

# AGUAS RESIDUALES

## EL RECURSO DESAPROVECHADO



WWDR  
2017



Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura



Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos



ONU medio ambiente



Al servicio de las personas y las naciones



Naciones Unidas

CEE, CEPALC, CESAO, CESAP



Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura

ONU HABITAT POR UN MEJOR FUTURO URBANO



Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017

# AGUAS RESIDUALES

## EL RECURSO DESAPROVECHADO

Publicado en 2017 por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, 7, place de Fontenoy, 75352 París 07 SP, Francia

© UNESCO 2017

El presente informe es publicado por la UNESCO en nombre de ONU-Agua. La lista de miembros y colaboradores de ONU-Agua se encuentra disponible en: [www.unwater.org](http://www.unwater.org)

*Capítulos 2, 4 y 7:* el autor es un funcionario de la Organización Mundial de la Salud. El autor es el único responsable de las opiniones aquí expresadas y no reflejan necesariamente las opiniones, decisiones o políticas de la Organización Mundial de la Salud. Nada de lo aquí mencionado habrá de interpretarse como una renuncia a los privilegios e inmunidades de los que goza la OMS ante los tribunales nacionales competentes.

*Capítulo 7:* Las ideas expresadas en esta publicación son las del (los) autor(es) y no necesariamente reflejan las opiniones o políticas de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

*Capítulo 9:* por Annukka Lipponen; colaboradora para el Capítulo 3: Nataliya Nikiforova © United Nations

*Capítulos 12, 15, 16, 17:* Las opiniones y argumentos aquí expresados corresponden al (los) autor(es) únicamente y no necesariamente reflejan las opiniones oficiales de la OCDE o sus países miembros.

La versión en español del *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017, Aguas residuales: El recurso desaprovechado*, fue posible gracias al apoyo del Gobierno de Brasil y de la Oficina de la UNESCO en Brasilia bajo la coordinación del Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO para América Latina y el Caribe (Oficina Regional de Ciencias de la UNESCO para América Latina y el Caribe – UNESCO Montevideo).

Traductora principal: Soledad Insiburo; corrección: Laura Zavala; adaptación de diseño: Diego García Pedrouzo.



ISBN 978-92-3-300058-2

Cita sugerida:

WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas). 2017. *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso desaprovechado*. París, UNESCO.

Esta publicación está disponible en Acceso Abierto bajo una licencia Creative Commons Reconocimiento-Compartir Igual 3.0 IGO (CC-BY-SA 3.0 IGO) ([creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/igo/](http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/igo/)). Al utilizar el contenido de esta publicación, los usuarios reconocen que quedan obligados por las condiciones de uso del Repositorio de Acceso Abierto de la UNESCO ([www.unesco.org/open-access/terms-use-ccbysa-en](http://www.unesco.org/open-access/terms-use-ccbysa-en)).

La presente licencia se aplicará exclusivamente al contenido del texto de la publicación. Para la utilización de cualquier material que no se encuentre claramente identificado como propiedad de la UNESCO, se deberá solicitar autorización previa a: [publication.copyright@unesco.org](mailto:publication.copyright@unesco.org) o UNESCO Publishing, 7, place de Fontenoy, 75352 París 07 SP Francia.

Las denominaciones aquí empleadas y la forma en que aparecen presentados los datos no implican la opinión de la UNESCO sobre la condición jurídica de países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, ni respecto de la delimitación de sus fronteras o límites.

Las ideas y opiniones expresadas en esta publicación son las de los autores; no son necesariamente las de la UNESCO y no comprometen a la Organización. Los contenidos son contribuciones de los miembros y colaboradores de ONU-Agua identificados al inicio de cada capítulo. La UNESCO y el Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas (WWAP) no son responsables por los errores de contenido o discrepancias de datos que puedan surgir entre los capítulos.

En el WWAP se les dio a las personas que contribuyeron como autores y colaboradores la oportunidad de identificarse, o de ser reconocidas en esta publicación. El WWAP no es responsable de ninguna omisión en este sentido.

El diseño original de portada es Phoenix Design Aid.

# ÍNDICE

<b>PRÓLOGO</b>	<b>v</b>
por Irina Bokova Directora General de la UNESCO	vi
<b>PRÓLOGO</b>	<b>vii</b>
por Guy Ryder Presidente de ONU-Agua y Director General de la Organización Internacional del Trabajo	
<b>PREFACIO</b>	<b>viii</b>
por Stefan Uhlenbrook, Coordinador del WWAP y Richard Connor, Jefe de redacción	
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>xi</b>
<b>RESUMEN EJECUTIVO</b>	<b>1</b>
<b>PRÓLOGO   ESTADO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS: DISPONIBILIDAD Y CALIDAD</b>	<b>8</b>

## PARTE I BASE DE REFERENCIA Y CONTEXTO

---

<b>CAPÍTULO 1   INTRODUCCIÓN</b>	<b>16</b>
1.1 Flujos de aguas residuales	20
1.2 Las aguas residuales como recurso: cómo aprovechar las oportunidades	21
<b>CAPÍTULO 2   AGUAS RESIDUALES Y LA AGENDA DE DESARROLLO SOSTENIBLE</b>	<b>23</b>
2.1 La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible	24
2.2 Posibles sinergias y conflictos	26
<b>CAPÍTULO 3   GOBERNABILIDAD</b>	<b>29</b>
3.1 Actores y funciones	30
3.2 Políticas, legislación y normativa	31
3.3 Financiamiento	36
3.4 Aspectos socioculturales	37
<b>CAPÍTULO 4   ASPECTOS TÉCNICOS DE LAS AGUAS RESIDUALES</b>	<b>39</b>
4.1 Fuentes y componentes de las aguas residuales	39
4.2 Consecuencias del vertido de aguas residuales no tratadas o con tratamiento inadecuado	41
4.3 Recolección y tratamiento de aguas residuales	43
4.4 Necesidades en materia de datos e información	47



## PARTE II

# EJE TEMÁTICO

---

<b>CAPÍTULO 5   AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES Y URBANAS</b>	<b>50</b>
5.1 La urbanización y sus consecuencias en la generación de aguas residuales	51
5.2 Tipos urbanos	51
5.3 Fuentes de las aguas residuales en los sistemas municipales y urbanos	53
5.4 Composición de las aguas residuales municipales y urbanas	52
5.5 Tipos urbanos y el potencial de uso de las aguas residuales municipales y urbanas	55
5.6 Gestión de la escorrentía urbana	57
<b>CAPÍTULO 6   INDUSTRIA</b>	<b>58</b>
6.1 Magnitud de la generación de aguas residuales industriales	59
6.2 Naturaleza de las aguas residuales industriales	61
6.3 El abordaje de las dificultades que implica el recurso	62
6.4 Las aguas residuales y el desarrollo industrial sostenible	68
<b>CAPÍTULO 7   AGRICULTURA</b>	<b>69</b>
7.1 La agricultura como fuente de contaminación del agua	70
7.2 La agricultura como usuaria de aguas residuales	74
<b>CAPÍTULO 8   ECOSISTEMAS</b>	<b>78</b>
8.1 Función y limitaciones de los ecosistemas en la gestión de aguas residuales	79
8.2 El uso planificado de aguas residuales para servicios de los ecosistemas	80
8.3 Aspectos políticos y operativos	82

## PARTE III

# ÁFRICA

---

<b>CAPÍTULO 9   ÁFRICA</b>	<b>83</b>
9.1 El agua y las aguas residuales en el África Subsahariana	85
9.2 Desafíos cruciales	85
9.3 El camino a seguir	88

<b>CAPÍTULO 10   LA REGIÓN ÁRABE</b>	<b>91</b>
10.1 Contexto	92
10.2 Desafíos	92
10.3 Respuestas	94
<b>CAPÍTULO 11   ASIA Y EL PACÍFICO</b>	<b>96</b>
11.1 Contexto y desafíos	97
11.2 La creación de infraestructuras resilientes	97
11.3 Un abordaje sistémico para la recuperación de los subproductos de las aguas residuales	99
11.4 Necesidades en materia de reglamentación y capacidades	99
<b>CAPÍTULO 12   EUROPA Y AMÉRICA DEL NORTE</b>	<b>100</b>
12.1 Contexto	101
12.2 Desafíos	101
12.3 Respuestas	103
<b>CAPÍTULO 13   AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE</b>	<b>106</b>
13.1 El desafío de la gestión de aguas residuales urbanas	107
13.2 Crecimiento reciente del tratamiento de aguas residuales urbanas	108
13.3 Inquietudes que prevalecen y nuevas oportunidades	109
13.4 Beneficios de los tratamientos de aguas residuales urbanas	109
13.5 Otras fuentes de aguas residuales	110
13.6 Lecciones aprendidas	110

## **PARTE IV**

# **OPCIONES DE RESPUESTA**

---

<b>CAPÍTULO 14   PREVENCIÓN Y REDUCCIÓN DE LA GENERACIÓN DE AGUAS RESIDUALES Y DE LAS CARGAS DE CONTAMINACIÓN EN LA FUENTE</b>	<b>112</b>
14.1 Mecanismos para la vigilancia y control de los niveles de contaminación	113
14.2 Respuestas técnicas	115
14.3 Abordajes económicos y cambios de comportamiento	118

<b>CAPÍTULO 15   MEJORAS EN LA RECOLECCIÓN Y TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES</b>	<b>119</b>
15.1 Alcantarillado y saneamiento hídrico	120
15.2 Alcantarillado de bajo costo	120
15.3 Alcantarillado combinado	121
15.4 Tratamiento descentralizado (DEWATS)	121
15.5 Gestión descentralizada de aguas pluviales	121
15.6 Evolución de las tecnologías de tratamiento	122
15.7 Aprovechamiento de vertidos y separación de componentes	123
<b>CAPÍTULO 16   REUTILIZACIÓN DEL AGUA Y RECUPERACIÓN DE RECURSOS</b>	<b>124</b>
16.1 Reutilización beneficiosa del agua	125
16.2 Recuperación de recursos de las aguas residuales y de los biosólidos	129
16.3 Modelos de negocios y abordajes económicos	132
16.4 Minimizar los riesgos para la salud humana y el medio ambiente	133
16.5 Regulación en materia de la reutilización del agua	135
16.6 Aprobación social respecto al uso de aguas residuales	136
<b>CAPÍTULO 17   CONOCIMIENTO, INNOVACIÓN, INVESTIGACIÓN Y CREACIÓN DE CAPACIDADES</b>	<b>137</b>
17.1 Tendencias en materia de investigación e innovación	138
17.2 Brechas en materia de conocimiento, investigación, tecnología y creación de capacidades	138
17.3 Tendencias futuras para la de gestión de aguas residuales	141
17.4 Creación de capacidades, sensibilización pública y colaboración entre las partes interesadas	142
<b>CAPÍTULO 18   LA CREACIÓN DE UN ENTORNO PROPICIO PARA EL CAMBIO</b>	<b>143</b>
18.1 Alternativas técnicas	144
18.2 Marcos jurídicos e institucionales	145
18.3 Posibilidades de financiamiento	146
18.4 Desarrollo de conocimiento y creación capacidades	147
18.5 Reducción de los riesgos para la salud humana y el medio ambiente	148
18.6 Promoción de la aprobación social	149
18.7 Coda	149
<b>Referencias</b>	<b>150</b>
<b>Anexo 1 - Léxico</b>	<b>172</b>
<b>Abreviaturas y siglas</b>	<b>175</b>
<b>Cuadros, figuras y tablas</b>	<b>177</b>
<b>Fotografías</b>	<b>180</b>

# PRÓLOGO

por Irina Bokova  
Directora General de la UNESCO

*En un mundo donde la demanda de agua dulce está en constante aumento y los escasos recursos hídricos se ven cada vez más exigidos por la captación excesiva, la contaminación y el cambio climático, sería sencillamente impensable no aprovechar las oportunidades que brinda una mejor gestión de las aguas residuales.*

Así concluye el *Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017*, donde se destaca cuán imperiosa es la necesidad de mejorar la gestión de aguas residuales en pos de nuestro porvenir común.

