrollo encargadas del desarrollo y la investigación de políticas. Entre estas, se encuentran:

- Departamento Central de Geografía, Universidad de Tribhuvan
- Instituto de Ingeniería, Universidad de Tribhuvan
- Universidad de Katmandú
- Facultad de Ingeniería de Nepal, Universidad de Pokhara
- Centro Internacional para la Ordenación Integrada de las Montañas (ICIMOD)
- Organización de Salud Pública y Medio Ambiente (ENPHO)
- Instituto para la Transición Social y Ambiental de Nepal (ISET-Nepal)
- Consejo de Investigación Agrícola de Nepal
- Programa de Capacitación y Gestión de Sistemas (SMTP), Departamento de Riego
- Consejo de Investigación Sanitaria de Nepal, Ministerio de Salud

A continuación, se mencionan algunos de los principales logros alcanzados hasta la fecha en las áreas de investigación y desarrollo de los conocimientos sobre la gestión y los sistemas de aguas residuales en Nepal:

- análisis sistemático de la calidad del agua en los ríos del valle de Katmandú llevado a cabo por el Departamento de Hidrología y Meteorología (DHM), el Gobierno de Nepal y la ENPHO durante 1992-1996;
- clasificación de los sistemas de ríos en la región del Hindu Kush del Himalaya efectuada por el ICIMOD durante el 2006-2007, sobre la base de los criterios de la calidad del agua, entre los que también se incluyeron los ríos en el valle de Katmandú;

- Perspectiva Ambiental del Valle de Katmandú preparada por el Ministerio de Medio Ambiente, Ciencia y Tecnología, con el apoyo del ICIMOD y el PNUMA en el 2007;
- optimización del diseño y promoción del sistema de gestión descentralizado de las aguas residuales en Nepal por la ENPHO.

Se desconoce que se hayan iniciado en el país proyectos de investigación específicamente centrados en el uso y la gestión de las aguas residuales, donde se estudien las preocupaciones sociales, económicas, tecnológicas, ambientales, sanitarias y de medios de vida.

7. Brechas de conocimientos y necesidad de un uso seguro de las aguas residuales

Hasta la fecha, no existe ningún análisis sobre el estado y brechas de conocimientos respecto del uso seguro de las aguas residuales en los diferentes organismos del sector del agua y su personal en el país. Esta falta de insistencia en evaluar las brechas de conocimientos sobre el uso seguro de las aguas superficiales se debe, probablemente, a que los organismos del sector del agua y su personal sostienen que las aguas residuales son una "molestia" ambiental y no un "recurso". En la actualidad, se le ha prestado mucha atención al desarrollo de la infraestructura física y los servicios de recolección, transporte, tratamiento y eliminación segura de las aguas residuales, mientras que se le ha dado poca importancia al reciclado y la reutilización de las aguas residuales en el diseño y la implementación de los programas de desarrollo. El motivo por el que no se considera las aguas residuales un recurso potencial para el uso productivo en la agricultura y otros sectores fue, en parte, la falta de coordinación institucional entre los organismos del sector del agua. El desarrollo del sector del agua en el país es altamente sectorial, con políticas sectoriales que dominan el desarrollo de los servicios y sistemas de agua en cada sector.

Durante la preparación de este caso, nos comunicamos con los ministerios y departamentos gubernamentales pertinentes, así como con el personal que ocupa cargos clave en la adopción de decisiones y formulación de políticas, y evaluamos sus opiniones respecto de la importancia, el estado y los requisitos de conocimientos sobre la

gestión y el uso seguro de las aguas residuales en sus compromisos diarios de prestación de los servicios. La información proporcionada a continuación está basada, sobre todo, en esta encuesta, que se llevó a cabo en un tiempo muy breve. El personal de los organismos gubernamentales identificó dos tipos de brechas: 1) brechas en la internalización y el uso seguro de las aguas residuales como uno de los temas del programa institucional de los organismos y 2) brechas en la planificación y la implementación de los programas.

Las brechas en la internalización del uso seguro de las aguas residuales como uno de los temas habituales del programa de los organismos se derivan, esencialmente, de la falta de iniciativa por parte de los organismos del sector del agua de incorporar el uso de las aguas residuales entre los temas de sus programas de aprovechamiento de los recursos hídricos. La Estrategia de Recursos Hídricos respaldada por el Gobierno de Nepal en el 2002 concibe un enfoque integrado de aprovechamiento de los recursos hídricos, en el cual se identificó la posibilidad de utilizar/reutilizar las aguas residuales como una de las alternativas para abordar/mejorar la seguridad del agua, al menos en las áreas que afrontan escasez de agua. Asimismo, en líneas generales, hubo leyes y disposiciones normativas adecuadas para fomentar el uso seguro de las aguas residuales. Las normas de calidad del agua para el uso seguro de las aguas residuales en la agricultura, la acuicultura, los abrevaderos de ganado, la recreación y el medio ambiente, publicadas en el Boletín Oficial del Gobierno de Nepal en el 2008, refuerzan el compromiso nacional con la promoción del uso seguro de las aguas residuales. Sin embargo, se ha obviado la importancia de traducir el énfasis de las políticas en programas y planes reales para el uso seguro de las aguas residuales en la mayoría de los organismos de desarrollo del sector del agua, así como en aquellos preocupados por las cuestiones ambientales y sanitarias.

En la tabla 6, se presentan las brechas identificadas en la planificación y la implementación de programas por los organismos pertinentes del sector del agua, según pone de manifiesto el personal correspondiente. Si bien el personal de la mayoría de los organismos del sector del agua y de aquellos relacionados con las áreas de la salud y el medio ambiente demostró un alto nivel de relevancia y manifestó la importancia de los conocimientos sobre el uso seguro de las aguas residuales, también destacó, invariablemente, un bajo nivel de énfasis actual en el desarrollo de programas y planes para

fomentar el uso seguro de las aguas residuales. Asimismo, todos los organismos expresaron una gran necesidad de desarrollar capacidades institucionales, en términos de desarrollo e incorporación de recursos humanos, materiales y tecnológicos para desempeñarse mejor en sus funciones de promoción de los conocimientos y las prácticas respecto del uso seguro de las aguas residuales.

Tabla 6: Brechas en la planificación y la implementación de los programas relacionados con el uso seguro de las aguas residuales en los organismos seleccionados del sector del agua

Niveles de brecha	MOA &C	MO-PPW	MOH	MOE	DOI	NARC
Relevancia de conocimientos sobre el uso seguro de las aguas residuales	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta
Políticas sectoriales que enfatizan/abarcaban el problema de las aguas residuales	NE	Adecuada	Adecuada	Adecuada	NE	NE
Recursos (materiales, tecnológicos y humanos) para abordar el uso seguro de las aguas residuales	Baja	Intermedia	Baja	Baja	Baja	Baja
Programas/planes que fomentan el uso seguro de las aguas residuales	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
Necesidad de desarrollo de capacidades institucionales para el uso seguro de las aguas residuales	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta

NE: No existente

8. Observaciones finales

El objetivo de este caso fue presentar el estado de la producción y uso de las aguas residuales en el contexto del valle de Katmandú, así como las normas y marcos legales vigentes sobre el uso de las aguas residuales en el país. En la última sección del caso, se evaluaron la brecha de conocimientos y la necesidad de desarrollar las capacidades de los agricultores, los organismos del sector del agua y su personal correspondiente respecto del uso seguro de las aguas residuales en el país. Asimismo, se intentó aprovechar las microperspectivas, en especial, las prácticas tradicionales de uso de las aguas residuales en el valle de Katmandú y, por consiguiente, la necesidad de fomentar los conocimientos y las prácticas sobre la gestión segura de las aguas residuales. Se extrajeron las siguientes conclusiones sobre la base de los contenidos y el análisis de este caso:

- Se observó que la gestión y el uso de las aguas residuales en el valle de Katmandú es una práctica milenaria, que se vincula, de manera intrínseca, con la sabiduría y los conocimientos tradicionales de las personas. Tradicionalmente, las personas consideran que las aguas residuales son un "recurso", mientras que los esfuerzos de desarrollo de los organismos del sector del agua en relación con la gestión de las aguas residuales, en esencia, estuvieron guiados por la noción de que las aguas residuales son una "molestia" y un elemento clave de contaminación ambiental. Esta noción se encontró en las perspectivas disciplinarias y sectoriales de desarrollo del sistema hídrico y está regida, básicamente, por una solución tecnológica para todos los problemas con el agua.
- Se observó que la producción de aguas residuales en el valle de Katmandú aumentó de manera significativa desde 1970, en especial, en las zonas urbanas, debido a un crecimiento acelerado de la población, el desarrollo no planificado e irregular de la infraestructura y los servicios para el suministro de agua, el saneamiento y la gestión de las aguas residuales. Por otro lado, a partir del análisis, se evidenció que el ritmo de desarrollo de la infraestructura y los servicios para la gestión de las aguas residuales ha sido, en gran medida, inadecuado e incompleto para satisfacer las necesidades. Sumado a ello, se demostró que una solución centralizada y basada en tecnología para la gestión de las aguas residuales no pudo abordar el problema de las aguas residuales, en especial, en las zonas urbanas del valle de Katmandú.

- Se comprobó que, en el ámbito legislativo, existe el compromiso de solucionar el problema de la gestión de las aguas residuales en el país. Se advirtió que las leyes y disposiciones normativas vigentes son, en general, adecuadas para tratar los problemas de la gestión de las aguas residuales. Por otro lado, se identificaron las brechas en la implementación de las políticas, las leyes y las disposiciones normativas relacionadas con el uso seguro de las aguas residuales. También se identificaron las brechas en el desarrollo institucional y la internalización del problema de la gestión de las aguas residuales como un área importante de desarrollo en la que pueden intervenir los organismos del sector del agua.
- Durante el análisis, se notó la falta de énfasis en la investigación y el desarrollo en el país para mejorar el estado de los conocimientos, las prácticas y las soluciones a la gestión de las aguas residuales. Existe solo una pequeña cantidad de organismos y su personal correspondiente que tienen un nivel limitado de compromiso con la investigación y el desarrollo del uso y la gestión de las aguas residuales. Esto se debe, principalmente, a la falta de atención nacional en la promoción del uso de las aguas residuales.
- La principal conclusión que se extrae del análisis es la necesidad de considerar el uso seguro de las aguas residuales un área importante de desarrollo del sector del agua en el país. Existe una escasez de agua visible, en especial en las zonas urbanas, que, sin dudas, se debe a la época de sequía, la incertidumbre respecto de los recursos hídricos, el agotamiento de las aguas subterráneas y la variabilidad climática. Hay una posibilidad de fomentar el uso de las aguas residuales como una manera de abordar la incertidumbre sobre los recursos hídricos y la seguridad hídrica a nivel local. Teniendo en cuenta la creciente preocupación sobre la incertidumbre en la disponibilidad del agua causada por el cambio climático en el país, en especial, sobre el probable agotamiento de los recursos hídricos debido al cambio climático, existe una clara posibilidad de considerar el uso seguro de las aguas residuales una herramienta importante de preparación y elaboración de estrategias de adaptación para velar por la posible seguridad hídrica futura.

Referencias

- ADB & GON. (2010). "Kathmandu Valley Water Supply and Wastewater System Improvement: Project Feasibility Study Final Report". Manila, Filipinas: Banco Asiático de Desarrollo (BAD).
- A. K. Shukla, U. R. Timilsina y B. C. Jha. (2012). "Nepal Country Paper, Wastewater Production, Treatment, and Use in Nepal".
- Basnyat B. B. (1999). "Fertilisers and the Environment in the Context of Nepal: How Big is the Problem?". Informe presentado en el taller *Present Environmental Challenges and Management of Pesticides, Chemical Fertilizers and Solid Wastes*, Katmandú, Nepal, 3 y 4 de octubre.
- CNP. (2010). "Millennium Development Goal Needs Assessment for Nepal". Comisión Nacional de Planificación (CNP) y PNUD.
- FAO. (2012). "Aquastat". Consultado el 12 d mayo en www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/results.html.
- ICIMOD, MOEST/GON y PNUMA. (2007). "Kathmandu Valley Environmental Outlook". Centro Internacional para la Ordenación Integrada de las Montañas (ICIMOD), Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente del Gobierno de Nepal (MOEST/GON) y Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).
- Mool P. K., Bajracharya S. R. Y Joshi S. P. (2001). "Glacial Lakes and Glacial Lake Outburst Flood Events in the Hindu Kush-Himalayan Region". En *Global Change and Himalayan Mountains*, editado por Shrestha KL., Lalitpur, Nepal: Instituto de Desarrollo e Innovación.
- Nyachhyon B. L. (2006). "Service Enhancement and Development of Sanitary Sewerage System in Urban and Semi-Urban Settings of Nepal". *Economic Policy Network*, Documento político N.º 23. Ministerio de Finanzas, Gobierno de Nepal y Banco Asiático de Desarrollo.
- OCE. (1995). "A Compendium of Environmental Statistics of Nepal". Ramshahpath, Katmandú: Oficina Central de Estadística (OCE).
- OCE. (2011). "Preliminary Results of National Population Census 2011". Ramshahpath, Katmandú: Oficina Central de Estadística (OCE).
- Palikhe B. R. (1999). "Pesticide Management in Nepal: Implementation Issues and Experiences". Informe presentado en el taller *Present Environmental Challenges and Management of Pesticides, Chemical Fertilizer and Solid Waste*, 3 y 4 de octubre, Katmandú, organizado por la Sociedad de Periodistas Ambientalistas, Nepal.
- Ruthkowski T. (2004). "Study of Wastewater Irrigation in Kathmandu Valley". *Water Nepal*, 11-2:63-71.

Sada R. (2010). "Processes and Consequences of Degradation of Hanumante River". Tesis de maestría no publicada, Universidad de Pokhara, Nepal.

SCAE. (2003). "Water Resource Strategy Nepal". Secretaría de la Comisión de Agua y Energía (SCAE), Gobierno de Nepal.

SCAE. (2010). "Concept Paper on Eco-Efficient Water Infrastructure Policy in Nepal". Secretaría de la Comisión de Agua y Energía, Gobierno de Nepal.

Sharma S., Bajracharya R. M., Sitaula B. K. y Merz J. (2005). "Water Quality in the Central Himalaya". *Current Science*, 89-5:774-786.

Shrestha J. (2011). "Traditional Practices and Knowledge System in Integrated Wastewater Management in Kathmandu Valley". Tesis de maestría no publicada, Universidad de Pokhara, Nepal.

PNUD. (2006). "Human Development Report- Beyond Scarcity: Power, Poverty and Global Water Crisis".

UNEP. (2001). "Nepal: State of the Environment 2001". Katmandú, Nepal: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y Centro Internacional para la Ordenación Integrada de las Montañas (ICIMOD).

CASO 14

El uso de aguas residuales tratadas en Mendoza-Argentina (Argentina)

Carlos Horacio Foresi¹

Resumen

En la provincia de Mendoza, Argentina, el reuso en agricultura de aguas residuales tratadas, se realiza desde hace más de cinco décadas. Existe un factor determinante en la demanda de este recurso para el riego, cual es la escasa ocurrencia de lluvias y la aridez del territorio, propias de un desierto.

Ubicada en el centro oeste de la Argentina, al pie de Los Andes, Mendoza registra precipitaciones que se ubican en promedio en un rango de 200 mm a 250 mm anuales según la latitud. Toda la actividad humana y la producción se concentra en tan sólo el 3,5 % de su superficie que abarca 148.827 km² y se distribuye en cuatro oasis desarrollados por la mano del hombre a expensas del agua que transportan sus ríos, sumando algo más de 500.000 hectáreas cultivadas en las cuales se hace agricultura intensiva siendo la vid para vinificar el cultivo preponderante, seguido por olivos, frutales de carozo y de pepita, horticultura, forestales y pasturas.