Si continuamos «actuando como de costumbre» estaremos fomentando un mayor deterioro de la situación. Se estima que en el mundo más del 80 por ciento de las aguas residuales (más del 95 por ciento en algunos países en desarrollo) se vierte al medio ambiente sin tratamiento alguno. Las consecuencias son inquietantes. La contaminación del agua en la mayoría de los ríos de África, Asia y América Latina es cada vez peor. En 2012, se registraron más de 800.000 muertes en el mundo a causa del consumo de agua potable contaminada e instalaciones para el lavado de manos y servicios de saneamiento inadecuados. Cada vez son más las zonas muertas desoxigenadas en mares y océanos a causa del vertido de aguas residuales sin tratar, lo cual afecta a los ecosistemas marinos en una superficie de 245.000 km<sup>2</sup>, con repercusiones en la industria pesquera, medios de subsistencia y cadenas alimenticias.

Las aguas servidas siempre fueron consideradas simplemente una complicación a ser desechada, cuando no completamente ignoradas. Sin embargo, esta concepción está cambiando porque la escasez de agua aumenta en muchas regiones y se comienza a reconocer la importancia de la recolección, tratamiento y reutilización de las aguas residuales. La infraestructura es un problema fundamental para todos los países. La disponibilidad de datos continúa siendo una dificultad constante, especialmente en los países en desarrollo. Un estudio reciente mostró que de 181 países, únicamente 55 contaban con información en materia de generación, tratamiento y utilización de aguas residuales; los países restantes no contaban con información o solo tenían datos parciales. En la mayoría de los países que contaban con información, esta se encontraba desactualizada. Este cuello de botella con respecto a la información impide realizar las actividades de investigación y desarrollo necesarias para diseñar tecnologías innovadoras y adaptar las existentes a las necesidades y características locales.

En el *Informe Mundial sobre Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017* se demuestra que una mejor gestión de las aguas residuales implica no solo la reducción de la contaminación en las fuentes, sino también la eliminación de contaminantes de los flujos de aguas residuales, la reutilización de las aguas regeneradas y la recuperación de los subproductos útiles. Conjuntamente, estas cuatro acciones generan beneficios sociales, ambientales y económicos para toda la sociedad, contribuyendo así al bienestar y a la salud, a la seguridad del agua y la alimentaria y al desarrollo sostenible. La importancia transversal de las aguas residuales se ve reflejada en la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, en el Objetivo

de Desarrollo Sostenible número 6 dedicado al agua y al saneamiento y, especialmente, en la Meta 6.3 que propone reducir a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentar considerablemente el reciclado y la reutilización segura a nivel mundial.

Para seguir avanzando es imprescindible contar con una mayor aprobación social con respecto a la utilización de aguas residuales. He aquí la importancia de la educación y capacitación, y de las nuevas formas de sensibilización para modificar la creencia de que estas aguas conllevan un riesgo para la salud y así ocuparse de las inquietudes socioculturales para fomentar la aprobación pública.

Esto también es positivo desde el punto de vista comercial. Como elementos fundamentales de una economía circular, la utilización de aguas residuales y la recuperación de sus subproductos pueden generar nuevas oportunidades comerciales y así ayudar a recuperar los costos de las instalaciones nuevas, innovadoras y modificadas. De esta forma podremos recuperar energía, nutrientes y metales, entre otros subproductos.

Por su parte, la UNESCO a través de su «familia del agua», apoya a los Estados Miembros a la hora de enfrentar los desafíos que presenta la calidad del agua. Entre estas iniciativas encontramos el Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO, el Programa Hidrológico Internacional, el Instituto UNESCO-IHE para la Educación relativa al Agua con sede en Delft y los numerosos Centros Categoría II y Cátedras alrededor del mundo. Nuestras iniciativas abarcan todo el espectro, desde promover la investigación científica, movilizar y divulgar conocimiento, hasta propiciar el intercambio de abordajes tecnológicos y políticas para la creación de capacidades y sensibilización sobre los riesgos asociados a los contaminantes emergentes en el suministro de agua y las aguas residuales.

Como siempre, el Informe 2017 es el resultado de la colaboración de las agencias del sistema de las Naciones Unidas y los 31 miembros de ONU-Agua, a quienes les estoy profundamente agradecida. Deseo agradecer al Gobierno italiano por el apoyo que brinda a la Secretaría del Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos para garantizar su sostenibilidad y productividad a largo plazo. Con este espíritu es que deseo invitarlos a todos a hacer propio el informe y sus conclusiones, para abogar por nuevos abordajes, equitativos y sostenibles en materia de agua como el medio para alcanzar un futuro más próspero para todos.



Irina Bokova

# PRÓLOGO

por Guy Ryder

Presidente de ONU-Agua y Director General de la Organización Internacional del Trabajo

Se dice que en el siglo V a. C., Heráclito afirmó: «lo único constante en la vida es el cambio». Esto es verdad hoy más que nunca. En tanto las poblaciones y los asentamientos urbanos continúan en aumento, también crecen nuestras necesidades; y así nuestras sociedades y el planeta se transforman ante nuestros ojos.

En la edición 2017 del Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos (WWDR) se analiza la temática de aguas residuales y su potencial como recurso sostenible. Sin embargo, los estudios muestran cuánto trabajo nos queda aún por hacer: *«En el mundo, la mayor parte de las aguas residuales no son tratadas ni recolectadas. Además, la recolección de aguas residuales per se no es sinónimo de tratamiento de aguas residuales. En muchos casos las aguas residuales recolectadas son simplemente vertidas directamente al medio ambiente sin tratamiento previo. La escorrentía de tierras agrícolas casi nunca es recolectada ni tratada, por lo cual prácticamente no existen indicadores para estos flujos de aguas residuales».*

Por supuesto que, además de ser una oportunidad desaprovechada, el vertido de casi todas las aguas residuales al medio ambiente sin tratamiento previo implica riesgos para la salud humana y la naturaleza.

La edición 2017 del WWDR, la publicación insignia de ONU-Agua, transmite a los lectores que las aguas residuales fueron durante mucho tiempo un recurso; no solo podrían ser una solución para gestionar la creciente escasez de agua sino que también son una rica fuente de nutrientes, minerales y energía, todo lo cual puede extraerse de manera rentable. Con base en el Informe analítico de ONU-Agua sobre Gestión de Aguas Residuales de 2015, el WWDR analiza la economía circular, la innovación y muchos aspectos en materia regional.

El informe claramente establece la opinión unánime de los 31 miembros y 38 colaboradores de ONU-Agua sobre el hecho de que los asuntos relativos a las aguas residuales superan el Objetivo de Desarrollo Sostenible número 6 y su meta en la materia, y tienen una incidencia transversal sobre muchas de las metas de los ODS.

Permítanme agradecer a todos mis colegas de ONU-Agua por su colaboración, incluyendo a la UNESCO y su Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos, por haber coordinado la elaboración de este informe de gran calidad, el cual podría tener extensas ramificaciones y lograr avances en todos los Objetivos de Desarrollo Sostenible.



Guy Ryder



# PREFACIO

Por Stefan Uhlenbrook, Coordinador del WWAP  
y Richard Connor, Jefe de redacción

En la edición correspondiente al año 2017 del Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos (WWDR), el cuarto en una serie anual de informes temáticos, se analiza un aspecto generalmente olvidado y que es fundamental para la gestión de los recursos hídricos y la prestación de servicios básicos relacionados con el agua: las aguas residuales.

Estas no implican meramente la gestión de aguas porque afectan al medio ambiente y a todos los seres vivos y, por ello, pueden tener repercusiones directas en las economías maduras y emergentes. Por otra parte, los flujos de aguas residuales contienen elementos aprovechables, como nutrientes, metales y materia orgánica, tal como el agua en sí misma, que pueden ser extraídos y utilizados para otros fines productivos. Las aguas residuales son, por lo tanto, un recurso valioso y si se logra su gestión sostenible se convertirán en un pilar fundamental de la economía circular. Son muchas las ventajas de mejorar la gestión de aguas residuales que conllevarían, igualmente, beneficios paralelos para las sociedades y el medio ambiente.

El concepto de aguas residuales es en sí mismo una contradicción. Una vez que el agua ha sido utilizada, cualquiera sea el fin, no debería ser considerada algo «residual». En otros idiomas se la llama, en forma literal, «agua utilizada» (*eaux usées* en francés), «agua de desperdicio» (*wastewater* en inglés) o «agua tras su uso» (*Abwasser* en alemán). De hecho, el mensaje central de este informe es, justamente, presentar argumentos para derribar el concepto de que el agua ya utilizada es un desecho a eliminar y forjar la idea de que las aguas residuales deben ser consideradas un recurso.

Durante el trabajo de preparación del Informe 2017, rápidamente nos dimos cuenta de que existe una gran variedad de definiciones de aguas residuales, y estas pueden tener distinto significado para mucha gente. Tanto ingenieros, planificadores urbanos, administradores ambientales y académicos como, por supuesto, varias agencias de las Naciones Unidas, han abordado distintos aspectos relativos a las aguas residuales en sus informes, cada uno desde su propia perspectiva y utilizando su propia terminología. Nos hemos esforzado por recurrir a muchos de estos documentos (tal como se aprecia en la extensa lista de referencias) para poder brindar una descripción equilibrada, basada en los hechos y objetiva, del acervo de conocimientos con el que contamos en la actualidad, abarcando así las innovaciones más recientes en materia de gestión de aguas residuales y los muchos beneficios y oportunidades que estas ofrecen en el ámbito de una economía circular.