En este contexto, el recurso hídrico es muy demandado por parte de los agricultores; más, si se tiene en cuenta que en el caso de aguas residuales tratadas existen garantías en lo que respecta al

¹ Carlos Horacio Foresi ✉
Jefe del Departamento Reusos Hídricos
Departamento General de Irrigación-España y Barcala (CP 5500) Ciudad de Mendoza.
Correo electrónico: cforesi@agua.gob.ar, carloshoracioforesi@gmail.com

En: Hiroshan Hettiarachchi and Reza Ardakanian (eds). *Uso seguro de las aguas residuales en la agricultura: ejemplos de buenas prácticas* ©UNU-FLORES 2016

control de su calidad y a la forma en que se aplica, para que no se produzcan efectos no deseados en los suelos ni en los cultivos. Con esta práctica, además, se completa el tratamiento que se lleva a cabo en las plantas depuradoras de efluentes y se incorporan nutrientes a los suelos logrando un aprovechamiento económico que adquiere importancia en una zona árida. No obstante, para que éste sea óptimo, se debe contar con las condiciones y conocimientos necesarios para garantizar tanto la conservación de la fertilidad del suelo (características orgánicas, minerales e hidrogeológicas) como la obtención de productos que respondan a las calidades higiénicas y sanitarias exigibles según su destino, así como también asegurar la preservación ambiental, para todo lo cual es necesario que el aprovechamiento de aguas residuales se realice de modo controlado. Con este fin el Departamento General de Irrigación emitió la Res. N° 400/03 HTA², mediante la cual se ha establecido la reglamentación a cumplir en las denominadas Áreas de Cultivos Restringidos Especiales (ACREs).

Actualmente, un importante porcentaje de los establecimientos depuradores de la provincia realizan disposición de los efluentes tratados en un ACRE. En cuanto a superficie, se cuenta con aproximadamente 7.000 ha que en verano son irrigadas con aguas residuales, concentrándose principalmente en el oasis norte, en consonancia con la densidad poblacional. El 85% de esta superficie está regularizada jurídicamente y es administrada por sus usuarios, con la fiscalización del Departamento General de Irrigación. Resta como importante tarea regularizar también el reuso invernal, cuyos lineamientos y requisitos están establecidos en la Resolución N° 500/06 HTA.

Palabras Clave: reuso agrícola, acre, aguas residuales, irrigación.

1. Introducción

La Constitución de Mendoza, vigente desde 1.916, contempla en su Sección VI un Capítulo Único dedicado al Departamento General de Irrigación. Este Organismo tiene como misión la administración y la

² Resolución 400/03 del Honorable Tribunal Administrativo "Reglamento de Areas de Cultivos Restringidos Especiales"

preservación de todo el recurso hídrico disponible en la provincia (superficial y subterráneo) contemplando los distintos usos del mismo: potable, riego, industrial, energía y recreación. Dentro de estos aspectos, el reuso de aguas residuales tratadas en agricultura, ha tomado un carácter más definido desde la creación en el año 2012 del Departamento Reusos Hídricos cuyo objetivo principal es la regularización técnica y administrativa de las Áreas de Cultivos Restringidos Especiales (ACREs). El Departamento General de Irrigación es un Organismo extrapoder que tiene autarquía financiera, es decir "independencia" en el manejo de sus propios recursos, sin depender económicamente ni de partidas presupuestarias que otorgue la H. Legislatura, ni de ejecuciones de las mismas que disponga el Poder Ejecutivo. También tiene autonomía administrativa. El Departamento General de Irrigación es un organismo público descentralizado, que administra el recurso hídrico en la provincia de Mendoza, reglamentando y fiscalizando su uso. Tiene autarquía institucional, presupuestaria y jerarquía constitucional. Su función principal es la de administración general de las aguas públicas y son de su competencia todos los asuntos referidos al recurso hídrico, lo mismo que la preservación, distribución y regulación de las aguas en sus cauces naturales y artificiales.

Esta institución tiene sus raíces en distintas formas que las organizaciones gubernamentales y de la sociedad civil, le fueron confiriendo desde la época de la colonia. El nacimiento del Departamento General de Irrigación, tal como hoy se lo conoce, comienza en 1884 con la sanción de la Ley General de Aguas, al establecer: "La administración del agua y en general el cumplimiento de la presente ley, estará bajo la dirección del Departamento General de Aguas". Diez años después, en 1894, la Constitución de la provincia de Mendoza denomina al Departamento General de Aguas como Departamento General de Irrigación, nombre que se mantiene hasta el presente.

La característica que resalta en la gestión del agua en Mendoza es que se realiza en forma conjunta con las organizaciones de usuarios llamadas **Inspecciones de Cauces**³ que si bien guardan una

³ Inspecciones de Cauces: son personas de derecho público sin fines de lucro, que gozan de autarquía y plena capacidad para actuar en los ámbitos del Derecho Público y Privado. Eligen sus autoridades, elaboran sus presupuestos, conforme con lo dispuesto por el artículo 187 de la Constitución Provincial. Se constituyen de pleno derecho por

dependencia funcional con el Departamento General de Irrigación se rigen por una ley específica (ley 6405)⁴.

Ya se ha dicho que la agricultura en zonas áridas y semiáridas, como la provincia de Mendoza, depende casi absolutamente del riego. La demanda de agua para uso en irrigación representa un porcentaje que supera el 80% de la necesidad total de agua. Asimismo, el constante crecimiento poblacional implica también un incremento en el requerimiento hídrico que se suma a la presión sobre la adecuada distribución del recurso. Esta realidad hace indispensable mejorar la eficiencia en su utilización, más aun teniendo en cuenta la disminución en las precipitaciones níveas de los últimos años.

Una de las alternativas disponibles para aliviar esta tensión es la reutilización de los efluentes urbanos tratados en agricultura. En nuestra provincia, si bien esta práctica se viene desarrollando desde hace más de cincuenta años, se ha reglamentado a partir de 2003.

En el presente trabajo se desarrolla una descripción y análisis de la situación provincial del reuso agrícola a efectos de servir de base en la toma de decisiones por parte de los diversos actores involucrados.

2. Breve reseña histórica

2.1. ACRE Campo Espejo

En la década del `20 comenzaron a instalarse las primeras redes cloacales en la capital de la provincia de Mendoza. Los líquidos, sin ningún tratamiento, eran conducidos por tuberías a gravedad hacia un campo inculto de propiedad fiscal ubicado varios kilómetros al norte

todos los usuarios titulares de derecho de uso de aguas públicas, cuya dotación se suministre a través de un mismo cauce o de un sistema de cauces específicamente determinado. Sus atribuciones y funcionamiento se rigen por la ley 6.405 y demás leyes que rigen en la materia. La administración, uso, control, conservación, mantenimiento y preservación de los canales, hijuelas y desagües de riego de la Provincia así como de las aguas que son conducidas por los mismos, estarán a cargo de las Inspecciones de Cauces, con sujeción a lo dispuesto en el Capítulo Único Sección Sexta-Departamento General de Irrigación, de la Constitución Provincial.

⁴ Ley 6.405: decretada por la Honorable Legislatura de Mendoza el 18 de julio de 1996.

de la ciudad. A dicho campo se lo comenzó a llamar “Campo Espejo”, seguramente, por el brillo que reflejaban desde lejos aquellas tierras donde se derramaban los efluentes. Al poco tiempo, agricultores establecidos en las proximidades construyeron cauces precarios para derivar esos líquidos y regar cultivos. Muchos años pasaron para que se construyera una planta de tratamiento primario (1976), siendo en ese entonces la Empresa que proveía el servicio de agua potable y cloacas Obras Sanitarias de la Nación (OSN). Esa planta, más tarde, fue remodelada y ampliada pero no alcanzó para revertir el riesgo que implicaba utilizar los líquidos residuales para riego con ese nivel de tratamiento. En 1994 se licitó una nueva planta y se adjudicó la misma a una Unión Transitoria de Empresas privadas (UTE)⁵ que realizó las obras. El proyecto de construir lagunas de estabilización cumpliría con los estándares de la OMS para un tratamiento secundario. La construcción de doce series de tres lagunas cada una se llevó a cabo considerando como contraprestación la concesión del tratamiento de los líquidos por parte de la UTE por un período de 20 años. Hoy se están reconsiderando las condiciones ya que los términos están vencidos. Se estableció aguas abajo un ACRE que hoy alcanza una superficie de 3.000 hectáreas.

2.2. ACRE Paramillo

A principios de 1980 se construyó otra gran planta de tratamiento de aguas cloacales para recibir el agua del gran Mendoza.

Cuatro grandes lagunas en serie en un sitio distante unos treinta kilómetros al este de Campo Espejo permitieron una buena depuración de los líquidos y el desarrollo de un nuevo ACRE en las inmediaciones del establecimiento. Este lugar, como su nombre lo indica, era un verdadero páramo, yermo, ya que no habían cultivos ante la inexistencia de derechos o concesiones de riego. Hoy, merced al aprovechamiento ordenado de las aguas cloacales tratadas y al agua subterránea, la localidad Paramillo se ha transformado y quizás debería comenzar a llamarse de otra forma pues es muy notable el cambio

⁵ UTE: Las UTE son una forma de colaboración empresarial para acometer proyectos obras o servicios de volúmenes importantes para una sola empresa.

que se ha registrado en la zona, con prósperas propiedades rurales altamente tecnificadas que dan trabajo a cientos de personas en las 3.500 hectáreas que constituyen el ACRE.

3. Los factores que han influido en el desarrollo exitoso del reuso en Mendoza

3.1. La demanda

Ya se ha hecho referencia a las condiciones de aridez de la provincia. Necesariamente debe suplementarse mediante el riego, el déficit de agua de lluvia que se registra en Mendoza para que cualquier cultivo prospere. Ante esta situación, los agricultores están siempre atentos a las fuentes que puedan serles de utilidad, ya sea agua superficial de ríos o arroyos, agua subterránea, o agua de reuso.

En el caso del agua cloacal tratada existe un gran interés, porque además de su disponibilidad durante todo el año en zonas que no tienen derechos de riego registrados, aporta nutrientes y materia orgánica que reducen los costos de fertilización tan necesarios en suelos esqueléticos y minerales como los que existen en Mendoza. Con seguridad este factor es determinante, pero como es lógico, va muy ligado a la calidad del recurso hídrico ya que el campesino no está dispuesto a aceptar cualquier agua. La calidad del agua cloacal tratada es aceptable de acuerdo al grado de tratamiento actual, aunque no para riego irrestricto.

3.2. La gestión del agua de reuso por parte de las Inspecciones de Cauces

Se ha citado anteriormente a las Inspecciones de Cauces como las autoridades de aplicación de la Ley de Aguas⁶ que ejercen funciones de policía hídrica sobre los cauces menores.

⁶ Ley de Aguas de Mendoza, vigente desde el año 1.884

Éstas también tienen injerencia en la gestión técnica y administrativa de las ACREs que se riegan con aguas residuales; a sus funciones específicas se le agregan algunos aspectos que se encuentran reglamentados en la Resolución 400/03 y que hacen a cuestiones operativas.

Este acierto ha tenido y tiene un gran peso en la sustentabilidad de las ACREs al existir un marco normativo sólido, por un lado, y una continuidad de más de un siglo en la práctica y en el ejercicio de las funciones.

Las Inspecciones de Cauces tienen tres pilares básicos que apuntalan su continuidad:

- Autarquía y autoadministración: ya que determinan y ejecutan sus propios presupuestos. Las Asambleas de Usuarios de la Inspección de Cauce se reúnen dos veces al año: una (durante el mes de noviembre), para establecer el presupuesto de gastos de la Inspección y la "prorrata" con que han de contribuir los usuarios a solventar los mismos el año próximo; y otra, durante el mes de mayo para aprobar la rendición de cuentas del presupuesto que ha realizado el Inspector de Cauce en el ejercicio anterior. El Inspector de Cauce, administra las rentas de la Inspección, todo ello, bajo el control de legalidad que realiza el Departamento General de Irrigación como autoridad superior del agua.
- Democracia directa y representativa: Los usuarios tienen la atribución de elegir a las autoridades de sus canales. Tal sistema, es propio de la naturaleza de "consorcio" que revisten las Inspecciones de Cauce. En este régimen, cada cuatro años los usuarios eligen por votación secreta y obligatoria a quien se ha de desempeñar como administrador y representante legal del consorcio a través del cargo de Inspector de Cauce. Pero sin perjuicio de la elección democrática de ese representante, las Asambleas de Usuarios también pueden expedirse sobre aspectos de importancia para la vida de la Inspección.
- Control por parte de las autoridades superiores: Tal como surge del punto anterior, las Inspecciones de Cauce están sometidas al control del Departamento General de Irrigación. El referido control, en el marco de la relación autárquica, se limita a la legalidad del funcionamiento de la Inspección. La Ley 6405 lo regula en su Art. 23, donde establece funciones de fiscalización a través del H. Tribunal Administrativo del Departamento General de Irrigación: aprobar los Estatutos de las Asociaciones de Inspecciones; requerir

la exhibición de libros y documentos que estime necesaria; solicitar informes y disponer investigaciones de oficio o a petición de parte; verificar el cumplimiento de los recaudos exigidos para designar autoridades; designar veedores de las Asambleas Generales de Usuarios; intervenir administrativamente la Inspección o la Asociación, (de oficio o a petición de los Usuarios, cuando existan causas graves que así lo justifiquen) y de la Superintendencia (vigilar el cumplimiento de las atribuciones, deberes y funciones asignadas a las Inspecciones y Asociaciones, cuidando de no entorpecer la regularidad de sus respectivas administraciones por las autoridades legítimamente constituidas.

En el caso de las Áreas de Cultivos Restringidos Especiales, la Inspección de Cauce del ACRE, sin perjuicio de las demás atribuciones legales, debe velar por la adecuada distribución y aplicación del agua de reuso, asegurándose que se realice dentro del perímetro del ACRE. También debe verificar que se observen las normas respecto a los cultivos autorizados y toda actividad conexas con éstas.

La Inspección también debe controlar en el marco reglamentario, la calidad y volumen de las aguas erogadas desde la Planta Depuradora en el punto de vuelco al ACRE, antes de su ingreso al reuso. Todos los años, las Inspecciones de Cauces que ejercen el manejo técnico y administrativo de las ACRE deben requerir a los agricultores una Declaración Jurada de los cultivos que van a efectuar en sus campos e inspeccionarlos al azar para constatar. En caso de que los cultivos no sean los permitidos, se los emplaza para que no continúen con el mismo bajo apercibimiento de iniciar acciones administrativas que consisten, primero en un apercibimiento, luego multa, pudiendo llegar a la clausura de la fuente de provisión de agua (turno de riego o perforación). No se ha presentado ningún caso en que se llegue a sancionar pero eso puede deberse también a falta de acción por parte de las Inspecciones de Cauces, aunque está previsto el régimen sancionatorio.

3.3. Las obras y la coordinación

Como ya es sabido, para que el reuso agrícola sea sostenible en el tiempo, deben existir obras específicas tanto en la faz de depuración de los líquidos, como en la zona de reuso (ACRE) que aseguren la calidad

del agua y la eficiencia y control en la aplicación de la misma. En el caso de Mendoza, el tratamiento de las aguas cloacales es realizado por una empresa descentralizada del gobierno, AySAM⁷, y la gestión del riego es efectuada por otro Organismo, el Departamento General de Irrigación, quien a través de las correspondientes Inspecciones de Cauces opera el sistema de riego. La relación entre las dos Entidades, valga ésto como crítica, no siempre ha sido suficientemente coordinada ni tampoco ha existido un criterio consensuado en la asignación de fondos para la realización de obras. Como consecuencia, hoy existen falencias en el mantenimiento de las instalaciones y por otro lado se dificulta la planificación ante ampliaciones futuras por el constante crecimiento de la población.