Una mejor gestión de las aguas residuales será fundamental para el crecimiento verde, especialmente en el ámbito de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. La Meta 6.3 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) aboga explícitamente por la reducción de la contaminación y mejoras en el vertido, gestión y tratamiento de las aguas residuales y sus repercusiones en la calidad del agua ambiental. Esta meta es sumamente importante para lograr muchos de los otros ODS.

Para poder maximizar el potencial de las aguas residuales como recurso valioso y sostenible será necesario crear un entorno propicio para el cambio. Esto incluye la creación de marcos jurídicos y regulatorios adecuados, mecanismos de financiamiento pertinentes y aprobación social. Confiamos en que, si existe voluntad política, podremos superar en forma rápida y eficiente, los obstáculos presentes, como la falta de conocimientos, capacidades, datos e información sobre aguas residuales.

Si bien, en principio, este informe está dirigido a los tomadores de decisiones y a los administradores de recursos hídricos a nivel nacional, esperamos que también sea de interés para la amplia comunidad de desarrollo, académicos y todos aquellos interesados en construir un futuro más justo y sostenible para todos.

Esta última edición del Informe surge a partir de un esfuerzo conjunto entre FAO, PNUD, CEPE, PNUMA, CESPAP, UNESCO, CESPAP, ONU-Hábitat, ONUDI y el WWAP. El informe también se enriqueció con los aportes y contribuciones de muchos de los miembros y colaboradores de ONU-Agua, de los miembros del Comité Técnico Asesor del WWAP, así como también de decenas de científicos, profesionales y ONG, quienes pusieron a disposición una amplia gama de materiales pertinentes. En esta edición, como en las anteriores, se integra la dimensión de género.

En nombre de la Secretaría del WWAP, nos gustaría expresar nuestro más profundo agradecimiento a las agencias antes mencionadas, miembros y colaboradores de ONU-Agua, autores, editores y otros colaboradores, sin cuyos aportes no hubiéramos podido elaborar colectivamente este excepcional y reconocido informe, que esperamos tenga múltiples repercusiones en el mundo.

Les estamos profundamente agradecidos al Gobierno italiano por financiar el Programa y a la Región de Umbría por acoger la Secretaría del WWAP en Villa La Colombella, en Perugia. Sus aportes han sido fundamentales para la elaboración del Informe.

Deseamos agradecer especialmente a Irina Bokova, Directora General de la UNESCO, por su importante apoyo al WWAP y a la elaboración del presente Informe. Gracias a la labor de liderazgo de Guy Ryder, Director General de la Organización Internacional del Trabajo, como Presidente de ONU-Agua fue posible esta publicación.

Por último, pero no menos importante, queremos extender nuestro más sincero agradecimiento a todos nuestros colegas de la Secretaría del WWAP, cuyos nombres figuran en la sección de agradecimientos. El informe no se podría haber concluido sin su dedicación y profesionalismo, especialmente a la luz de las dificultades y desafíos afrontados luego de los terremotos que afectaron la región italiana de Umbría y sus alrededores en 2016.



Stefan Uhlenbrook



Richard Connor

# EL EQUIPO DEL WWDR 2017

**Director de la publicación**

Stefan Uhlenbrook

**Jefe de redacción**

Richard Connor

**Coordinador de procesos**

Engin Koncagül

**Responsable de investigación**

Angela Renata Cordeiro Ortigara

**Responsable de publicaciones**

Diwata Hunziker

**Asistente de publicaciones**

Valentina Abete

**Diseño gráfico**

Marco Tonsini

**Corrector**

Simon Lobach

**Comité Técnico Asesor del WWAP**

Uri Shamir (Presidente), Dipak Gyawali (Vicepresidente), Fatma Abdel Rahman Attia, Anders Berntell, Elias Fereres, Mukuteswara Gopalakrishnan, Daniel P. Loucks, Henk van Schaik, Yui Liong Shie, László Somlyódy, Lucio Ubertini y Albert Wright

**Secretaría del Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP) en 2017**

*Coordinador:*

Stefan Uhlenbrook

*Coordinadora adjunta:*

Michela Miletto

*Programas:*

Richard Connor, Angela Renata Cordeiro Ortigara, Francesca Greco, Engin Koncagül et Lucilla Minelli

*Publicaciones:*

Valentina Abete, Diwata Hunziker y Marco Tonsini

*Comunicaciones:*

Simona Gallese y Laurens Thuy

*Administración y soporte:*

Barbara Bracaglia, Lucia Chiodini, Arturo Frascani y Lisa Gastaldin

*TI y seguridad:*

Fabio Bianchi, Michele Brensacchi y Francesco Gioffredi

# AGRADECIMIENTOS

El Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas (WWAP) agradece las invaluable contribuciones de FAO, PNUD, CEPE, PNUMA, CESPAP, UNESCO, CESPAP, ONU-Hábitat y ONUDI, cuyo trabajo como organismos coordinadores de los capítulos hicieron que la preparación de los contenidos del presente informe fuera posible. También deseamos agradecer a los miembros y colaboradores de ONU-Agua, organizaciones, instituciones y personas que aportaron observaciones y comentarios de gran utilidad durante las varias rondas de revisión.

El Informe WWDR 2017 se enriqueció con las revisiones, comentarios y asesoramiento del Comité Técnico Asesor del WWAP.

Deseamos agradecer profundamente a Irina Bokova, Directora General de la UNESCO, cuyo apoyo fue fundamental para la elaboración del informe; Flavia Schlegel, Subdirectora General de la UNESCO para las Ciencias Exactas y Naturales; Blanca Jiménez-Cisneros, Directora de la División de Ciencias del Agua y Secretaria del Programa Hidrológico Internacional (PHI) y el resto de los colegas del PHI merecen nuestro especial reconocimiento por su invaluable contribución y apoyo.

Apreciamos profundamente la generosa colaboración que nos brindaron las oficinas locales de la UNESCO en Almaty, Beijing, Brasilia, El Cairo y Nueva Delhi para la traducción del Resumen Ejecutivo en ruso, chino, portugués, árabe e hindi. La traducción al alemán fue posible gracias a la Comisión Alemana para la UNESCO.

El WWAP agradece la generosa contribución financiera del Gobierno de Italia y las facilidades otorgadas por la región de Umbría. El Ministerio de Asuntos Exteriores de Noruega también brindó apoyo económico para la elaboración del presente informe.





Planta de tratamiento de aguas residuales





# RESUMEN EJECUTIVO

La mayoría de las actividades humanas que utilizan agua generan aguas residuales. A medida que crece la demanda global de agua, el volumen de aguas residuales generadas y su nivel de contaminación se encuentran en constante aumento en todo el mundo.

En todos los países, excepto los más desarrollados, la mayor parte de las aguas residuales se vierte directamente al medio ambiente sin un tratamiento adecuado. Esto tiene repercusiones negativas en la salud humana, la productividad económica, la calidad de los recursos de agua dulce ambiental y los ecosistemas.

Si bien las aguas residuales son un elemento clave de la gestión del ciclo del agua, por lo general, una vez que el *agua* ya sido utilizada se la considera como una carga a ser eliminada o una molestia a ser ignorada. Las consecuencias de esta indiferencia ahora son evidentes. Sus efectos inmediatos, entre ellos el deterioro de los ecosistemas acuáticos y las enfermedades transmitidas por el agua que proviene de suministros de agua dulce contaminada, tienen repercusiones a largo plazo en el bienestar de las comunidades y los medios de subsistencia de las personas. Si continuamos ignorando el tema de las aguas residuales como problema social y medioambiental ponemos en peligro los otros esfuerzos realizados en pos de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.

Ante una demanda en constante crecimiento, las aguas residuales están cobrando impulso como una fuente alternativa y confiable de agua. Se aprecia un cambio de paradigma en la gestión de aguas residuales, la cual pasa de un mero «tratamiento y eliminación» a contemplar la «reutilización, reciclado y recuperación de recursos». En este sentido, las aguas residuales ya no se consideran un problema que necesita solución, sino que son parte de la solución ante las dificultades que hoy enfrentan las comunidades.

Las aguas residuales también pueden ser una fuente rentable y sostenible de energía, nutrientes y materia orgánica, entre otros subproductos útiles. Los potenciales beneficios de la extracción de dichos recursos van mucho más allá de la salud humana y medioambiental, con posibles repercusiones en la seguridad alimentaria y energética, así como también en la mitigación del cambio climático. En el contexto de una economía circular, donde se busca un equilibrio entre el desarrollo económico, la protección de los recursos naturales y la sostenibilidad ambiental, las aguas residuales constituyen un recurso abundante y valioso.

La perspectiva es ciertamente optimista, siempre y cuando se tomen medidas ahora.

## El agua en el mundo: disponibilidad y calidad

Se espera que la demanda mundial de agua aumente considerablemente en las próximas décadas. Además del sector agrícola, al que se destina el 70% de las extracciones mundiales, se esperan aumentos importantes en la demanda de agua para la producción industrial y energética. La urbanización acelerada y el desarrollo de sistemas de suministro de aguas municipales y de saneamiento también contribuyen al aumento de la demanda.

Los escenarios de cambio climático prevén que las variaciones espaciales y temporales de las dinámicas del ciclo del agua empeorarán, de modo que la brecha entre la oferta y la demanda de agua se agudizará cada vez más. La frecuencia e intensidad de las sequías e inundaciones probablemente modificarán las cuencas hidrográficas del mundo. Las sequías pueden tener repercusiones socioeconómicas y medioambientales muy serias. La crisis en Siria se desencadenó, entre otros factores, debido a una sequía histórica (2007-2010).



En la actualidad, dos tercios de la población mundial vive en regiones donde sufren escasez de agua al menos un mes al año. Unos 500 millones de personas viven en zonas donde el consumo de agua supera los recursos hídricos renovables localmente en una proporción de dos a uno. Las zonas sumamente vulnerables, aquellas donde los recursos no renovables (como las aguas subterráneas fósiles) continúan agotándose, han pasado a depender en gran medida de las transferencias que provienen de zonas con abundantes recursos hídricos y buscan constantemente fuentes alternativas económicas.