4. El reuso de aguas cloacales tratadas en Mendoza

La suma de caudales que se tratan en todas las plantas depuradoras existentes en Mendoza, en promedio, está en el orden de 5 m³/s. La población actual de la provincia es de alrededor de 1.800.000 habitantes (según Censo Nacional 2010 era de 1.741.610 habitantes). De esa población el 75% aproximadamente tiene servicio cloacal. Considerando que en Mendoza se gastan 400 litros /día de agua potable y que de ese volumen el 80% vuelve a cloaca, se calcula el caudal disponible con el que pueden regarse las ACREs existentes teniendo en cuenta la evapotranspiración de la región y las eficiencias de riego posibles. En el cuadro N°1 se detallan los valores de caudales cloacales disponibles y la superficie regable con los mismos.

Este cálculo teórico coincide en la realidad con la existencia de Áreas de Cultivos Restringidos Especiales en el territorio, que se muestra en el Cuadro N° 2. (Fuente: elaboración propia)

⁷ Ley de Aguas de Mendoza, vigente desde el año 1.884

Cuadro N° 1: Caudales disponibles de agua cloacal tratada en la provincia de Mendoza y superficies factibles de riego

ITEM	CANTIDAD	UNIDAD
Población de la provincia	1.800.000	habitantes
% servido	0,75	75%
Vuelco	0.320	m ³ /persona/día
Efluentes a reuso	432.000	m ³ /día
Caudal	5	m ³ /s
Sup. ACREs verano	7.142	Ha.
Sup. Acres invierno (x3)	21.428	Ha.

Fuente: elaboración propia

Cuadro N° 2: Superficie de ACREs irrigada con agua cloacal tratada en Mendoza.

DIMENSIÓN ACREs	SUPERFICIE
GRANDES ACREs	6.300 hectáreas
ACREs MEDIANOS Y PEQUEÑOS	600 hectáreas
ACREs A CONSTITUIR O FORMALIZAR	200 hectáreas
TOTAL	7.100 hectáreas

4.1 ¿Que es un ACRE?:

La Resolución N° 400/03 del Honorable Tribunal Administrativo del Departamento General de Irrigación aprueba el Reglamento de Áreas de Cultivos Restringidos Especiales (A.C.R.E.) y establece los parámetros a determinar y la frecuencia de mediciones, en los Anexos I y II que forman parte integrante de la citada Resolución.

Establece o define lo que se entiende por ACRE. Textualmente, se expresa en el citado documento, en su Anexo I:

“Art.1.2. Se establece que la zona denominada AREA DE CULTIVOS RESTRINGIDOS ESPECIALES (A.C.R.E.) tiene por finalidad la materialización en ella del reuso controlado de los efluentes de un Establecimiento Depurador, la que podrá ser sujeta a explotación dentro de un marco de desarrollo sustentable, quedando absolutamente prohibido que éstas aguas reusadas sean derramadas o conducidas fuera de sus límites o de cualquier modo liberadas a su uso irrestricto. El uso de las aguas de reuso provenientes de efluentes depurados en las referidas áreas se encuentra sujeto a los principios generales de uso de aguas públicas, como la onerosidad, la utilización eficiente, la mejora progresiva de la calidad, etc., además de los que éste reglamento establezca.”

Del análisis de esta definición surgen algunas consideraciones:

- Materializa en un área definida el reuso controlado de los efluentes de un establecimiento depurador. Generalmente se eligen zonas sin concesiones de riego, de forma de ampliar la frontera cultivada. Existe una gran actividad industrial en Mendoza siendo la misma en un muy alto porcentaje de base agro-alimentaria, (bodegas, fábricas de conservas de frutas y hortalizas, fábricas de dulces, aceiteras, concentradoras de mostos, etc.) El límite que se le impone a las fábricas para vuelco a cloacas es fundamentalmente referido a la conductividad eléctrica que no debe superar los 3.000 μ S. No hay prácticamente aportes de efluentes con metales pesados al sistema cloacal.
- Dentro de un marco de desarrollo sustentable en el que debe considerarse la preservación de los suelos, las buenas prácticas agrícolas, el control de cultivos permitidos y la rentabilidad de la

producción. La calidad de los suelos se ha monitoreado en varias oportunidades sirviendo como base para determinados estudios, pero no como una tarea sistemática que lleve adelante el Departamento de Irrigación. En los ACREs existe una red de freatómetros construídos en lugares estratégicos que permiten evaluar el nivel freático del agua en los suelos y esta evaluación si es realizada metódicamente.

- Prohíbe que las aguas de reuso sean derramadas o conducidas fuera del ACRE, tendiendo a lo que se denomina "vuelco cero"⁸. Este aspecto se trata con mayor profundidad en el punto siguiente. El reuso se ha dado en Mendoza naturalmente, por el interés que tienen los usuarios en reemplazar agua subterránea, que es mas cara, por el agua cloacal. Además como las Acre's generalmente están situadas en zonas que no tienen derechos de riego, en algunos casos el agua cloacal tratada es la única fuente disponible para cultivar. No hay por lo tanto necesidad de promocionar desde el Estado el reuso.
- Se enmarca en los principios de uso de aguas públicas: onerosidad, uso eficiente, mejora de la calidad, etc.

Es de hacer notar que en verano la demanda supera a la oferta. Solamente hay disponibilidad para otorgar nuevos permisos en invierno que es la época en que se registran sobrantes porque las necesidades de los cultivos bajan significativamente.

4.2. Winter ACREs

Mendoza tiene un clima árido y continental, las temperaturas presentan una importante oscilación anual y las precipitaciones son escasas. El verano es cálido y húmedo, es la época más lluviosa y las temperaturas

⁸ Vuelco Cero: establecido en un convenio firmado entre el Departamento General de Irrigación y Obras Sanitarias Mendoza S.A. en el año 2000, llamado "Convenio Marco para la Implementación de la Política de Vuelco Cero y la Conformación de Áreas de Cultivos Restringidos Especiales (A.C.R.E.)", con la finalidad de reordenar el reuso de efluentes mediante la implementación de tal política, y ampliar así la superficie cultivada en la provincia. La política de vuelco cero implica la prohibición de que el efluente o su sobrante luego del riego, se derrame fuera de los límites del A.C.R.E. Esta situación no se cumple cabalmente al producirse sobrantes por la disminución de las necesidades hídricas de los cultivos en invierno.

medias están por encima de los 25 °C, registrándose máximas que superan los 37°C.

El invierno es frío y seco, con temperaturas medias por debajo de los 8 °C, mínimas por debajo de 0°C, heladas nocturnas ocasionales y escasas precipitaciones. La caída de nieve y aguanieve son poco comunes, suelen darse una vez por año, aunque con poca intensidad en las zonas más altas de la ciudad.

La evapotranspiración de los cultivos oscila en pleno verano desde 4,5 a 7 mm/día conforme a factores como altitud, latitud, etc. En invierno la evapotranspiración baja sensiblemente, 3 a 4 veces los valores del verano.

La Resolución N° 500/06 del HTA instituye los llamados "ACREs de Invierno" que básicamente tienden a lograr el vuelco cero. Esta norma permite el otorgamiento de nuevos permisos para que el agua residual sea utilizada durante un período de seis meses (desde abril a octubre de cada año) y el canon o pago por su uso se reduce al 50% del que se abona por todo el año. De esta forma se han otorgado más de 1.100 hectáreas en el ACRE Paramillo y unas 200 en el ACRE Campo Espejo.

5. Aciertos y Falencias actuales

Constituye todo un hito el hecho de que el Departamento General de Irrigación haya tomado bajo su órbita casi exclusiva y desde hace años el manejo de las áreas donde se efectúa el reuso de aguas residuales tratadas. Con anterioridad, la dispersión y superposición de normativa o la inacción (muchas veces por falta de medios) de distintos Organismos involucrados tangencialmente, atentaban contra una gestión eficiente en su manejo y desarrollo. Hoy nadie discute que la conducción de un ACRE, sobre todo en el caso de los dos grandes (Campo Espejo y Paramillo) con muchos usuarios y con extensas superficies corresponde al DGI; no obstante es aceptado que su tarea es perfectible.

Otro acierto ha sido sin lugar a dudas la forma de administración de las ACREs a través de las Inspecciones de Cauces. Esta característica le ha dado continuidad, transparencia y participación. No obstante las Inspecciones deben mejorar su gestión cumpliendo acabadamente la ley 6.405 en lo que a obligaciones se refiere.

En el caso de las ACREs las obras se pueden hacer por administración, con fondos de la Inspección si son obras chicas; otra posibilidad, ante obras medianas es que las hagan las Subdelegaciones de Aguas y luego reembolsan los regantes. Ante obras mayores la Provincia licita y financia las obras con fondos nacionales o internacionales y también son reembolsadas por los usuarios con años de gracias y plazos mas largos

En lo que respecta a la calidad del agua residual que se recibe para el riego en las ACREs, en general, se encuentra dentro de los parámetros exigibles para un tratamiento secundario. No obstante, por falta de inversión en algunos establecimientos de la Empresa que se ocupa del agua potable y saneamiento en Mendoza, AySAM SA, y también en el caso de plantas operadas por municipios, no se alcanza la calidad requerida (caso Algarrobal, Tupungato). El costo de tratamiento de las aguas cloacales lo pagan los usuarios del agua potable, vale decir las ciudades. El Departamento General de Irrigación le vende el agua cruda a AySAM (Agua y Saneamiento Mendoza) u otros operadores que realizan el servicio de agua y cloacas. Esas Empresas entregan el agua tratada en forma gratuita nuevamente al DG de Irrigación que constituye las ACRE y que les cobra a los usuarios un canon de riego. En realidad el DG de Irrigación les soluciona un problema a estos operadores ya que tiene los elementos administrativos y técnicos para ocuparse mejor de la disposición final de los líquidos.

6. Conclusiones

En Mendoza confluyen varias circunstancias favorables para que el reuso en agricultura de aguas residuales tratadas pueda llegar a feliz término: las condiciones climáticas que, como se ha expresado precedentemente, hacen del recurso hídrico un bien escaso, altamente requerido por los agricultores; la existencia de un Organismo como el Departamento General de Irrigación con más de cien años de experiencia en la gestión del agua (cabe aclarar que en 2012 se dictó la Resolución N° 293/12⁹

⁹ La Resolución N° 293/12 crea el Departamento Reusos Hídricos dentro del organigrama, poniendo énfasis en funciones específicas entre las que se cuentan determinar áreas factibles para el reuso, monitoreo de los efluentes en sus parámetros físicos, químicos y biológicos, control de cultivos, proyectos de obras en las ACREs, etc.

del Honorable Tribunal Administrativo); las organizaciones de usuarios (Inspecciones de Cauces) consolidadas a través del tiempo, con capacidad técnica y operativa para gestionar las áreas de reuso; la práctica de los agricultores que por décadas han utilizado las aguas cloacales tratadas y tienen conciencia de sus riesgos y los cuidados necesarios para su manejo. Como resultado de tantos años en los cuales los agricultores han regado con aguas cloacales tratadas existe una experiencia en su manejo. A ello se suman las recomendaciones oficiales sobre el tema efectuadas por el DG de Irrigación y otros organismos vinculados. De todas maneras se han previsto asambleas en las cuales se pueda instruir a los usuarios con mayor profundidad sobre las enfermedades de transmisión hídrica y los cuidados a tener en cuenta.; el tratamiento de los líquidos con resultados admisibles, dentro de los valores que se exigen en la reglamentación y la normativa existente que, a pesar de presentar algunas falencias, permite desenvolverse en un marco legal y administrativo definido. En Mendoza el agua no se cobra por volumen; se cobra por superficie y el coeficiente que se le entrega a las propiedades varía de acuerdo a la disponibilidad fundamentalmente de nieve caída en la cordillera de Los Andes cada año. En todos los casos, ya sea agua limpia o aguas tratadas, lo que cobran las Inspecciones es lo que les corresponde por el servicio que prestan para que el agua llegue a los agricultores, costo de sueldo del Inspector, tomeros (estos distribuyen el agua en cada toma o compuerta), trabajo de máquinas, mantenimiento de cauces, etc.

Si bien hay que reconocer que se han dado pasos importantes en pos del ordenamiento técnico y administrativo de las ACREs como el empadronamiento de los usuarios, la gestión de cobro para el uso del agua, el control de los cultivos permitidos, la organización de cuadros de turnado para el riego, etc., se puede y se debe seguir avanzando para perfeccionar este singular *sistema productivo* que se deriva del reuso de aguas residuales, valorizadas de tal forma, que hoy compiten con otras fuentes tradicionales de agua.

En este contexto, se sugieren algunas acciones de cuya implementación pueden lograrse mayores avances en los sistemas integrados de tratamiento y reuso.

Planificación y coordinación. Hoy, prácticamente no existe ni planificación ni coordinación; en Mendoza opera una Empresa que se ocupa del agua potable y el saneamiento (AySAM SA), existen otros operadores del servicio cloacal como Municipios, Cooperativas,

Uniones Vecinales, etc., interviene un Ente Regulador (E.P.A.S.)¹⁰ y un organismo como el Departamento General de Irrigación que administra toda el agua.

Reformulación de la Comisión de Seguimiento de ACREs ¹¹.

Revisión de la normativa actual que presenta algunas inconsistencias, superposiciones y omisiones.

Investigación sobre calidad de la producción y salud, con participación de las universidades locales

Capacitación de los agricultores

Construcción de obras, tanto en los establecimientos depuradores como en las ACREs.

Participación activa de otros Organismos vinculados al reuso.

Si se logran los objetivos propuestos, el reuso agrícola en Mendoza pasará a tener una importancia estratégica relevante para incrementar la eficiencia en el aprovechamiento del recurso hídrico, mitigando las consecuencias del cambio climático.

También proporcionará una mejora en la garantía hídrica ya que las aguas cloacales tratadas se generan todo el año y con un caudal prácticamente constante. Además de la cantidad, con ACREs correctamente manejados y controlados se garantiza el uso seguro desde el punto de vista sanitario.

Por último favorecerá el desarrollo socioeconómico ya que la reutilización de efluentes cloacales tratados incrementa el oasis cultivado y genera nuevas posibilidades de trabajo.

¹⁰ Ente Provincial del Agua y Saneamiento

¹¹ Esta Comisión integrada por representantes de las Entidades que intervienen en el reuso efectúa el seguimiento de las ACRE y propone acciones para su mejor desempeño; hasta el presente no se ha logrado implementar correctamente.

8. Bibliografía

Departamento General de Irrigación, Resolución N° 400/03 del Honorable Tribunal Administrativo, Reglamento de Áreas de Cultivos Restringidos Especiales (A.C.R.E.)

Departamento General de Irrigación, Resolución N° 500/06 del Honorable Tribunal Administrativo, faculta la creación de ACREs de Invierno.

Magnani, Cesar, *“Administración de las Aguas en la Provincia de Mendoza. “Descentralización y participación de los usuarios como rasgos determinantes de la gestión hídrica de regadío”*, Tesis, Universidad de Mendoza, Mendoza, 1991.

Obras Sanitarias Mendoza S.A., *“Depuración y reuso de efluentes clocales, Folleto de Divulgación”*, Mendoza, 1997.

“Ley de Aguas de 1884” comentada y concordada / Mauricio Esteban Pinto, Gladys Eugenia Rogero, Mónica Marcela Andino; 1ª ed. Mendoza: Irrigación Edita, 2006.

Ley 6044/93 “Ley de Reordenamiento Institucional. Sector Agua Potable y Cloacas”

Revista del Centro de Ingenieros de Mendoza “Áreas de Cultivos Restringidos Especiales-Ing. León Kotlik”, 2004.

Boletín Oficial de la Provincia de Mendoza del 2 de Noviembre de 2001.

CASO 15

Proyecto Varamin: un caso exitoso de reutilización de aguas residuales en Irán (Irán)

Mohammad Javad Monem¹

Resumen

Los limitados recursos hídricos, las crecientes necesidades en torno al agua y la competencia por el consumo de los recursos hídricos en diferentes sectores se han transformado en grandes desafíos. Se han realizado distintos esfuerzos para encontrar nuevas fuentes de agua. El crecimiento demográfico y la urbanización han generado un volumen mayor de aguas residuales, que se podría considerar como una nueva fuente de agua. Esta fuente es importante para la producción agrícola, que es el sector que más agua consume. En la antigüedad, el agua residual se utilizaba, sobre todo, para incrementar la fertilidad de la tierra. Hoy en día, la principal motivación de la reutilización de las aguas residuales es la escasez de agua. La reutilización en la agricultura engloba distintos aspectos en cuanto a la cantidad y la calidad de las aguas residuales. Se debería investigar con detenimiento el impacto de la reutilización de las aguas residuales en la salud, el medio ambiente, el suelo, los cultivos y otros recursos de aguas subterráneas y superficiales.

Es preciso tener en cuenta las actividades específicas de control, y se deben implementar normas estrictas que rijan la reutilización de las aguas residuales. Las evaluaciones económicas, sociales y agrícolas constituyen aspectos importantes y son fundamentales

¹ Mohammad Javad Monem ✉
Profesor adjunto, Universidad Tarbiat Medares, Teherán, Irán
Correo electrónico: monem_mj@modares.ac.ir

En: Hiroshan Hettiarachchi and Reza Ardakanian (eds). *Uso seguro de las aguas residuales en la agricultura: ejemplos de buenas prácticas* ©UNU-FLORES 2016

para las investigaciones. Irán es un país donde el agua es escasa, la urbanización se extiende y la población crece, por lo tanto, el país planifica reutilizar más aguas residuales en la agricultura. El proyecto de riego Varamin es un magnífico ejemplo de dicho plan. El primer sistema de reutilización de aguas residuales se estableció en 1988. Debido al empeoramiento de la situación en lo relativo a la escasez de agua, se puso en marcha un plan de desarrollo para aumentar la capacidad de reutilización de las aguas residuales que se terminará con la colaboración del sector privado. En la actualidad, se utilizan 120 millones de m³ de aguas residuales en la red de riego Varamin, que se incrementarán hasta llegar a los 280 millones de m³ tras la conclusión del plan de desarrollo.

Palabras clave: aguas residuales, riego, riesgos para la salud, eficacia en el uso del agua, sector privado

1. Antecedentes

El crecimiento demográfico, la mejora en los niveles de vida y bienestar, y el cambio climático han llevado a que haya menos agua por persona en todo el mundo. Irán se sitúa en una región árida, y la crisis hídrica es una amenaza cada vez más presente en la zona, que ya ha pasado el límite de estrés por déficit hídrico. El sector agrícola, entre otros, es el principal consumidor de agua. Alrededor del 70 % del agua dulce accesible del mundo se utiliza en las actividades agrícolas, pero en Irán esta cifra es del 92 %.

Se puede aumentar el volumen de agua dulce si se mejora la eficacia en el uso del agua, se amplían las capacidades de almacenamiento, se aplican métodos modernos de captación del agua, se tratan las aguas residuales y el agua.

Aunque la cantidad de agua y aguas residuales tratadas en comparación con las necesidades hídricas totales en la agricultura es baja, aún podría utilizarse como reemplazo del agua de calidad y permitir que el agua de calidad se destine a fines más importantes, como agua potable.

La urbanización se expande en todo el mundo, y el volumen de aguas residuales que se produce aumenta cada día. Debido al bajo nivel de concientización sobre los beneficios del tratamiento

de aguas residuales, este tipo de agua no se considera una fuente importante cuando se planifican los recursos hídricos. Los limitados recursos hídricos, el incremento en el volumen de producción de aguas residuales y una mayor concientización sobre el tema han atraído la atención de los grupos de interés del agua a fin de que el agua residual se utilice con prudencia. En los países desarrollados, la reutilización de las aguas residuales tratadas se realiza en conformidad con las normas ambientales. El objetivo principal de esta legislación es proteger la salud humana, preservar el medio ambiente y evitar la contaminación del suelo y el agua. Sin embargo, en los países en desarrollo, además de las aguas residuales tratadas, también se utilizan las aguas residuales crudas para la producción agrícola. En los países en desarrollo no se dispone de planes y estrategias adecuadas, ni de instrucciones específicas sobre el uso de las aguas residuales, lo que, como consecuencia, incrementa los riesgos ambientales y para la salud, así como la contaminación del agua y el suelo.

2. Efectos de utilizar aguas residuales para riego

En diversos estudios se ha demostrado que el uso constante de aguas residuales urbanas además de favorecer el crecimiento de la vegetación, evita la contaminación ambiental y, por otro lado, reduce los costos relativos al uso de fertilizantes debido a su alto contenido de nutrientes. Los investigadores sugieren que la reutilización de las aguas residuales en cantidades adecuadas mejora la condición física del suelo, a la vez que aporta una proporción considerable de fertilizantes indispensables. Sin embargo, la aplicación excesiva de aguas residuales es perjudicial para los cultivos y disminuye el rendimiento y la calidad de los cultivos.

La utilización adecuada de las aguas residuales municipales reduce la contaminación de las aguas superficiales y protege los recursos hídricos. Los efluentes se encuentran cerca de centros urbanos y ofrecen el potencial de aumentar la producción agrícola en torno a las ciudades, que representan un mercado prometedor para los agricultores.

Se deben analizar con detenimiento los impactos de la reutilización de aguas residuales para la agricultura en la salud, el suelo y los cultivos. La acumulación de sustancias de alta toxicidad en el suelo, las plantas y los animales, y su ingreso en la cadena alimentaria

humana son cuestiones importantes para la salud humana, por lo que se deben tener en cuenta. Cuando se reutilizan las aguas residuales, además de los productos químicos, también se debe considerar la transmisión de agentes infecciosos, como bacterias, parásitos (protozoos y lombrices) y virus.

El impacto de las aguas residuales en la calidad del suelo en las zonas áridas, con temperaturas altas, humedad baja y evaporación elevada es de particular importancia. Las propiedades físicas y mecánicas del suelo, como la resistencia, la porosidad, la estructura y la conductividad hidráulica, son sensibles al intercambio iónico. Una preocupación importante en el uso de las aguas residuales tratadas para regar cultivos es la presencia de compuestos peligrosos en concentraciones elevadas, como varios materiales excepcionales y sostenibles, composiciones orgánicas y complejas, y microcontaminantes, en el agua de riego.

La reutilización de las aguas residuales puede generar los siguientes efectos positivos y negativos: Reducir la presión que se ejerce en los recursos hídricos, bajar el costo del agua agrícola, disminuir los costos de fertilizantes, incrementar la producción agrícola, mermar la contaminación ambiental y permitir el acceso a fuentes más económicas de agua para consumo humano y saneamiento.

Los efectos secundarios ambientales de reutilizar aguas residuales incluyen: desequilibrio entre la oferta de aguas residuales y la demanda agrícola, que puede dañar el medio ambiente al verter el agua residual que no se utilice en la naturaleza, mayor riesgo de algunas sustancias tóxicas y nocivas, y efectos adversos sociales y psicológicos de la reutilización de las aguas residuales para la producción de cultivos agrícolas.

3. Control

El control de los diversos parámetros de calidad del agua es esencial para el uso seguro de las aguas residuales en la agricultura. Es fundamental que se realice el control anual de los parámetros químicos y biológicos, tanto antes como después del riego. Es posible que se produzcan cambios vinculados con las fuentes de aguas residuales, los procesos de tratamiento, las variaciones de población y las modificaciones en las capacidades industriales, por lo que se deben ajustar los métodos de control según corresponda. El control debe

englobar a todos los procesos e instalaciones, a saber: tratamiento de las instalaciones de la planta, sistemas de transmisión y distribución, aguas superficiales y subterráneas, suelo, plantas y el estado de salud de los trabajadores, los agricultores y el público de acuerdo con las normas aceptables en su totalidad.

4. Introducción al Proyecto de Irrigación de Varamin

En 1971, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) emprendió los estudios de viabilidad del proyecto de riego Varamin en 50.000 hectáreas de tierra. La compañía Mahab Ghodss Consulting Engineers Co. realizó otros estudios complementarios entre 1971 y 1973. La obra se empezó a ejecutar en 1975 y finalizó en 1988, y posteriormente las redes comenzaron a funcionar. En la figura 1 se muestra la ubicación del proyecto (Tehran Sewerage Company, 2012).



Figura 1: Ubicación de la planicie de Varamin y el canal de Teherán (Tehran Regional Water Company, 2012)

La red Varamin consta de 82 km de canales principales y secundarios, y 384 km de canales distributivos (figura 2). Las necesidades hídricas anuales totales de la red de riego Varamin son de unos 600 millones de m³, que supuestamente debían ser cubiertas por la presa Lar en el río Jajroo y aguas subterráneas. Debido a la expansión de la ciudad capital y al incremento de las necesidades hídricas domésticas, una parte del embalse Lar se cedió a Teherán, que desde un principio debía sustituirse por las aguas residuales tratadas de la planta de tratamiento del sur de Teherán.

Las zonas agrícolas al sur de Teherán están ubicadas cerca del mercado de consumidores más grande de productos agrícolas. Esto ayuda a los agricultores a producir cultivos más rentables (vegetales). La planicie de Varamin es uno de los principales centros de producción de vegetales.

Una cantidad importante de tierra donde se cultivan vegetales se riega directamente con aguas residuales. El método que más se utiliza para regar los vegetales es el riego por inundación, y el agua entra en contacto directo con las plantas y, en algunos casos, se sumerge toda la planta.

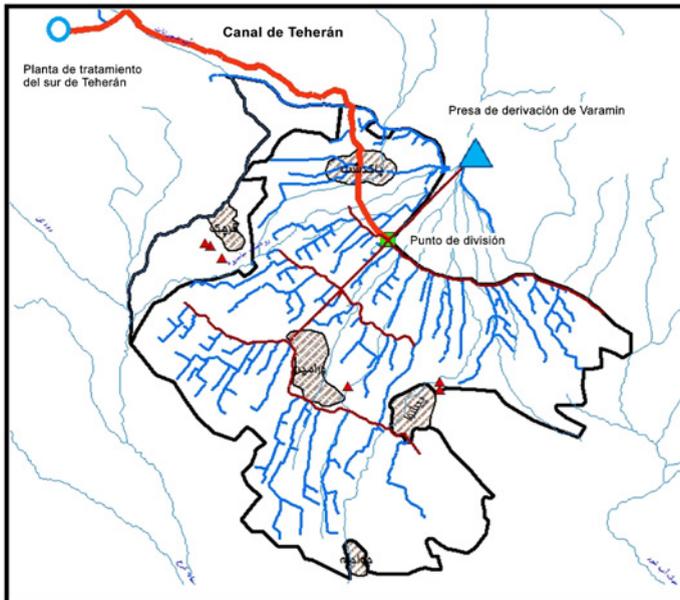


Figura 2: Planta de tratamiento del sur de Teherán, canal de Teherán, red de riego Varamin (Yekom Consulting Engineering, 2007)

Debido a la presencia de productos químicos y varios agentes microbianos en las aguas residuales, es muy probable que se produzca el ingreso de elementos perjudiciales en los tejidos de las plantas y de microbios transmitidos por el producto. Dado que, en muchos casos, los vegetales se lavan solo con agua, no se desinfectan, y se consumen crudos, los riesgos potenciales para la salud pública son altos.

Uno de los componentes más importante del diseño de la red de riego Varamin es el canal de Teherán que tiene una longitud de 36 km, y una capacidad según diseño de 8 m³/s (véase la figura 3) (Yekom Consulting Engineering, 2007). El canal se construyó con el objetivo de suministrar 200 millones de m³ por año de aguas residuales tratadas provenientes de la planta de tratamiento del sur de Teherán, 50 millones de m³ se destinarían a la recarga artificial de las aguas subterráneas y 150 millones de m³, a la agricultura. Por lo tanto, entre el 25 y el 30 % de las necesidades hídricas, según el proyecto, debían cubrirse mediante el reciclado de aguas residuales.



Figura 3: Canal de Teherán después de la planta de tratamiento del sur de Teherán (Yekom Consulting Engineering, 2007)

Debido a la falta de un sistema de recolección de aguas residuales en Teherán y a un retraso en la conclusión de la planta de tratamiento del sur, no se alcanzó el objetivo propuesto en el diseño. Por consiguiente, el consumo de agua subterránea se incrementó de manera significativa y la capa freática disminuyó por debajo del límite permisible en la planicie de Varamin y ha alcanzado el límite crítico. De acuerdo con los últimos estudios, el nivel promedio anual de aguas subterráneas decayó en la planicie de Varamin, en una superficie de 1112 ha, ha llegado a 1,47 m, y la merma anual de la reserva de aguas subterráneas es de 49 millones de m³. El canal Afsarieh de 10 km de longitud y una capacidad de 4 m³/s se construyó para transportar las aguas residuales del este de Teherán a la planicie de Varamin. El canal de Teherán atraviesa unos 4 km de zonas residenciales. Por cuestiones ambientales, sociales, sanitarias y de seguridad, esta parte del canal se construyó como un cajón de hormigón. En la figura 4 se muestra el punto de división de la red de riego Varamin.



Figura 4: Punto de división de la red Varamin (Tehran Sewerage Company, 2012)

Después de 25 años de la construcción del canal de Teherán, la zona rural en torno al canal se ha expandido, lo que ha obligado a establecer distintos límites y realizar modificaciones en el canal (figura 5). Aunque la capacidad inicial del canal de Teherán era de 8 m³/s, debido a las modificaciones y a la falta del mantenimiento adecuado, la capacidad actual es mucho menor que dicho volumen.



Figura 5: Canal de Teherán atravesando una zona residencial (Tehran Sewerage Company, 2012)

5. Plan de desarrollo

La capacidad operativa del canal de Teherán en los últimos años fue de 4 m³/s, y ha transportado alrededor de 120 millones de m³ de efluentes desde la planta de tratamiento hasta la planicie de Varamin. Con la conclusión de 6 unidades de la planta de tratamiento del sur a partir del 2010, y la finalización de 8 unidades en un futuro inmediato, el efluente anual de la planta de tratamiento alcanzará los 280 millones de m³ a una velocidad máxima de 13 m³/s. A fin de incrementar la capacidad de utilización de los efluentes de la planta de tratamiento, se propuso un plan de desarrollo integral, y se han realizado estudios exhaustivos sobre los aspectos agrícolas, sociales, ambientales, técnicos y económicos.

El principal componente del plan de desarrollo es la construcción de una tubería para transportar las aguas residuales tratadas desde la

planta de tratamiento de aguas del sur de Teherán hasta la planicie de Varamin. Esta tubería, que se extenderá junto al canal de Teherán, se conectará con el punto de vertido de efluentes de la planta de tratamiento de aguas residuales del sur en Shahre Rey y continuará su recorrido hasta Varamin. La longitud total de la tubería será de 36 km.

Al implementar este proyecto, se transportarán 9 m³/s complementarios de aguas residuales a las planicies de Varamin, Pakdasht y Shahre Rey. El caudal máximo de efluentes de la planta será de 13 m³/s, de los cuales 4 m³/s, actualmente, se transportan a la planicie de Varamin por el canal de Teherán existente. Este sistema transportará un volumen anual de 280 millones de m³ de aguas residuales de la planta de tratamiento del sur a dichas planicies, que se utilizarán para el riego agrícola (230 millones de m³) y la recarga artificial de las aguas subterráneas (50 millones de m³). El sistema tendrá una toma en el punto de salida de la planta de tratamiento de aguas residuales y una tubería de plástico reforzado con fibra de vidrio (3 m de diámetro por 36 km de longitud), que se extenderá a lo largo del presente canal de Teherán. La profundidad de la zanja será entre 5 y 7 metros. La regulación de las fluctuaciones del agua residual durante las 24 horas se realizará mediante tres piletas al final de la línea con una capacidad total de 120 mil m³.