La disponibilidad de recursos hídricos está intrínsecamente ligada a la calidad del agua, ya que la contaminación de las fuentes de agua puede excluir diferentes usos. El aumento en los vertidos de aguas residuales sin tratar, junto con la escorrentía de tierras agrícolas y las aguas residuales industriales con tratamiento inadecuado, han llevado al deterioro de la calidad del agua en el mundo. Si las tendencias actuales perduran, la calidad del agua continuará deteriorándose en las próximas décadas, especialmente en los países de bajos recursos en zonas áridas, poniendo así aún en mayor riesgo la salud humana y los ecosistemas.

## Aguas residuales: tendencias mundiales

En promedio, los países de ingresos altos tratan cerca del 70% de las aguas residuales municipales e industriales que generan. Este promedio cae a un 38% en los países de ingresos medios-altos y a un 28% en los países de ingresos medios-bajos. En los países de ingresos bajos solo el 8% recibe algún tratamiento. Estas estimaciones sustentan la aproximación que se cita comúnmente que, en el mundo, más del 80% de las aguas residuales son vertidas sin tratamiento alguno.

En los países de ingresos altos la motivación por llevar adelante tratamientos avanzados de aguas residuales se basa en el deseo de mantener la calidad del medio ambiente o de contar con una fuente alternativa de agua a la hora de enfrentar la escasez hídrica. Sin embargo, el vertido de aguas residuales sin tratar continúa siendo una práctica habitual, especialmente en países en desarrollo, porque no cuentan con la infraestructura, capacidades técnicas e institucionales y financiamiento necesarios.

## Aguas residuales, saneamiento y la agenda de desarrollo sostenible.

El acceso a instalaciones de saneamiento mejoradas puede ayudar a reducir notoriamente los riesgos para la salud. Con los tratamientos mejorados de aguas residuales se pueden obtener mayores beneficios para la salud. Si bien unos 2.100 millones de personas lograron acceso a

instalaciones de saneamiento mejoradas desde 1990, cerca de 2.400 millones de personas aún no lo tienen y 1.000 millones todavía practican la defecación al aire libre.

Sin embargo, la disponibilidad de una infraestructura de saneamiento mejorada no necesariamente equivale a una mejor gestión de aguas residuales o seguridad pública. Solo 26% de los servicios urbanos de saneamiento y de gestión de aguas residuales y 34% de los servicios rurales previenen de forma efectiva el contacto de los humanos con excrementos a lo largo de la cadena de saneamiento, los cuales sí reflejan una gestión segura para las personas.

Con base en lo aprendido con los ODM, la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible se fija objetivos más integrales para el agua y no se limita únicamente a las cuestiones de suministro de agua y saneamiento. La Meta 6.3 de los ODS establece: *De aquí a 2030, mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial.* Los niveles extremadamente bajos de tratamiento de las aguas residuales muestran la imperiosa necesidad de realizar mejoras tecnológicas y de contar con opciones seguras para la reutilización del agua y así alcanzar la Meta 6.3, tan importante para el logro de la Agenda en su totalidad. Las iniciativas necesarias para lograr esta meta implicarán una carga económica más importante para los países de bajos ingresos e ingresos medios-bajos, lo cual los coloca en una situación de desventaja económica frente a los países de ingresos altos e ingresos medios-altos.

## Retos en materia de gobernabilidad

La gestión de los desechos humanos conlleva grandes beneficios para la sociedad, tanto para la salud pública como para el medio ambiente. Por cada dólar que se gasta en saneamiento, el retorno estimado para la sociedad es de USD 5,5.

Puede resultar especialmente difícil superar los retos de la puesta en marcha de las reglamentaciones en materia de la calidad de agua. Tanto los individuos como las organizaciones responsables de la gestión de aguas residuales deberán cumplir y actuar en pos del interés colectivo para lograr los objetivos relativos a la mejora de la calidad del agua y la protección de los recursos hídricos. Solo cuando respetemos las reglas para la protección de los recursos hídricos frente a la contaminación, lograremos materializar los beneficios.

La integración de la ciudadanía en la toma de decisiones en todos los niveles fomenta la participación y el sentido de pertenencia. Esto incluye decisiones acerca del tipo de instalaciones de saneamiento deseadas y aceptadas, de

cómo financiarlas de forma segura y de cómo mantenerlas a largo plazo. Es especialmente importante acercarse a los grupos marginalizados, minorías étnicas y personas que viven en condiciones de extrema pobreza, en zonas rurales alejadas o asentamientos urbanos informales. La participación de las mujeres también será fundamental, ya que son ellas quienes sufren las consecuencias de salud más serias causadas por la gestión inadecuada de desechos humanos.

## Aspectos técnicos del ciclo de gestión de aguas residuales

Las aguas residuales se componen, básicamente, de un 99% de agua y un 1% de sólidos disueltos, suspendidos o coloidales.

El vertido de aguas residuales sin tratar o con tratamiento inadecuado tendrá consecuencias que se clasifican en tres grupos, según tengan: i) efectos nocivos para la salud humana; ii) efectos ambientales negativos; iii) repercusiones desfavorables para las actividades económicas.

El fin último de la gestión de aguas residuales es el control y la regulación de sus diversos flujos. El ciclo de gestión de aguas residuales puede dividirse en cuatro fases básicas interconectadas:

### 1. Prevención o reducción de la contaminación en la fuente

Se deberán priorizar, siempre que sea posible, aquellos métodos de control de la contaminación hídrica que se centren en la prevención y minimización de las aguas residuales, en lugar de los sistemas de tratamientos en la etapa final. Estos métodos incluyen la prohibición o la fiscalización del uso de ciertos contaminantes para evitar o controlar su ingreso en los flujos de aguas residuales, ya sea por medios normativos, técnicos u otros. Las medidas correctivas para la limpieza de los sitios y cursos de agua contaminados son generalmente mucho más costosas que las medidas destinadas a evitar la contaminación en primer lugar.

La vigilancia y presentación de informes sobre las descargas de contaminantes al medio ambiente y sobre la calidad del agua ambiental serán fundamentales para lograr avances. Si no se realizan mediciones, no se puede identificar el problema y no se puede evaluar la eficacia de las políticas.

### 2. Recolección y tratamiento de aguas residuales

Las redes centralizadas de eliminación de desechos por flujos de agua siguen siendo el método más común de saneamiento y evacuación de las aguas residuales de origen doméstico, comercial e industrial. En el mundo, cerca del 60% de las personas están conectadas a un sistema de alcantarillado (si bien solo un pequeño porcentaje del total de aguas residuales recolectadas recibe tratamiento). Otros

sistemas de saneamiento, como los sistemas *in situ*, son más apropiados para las zonas rurales y aquellas con baja densidad de población, pero pueden resultar costosos y difíciles de gestionar en las zonas urbanas densamente pobladas.

En muchos países, los sistemas de tratamiento de aguas residuales centralizados a gran escala ya no serían la opción más viable para la gestión de aguas urbanas. Se ha observado una creciente tendencia a contar con sistemas de tratamiento de aguas residuales descentralizados, que atienden establecimientos individuales o pequeños grupos de establecimientos. Permiten la recuperación de nutrientes y energía, el ahorro de agua dulce y garantizan el acceso al agua en tiempos de escasez. Se estima que estos tienen un costo de instalación que representa entre un 20 y 50% el valor de las plantas de tratamiento convencionales, y los costos operativos y de mantenimiento son aún más bajos (entre un 5 a 25% del valor de las plantas de tratamiento de lodos activados convencionales).

Los sistemas de alcantarillado de bajo costo son los preferidos en los barrios de todos los niveles económicos. Son distintos a los utilizados en los diseños de alcantarillado convencionales y se basan en el concepto de que el sistema transporta aguas residuales libres de sólidos. Estos sistemas son útiles para la organización comunitaria y son muy adecuados para la ampliación de los sistemas existentes o para conectar las comunidades satélites con los sistemas centralizados. También se han utilizado en campos de refugiados. Una de sus desventajas es que no sirven para el drenaje de aguas pluviales.

Los ecosistemas pueden resultar efectivos como servicios económicos de tratamiento de aguas residuales, siempre que se trate de ecosistemas sanos, la carga (y los tipos) de contaminantes presentes en los efluentes se regule sin exceder la capacidad de asimilación de contaminación del ecosistema.

### 3. La utilización de aguas residuales como fuente alternativa de agua

Por muchos siglos se han utilizado aguas residuales sin tratar o diluidas para el riego. Las aguas regeneradas también sirven como un suministro de agua sostenible y confiable para la industria y las municipalidades, especialmente porque cada vez más ciudades dependen de suministros lejanos y/o fuentes de agua alternativas para satisfacer la creciente demanda.

En general, la reutilización de agua es más viable desde el punto de vista económico si el punto de reutilización se encuentra cerca del punto de producción. Tratar el agua residual hasta alcanzar un nivel de calidad de agua apropiado para el usuario (es decir, tratamientos «adecuados para el fin específico») aumenta las posibilidades de recuperar costos. La utilización de aguas residuales es también una opción más competitiva si consideramos

que los precios del agua dulce también manifiestan los costos de oportunidad por su utilización y las tasas por contaminación reflejan los costos de eliminación de los contaminantes de los flujos de aguas residuales.

El uso planificado de aguas residuales tratadas, completa o parcialmente, para los servicios de los ecosistemas puede aumentar la eficiencia del recurso y generar beneficios para los ecosistemas al reducir las extracciones de agua dulce y reciclar y reutilizar los nutrientes, permitiendo así el desarrollo de la industria pesquera y otros ecosistemas acuáticos gracias a la reducción de la contaminación del agua y la recarga de acuíferos agotados.

#### 4. La recuperación de subproductos útiles

El vasto potencial de las aguas residuales como fuente de recursos, como energía y nutrientes, sigue siendo poco explotado.

Se puede recuperar energía, por ejemplo, para la generación de energía eléctrica, calefacción y refrigeración. Hoy en día existen las tecnologías que hacen posible la recuperación de energía *in situ* mediante procesos de tratamiento de lodos/biosólidos integrados en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Esto les permite pasar de ser grandes usuarios de energía a la neutralidad energética o, incluso, transformarse en productores netos de energía. La recuperación energética también puede ayudar a las instalaciones a reducir tanto costos operativos como su huella de carbono, lo cual permitiría mayores fuentes de ingresos mediante créditos de carbono y programas de comercio de emisiones de carbono. La recuperación combinada de nutrientes y energía también tiene gran potencial. La recuperación energética *ex situ* comprende la incineración de lodos en plantas centralizadas mediante procesos de tratamiento térmico.