6. Mecanismos de financiación del proyecto

El costo estimado del proyecto es de 1600 mil millones de riales. La financiación del proyecto estará en manos de un agente del sector privado. El acuerdo de construcción-explotación-traspaso (CET) y la compra garantizada de efluentes al sector privado durante un período de 15 años estuvieron incluidos en la agenda de la Tehran Regional Water Company. Se anunciaron los llamados públicos a licitación en los periódicos, y se recibieron 21 documentos de la licitación de inversionistas privados previos a la calificación.

Se decidió atraer iniciativas del sector privado al ofrecer al inversionista la posesión de hasta 30 millones de m³ de aguas residuales por año. Asimismo, el Gobierno propuso al inversionista la compra anticipada de efluentes durante un período transitorio de un año. Además el sector privado exige garantías por el reembolso de la inversión por parte del Banco Central de Irán y una seguridad en el precio del agua.

7. Conclusión

La creciente demanda de agua y la elevada competencia por el uso del agua en distintos sectores han despertado la necesidad de buscar nuevos recursos hídricos. El crecimiento demográfico y el aumento de la urbanización han impulsado una mayor producción de aguas residuales. El agua residual se considera un nuevo recurso hídrico, especialmente, para el uso agrícola. Se deben tener en cuenta varias consideraciones importantes sobre las cuestiones ambientales, sanitarias, sociales y económicas para el uso prudente de las aguas residuales en la agricultura. Se deben redactar e implementar normas estrictas sobre el control, el diseño, la ejecución y el funcionamiento de todo el proceso. El plan de desarrollo para la reutilización de las aguas residuales en la red de riego Varamin en Irán es un buen ejemplo de dicho proyecto. El uso de la capacidad del sector privado para la inversión en el proyecto, junto con el suministro de los incentivos y las garantías requeridos, fue un método satisfactorio en el caso de la red de riego Varamin.

Referencias

California State Water Resources Control Board, 2990, Department of Land, Air and Water Resources. (1985). *Irrigation with Reclaimed Municipal Wastewater: A Guidance Manual*. G. Stuart Pettygrove y Takashi Asano (Eds.) Davis, California: Lewis Publishers, Inc.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (1992). *Wastewater treatment and use in agriculture*. Publicación N.º 24. Roma: FAO.

Vicepresidente de control de la planificación y orientación. (2009). *Pautas para los estudios de planes para la reutilización de las aguas residuales tratadas rurales y urbanas (en persa)*. Publicación N.º 434.

Tehran Regional Water Company. (2012). *Pipeline from Tehran wastewater treatment plant to Varamin plain*. Folleto del proyecto.

Tehran Sewerage Company. (2012). *Description of Tehran metropolitan sewerage Project*.

Organización Mundial de la Salud (OMS) de las Naciones Unidas. (1989). *Health guidelines for the use of wastewater in agriculture and aquaculture*. Report of a WHO scientific group, *Technical Report, Series 77*. Ginebra, Suiza.

Yekom Consulting Engineering. (2007). Plan de desarrollo del uso de agua salina, salobre e inusual en cuencas hidrográficas del país (en persa). Informe N.º 6, Estrategias y políticas adecuadas para el uso del agua salina, salobre e inusual.

CASO 16

Comité de certificación de riego con aguas residuales tratadas en México (México)

Carlos Antonio Paillés Bouchez¹

Resumen

La instalación de plantas de tratamiento de aguas residuales para el riego agrícola en México y América Latina ha cambiado bastante, desde sus inicios en Belem, Brasil, en 1999. La implementación de más de 30 plantas como proyectos piloto en los estados de Oaxaca, Puebla e Hidalgo, con parcelas de riego de demostración, no ha sido suficiente para que las organizaciones agrícolas y del agua locales reproduzcan el modelo propuesto. La Cultura del Agua en nuestro país no incluye la importancia del tratamiento de las aguas residuales. Hasta 1950, se trataba menos del 10 % de las aguas residuales. Hasta el 2000, este porcentaje no llegaba al 25 %. El concepto de la reutilización de esta agua es extremadamente limitado, incluso, en los ámbitos de las facultades de ingeniería, agricultura y economía. En las comunidades donde se implementaron los proyectos piloto, menos del 1 % de las personas, incluidos los docentes y funcionarios del gobierno, conocían las guías sobre el Uso Seguro de las Aguas Residuales en la Agricultura (SUWA, por sus siglas en inglés). Al mismo tiempo, miles de hectáreas se regaban con aguas residuales sin tratar, donde había algún tipo de participación de los gobiernos nacionales y locales. La prohibición en sí nunca ha funcionado en el mundo. En los últimos 15 años, la Certificación

¹ Carlos Antonio Paillés Bouchez ✉

Fideicomiso de Infraestructura Ambiental de los Valles de Hidalgo, Hidalgo, México
Correo electrónico: fiavhi@hotmail.com

En: Hiroshan Hettiarachchi and Reza Ardakanian (eds). *Uso seguro de las aguas residuales en la agricultura: ejemplos de buenas prácticas* ©UNU-FLORES 2016

de Competencias en México ha sido aceptada por los trabajadores, los agricultores, las empresas, las organizaciones sindicales y los organismos gubernamentales como un buen instrumento para calificar a las personas encargadas de actividades específicas. El Comité de Gestión por Competencias de Riegos Agrícolas Tecnificados con Aguas Residuales Tratadas en México intenta impulsar la aceptación de los objetivos de las guías SUWA todos los días y en cada una de las personas.

Palabras clave: desarrollo de capacidades, riego agrícola, salud ambiental, seguridad alimentaria

1. Introducción

México posee la mayor superficie agrícola regada con aguas residuales sin tratar del mundo (90.000 hectáreas en un solo sistema de riego) (CONAGUA, 2015).

La construcción en 1900 de un túnel de 32 km de longitud y 6 m de diámetro para captar el agua de lluvia y las aguas residuales de la Ciudad de México fue un logro de la ingeniería civil en esa época, donde no se ha contemplado ningún tipo de prevención sanitaria, agrícola, ambiental ni en materia de salud en los 100 años posteriores, especialmente, en la cuenca del río Tula, donde se vertía el agua. Dos sequías consecutivas en 1976 y 1977 hicieron que el Gobierno mexicano autorizara de manera temporal la utilización de esta agua en el sistema de riego del valle del Mezquital. Este acuerdo temporal se ha prolongado hasta el presente.

En agosto de 1999, dos organismos de las Naciones Unidas, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), con la estrecha participación de la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), el Banco Mundial y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), invitaron a las organizaciones del agua del continente a que presenten alternativas para el tratamiento del agua sobre la base de las Guías para el Uso Seguro de las Aguas Residuales en la Agricultura (SUWA, por sus siglas en inglés) en poblaciones rurales, durante un taller realizado en Belem, Brasil. La propuesta mexicana, que presentó uno de los fideicomisos de infraestructura ambiental, fue

respaldada por el BID en el 2000 y se incluyó en el nuevo Programa para la Construcción y Rehabilitación de Sistemas de Agua Potable y Saneamiento en Zonas Rurales (PROSSAPyS) (CONAGUA, 2001).

La implementación de 20 proyectos piloto en los estados de Oaxaca y Puebla permitió demostrar las capacidades y limitaciones de este tipo de solución. Existen seis plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en las poblaciones rurales de Ixtlán y Capulálpam, en la Sierra Norte de Oaxaca, que los mismos agricultores se han encargado de que funcionen sin cesar desde el 2003, y que constituyen ejemplos concretos de estas opciones. Los altercados políticos entre el 2006 y el 2007 en Oaxaca interrumpieron esta tendencia positiva. En el 2008, el Gobierno Federal (CONAGUA) tomó la decisión de construir una gigantesca PTAR en Atotonilco para tratar las aguas residuales provenientes del valle de México (35.000 l/s, la más grande del mundo). En el mismo año, CONAGUA y el Estado de Hidalgo firmaron un Acuerdo Marco con el Fideicomiso de Infraestructura Ambiental de los Valles de Hidalgo para establecer diez o más proyectos piloto de PTAR sobre la base de las guías SUWA y preparar a las comunidades locales para esta nueva opción de aguas tratadas para la agricultura.

Dentro de los distintos puntos operativos que se desarrollarían en estos proyectos pilotos, fue preciso prestarle atención especial a un recurso importante: la *construcción de capacidades* y la *certificación de competencias* para la gestión correcta y adecuada de las aguas residuales tratadas para el riego agrícola. Llevó 2 años desarrollar y completar el proceso para la constitución del Comité de Gestión por Competencias de Riegos Agrícolas Tecnificados con Aguas Residuales Tratadas, que incluyó la publicación en el periódico oficial (Diario Oficial de la Federación, 2015). Mediante el presente caso, se intenta compartir nuestros puntos de vista y las experiencias que acumulamos durante el establecimiento del proceso.

2. 2. Hechos históricos importantes

1800 (primera década): la población de los Estados Unidos creció de 5 millones a 75 millones. Principales desarrollos: sistemas de captación. Objetivo principal: prevención de enfermedades. *El tratamiento, en su mayoría, consistía en la dilución en las aguas receptoras.*

1887: se instaló el primer tratamiento biológico, un filtro intermitente de arena, en Medford, Massachusetts.

1899: se creó la primera ley federal de uso indebido de aguas residuales, ríos y puertos ("Ley de Desechos") que prohibía el vertido de sólidos en aguas de navegación sin el permiso del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos de América.

1900 (principios de la primera década): los efluentes de 1 millón de personas se trataban en 60 plantas de tratamiento de aguas residuales donde se extraían los sólidos flotantes y asentados. Tendencia: crecimiento de la población y construcción de alcantarillados.

1900 a década del 1930: los alcantarillados se extendieron a la misma velocidad que la población total. Tendencia: desarrollo de tratamiento secundario (biológico).

1909: primer tanque Imhoff (decantación de sólidos) (Cooper, 2003).

1914: primer proceso de cloración de líquidos para la desinfección de efluentes.

1916: primera planta de lodos activados, San Marcos, Texas.

1920 a década del 1940: el tratamiento de las aguas residuales se vinculó con la importancia del oxígeno disuelto para la vida acuática, las propiedades estéticas de las aguas superficiales (olor, color, sólidos), la medición de la materia orgánica en las aguas residuales como la demanda biológica de oxígeno (DBO).

El incremento en el tratamiento de las aguas residuales significó mayores residuos (lodos). Eliminación de nutrientes.

1960: logro importante. El 50 % de la población estadounidense tenía acceso a alguna forma de tratamiento de aguas residuales.

1960 al presente: la tendencia es el proceso de tratamiento que avanza hasta mejorar la calidad del agua receptora.

Remoción de nutrientes (nitrógeno y fósforo). Configuración de nuevos procesos: procesos de alta velocidad de lodos activados; oxígeno de

alta pureza, reactores de lotes secuenciales, filtros percoladores de alta velocidad y procesos híbridos de lodos activados y filtros percoladores, y biorreactores de membrana. Tendencia: reglamentación.

1972 al presente: las modificaciones de la ley federal sobre la lucha contra la contaminación de las aguas (PL 92-500, conocida como la Ley de Agua Limpia) y sig. hasta el 2002. Resumen de la Ley de Agua Limpia, Normas de Calidad del Agua para las aguas receptoras (sobre la base de los usos designados y la salud humana correspondiente y los criterios de la vida acuática). Política contra la degradación con control ambiental. Si no se cumplían las Normas de Calidad del Agua: planes (estrategias y controles) para mejorar el agua afectada mediante el enfoque de Carga Máxima Total Diaria (CMTD). Control de toxinas, lodos industriales previos al tratamiento. Disposición de biosólidos. Artículo 404 (protección de humedales). Fondos rotativos estatales.

Tendencias emergentes: *reutilización de las aguas residuales*, reglamentación local de la utilización directa como agua potable, potable indirecta en distribución separada, no potable. Recuperación energética (biocombustibles, cogeneración, fertilizante), conservación de energía (aireación, bombeo, procesamiento mecánico de sólidos, calefacción, materiales incrustados).

3. Patrones de diseño de las PTAR para riego agrícola conforme a las guías SUWA de la OMS

En las referencias históricas, se destacó el predominio de las PTAR que se caracterizaban por regresar el agua tratada a los ríos, lagos y mares. Se repitió varias veces el modelo de lodos activados, quizás en hasta dos tercios de los casos, durante todo el siglo XX y en los primeros 15 años del siglo XXI. El aspecto más importante de este modelo es *la eliminación de nutrientes* (Sanitation District of Los Angeles County, 2011). Cuando se eliminan los nutrientes, se ignora el valor más importante de las aguas residuales. Es preciso destacar que, sobre todo, utilizar las aguas tratadas en riego agrícola sin los nutrientes y con abundantes productos químicos, como el cloro, es complejo, inútil y, algunas veces, contraproducente.

Las guías actuales SUWA que publicó la OMS (2006) se basan en los seis puntos que se muestran en la figura 1:

- Reconocimiento de los valores nutricionales agrícolas de los distintos componentes de las aguas residuales domésticas.
- Conocimiento absoluto de los distintos contaminantes de las aguas residuales y los riesgos existentes en su uso.
- Profundo entendimiento del proceso de riego agrícola, desde las secuencias iniciales de las aguas residuales hasta los procesos de absorción en los diferentes cultivos, sin dejar a un lado el filtro más importante del mundo, el suelo, y todas las tecnologías de riego.
- Consideración simultánea de los diferentes peligros para la salud (humanos, vegetales, animales, ambientales, etc.).
- Uso adecuado del proceso de gestión de riesgos.
- Condiciones históricas, geográficas y sociales del uso de las aguas residuales (o la gestión).

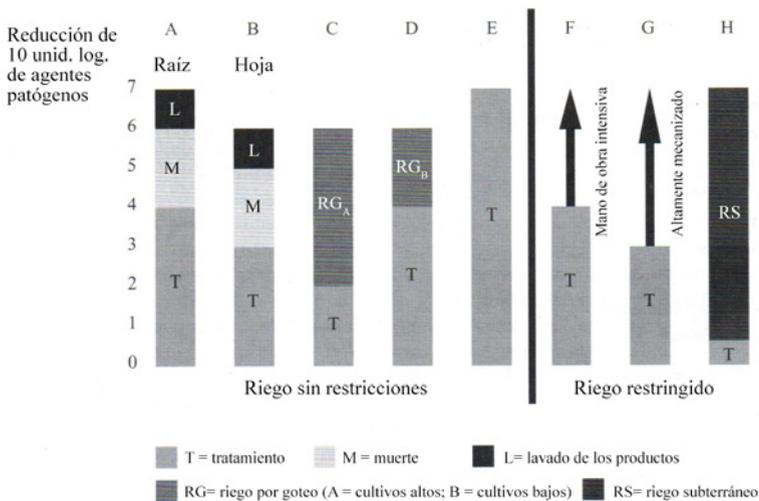


Figura 1: Ejemplos de opciones para la reducción de agentes patógenos víricos, bacterianos y protozoos, según las diferentes combinaciones de medidas de protección de la salud que logran la meta sanitaria de $\leq 10^{-6}$ AVAD por persona y año.

Entre 1999 y el 2000, en vista de estas consideraciones, el Fideicomiso de Infraestructura Ambiental realizó una revisión completa de las distintas alternativas para el tratamiento de las aguas residuales

en 12 países diferentes, con énfasis en la reutilización agrícola. Durante la revisión de los documentos de investigación de las guías SUWA de la OMS, se prestó especial atención a la diferenciación de los cultivos en relación con el riego y los procesos sistémicos. La esencia operativa de las guías se explica brevemente en los siguientes párrafos.

Existen tres tipos diferentes de cultivos, conforme a la clasificación de las guías SUWA.

- A. Árboles y arbustos grandes, que requieren *dispositivos de control* básicos para el uso correcto de las aguas residuales tratadas y la gestión adecuada.
- B. Cultivos de tallo grande, mediano y pequeño (maíz, quinua, frijoles, tomates, brócoli, etc.), que requieren procesos específicos de tratamiento biológico para que las aguas residuales alcancen un nivel de 75 a 80 %, (tratamiento secundario), riego por goteo para evitar el contacto humano con las aguas tratadas y la gestión adecuada de los cultivos

Estos representan aproximadamente el 70 % de los cultivos comestibles del mundo, como se ilustra en las figuras 2 y 3.



Figura 2: PTAR con cultivos de quinua (Acoculco, Hidalgo)



Figura 3: PTAR con cultivos de tomate (Tecamachalco, Puebla)

- C. Verduras de hojas y raíz, en las que el agua tratada entra en contacto con el producto comestible (lechuga, espinaca, zanahorias, remolachas, etc.), que requieren tratamiento terciario calificado, además del tratamiento secundario, para llegar a un nivel de 97 a 99 %.

Estas representan aproximadamente el 20% de los cultivos comestibles del mundo, como se ilustra en las figuras 4 y 5.



Figura 4: Cultivo de espinaca con cubierta protectora en el suelo



Figura 5: Verduras listas para el mercado local

Se lograron y patentaron patrones de diseño específico para los procesos B y C (secundario y terciario) que se implementaron en distintas PTAR (90 % del tipo B y 10 % del tipo C).

4. Plantas de tratamiento de aguas residuales de las guías SUWA conforme al marco estatal, federal y municipal, 2008-2013

Con la firma de un Acuerdo Marco entre la Comisión Estatal del Agua y Alcantarillado del Estado de Hidalgo y el Fideicomiso de Infraestructura Ambiental de los Valles de Hidalgo (FIAVHI), con la participación testimonial de CONAGUA, para la implementación de las 10 primeras PTAR para reutilización agrícola, se buscó un candidato importante para la implementación y evaluación del posible impacto de la iniciativa SUWA en el grupo de distritos de riego con aguas sin tratar más grande del mundo: el valle del Mezquital.

A 900 m de la PTAR más grande del mundo, Atotonilco de Tula, se instaló la cuarta de las diez PTAR, San José Acoculco, dentro de la

municipalidad de Atotonilco de Tula, junto con una organización de agricultores (Ejido Progreso), donde se realizan los procesos secundarios y terciarios, y se reciben en forma directa las aguas residuales del valle de México. El objetivo de esta planta es ofrecer a CONAGUA, el Estado de Hidalgo, las diferentes municipalidades en torno al valle y, lo que es muy importante, a la gran cantidad de usuarios agrícolas de aguas residuales sin tratar (más de 90.000), la gestión, el mantenimiento, los rendimientos de producción, los controles de saneamiento y los distintos parámetros de una PTAR real conforme a las guías SUWA, que se considerarán en la gigantesca PTAR que se está implementando.

La PTAR de San José Acoculco, un proyecto piloto, se concluyó en el 2011, trata 500.000 litros por día (5 l/s) y riega 20 ha, y desde entonces, (4 años) ha funcionado todos los días, como se muestra en la figura 6, con los siguientes resultados.



Figura 6: PTAR en San José Acoculco, Hidalgo

4.1. Niveles de tratamiento

4.1.1. Tratamiento secundario

Cinco reactores independientes, que retienen al máximo las distintas colonias bacterianas, producen aguas residuales tratadas que cumplen con la reducción de 10 unidades logarítmicas de agentes patógenos, tal como se recomienda en las guías SUWA de la OMS (ejemplos de opciones para la reducción de agentes patógenos víricos, bacterianos y protozoos gracias a las distintas combinaciones de medidas de

protección de la salud que permiten lograr la meta sanitaria de $\leq 10^{-6}$ AVAD por persona y año). En los tres tipos de reducción logarítmica de las guías de la OMS, se aplica el riego por goteo con aguas tratadas en diferentes porcentajes, según se trate de cultivos de tallo corto, mediano o largo.

En la figura 7 se muestran los niveles de reducción alcanzados en las distintas PTAR en un proceso de medición realizado por los especialistas del Centro Oriental de Ecosistemas y Biodiversidad (BIOECO), en virtud de un acuerdo con la Agencia de Medio Ambiente del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de la República de Cuba.



Figura 7: Muestras de 7 pasos en los procesos de tratamiento de las PTAR para el riego agrícola, SUWA

4.1.2. Tratamiento terciario

La combinación de los procesos de coagulación y floculación genera flóculos de materia orgánica, principalmente, constituidos por nutrientes, que se envían a 20 canales de decantación, cada uno con la válvula correcta, para los controles demostrativos y operativos (5 a 100 %) de su

eliminación. Una vez que se determina el nivel porcentual, el agua ingresa a una cámara de precipitación artificial para la oxigenación complementaria antes de pasar por los 16 filtros de silicato de aluminio, que producen un intercambio iónico para incrementar el nivel de tratamiento de manera sustancial.

Existen tres opciones para llegar al nivel 8 de reducción logarítmica de agentes patógenos (no se exige en las guías SUWA de la OMS, pero permiten asegurar que se ha alcanzado el nivel 7): carbón activado, sistema de filtros de ozono y sistema de multiválvulas esféricas de fibra de vidrio.

4.2. Resultados en la agricultura

Rendimiento de los cultivos: los cultivos regados con aguas residuales tratadas permiten alcanzar tres resultados importantes conforme a las guías de la OMS:

4.2.1. Un aumento en la productividad

El contenido medido de fertilizantes naturales en las aguas residuales correctamente tratadas, junto con el uso racional y la gestión de este tipo de agua, ha demostrado incrementos en la productividad en los siguientes niveles:

Cultivos	Promedio t/ha	SUWA	Promedio cultivos/año	SUWA
Frijoles	2	3,2	1	2
Tomate	8,9	24,5	5 cosechas	10 cosechas
Habas	2,8	4,6	1	2
Guisantes	1,8	3	1	2
Quinua	1,3	6,2	1	3

4.2.2. Un incremento importante en la calidad de los productos y los precios

Tal como se requiere en las guías de la OMS, el lavado de los productos y las buenas prácticas agrícolas inherentes a este tipo de gestión incrementan la calidad y el precio de los cultivos.

El FIAVHI denomina a este proceso el JUEGO DE AGREGAR UN CERO. Significa que el agricultor recibirá 10 veces más dinero del que solía tener al final del año, pero deberá prestar 10 veces más atención de lo que solía prestarles a sus cultivos.

4.2.3. Ahorros valiosos en la cantidad de agua utilizada

Aunque este resultado se deba, sobre todo, al sistema de riego por goteo, es válido considerarlo dentro del "paquete" de propuestas de las guías SUWA. Se producen ahorros en la cantidad de agua del 50 al 80 % en comparación con el riego por inundación tradicional. En los proyectos del FIAVHI, la regla general es regar una superficie tres veces mayor a la que se regaba con el riego por inundación.

4.3. Controles sanitarios y de saneamiento

Al trabajar en la zona más grande del mundo bajo riego constante con aguas residuales sin tratar, la introducción de aguas residuales tratadas ha demostrado que es preciso realizar controles en los siguientes ámbitos:

4.3.1. Salud humana

La seguridad alimentaria abarca actividades para garantizar la seguridad máxima posible en el proceso desde la producción de alimentos hasta el consumo ("del campo a la mesa") (European Food Information Council, 2014). Las enfermedades transmitidas por los alimentos abarcan un amplio espectro de afecciones que representan un problema creciente a nivel mundial en materia de salud pública. Un programa de seguridad alimentaria debe incluir

ingredientes alimentarios nutritivos y saludables, que no contengan peligros biológicos, químicos, ni físicos. Todas las reglamentaciones deben cubrir estos conceptos.

Los problemas más comunes de origen alimentario son (OMS, 2000):

- La propagación de riesgos microbiológicos (que incluye las bacterias, como *Salmonella* o *Escherichia coli*). Sin embargo, la intoxicación alimentaria puede suceder debido al consumo de alimentos contaminados que contienen toxinas producidas con anterioridad. No es necesario ingerir los microorganismos vivos.
- La presencia de contaminantes químicos en los alimentos. Es muy importante cumplir con las reglamentaciones que rigen las actividades industriales y agrícolas en relación con este tema.
- La evaluación de nuevas tecnologías de los alimentos. Es necesario adoptar los sistemas de vigilancia para garantizar la seguridad alimentaria en toda la cadena alimentaria.

La imagen de un usuario habitual de aguas residuales sin tratar (figura 8) en el valle del Mezquital en México vale más que mil palabras. Es importante difundir las prácticas de las guías SUWA (figura 9). Aunque el agua residual tratada ha permitido reducir los riesgos para la salud en la mayor medida posible, en las mismas guías de la OMS se aconseja que no se produzca ningún tipo de contacto entre los agricultores, los regantes y el agua.



Figura 8: Riego por inundación con aguas residuales sin tratar en el valle del Mezquital



Figura 9: Cultivo de calabazas para exportación con las prácticas de las guías SUWA. Tepetitlán, Hidalgo.

4.3.2. Salud animal

Las grandes superficies regadas con aguas residuales sin tratar y los canales que transportan esta agua hacia los campos han generado una especie de subcultura, que incluye el consumo de esta agua por parte del ganado.

Su ingestión genera debilidad y enfermedades en los rebaños. Lamentablemente, la mayoría de los animales se crían para el consumo de carne, y se transfiere la contaminación a los consumidores humanos, con consecuencias muy poco saludables.

4.3.3. Salud ambiental

El daño en la salud ambiental debería de ser muy alto sin la existencia del extraordinario sistema de filtración del suelo. Por ejemplo, muchas familias de gusanos, cuyos huevos están en las aguas residuales sin

tratar, encuentran un lugar propicio para vivir en el suelo donde son depositados sin interferir con la salud ambiental (Siebe, 1998).

Sin embargo, la presencia de grandes cantidades de aguas residuales sin tratar durante 2 a 3 semanas en los "campos regados" y sus canales produce la propagación masiva de contaminantes (líquidos, aéreos, sólidos, etc.), que generan un ambiente de baja calidad.

4.4. Mantenimiento y gestión de la PTAR

Dos de los requisitos básicos establecidos como parte del proceso para el diseño adecuado de las PTAR para reutilización agrícola fueron:

4.4.1. Una manera simplificada y fácil de mantener la PTAR

La sofisticación de la mayoría de las PTAR tradicionales (sobre todo, todos activados) requiere de personal muy calificado para su mantenimiento, lo que da paso a interrupciones en el funcionamiento si los técnicos correspondientes no están presentes. El tratamiento secundario de las PTAR del FIAVHI se puede realizar en 30 minutos al día y puede estar a cargo de cualquier persona que reciba una capacitación de 2 semanas. El tratamiento terciario requiere un ciclo combinado de mantenimiento y funcionamiento, y puede realizarlo una persona con 8 semanas de capacitación.

4.4.2. Una gestión sostenible de la PTAR

Para la gestión sostenible de la PTAR con un funcionamiento apropiado y económico, dos componentes humanos importantes deben estar presentes en la PTAR para el riego agrícola:

A: usuarios del proceso de saneamiento.

B: usuarios del riego agrícola.

Ambas partes tienen un interés específico en el funcionamiento correcto de la PTAR. En pueblos pequeños (el programa está destinado

a poblados con menos de 2500 habitantes), la mayoría de las personas del grupo A están dentro del grupo B y viceversa. En todos los casos de implementación satisfactoria, el comité de la PTAR se compone de personas del grupo B. Su interés en obtener agua de riego de mejor calidad es la base para la buena gestión. El valor del agua tratada, convertido en productos agrícolas, necesariamente otorga un valor de retorno para cubrir los gastos operativos de la PTAR. El Banco Interamericano de Desarrollo, uno de los patrocinadores económicos de este programa, ha respaldado con vehemencia esta opción operativa.

4.5. Desarrollo de capacidades y extensión del riego agrícola

En cada actividad humana de la historia, se ha necesitado de la transmisión de habilidades de una persona a otra, de una entidad social a otra, etc. No obstante, los actores agrícolas y las comunidades rurales, que son responsables de la producción agrícola actual, han sido reacios al cambio. El sistema de extensión agrícola ha sido una de las herramientas más valiosas en la introducción y mantenimiento del uso correcto de las aguas residuales tratadas en la agricultura.

4.5.1. Aceptación por parte de los usuarios potenciales

Si se analizan los beneficios descritos arriba, lo lógico sería esperar que los usuarios potenciales, es decir, los actores agrícolas, acepten esta opción de riego.

En cada una de las PTAR implementadas por el FIAVHI, hubo grupos medianos y pequeños interesados en las ventajas expuestas, que aceptaban las limitaciones y obligaciones necesarias para el funcionamiento adecuado de este tipo de riego.

4.5.2. Controles y reglamentaciones locales

No existen reglamentaciones específicas en México sobre el uso de las aguas residuales en la agricultura, ya sean tratadas o sin tratar. En estrecha colaboración con las universidades, el FIAVHI ha elaborado las propuestas

iniciales para llegar al primer nivel de reglamentaciones federales en lo que respecta a las guías SUWA. Para bien o para mal, todas las reglamentaciones del agua en México son federales. Los estados tienen algún tipo de responsabilidad proveniente de delegaciones hechas por el gobierno federal. Las municipalidades tienen cierta capacidad legal que versa sobre la distribución y el funcionamiento del agua municipal y los sistemas de saneamiento.

En esta búsqueda de los medios y las maneras de lograr contar con las normas y los controles, la Universidad Tecnológica de Tula-Tepeji (UTTT), que es una entidad de certificación de competencias, que ofrece distintos programas para el desarrollo de capacidades, invitó al FIAVHI a crear la Certificación de Competencias en el Uso Seguro de Aguas Residuales Tratadas en Riego.

La idea principal de la UTTT y el FIAVHI era participar en una nueva manera de reconocer las capacidades y competencias de las personas involucradas en el riego con aguas residuales, desde los agricultores locales hasta los funcionarios del gobierno, pasando por los técnicos, ingenieros, vendedores, docentes, etc., para establecer reglas específicas dentro del círculo de influencia del gobierno federal.

5. La Certificación de Competencias en el Uso Seguro de Aguas Residuales Tratadas en Riego (CGC)

¿Qué es el CGC?

El Comité de Gestión por Competencias (CGC) es un grupo de personas, empresas u organizaciones, que representan a los sectores productivos, sociales o gubernamentales que, debido al número de trabajadores y la participación en el mercado laboral, así como el reconocimiento nacional en el sector, actúa como órgano responsable de la promoción del concepto de gestión por competencias en las organizaciones que representan a cada sector.

Objetivos del CGC:

- Promover el desarrollo y la implementación del Sistema Nacional de Competencias en su sector.
- Definir la agenda de capital humano para la competitividad en su sector.

- Desarrollar y actualizar Estándares de Competencia (EC), crear instrumentos de evaluación de competencias y mecanismos de consecuencias que incentiven la certificación de los trabajadores en el sector.
- Dar seguimiento e impulsar la excelencia en la implementación de las soluciones de Evaluación y Certificación en su sector (CONOCER, 2008).

En la figura 10 siguiente se ilustra el modelo operativo del Comité de Gestión por Competencias (CGC).