Se registran avances en la creación de nuevas tecnologías para la recuperación de nitrógeno y fósforo de las aguas residuales o lodos. La recuperación de fósforo en instalaciones *in situ* como fosas sépticas y letrinas es posible tanto desde el punto de vista técnico como económico mediante la transformación de los residuos sépticos en fertilizante orgánico u orgánico-mineral. Por otra parte, los lodos fecales presentan un riesgo de contaminación química relativamente menor en comparación con los biosólidos de las aguas residuales.

Es probable que la recolección y utilización de orina sea un elemento de la gestión ecológica de aguas residuales cada vez más importante, ya que esta contiene el 88% de nitrógeno y el 66% del fósforo que se encuentran en los desechos humanos, ambos componentes esenciales para el crecimiento de las plantas. Como se prevé que en las próximas décadas los recursos minerales de fósforo sean escasos o, incluso, se agoten, una alternativa realista y viable sería la posibilidad de recuperarlo en las aguas residuales.

## Aguas residuales municipales y urbanas

La composición de las aguas residuales municipales puede variar notoriamente, lo cual refleja la gran diversidad de contaminantes liberados por las distintas fuentes domésticas, industriales, comerciales e institucionales. Las aguas residuales de fuentes domésticas en general están relativamente libres de sustancias peligrosas, si bien preocupa cada vez más la presencia de contaminantes emergentes, inclusive algunos medicamentos de uso común, que pueden tener efectos a largo plazo aun en concentraciones pequeñas.

El crecimiento acelerado de las ciudades presenta una cantidad de retos, entre ellos, un marcado aumento en la generación de aguas residuales municipales.

Sin embargo, este crecimiento también nos permite alejarnos de las antiguas (inadecuadas) prácticas de gestión hídrica y adoptar nuevos métodos innovadores como, por ejemplo, la utilización de aguas residuales tratadas y sus subproductos.

La generación de aguas residuales constituye uno de los principales desafíos que presenta el crecimiento de los asentamientos informales (barrios marginales) en los países en desarrollo. En 2012 se registró un número mayor de habitantes en los barrios marginales que en el año 2000, y es probable que esta tendencia persista en el futuro. Los habitantes de los barrios marginales generalmente tienen que utilizar sanitarios comunales que no están conectados a una red de saneamiento, espacios abiertos o recurren a eliminar las heces en bolsas de polietileno (es decir, inodoros voladores). Los sanitarios comunales no son muy utilizados por la falta de agua, mantenimiento y el costo que le implica al usuario. Poder encontrar un lugar adecuado para ir al baño resulta particularmente problemático para las mujeres, e implica riesgos en materia de seguridad personal e higiene y es un motivo de vergüenza.

## La industria

La toxicidad, movilidad y carga de los contaminantes industriales pueden tener consecuencias más graves en los recursos hídricos, la salud humana y el medio ambiente que los grandes volúmenes de aguas residuales en sí. Como primer paso, los niveles y toxicidad de la contaminación se deben mantener lo más bajos posibles, primero en el punto de origen, luego desde su concepción al diseño y durante las operaciones y el mantenimiento. Esto comprende la utilización de materias primas más ecológicas y productos químicos biodegradables, así como la capacitación y educación del personal para abordar aspectos relativos a la contaminación. El segundo paso es reciclar tanta agua como sea posible en la planta, para así minimizar los vertidos.

Las pequeñas y medianas empresas (PYMES) y las industrias informales comúnmente vierten sus aguas residuales en los sistemas municipales o, directamente, al medio ambiente. Las industrias que vierten aguas en los sistemas municipales o aguas superficiales deben cumplir con ciertas reglamentaciones de vertido para evitar multas, por lo tanto, en muchos casos es necesario hacer tratamientos en la planta al final del proceso, antes del vertido. Sin embargo, a veces las industrias consideran que es más económico pagar las multas que invertir en los tratamientos para cumplir con la reglamentación.

Una de las mejores oportunidades para el uso y reciclaje de las aguas residuales industriales es la cooperación entre plantas mediante la simbiosis industrial. Esto se observa claramente en los parques ecoindustriales, donde se instala una compañía al lado de la otra para aprovechar los flujos de aguas residuales y el reciclaje de agua y subproductos. Para las PYMES, esto puede implicar grandes ahorros en el tratamiento de aguas residuales.

## Agricultura

En los últimos cincuenta años, la superficie equipada para el riego aumentó más del 100%, el inventario total de ganado se triplicó y la acuicultura continental se multiplicó por veinte. La contaminación del agua por la actividad agrícola ocurre cuando se aplica una cantidad mayor de fertilizantes (nutrientes), y otros productos agroquímicos, que la que las cosechas pueden absorber o cuando estos son arrastrados. Los sistemas de riego eficientes pueden ayudar a reducir en gran medida la pérdida tanto de agua como de fertilizantes. La producción de ganado y la acuicultura también generan la liberación de nutrientes.

La agricultura, además, puede ser fuente de otros tipos de contaminantes, entre ellos, materia orgánica, patógenos, metales y contaminantes emergentes. En los últimos 20 años, surgieron nuevos contaminantes agrícolas, como los antibióticos, vacunas, promotores del crecimiento y hormonas, todos los cuales pueden ser liberados por explotaciones ganaderas y acuícolas.

Si se tratan adecuadamente y se utilizan en forma segura, las aguas residuales domésticas constituyen una valiosa fuente tanto de agua como de nutrientes. Además de fomentar la seguridad alimentaria, la reutilización del agua en la agricultura puede generar grandes beneficios para la salud, entre ellos, un mayor valor nutricional. El uso de las aguas residuales municipales es una práctica habitual en países del Oriente Medio y África Septentrional, Australia y el Mediterráneo, así como también en China y los Estados Unidos. Esta práctica ha tenido más éxito en zonas urbanas y periurbanas, donde hay una gran disponibilidad de aguas residuales, por lo general, sin costo alguno y donde hay una mayor demanda de productos agrícolas.

## Perspectivas regionales

Uno de los principales retos con respecto a las aguas residuales en África es la falta generalizada de infraestructura para la recolección y tratamiento. Esto genera la contaminación de los recursos de aguas superficiales y subterráneas, de por sí escasos. Las ciudades africanas crecen rápidamente, y sus sistemas actuales de gestión hídrica no pueden acompañar la creciente demanda. Sin embargo, esta situación presenta nuevas oportunidades para mejorar la gestión de aguas residuales urbanas por medio de tecnologías multipropósito para la reutilización del agua y la recuperación de subproductos útiles. Se necesita una fuerte campaña de promoción para convencer a los formuladores de políticas del alto «costo de la inacción» en términos de desarrollo socioeconómico, la calidad del medio ambiente y la salud humana.

El uso de aguas residuales tratadas de forma segura es ahora una herramienta que se utiliza para aumentar la disponibilidad de agua en muchos Estados árabes, y se ha contemplado como elemento fundamental de la planificación de la gestión de recursos hídricos. En 2013, se trató el 71% de las aguas residuales recolectadas en los Estados árabes en forma segura y de este porcentaje un 21% se utiliza, en su mayoría, para actividades de riego y recarga de acuíferos. La gestión integrada de los recursos hídricos y los planteamientos de nexos que contemplen los vínculos entre el agua, la energía, los alimentos y el cambio climático permiten crear un marco para analizar las alternativas posibles para lograr una mejor recolección, transferencia, tratamiento y uso de las aguas residuales en la región árabe desde una perspectiva de seguridad hídrica.

Los subproductos de las aguas residuales como las sales, nitrógeno y fósforo, tienen valor económico potencial que puede utilizarse para mejorar los medios de subsistencia de las personas en la región de Asia y el Pacífico. Algunos estudios de caso del Asia Sudoriental han demostrado que los ingresos generados por los subproductos de aguas residuales, como los fertilizantes, son mucho más elevados que los costos operativos de los sistemas de aguas residuales que generan dichos subproductos. Esto demuestra que la recuperación de recursos de las aguas residuales es un modelo de negocios viable y rentable. Se necesita trabajar más en la región para respaldar a los gobiernos municipales y locales en la gestión de aguas residuales urbanas y la captación de los beneficios del recurso.

El porcentaje de acceso a instalaciones de saneamiento mejoradas en Europa y América del Norte es relativamente alto (95%) y los niveles de tratamiento de aguas residuales mejoraron en los últimos 15 a 20 años. Si bien la disponibilidad de tratamientos terciarios mejoró en forma gradual, todavía se recolectan grandes

volúmenes de aguas residuales que luego se vierten sin tratar, especialmente en Europa Oriental. Los cambios económicos y demográficos llevaron a que algunos de los grandes sistemas centralizados hayan perdido su eficacia, lo que queda claro al observar muchos de los sistemas voluminosos y mal adaptados que subsisten en partes de la ex Unión Soviética. Muchas ciudades en toda la región enfrentan la carga económica que implica reparar o reemplazar infraestructuras envejecidas.

La tasa de cobertura de los tratamientos de aguas residuales urbanas en América Latina y el Caribe prácticamente se duplicó desde fines de la década de 1990 y se estima que alcanzó entre un 20% y 30% de las aguas residuales recolectadas en los sistemas de alcantarillado urbano. Esta mejora se atribuye principalmente a una mayor cobertura de los servicios hídricos y de saneamiento, una mejor situación económica de los prestadores de servicios (que en los últimos años han mejorado sustancialmente la recuperación de costos) y al gran crecimiento socioeconómico de la región en la última década. La integración de las economías regionales a los mercados globales también ha sido un factor determinante. Las aguas residuales tratadas pueden ser una fuente importante de abastecimiento de agua para algunas ciudades, en especial aquellas que se encuentran en zonas áridas (como Lima) o donde sea necesario recorrer grandes distancias para satisfacer la creciente demanda, particularmente en las épocas de sequía (por ejemplo, en San Pablo).

## La creación de un entorno propicio para el cambio

La mejora de los tratamientos de aguas residuales, una mayor reutilización y la recuperación de los subproductos son factores que fomentan la transición hacia una economía circular, al permitir reducir las extracciones de agua y la pérdida de recursos en los sistemas de producción y las actividades económicas.

### Marcos jurídicos y regulatorios adecuados

Para lograr un marco regulatorio eficaz es indispensable que la autoridad a cargo tenga los conocimientos técnicos y de gestión adecuados, que actúe en forma independiente y que posea las facultades necesarias para ejecutar normas y lineamientos. La transparencia y la disponibilidad de acceso a la información fomentan el cumplimiento, ya que generan confianza en los usuarios con respecto a los procesos de aplicación y fiscalización. Para progresar será necesario adoptar un enfoque flexible y progresivo.

Las políticas y medidas regulatorias se adoptan a nivel local y es necesario que puedan adaptarse a circunstancias de todo tipo. Será importante, por lo tanto, que se

brinde apoyo político, institucional y económico a las iniciativas que abordan perspectivas que van desde el nivel inferior hasta el superior («bottom-up») y a la prestación de servicios de gestión de aguas residuales locales de pequeña escala (es decir, descentralizados).

También se necesitan nuevas reglamentaciones en materia de reutilización de agua y recuperación de subproductos de las aguas residuales. Por lo general no existe legislación, o es muy escasa, sobre las normas de calidad para estos productos, lo que fomenta la incertidumbre en el mercado en detrimento de la inversión. Se podrían utilizar incentivos económicos o legales para estimular el mercado de estos productos (por ejemplo, la mezcla obligatoria de fosfatos recuperados en fertilizantes artificiales).

### Recuperación de costos y mecanismos de financiamiento adecuados

La gestión de aguas residuales y el saneamiento se consideran generalmente actividades costosas y con un uso intensivo de capital. Esto es así sobre todo en los grandes sistemas centralizados, que exigen el desembolso de grandes sumas de capital por adelantado y tienen costos de operación y mantenimiento elevados en el mediano y largo plazo para evitar que se deterioren rápidamente. Además, el problema se agrava por la escasez crónica de fondos, que no permite invertir en el desarrollo de recursos institucionales y humanos. Sin embargo, los costos de una inversión inadecuada en la gestión de aguas residuales son aún más elevados, especialmente si tomamos en cuenta los daños directos e indirectos a la salud, el desarrollo socioeconómico y el medio ambiente.

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales descentralizados pueden utilizarse para compensar algunos de los problemas económicos causados por los sistemas centralizados. Estas tecnologías de bajo costo, si son correctamente diseñadas y aplicadas, generan buenos resultados en la calidad de los efluentes, si bien también necesitan determinados niveles de operación y mantenimiento para evitar fallas en el sistema.

La utilización de aguas residuales puede generar nuevas fuentes de ingresos para la gestión de tratamiento de las mismas, especialmente en aquellas situaciones donde la escasez de agua es recurrente o crónica. Se han aplicado distintos modelos de negocios en los cuales la recuperación de costos y valor representan una notoria ventaja desde el punto de vista económico. Sin embargo, los ingresos por la venta de las aguas residuales tratadas en sí mismos no son suficientes para cubrir los costos operativos y de mantenimiento de la planta de tratamiento. La recuperación de nutrientes (principalmente fósforo y nitrógeno) y energía puede agregar nuevas fuentes de ingreso importantes que permitirían mejorar en materia de recuperación de costos.



Si bien los ingresos generados por la utilización de aguas residuales y la recuperación de recursos pueden no siempre cubrir los costos adicionales, los beneficios de invertir en iniciativas de reutilización del agua podrían compararse con los costos de represas, desalinización y transferencias entre cuencas, entre otras opciones que aumentan la disponibilidad hídrica.

El agua potable es todavía un recurso infravalorado, incluso aunque se encuentre disponible desde el grifo, y con precios menores a los que deberían fijarse si consideramos el costo total del servicio. Las aguas residuales tratadas deberán tener un precio menor al del agua potable para que la ciudadanía las acepte. Si fijamos el precio del agua, de todas las fuentes, en un monto que refleje de manera más fidedigna los costos reales, lograremos inversiones que se traduzcan en la prestación de servicios asequibles para todos los miembros de la sociedad, incluidos los sectores de menos ingresos.

### **Minimizar los riesgos para las personas y el medio ambiente**

El vertido de aguas residuales no tratadas puede tener efectos sumamente nocivos para la salud humana y el medio ambiente, incluyendo brotes de enfermedades transmitidas por vectores, el agua y los alimentos, así como la contaminación y pérdida de la diversidad biológica y servicios de los ecosistemas. La exposición de los grupos vulnerables, en especial mujeres y niños, a aguas residuales no tratadas o tratadas en forma parcial requiere de nuestra especial atención. La falta de información sobre los riesgos para la salud asociados al uso de aguas residuales, ya sea por falta de educación o por vivir en condiciones de pobreza, contribuye a su existencia, especialmente en los países en desarrollo. En aquellos casos donde consideremos que la exposición humana es más factible (por ejemplo, por alimentos o contacto directo) será necesario contar con medidas de gestión más estrictas.

### **Creación de conocimiento y capacidades**

La disponibilidad de información y datos en materia de generación de aguas residuales, tratamiento y utilización será fundamental para los formuladores de políticas, investigadores, médicos e instituciones públicas, para elaborar planes de acción nacionales y locales que protejan el medio ambiente y garanticen la utilización segura y productiva de las aguas residuales. Los datos sobre los volúmenes o, incluso más importante, los componentes de las aguas residuales son herramientas fundamentales para proteger la salud y seguridad humana y del medio ambiente. Sin embargo, nos encontramos ante una falta constante de información sobre casi todos los aspectos en materia de calidad del agua y gestión de aguas residuales, especialmente en los países en desarrollo.

Los países desarrollados deben transferir tecnologías adecuadas y asequibles, ya sean nuevas o consolidadas, a los países en vías de desarrollo. Es necesario llevar adelante iniciativas de investigación para comprender cabalmente las dinámicas de los contaminantes emergentes y mejorar los métodos para eliminarlos de las aguas residuales. También es fundamental entender qué impacto tienen los factores externos, como el cambio climático, en la gestión de aguas residuales.

Para mejorar la gestión de aguas residuales será indispensable poder contar con los recursos humanos adecuados. Por lo general, la gestión de aguas residuales tiene insuficiencias en materia de capacidades organizacionales e institucionales, por lo tanto, toda inversión implica riesgos, sean sistemas centralizados de gestión de agua residuales de gran escala o sistemas *in situ* de menor porte.

### **Conciencia pública y aprobación social**

Aunque un proyecto para la utilización de aguas residuales esté bien diseñado, parezca factible desde el punto de vista económico y haya incorporado las medidas de seguridad indicadas, toda iniciativa para la reutilización del agua puede fallar si sus creadores no contemplan las vicisitudes de la aprobación social. En general, el uso de aguas residuales tiene gran oposición de la ciudadanía por falta de información y de confianza con respecto a los posibles riesgos para la salud humana. La sensibilización de la población y la educación serán las principales herramientas a utilizar para sobreponerse a los obstáculos sociales, culturales y a aquellos relacionados con los consumidores. Estas campañas de sensibilización tienen que personalizarse de acuerdo con las diferencias culturales, religiosas y contextos de los consumidores.

Para obtener la aprobación pública y maximizar los beneficios del uso de aguas residuales y al mismo tiempo reducir los efectos negativos, será necesario evaluar, gestionar, dar seguimiento e informar en forma constante sobre los riesgos para la salud de la reutilización del agua. En el caso del agua para consumo (es decir, la reutilización de agua potable), se necesitarán grandes campañas informativas para que las personas confíen lo suficiente en el sistema para superar el llamado «factor de asco».

### **Coda**

En un mundo donde la demanda de agua dulce aumenta de forma permanente y los escasos recursos hídricos se ven cada vez más exigidos por la captación excesiva, la contaminación y el cambio climático, sería sencillamente impensable no aprovechar las oportunidades derivadas de una mejor gestión de las aguas residuales.



# PRÓLOGO

WWAP | Stefan Uhlenbrook, Angela Renata Cordeiro Ortigara y Richard Connor

Con los aportes de: Sara Marjani Zadeh (FAO)

## ESTADO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS: DISPONIBILIDAD Y CALIDAD

Recolección de agua de un río en Bor (Sudán del Sur)



En el prólogo se brinda un breve resumen de dos aspectos fundamentales del estado de los recursos hídricos del mundo que están directamente relacionados con las aguas residuales: la disponibilidad de agua y la calidad del agua ambiente. Si bien las aguas residuales tratadas adecuadamente son un recurso que puede utilizarse para abordar la escasez de suministro de agua, el nivel de tratamiento de aguas residuales afecta directamente la calidad del agua ambiente, con consecuencias en la disponibilidad de agua. Se describen los factores externos que dictarán las tendencias futuras en cuanto a la disponibilidad y la calidad del agua, con especial énfasis en la dinámica demográfica y el cambio climático.

## Generación y tratamiento de aguas residuales a nivel mundial

Aunque los datos sobre la generación, la recolección y el tratamiento de aguas residuales son prácticamente inexistentes, es evidente que, en todo el mundo, la mayor parte de las aguas residuales no se recoge ni se trata. Además, la recolección de aguas residuales *per se* no es sinónimo de tratamiento de aguas residuales. En muchos casos, las aguas residuales recolectadas se liberan directamente en el medio ambiente sin ningún tratamiento. La escorrentía agrícola casi nunca es recolectada o tratada, de modo que las métricas para estos tipos de flujos de aguas residuales son prácticamente inexistentes.

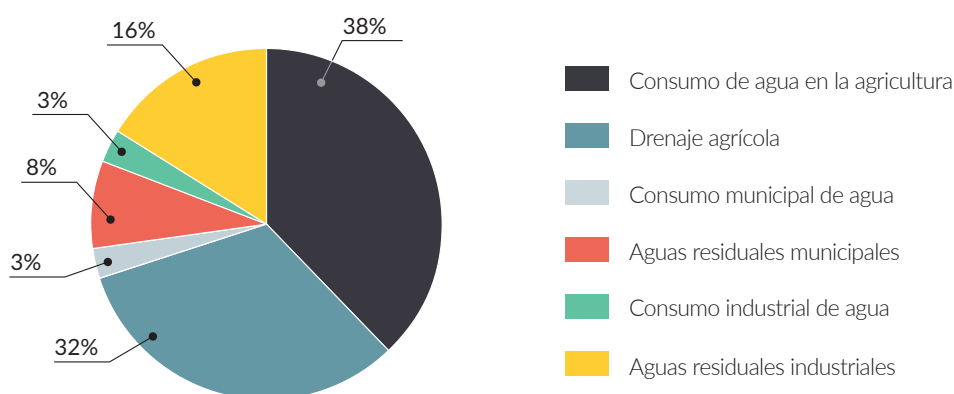
La base de datos AQUASTAT de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) considera que las extracciones de agua dulce a nivel mundial son de 3.928 km<sup>3</sup> al año. Se estima que principalmente la agricultura, mediante evaporación en tierras de cultivo irrigadas, consume el 44% (1.716 km<sup>3</sup> por año) de esta agua. El 56% restante (2.212 km<sup>3</sup> por año) es liberado al medio ambiente como aguas residuales en forma de efluentes municipales e industriales y agua de drenaje agrícola (ver Figura 1).