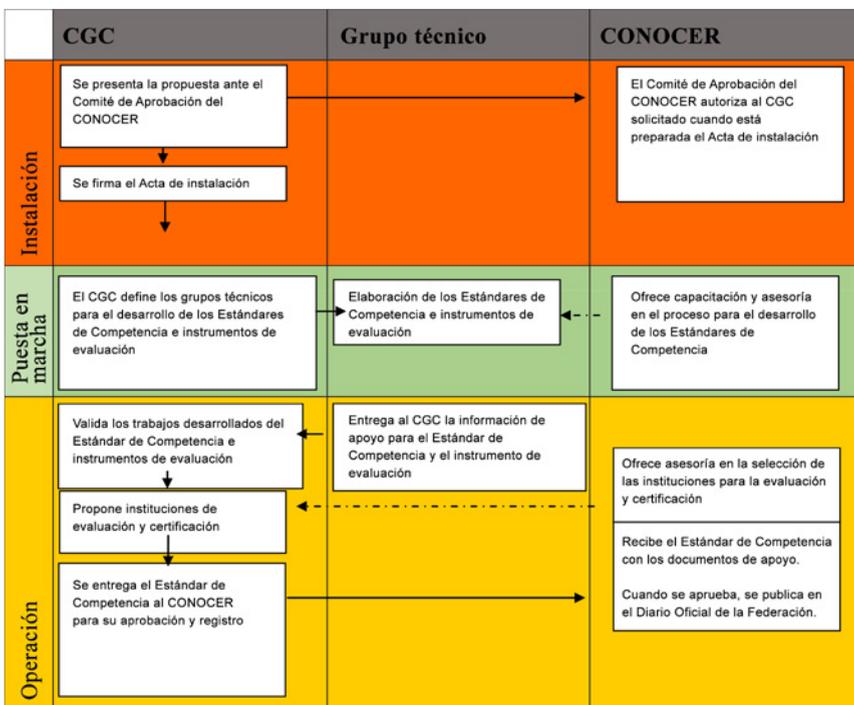


Figura 10: Modelo operativo del CGC

Los Comités de Gestión por Competencias se pueden integrar a petición de asociaciones, cámaras y confederaciones empresariales, empresas, organizaciones sindicales, instituciones sociales y entidades de los diversos niveles de gobierno interesadas en adherirse al Sistema Nacional de Competencias, así como en certificar las competencias de

sus trabajadores, con la posibilidad de que existan uno o más comités por cada sector de actividad económica, social o de gobierno. Los comités deben reunir tres criterios de integración:

- Alcance
- Representatividad
- Alto nivel de interlocución

Las instituciones participantes son las siguientes:

- UTTT (Universidad Tecnológica de Tula-Tepeji)
- FIAVHI (Fideicomiso de Infraestructura Ambiental de los Valles de Hidalgo)
- CONAGUA (Gestión de los distritos de riego. Rama de la infraestructura hidroagrícola)
- SAGARPA (Dirección General de Desarrollo de Capacidades y Extensionismo Rural)
- UNAM (Departamento de Edafología. Instituto de Geología)
- Ejido Progreso, Atotonilco de Tula

Lo que estas organizaciones buscan es la especialización en el uso seguro de las aguas residuales tratadas en la agricultura.

En la actualidad, otras siete instituciones están ofreciendo la certificación a través de los Estándares de Competencia (EC).

- Entidad de evaluación y certificación de la Universidad Autónoma Chapingo (Texcoco, Estado de México)
- Entidad de evaluación y certificación de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (Saltillo, Coahuila)
- Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario N.º 109 (CBTA 109 Capulálpam de Méndez, Oaxaca)
- Universidad Tecnológica de Tecamachalco (Puebla)
- Universidad Tecnológica Francisco I. Madero (Tepatepec, Hidalgo)
- Entidad de evaluación y certificación de la Universidad Tecnológica del Valle del Mezquital (Ixmiquilpan, Hidalgo)
- Entidad de evaluación y certificación de la Universidad Tecnológica de Tula-Tepeji (Tula de Allende, Hidalgo)

La población aproximada que desempeña tareas en temas relativos a la tierra agrícola regada con aguas residuales tratadas es de 90.000

personas; es posible que alrededor de 4470 de estas personas obtengan la certificación en el transcurso de 10 años. Existen 90.000 usuarios de agua registrados en organizaciones que tienen acuerdos con derechos a utilizar el agua con CONAGUA.

Estándares de Competencia (EC) que se están desarrollando:

- "Implementación de las reglamentaciones, el análisis y la evaluación de los procesos de tratamiento para la reutilización agrícola de las aguas residuales".
- EC0628 "Operación de PTAR para riegos agrícolas" (desarrollado, aprobado y publicado)
- "Control de los sistemas de riego con aguas residuales tratadas".

Con la ejecución del primer Estándar de Competencia (EC), se ha puesto en marcha el proceso de certificación (figura 11), mientras que se está trabajando en otros dos, y se espera contar con los primeros candidatos certificados en el segundo semestre del 2016, lo que representa un paso importante en México para la mejora de las prácticas SUWA.



Figura 11: Certificación de candidatos durante los exámenes de campo en la PTAR en Acoaculco, conforme a las guías SUWA

6. Resumen, conclusiones y lecciones aprendidas

- Las guías SUWA han demostrado su gran importancia para la situación actual y futura del agua, los alimentos y el medio ambiente en el plano mundial y de cada país.
- La resistencia al cambio se produce ante todas las propuestas de las guías SUWA. Los subsidios del agua y agrícolas son obstáculos que impiden apreciar el valor de las aguas tratadas.
- Los proyectos piloto de demostración y las actividades de desarrollo de capacidades son el camino que conduce hacia la difusión de las prácticas de las guías SUWA.
- La Certificación de Capacidades y Competencias de Riego con Aguas Tratadas es un instrumento necesario para mejorar la aceptación de las prácticas de las guías SUWA.
- La creación de los procesos de certificación y desarrollo de capacidades a nivel regional y local a través de las siete instituciones autorizadas en todo el país son los pasos inmediatos para que las personas calificadas en el riego con aguas residuales tratadas tengan el respaldo técnico y legal, sobre la base de las guías de la OMS.
- La planificación de talleres regionales sobre las prácticas de las guías SUWA en las universidades, los sindicatos agrícolas y las organizaciones de la sociedad civil es una iniciativa importante para acompañar este proceso.
- La organización de talleres internacionales sobre las PTAR de las guías SUWA, que se han implementado de manera satisfactoria en los estados de Hidalgo y Oaxaca, permitirá el intercambio de experiencias valiosas y el registro de las observaciones correctas por parte de los organismos de la ONU (PNUMA, FAO, OMS, UNU, etc.) y ofrecerá la oportunidad de avanzar en el uso seguro de las aguas residuales tratadas en la agricultura.

Referencias

CONAGUA. (2001). Inodoros para uso sanitario-Especificaciones y métodos de prueba

CONAGUA. (2015). Estadísticas del Agua en México.

CONOCER (2008). Registro Nacional de Estándares de Competencia. México.

Cooper, P.F. (2003). Historical aspects of wastewater treatment. En *Decentralised Sanitation and Reuse*, 11–38. IWA Publishing.

Diario Oficial de la Federación. (2015). 28 de diciembre.
Recuperado de: <http://dof.gob.mx/>.

European Food Information Council. (2014). Farm to Fork.

Sanitation District of Los Angeles County. (2011). Joint Water Pollution Control Plant.

Siebe, C. (1998). Nutrient inputs to soils and their uptake by alfalfa through long-term irrigation with untreated sewage effluent in Mexico. *Soil Use and Management*, 13.

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2000). Guidelines for the microbiological quality of treated wastewater in agriculture: Recommendations for revising WHO guidelines. *Bulletin of the World Health Organization* 78(9).

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2006). WHO Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater. Ginebra: Organización Mundial de la Salud.

CASO 17

Reuso de aguas tratadas para riego agrícola en Bolivia (Bolivia)

Luis Grover Marka Saravia¹

Resumen

En Bolivia la cobertura de saneamiento básico es del 52.7%, sin embargo, no se cuenta con tecnología para el tratamiento de aguas residuales y una gran parte de las existentes no funcionan, resultando en una fuente potencial de contaminación, además de no contar con una reglamentación específica para el reúso de aguas residuales tratadas y su gestión para riego agrícola.

A pesar de ello la Ley Marco de la Madre Tierra y Desarrollo Integral para Vivir Bien define lineamientos para el tratamiento de las aguas que son aprovechadas con fines extractivos y el Plan de Desarrollo Económico y Social tiene planificado rehabilitar y mejorar las plantas de tratamiento de aguas residuales con enfoque de reúso, estableciendo el Gobierno un marco normativo y de planificación para resolver los problemas relacionados con la reutilización del agua.

Desde el año 2009 la Comisión Mixta, como espacio de intercambio de información, coordinación y concertación intersectorial promovió una serie de actividades orientadas al desarrollo de capacidades en Bolivia para definir estrategias y lineamientos ante la problemática de reuso de aguas tratadas para riego. Estas estrategias servirán para

¹ Luis Grover Marka Saravia ✉
Director General de Ministerio de Medio Ambiente y Agua
Ministry of Environment and Water, Bolivia
Correo electrónico: fiavhi@hotmail.com

En: Hiroshan Hettiarachchi and Reza Ardakanian (eds). *Uso seguro de las aguas residuales en la agricultura: ejemplos de buenas prácticas* ©UNU-FLORES 2016

orientar un programa de reutilización del agua para riego en Bolivia en el marco de la gestión del agua.

Palabras Clave: Reuso – Agricultura – Normativa – Estrategias - Capacidades

1. Agua potable y saneamiento básico

A nivel nacional el 80.8% de la población en viviendas particulares tiene acceso al agua y 52.7% cuenta con saneamiento básico. Entre los censos 2001 y 2012, el acceso al agua subió en 8 puntos porcentuales, es decir de 72.8% a 80.8%, mientras que la cobertura de saneamiento básico incremento en 11 puntos porcentuales, es decir de 41.4% a 52.7% (1)

En áreas urbanas, el 30% de las aguas residuales captadas por sistemas de alcantarillado son tratadas, el resto se descarga a cuerpos receptores. En 98 municipios del país (con una población urbana mayor a 2.000 habitantes), se identificaron 84 plantas de tratamiento de aguas residuales (2)

De las 84 PTAR, 31 no funcionan; del restante 53 que funcionan, más de la mitad no presenta una remoción mayor al 50%, lo que significa que existen diversos problemas que ponen en riesgo la salubridad de la población:

- Desconocimiento de los operadores de las plantas en cuanto a los procesos y responsabilidades de un sistema de tratamiento de aguas residuales,
- Deterioros en las instalaciones por efectos de aguas distintas a las residuales domésticas,
- Insuficiente presupuesto para una administración adecuada de las PTAR, y
- Insuficiente personal y débil capacidades necesarias.

2. Riego y reuso de aguas residuales

Las proyecciones en Bolivia estiman que para el 2012 el 32.5% de la población está en área rural y el 67.5% en áreas urbanas; esta población demanda una gran cantidad de alimentos pero también agua potable y saneamiento básico. En el área de riego, el 40% de la superficie nacional presenta un alto déficit de agua (más de 7 meses secos), ligado a esta problemática que demanda agua para riego, el cambio climático incrementa la incertidumbre con relación a la disponibilidad de agua para riego.

Para el año 2012 solamente el 11% de la superficie cultivada cuenta con un sistema de riego (303.000 ha). 70% del área regada depende de la captación de ríos (caudales fluctuantes). Aproximadamente en el país se riegan 7.000 hectáreas con aguas residuales, el 53% de ésta superficie en el departamento de Cochabamba. (3)

En Bolivia se usa agua residual, tratada o no, como fuente de agua de riego en casi todos los lugares donde existe una red de alcantarillado. El uso se realiza en forma indiscriminada, sin control de los efectos en la salud que puedan tener los productos regados con estas aguas.

Se estima que en Bolivia existen aproximadamente 13,400 industrias, de las cuales el 94% son pequeñas (de entre 1 a 10 empleados), consistiendo talleres de tipo artesanal. El 80% de las industrias están ubicadas en las ciudades del eje central: La Paz, El Alto, Santa Cruz y Cochabamba. (4)

Dentro de un contexto mayor, pobladores de cuencas bajas presentan problemas de cantidad y calidad debido a que los pobladores de la cuenca alta aprovechan volúmenes cada vez mayores de agua y re inyectan al sistema aguas residuales sin tratamiento.

3. Marco legal para reuso de aguas tratadas

Bolivia no cuenta con una reglamentación específica para el reúso de aguas residuales tratadas y su gestión para riego agrícola. El reglamento de La Ley de Medio Ambiente 1333 en Materia de Contaminación Hídrica establece que el reúso de aguas residuales crudas o tratadas por terceros, será autorizado por gobierno departamental cuando el

interesado demuestre que estas aguas satisfacen la calidad establecida en dicho reglamento (5).

El Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica, no presenta una metodología clara para la clasificación de cuerpos de agua. Cada Gobierno Departamental, debiera de proponer una clasificación de los cuerpos de agua con relación a su aptitud de uso. Sin embargo, han existido hasta la fecha limitaciones en cuanto a las capacidades tanto de conocimiento y recursos, p.e. para los análisis de laboratorio en cuanto a los parámetros básicos, además del control de calidad de los datos.

En octubre del 2012 se promulgó la Ley Marco de la Madre Tierra y Desarrollo Integral para Vivir Bien con el objeto de establecer la visión y los fundamentos del desarrollo integral en armonía y equilibrio con la Madre Tierra para Vivir Bien, garantizando la continuidad de la capacidad de regeneración de los componentes y sistemas de vida de la Madre Tierra, recuperando y fortaleciendo los saberes locales y conocimientos ancestrales, en el marco de la complementariedad de derechos, obligaciones y deberes. (6)

Entre alguna de las bases y orientaciones del Vivir Bien a través del desarrollo integral del agua, se establece:

- Toda actividad industrial y extractiva, que implique el aprovechamiento del agua según corresponda, debe implementar, entre otros, dinámicas extractivas y de transformación adecuadas que incluyen plantas y/o procesos de tratamiento que minimicen los efectos de la contaminación, así como la regulación de la descarga de desechos tóxicos a las fuentes de agua.
- Regular, proteger y planificar el uso, acceso y aprovechamiento adecuado, racional y sustentable de los componentes hídricos, con participación social, estableciendo prioridades para el uso del agua potable para el consumo humano.
- Regular, monitorear y fiscalizar los parámetros y niveles de la calidad de agua.
- Promover el aprovechamiento y uso sustentable del agua para la producción de alimentos de acuerdo a las prioridades y potencialidades productivas de las diferentes zonas.
- Adoptar, innovar y desarrollar prácticas y tecnologías para el uso eficiente, la captación, almacenamiento, reciclaje y tratamiento de agua.

El Plan de Desarrollo Económico y Social (PDES) en el marco del Desarrollo Integral para Vivir Bien (PDES, 2016 - 2020) del Estado Plurinacional de Bolivia, se constituye en el marco estratégico y de priorización de Metas, Resultados y Acciones a ser desarrolladas en el tercer periodo del gobierno de la Revolución Democrática Cultural, mismo que se elabora sobre la base de la Agenda Patriótica 2025 y el Programa de Gobierno 2015 – 2020. (7)

En el tema de alcantarillado, el PDES establece que hasta el 2020 el 60% de la población rural cuente con servicios de alcantarillado y saneamiento y el 70% de la población urbana cuente con el servicio. Entre algunas de las acciones para el cumplimiento de los resultados:

- Ampliar de manera concurrente los servicios de agua potable en el área urbana y rural, con participación, tecnología adecuada y corresponsabilidad de la comunidad en su uso y mantenimiento.
- Desarrollar estrategias concurrentes para la gestión ambiental y control de calidad del agua para consumo humano (urbano y rural), a través de la implementación del Programa de Control de Calidad de Agua en las Empresas Públicas de Servicio de Agua (EPSAs).
- Incrementar la cobertura de servicios de alcantarillado y saneamiento en el área urbana con enfoque de reúso (cultivo restringido y/o energía) y corresponsabilidad de la población en el uso y mantenimiento adecuado del sistema.
- Ampliar la cobertura de alcantarillado y saneamiento en el área rural con participación y tecnología apropiada y pertinencia a la cultura de las comunidades.
- Rehabilitar y mejorar las plantas de tratamiento de aguas residuales con enfoque de reúso (cultivo restringido y/o energía).