El nivel de tratamiento de aguas residuales industriales y municipales de un país es generalmente un reflejo de su nivel de ingresos. En promedio, los países de ingresos altos tratan cerca del 70% de las aguas residuales que generan, mientras que esa proporción cae al 38% en los países de ingresos medios-altos y al 28% en los países de ingresos medios-bajos. En países de bajos ingresos, solo el 8% de las aguas residuales industriales y municipales se someten a algún tipo de tratamiento (Sato *et al.*, 2013). Esto exacerba la situación de los pobres, en particular en los barrios marginales, que a menudo están expuestos directamente a las aguas residuales debido a la falta de servicios de saneamiento y agua.

Estos cálculos apoyan la estimación citada a menudo que, a nivel mundial, es probable que más del 80% de las aguas residuales se liberen al medio ambiente sin un tratamiento adecuado (WWAP, 2012; ONU Agua 2015a).

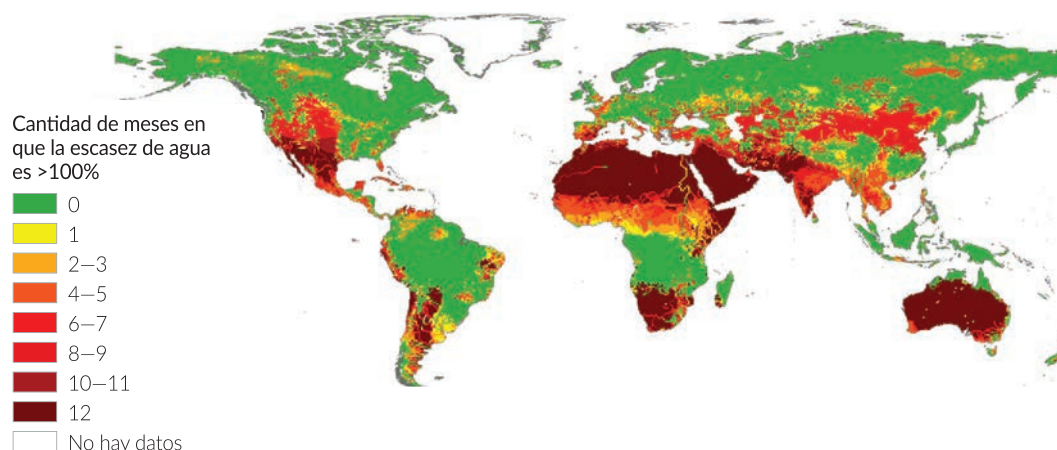
También parece haber una variabilidad significativa entre diferentes regiones. En Europa, se trata el 71% de las aguas residuales municipales e industriales generadas, mientras que en los países de América Latina solo se trata el 20%. Se estima que en Oriente Medio y África del Norte (MENA) un 51% de las aguas residuales municipales e

**Figura 1** Destino de las extracciones de agua dulce: Consumo y generación de aguas residuales a nivel mundial por sector principal de uso de agua (Circa, 2010)



Fuente: Basado en datos de AQUASTAT (n.d.a.); Mateo-Sagasta *et al.* (2015); Shiklomanov (1999).  
Aportados por Sara Marjani Zadeh (FAO).

**Figura 2** Cantidad de meses por año en que el volumen de agua superficial y subterránea que se extrae y no se devuelve excede 1.0 a 30 x 30 arco de resolución mínima (1996-2005)\*



\*Promedio trimestral de la escasez mensual de agua azul a 30 x 30 arco de resolución mínima. La escasez de agua a nivel de la cuadrícula se define como la relación de la huella del agua azul dentro de la cuadrícula con la suma del agua azul generada dentro de la célula y la entrada de agua azul de las células aguas arriba. Período: 1996-2005.

Fuente: Mekonnen y Hoekstra (2016, Fig. 3, p. 3).

industriales son tratadas. En los países africanos, la falta de recursos financieros para el establecimiento de instalaciones de aguas residuales constituye una limitación importante en la gestión de las aguas residuales, mientras que 32 de los 48 países de África subsahariana no disponían de datos sobre la generación y el tratamiento de aguas residuales (Sato *et al.*, 2013).

El tratamiento de las aguas residuales y su uso y/o eliminación en las regiones húmedas de los países de altos ingresos (por ejemplo, América del Norte, Europa septentrional y Japón) están motivados por estrictas regulaciones de descarga de efluentes y la conciencia pública sobre la calidad ambiental.

La situación es diferente en los países de altos ingresos en regiones más secas (por ejemplo, partes de América del Norte, Australia, Oriente Medio y el sur de Europa), donde las aguas residuales tratadas se usan con frecuencia para riego dada la creciente competencia por el agua entre la agricultura y otros sectores.

La expansión constante del alcantarillado y los consiguientes aumentos en el volumen de aguas residuales generan presión sobre las instalaciones de tratamiento existentes y, en algunos casos, pueden conducir a un rendimiento deficiente.

Incluso, cuando las aguas residuales son recolectadas y tratadas, la calidad final de las aguas residuales descargadas puede verse afectada por mal funcionamiento y mantenimiento, así como por desbordamiento durante tormentas, cuando se permite que las aguas residuales eviten la planta de tratamiento. Así, gran parte de las aguas residuales

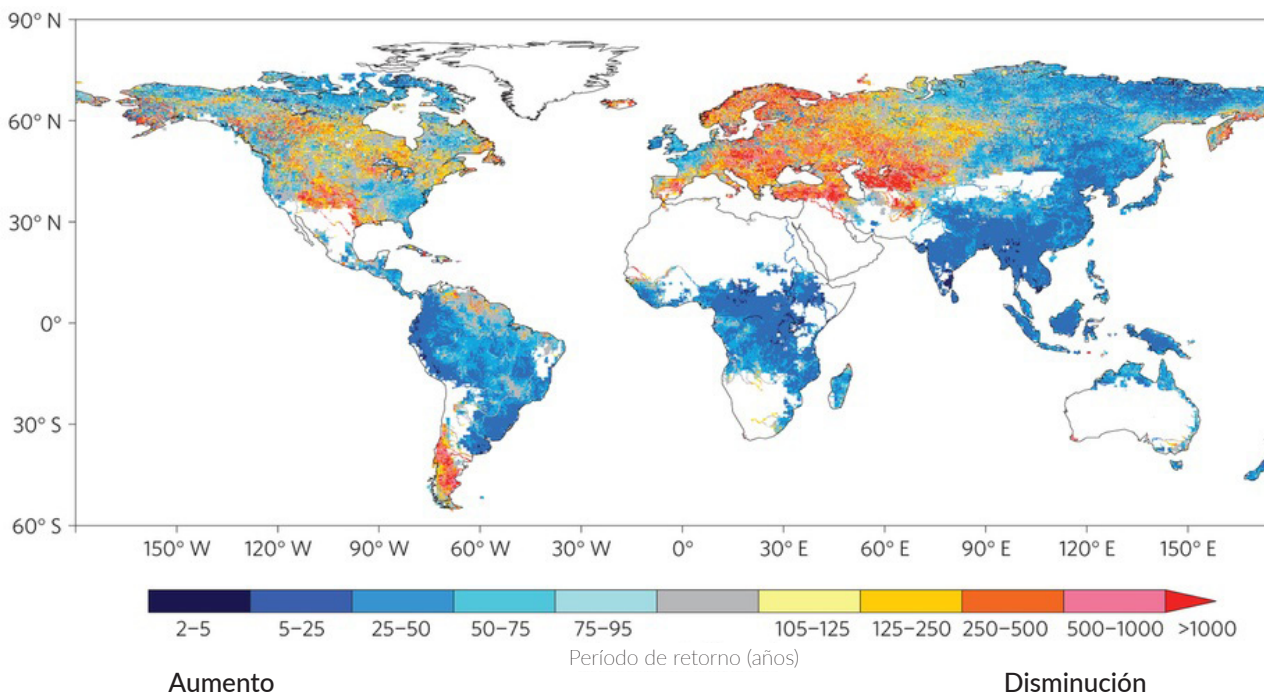
no se tratan (o no se tratan adecuadamente) y se descargan en masas de agua y, posteriormente, afectan la calidad del agua (y su disponibilidad) para los usuarios aguas abajo.

## Disponibilidad de agua a nivel mundial - Escasez cada vez más severa año a año

Los recursos hídricos (aguas superficiales y subterráneas) se renuevan en el ciclo continuo de evaporación, precipitación y escorrentía. El ciclo del agua es impulsado por fuerzas mundiales y climáticas que introducen variabilidad en la precipitación y la evaporación, lo que a su vez define los patrones de escorrentía y de disponibilidad de agua en el espacio y el tiempo (modulados por almacenamiento natural y artificial). Las observaciones durante las últimas décadas y las proyecciones de los escenarios de cambio climático apuntan hacia una exacerbación de las variaciones espaciales y temporales de la dinámica del ciclo del agua (*cf.* IPCC, 2013). Como resultado, las discrepancias en el suministro y la demanda de agua se agravan cada vez más.

En estudios recientes se ha demostrado que dos tercios de la población mundial vive actualmente en zonas con escasez de agua durante al menos un mes al año (ver Figura 2). Cabe destacar que alrededor del 50% de las personas que enfrentan este nivel de escasez de agua vive en China e India. Esta evaluación mensual de la escasez de agua es esencial, ya que el estrés hídrico como consecuencia de períodos secos puede estar enmascarado con los promedios anuales de disponibilidad de agua. Las evaluaciones basadas

**Figura 3** Cambios pronosticados en la frecuencia de inundaciones\*



\* Ilustrado como el cambio del período de retorno de una inundación de 100 años. Las simulaciones muestran la mediana de los resultados de 11 Modelos de Circulación Mundial (MCG) en el escenario futuro RCP 8.5 y se compara la diferencia entre los periodos 2071-2100 y 1971-2000.

Fuente: Hirabayashi et al. (2013, Fig. 1a).

Reimpreso con autorización de Macmillan Publishers Ltd: Nature Climate Change, © 2013

en la cuadrícula, como se muestra en la Figura 2, pueden agregarse fácilmente a la escala del país y proporcionar más información sobre la variabilidad dentro del país. Los números promedio pueden ser engañosos, particularmente en países con distintas variaciones espaciales de recursos hídricos y usos como, por ejemplo, Australia, Brasil, Chile, Rusia y los Estados Unidos.

Alrededor de 500 millones de personas viven en zonas donde el consumo de agua supera los recursos hídricos renovables locales en una relación de dos a uno (Mekonnen and Hoekstra, 2016). Esto incluye partes de la India, China, la región mediterránea y Oriente Medio, Asia Central, partes áridas de África subsahariana, Australia, el centro y oeste de América del Sur y el centro y oeste de América del Norte. Algunas zonas donde los recursos no renovables (esto es, las aguas subterráneas fósiles, nunca una fuente sostenible) continúan disminuyendo, se han vuelto extremadamente vulnerables y dependen de las transferencias de agua de áreas con abundante agua.