Se ha establecido este decenio como la “Década del Riego” 2015-2025 y se tiene previsto la incorporación de la estrategia de la reutilización del agua para riego agrícola para afrontar la problemática de cambio climático, además de establecer las siguientes acciones:

- Fortalecer el proceso de implementación del Plan Nacional de Cuencas y el enfoque de gestión integral de recursos hídricos en procesos de coordinación intersectorial y entre el nivel central del Estado y las Entidades Territoriales Autónomas.

- Promover plataformas territoriales consultivas de coordinación en temas de riego y gestión integral de cuencas con enfoque de adaptación al cambio climático.

4. La Comisión Mixta para el reuso de aguas para riego

En Bolivia la Comisión Mixta es un espacio de intercambio de información, coordinación y concertación intersectorial en las temáticas priorizadas, de modo que se contribuya en el desarrollo de políticas orientadas a una adecuada gestión de las aguas residuales en las PTAR y reuso con fines agrícolas de manera sostenible, inicia el año 2009.

Forman parte de esta Comisión: el Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego y Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico, Directores del Servicio Nacional de Riego, Servicio Nacional para la Sostenibilidad de los Servicios en Saneamiento Básico (SENASBA), además de representantes de los programas de la Cooperación Alemana para el Desarrollo y otras entidades de la Cooperación Internacional.

La Comisión Mixta promovió a través de apoyo técnico y financiero de la cooperación alemana el **“Relevamiento y Caracterización del re-uso de aguas residuales en Bolivia con fines de riego”** con el objetivo de establecer propuestas de lineamientos y estrategias sectoriales.

A partir del año 2011 se ejecutó el proyecto de cooperación triangular **“Apoyo en la Mejora del Reúso y Tratamiento de Aguas Residuales y Protección de Cuerpos de Agua con Enfoque de Adaptación al Cambio Climático”**, entre México, Bolivia y Alemania, con el objetivo de trabajar en el fortalecimiento de las capacidades institucionales y técnicas para fomentar el reúso de aguas residuales tratadas, así como para el establecimiento de medidas de adaptación al cambio climático en el sector hídrico.

El año 2014 se amplía el compromiso de trabajo de los tres países a través de un nuevo proyecto de Cooperación Triangular entre México-Alemania-Bolivia denominado **“Reúso de Aguas Residuales Tratadas para Riego Agrícola”**, con un horizonte hasta enero de 2016 y destinado a mejorar las condiciones marco para el reúso de aguas tratadas para

riego agrícola. Un resumen de los resultados (8) alcanzados durante estas dos etapas se presenta en el siguiente cuadro:

Línea de acción	Resultados alcanzados
Normativo y de regulación	<ul style="list-style-type: none"> • Una propuesta de reglamento técnico de reuso de agua tratada en riego • Una guía técnica para el reuso de aguas residuales en la agricultura • Una guía para orientar la selección y el diseño de proyectos de tratamiento de aguas residuales
Desarrollo de capacidades	<ul style="list-style-type: none"> • Técnicos bolivianos recibieron capacitación en México y aplican sus conocimientos en el rediseño de PTAR • Técnicos bolivianos recibieron capacitación en monitoreo y medición de la calidad del agua • Un diplomado en criterios de diseño de PTAR orientados al reuso entre el IMTA y la UMSA
Proyectos piloto de tratamiento de aguas residuales para reuso	<ul style="list-style-type: none"> • Asesores mexicanos revisaron y realizaron recomendaciones a dos diseños de PTAR en el departamento de Cochabamba

Con apoyo del Banco Mundial, se han realizado estudios orientados a la evaluación del potencial del reuso de aguas residuales para riego en Bolivia basado en el análisis técnico y económico de dos estudios de caso en Cochabamba y en Tarija. Los resultados de estos estudios de caso, demuestran que:

1. Existe un gran potencial del reuso seguro de aguas residuales como solución a los problemas de escasez del agua que sufren diferentes regiones del país y como motor de desarrollo económico de las mismas;
2. Los embalses de estabilización pueden alcanzar la calidad necesaria para permitir el riego sin restricciones de manera segura; optimizar

el uso del agua maximizando la superficie de terreno cultivable y permitiendo simplificar al máximo las labores de operación y mantenimiento y

3. Es necesario vencer ciertas barreras existentes que pondrían en peligro la sostenibilidad a largo plazo del mismo (descontento generalizado de la población residente en las inmediaciones de las plantas de tratamiento de aguas residuales del país).

Con el apoyo del Programa de Agua y Saneamiento del Banco Mundial, se realizó un estudio titulado **“Dimensiones Socioeconómicas Asociadas a las Prácticas de Reúso de Aguas Residuales con Fines Agroproductivos en el Altiplano Boliviano”**, con el objetivo de recabar información que permita orientar la correcta toma de decisiones de política en relación al reúso agrícola de aguas residuales.

El estudio desarrollado pone en evidencia el gran respaldo del sector agrario de las áreas de altiplano y cabecera de valle, entre los que se encuentran el de la promoción del reúso planificado de aguas residuales en la agricultura como medida de adaptación al cambio climático y uso eficiente del agua y la implementación de proyectos piloto en este ámbito.

Los agricultores encuestados expresaron disposición a colaborar en la gestión de la infraestructura de tratamiento y distribución de aguas necesaria, bien mediante la realización de aportes monetarios o dedicando horas de trabajo a la operación y mantenimiento de la misma. No obstante los aportes económicos que a día de hoy realizan los agricultores de estas zonas a las organizaciones de regantes a las que algunos de ellos pertenecen son muy reducidos, por no decir simbólicos, por lo que si bien esta voluntad de colaboración es un buen síntoma, será necesaria la definición de mecanismos alternativos y/o complementarios que aseguren la sostenibilidad financiera de los esquemas planificados de reúso que eventualmente se implementen en el futuro.

La reducción de riesgos para la salud mediante el incremento de la cobertura de tratamiento y la mejora del desempeño de las plantas existentes, si bien necesaria, requiere de la realización de grandes inversiones para la rehabilitación y construcción de nuevas PTAR y por lo tanto de largos plazos de implementación.

Por esta razón, y para contra restar los riesgos inherentes al consumo de productos agrícolas que ya al día de hoy están siendo

regados con aguas residuales, es necesario adoptar en paralelo otras medidas complementarias de impacto a medio y corto plazo, como las propuestas por la OMS (restricción de cultivos, riego localizado, manejo mejorado de cosechas, etc.).

El estudio confirmó la necesidad de desarrollar un importante esfuerzo en el ámbito educativo e informativo dirigido tanto a agricultores como a comercializadores y consumidores, así como de llevar a cabo iniciativas de asistencia técnica a productores, para asegurar el éxito de posibles iniciativas encaminadas a promover la adopción de cultivos adecuados y prácticas mejoradas de manejo de la producción desde el cultivo hasta su comercialización y consumo.

5. Aprendizajes y oportunidades

5.1. Planes municipales con énfasis en tratamiento y reuso

En Bolivia, se pretende la construcción de una planta de tratamiento como requerimiento ambiental derivado del cumplimiento de las recomendaciones ambientales, como parte de una obligación emanada del cumplimiento de la Ley 1333, pero no se tiene claro el uso de las aguas residuales tratadas como un insumo importante para el riego de jardines o de cultivos.

Durante este proceso mientras dura la gestión del financiamiento, hasta la etapa de construcción, no es seguida por el establecimiento de unidades de gestión y manejo de las plantas de tratamiento y el posterior uso que se dará a las aguas tratadas. Es posible, para aquellos municipios en los cuales el tratamiento de las aguas residuales depende de ellos, establecer la obligatoriedad de la asignación de recursos para la operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento.

Se requiere sin embargo, que la operación esté a cargo de personal especializado, pues se debe garantizar el monitoreo de la calidad de agua en el efluente y ello necesita técnicos de laboratorio y equipo para el monitoreo de la calidad de agua, tanto afluente como efluente, de manera de ajustar los procesos y operaciones unitarias para el cumplimiento de las metas de tratamiento.

5.2. Generación de incentivos para uso racional del agua y reuso de aguas residuales

Cambiar la manera de asegurar que las PTAR y los cultivos regados tengan atención a lo largo de la vida útil de los proyectos de emplazamiento de PTAR, Esto es generando incentivos a las buenas prácticas ambientales en función al reuso que se le pueda dar a las ARD y que ellos sean tomados fuera del contexto del presupuesto que se vaya a asignar en los municipios.

El establecimiento de un fondo que disminuya la carga económica y/o financiera que pueda resultar del diseño, construcción, operación y mantenimiento de las PTAR. Dicho fondo, también puede estar disponible a las industrias que tengan buenas prácticas ambientales, de manera tal que la tarifa que sea establecida por contrato pueda ser subvencionada.

5.3. Identificación de alternativas para intercambio de aguas

Uno de los problemas que afecta a gran parte del territorio nacional, es la cada vez más escasa posibilidad de encontrar y explotar fuentes de agua para la potabilización y su posterior uso. El cambio climático, obliga a tomar precauciones en el abastecimiento de agua previsto principalmente para las capitales de departamento que presentan la mayor parte de la población concentrada.

Por otra parte, las áreas de concentración, que son las urbes principalmente de las capitales de departamento, no tienen cuencas dentro de su jurisdicción que permitan la decisión en cuanto hace al mejor uso que se le puede dar al recurso hídrico. Estas restricciones, cada vez más crecientes, hacen que la búsqueda de fuentes de agua para consumo humano tenga que ser consensuadas en todos los casos con los pobladores de donde se pretende extraer el agua.

En este contexto, se puede en algunos casos cambiar el paradigma de competitividad de uso entre al agua potable y el agua de riego, haciendo que los mismos sean complementarios, es decir las aguas residuales tratadas pueden sustituir con ventaja a las que se usan actualmente para uso en riego.

5.4. Establecimiento de controles para monitorear la calidad del agua

En la Ley 1333 de Medio Ambiente, no ha sido posible hasta el momento establecer una regularidad en cuanto al control y monitoreo de los cuerpos de agua o de los lanzamientos que se hacen a los mismos. El reglamento en materia de contaminación hídrica, en su anexo A, contiene 4 tipos de cuerpos de agua de acuerdo a su aptitud de uso, 80 parámetros con valores máximos admisibles en cuerpos receptores, 25 parámetros de límites permisibles para descargas hídricas.

Tal cantidad de parámetros de control, hace difícil sino imposible el control de los lanzamientos de descargas en los cuerpos de agua.

Es posible entonces, establecer a partir de las universidades, programas para la formación de auditores ambientales y de técnicos ambientales. Una vez formados, deberán retornar a sus municipios, para empezar a trabajar en las PTAR con contratos garantizados, generando así capacidades que se pueden desarrollar a nivel rural.

Para poder hacer un monitoreo efectivo acerca de la calidad del agua, se requiere que los parámetros de control, estén en un número manejable, permitan el análisis con equipo y material reducidos y puedan tener una repetitividad para su posterior comparación.

5.5. Promoción intensiva para buen uso de alcantarillado y beneficios de reuso de aguas residuales

Las PTAR, son posibles solo si se tiene un sistema de red de alcantarillado que recoja las aguas residuales y las lleve a un punto normalmente por gravedad. La experiencia en las áreas rurales es que se hace un mal uso de las facilidades sanitarias y normalmente se presentan con mucha frecuencia taponamientos de la red de alcantarillado por diferentes tipos de objetos especialmente plásticos que impiden el flujo normal y demandan un mantenimiento intensivo no siempre disponible de inmediato.

Por otro lado, es evidente el rechazo al emplazamiento de PTAR por parte de los vecinos, especialmente donde el lugar de emplazamiento está muy cerca de concentraciones poblacionales urbanas. No es posible el reuso de aguas, sin alcantarillados bien manejados, sin plantas de tratamiento que funcionen adecuadamente, pues no se alcanzarían las metas de salud que son parte del reuso del agua en riego.

Se requiere en primer lugar que una vez que la red sea construida, se tengan acometidas domiciliarias funcionando, en otras palabras el financiamiento público debe comprender hasta la acometida. Las plantas de tratamiento y su tecnología, son más difíciles de introducir en la sociedad, ya que la experiencia hasta ahora es negativa. Se requiere de plantas demostrativas, de buen funcionamiento pero sobre todo que no causen la molestia de olores que por ahora se tienen.

Es indispensable que las plantas de tratamiento tengan un componente arquitectónico y de paisajismo además que la tecnología empleada sea adecuada al lugar donde se emplaza la planta de tratamiento.

5.6. Establecimiento de metas de salud y multibarreras

Se trata de establecer tecnologías adecuadas y niveles de tratamiento de ARD, métodos de aplicación de riego, restricción de cultivos y control de la exposición humana en el proceso del riego con ARD tratadas.

Bibliografía

1. **Instituto Nacional de Estadística**. Nota de Prensa. www.ine.gob.bo. [En línea] 2013.
2. **Ministerio de Medio Ambiente y Agua**. *Sistematización Sobre Tratamiento y Reuso de Aguas Residuales*. La Paz : Programa PROAGRO y PERIAGUA (GIZ), 2013.
3. —. *Inventario Nacional de Sistemas de Riego 2012*. Cochabamba : Programa PROAGRO (GIZ), 2013.
4. *Legislación del Agua en Bolivia*. **Bustamante, Rocio**. 2002.
5. **Ley de Medio Ambiente**. *Ley N°1333*. La Paz : s.n., 1992.
6. **Ley Marco de la Madre Tierra y Desarrollo Integral para Vivir Bien**. *Ley N°300*. La Paz : s.n., 2012.
7. **Estado Plurinacional de Bolivia**. *Plan de Desarrollo Económico y Social 2016 - 2020*. La Paz : s.n., 2016.
8. **Ministerio de Medio Ambiente y Agua**. *Informe del Taller de Evaluación de Medio Término*. 2015.

Hiroshan Hettiarachchi
Reza Ardakanian, Editores

USO SEGURO DE AGUAS RESIDUALES EN LA AGRICULTURA: EJEMPLOS DE BUENAS PRÁCTICAS

La Universidad de las Naciones Unidas Instituto para la Gestión Integral de Flujos de Materiales y de Recursos (UNU-FLORES) promueve el enfoque Nexus en el manejo de tres recursos ambientales clave: agua, suelo y residuos. La gestión de aguas residuales provee uno de los mejores ejemplos en la naturaleza que demuestra la utilidad del enfoque Nexus en el manejo de estos tres recursos. Este libro es un intento por compartir lo que UNU-FLORES ha aprendido a través de ejemplos respecto a este tema alrededor del mundo. Se presentan aquí, diecisiete estudios de casos alrededor del mundo en el reuso de agua en agricultura. Todos ellos proporcionan información de primera mano, gracias a que los autores son expertos que han implementado el reuso de aguas residuales en agricultura o han monitoreado el progreso de dichas implementaciones de cerca. Todo el material es presentado en tres secciones: la sección I presenta cinco casos sobre Avances Tecnológicos, la sección II esta dedicada a Aspectos Sanitarios y Medioambientales en otros cinco casos, y finalmente la sección III del libro provee una útil discusión, en siete casos, respecto a Cuestiones relativas a las Políticas y la Implementación.

e-ISBN: 978-3-944863-48-1



UNITED NATIONS
UNIVERSITY

UNU-FLORES

Institute for Integrated Management
of Material Fluxes and of Resources

flores.unu.edu