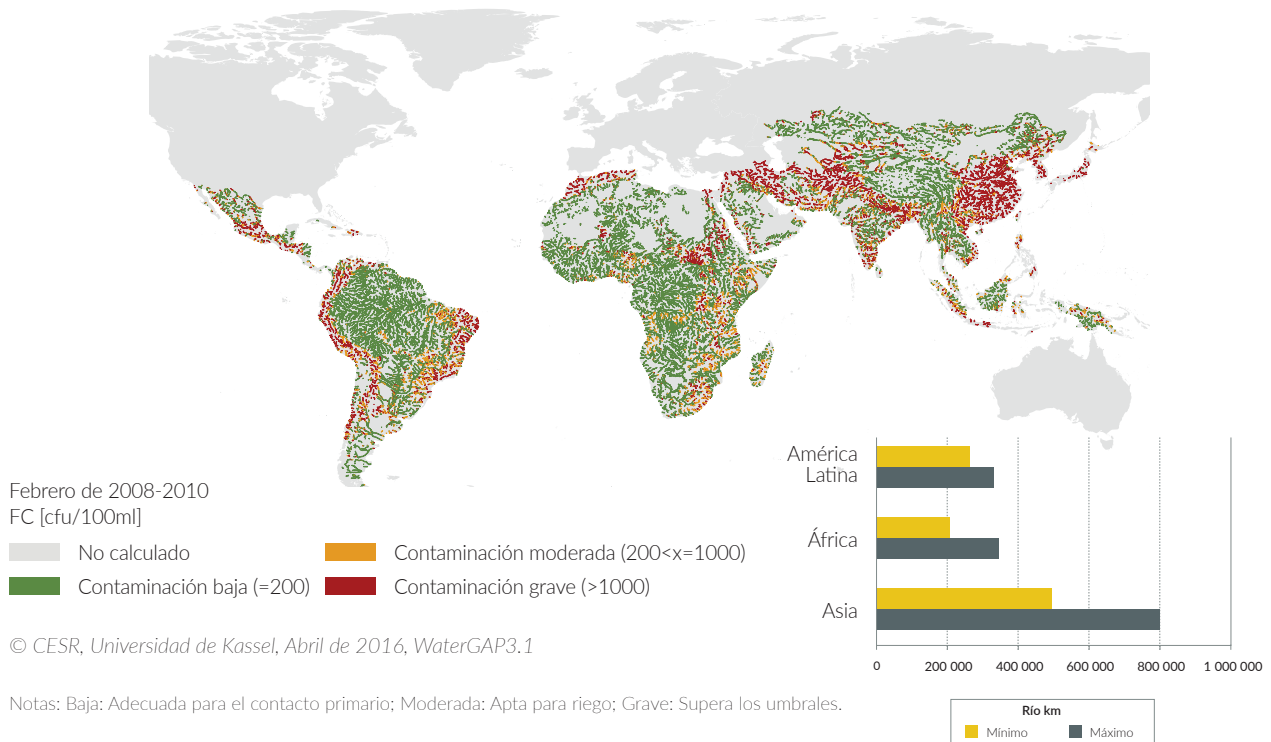
Si bien las inundaciones y las sequías son un fenómeno natural y una parte de la dinámica espacio-temporal variable del ciclo del agua, la frecuencia y la gravedad de las inundaciones y las sequías han cambiado en muchas cuencas fluviales en todo el mundo, a

menudo por una combinación de cambio climático y actividades humanas. Los cambios en el uso de la tierra, incluida la urbanización, la canalización de los ríos y otras actividades humanas, modifican la capacidad de almacenamiento de las cuencas hidrográficas y afectan los flujos elevados, así como la recarga de los acuíferos y los estiajes. Los cambios en la capacidad de almacenamiento y los procesos de generación de escorrentía pueden aumentar la ocurrencia de desastres relacionados con el agua. Es probable que las frecuencias de las inundaciones (Hirabayashi et al., 2013) y las sequías (IPCC, 2013) cambien con el aumento de las temperaturas. Los resultados de un conjunto de proyecciones (ver Figura 3) muestran un gran aumento en la frecuencia de las inundaciones (representado por las áreas azules, donde aumentaría la frecuencia de eventos que ahora se consideran inundaciones de 100 años) en muchas áreas, incluidas la India, el sudeste asiático y África Central y Oriental, mientras que en otras áreas disminuye la frecuencia de inundaciones pronosticadas (representadas por las zonas amarillas/rojas).

Tener agua en exceso (inundaciones) o en cantidades insuficientes (sequías), a menudo acompañada de agua demasiado sucia (concentraciones de contaminación más altas en ambos extremos), hacen aún mayor la necesidad de usar aguas residuales.



**Figura 4** Estimación de las concentraciones de bacterias coliformes fecales (CF) en los cursos de agua en África, Asia y América Latina (febrero de 2008-2010)\*



© CESR, Universidad de Kassel, Abril de 2016, WaterGAP3.1

Notas: Baja: Adecuada para el contacto primario; Moderada: Apta para riego; Grave: Supera los umbrales.

\* El gráfico de barras muestra las estimaciones mensuales mínimas y máximas de tramos de ríos en la categoría de contaminación grave por continente en el periodo de 2008 a 2010

Fuente: PNUMA (2016, Fig. 3.3, p. 20).

Los costos económicos derivados de las crecidas de los ríos en todo el mundo podrían aumentar veinte veces para finales del siglo XXI si no se adoptan nuevas medidas para reducir los riesgos de inundaciones. Más del 70% de este aumento puede atribuirse al crecimiento económico de las zonas propensas a inundaciones, además del cambio climático (Winsemius *et al.*, 2016). La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE, 2015a) cita escenarios climáticos basados en la modelización llevada a cabo por Winsemius y Ward (2015), que demuestra que los daños causados por las inundaciones en las zonas urbanas podrían llegar a USD 0.7-1.8 billones al año para 2080.

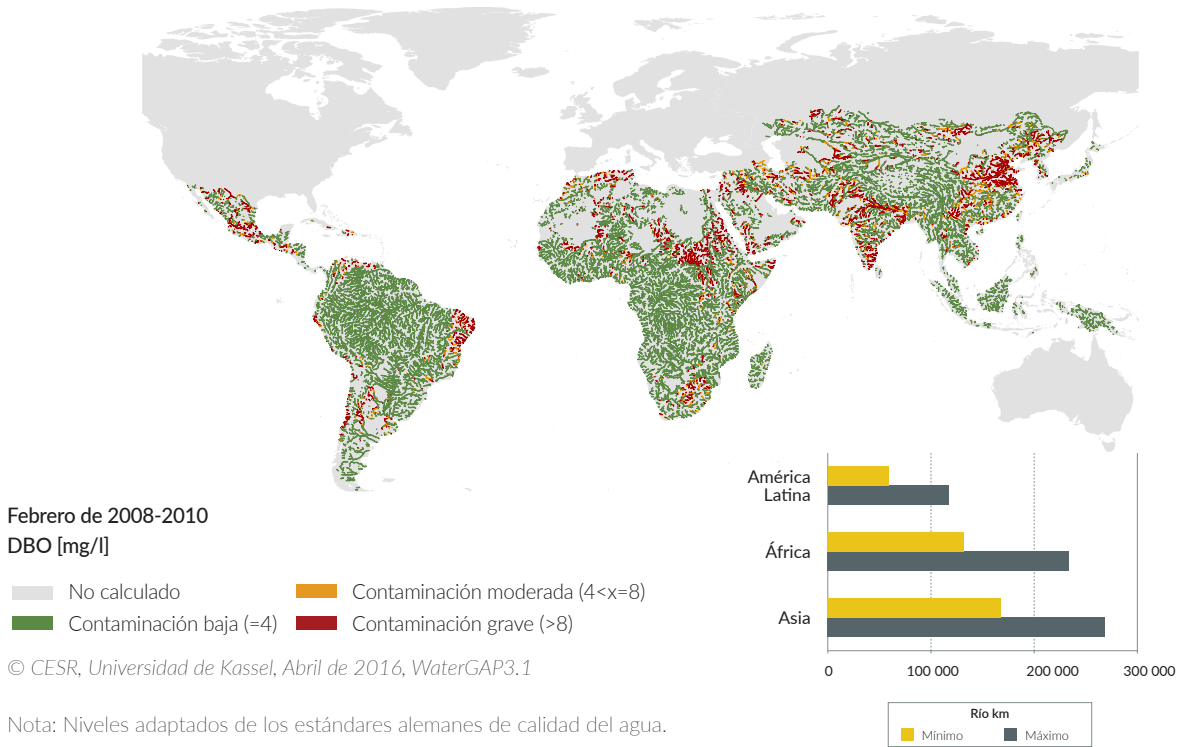
A nivel mundial, la sequía es probablemente la mayor amenaza del cambio climático pero, a nivel local, el aumento del nivel del mar (que afecta las zonas costeras) u otras amenazas podrían ser mayores (por ejemplo, áreas que son extremadamente vulnerables a inundaciones o deslizamientos de tierra). Desde una perspectiva socioeconómica y ambiental, las consecuencias de la sequía pueden ser notorias. Sus efectos van desde una menor productividad agrícola y alteraciones en el funcionamiento de los ecosistemas hasta el aumento de los precios de los alimentos, mientras que la inseguridad y el hambre pueden

desencadenar una migración masiva. La crisis en Siria se desencadenó, entre otros factores, debido a una sequía histórica entre 2007 y 2010.

Se registraron muy pocas lluvias invernales (en parte debido al cambio climático), lo que hizo imposible la agricultura en un 60% de las tierras agrícolas, a pesar de los conocimientos y la tecnología disponibles. Los medios de subsistencia de miles de agricultores se vieron afectados, lo que llevó a una migración desde las zonas rurales hacia los centros urbanos, acompañada de un aumento de la dependencia de las importaciones de alimentos y a precios más caros de los alimentos, asentamientos informales, desempleo y disturbios sociales. En consecuencia, se inició un movimiento migratorio a gran escala provocado por la guerra civil, entre otras razones (Kelley *et al.*, 2015). Algunas de las medidas para aumentar la resiliencia a las sequías incluyen la aceptación de aguas residuales como una fuente confiable de agua para la agricultura y muchos otros usos.

Se prevé que la demanda mundial de agua aumente sensiblemente en las próximas décadas. Además de la demanda del sector agrícola, que actualmente es responsable del 70% de las captaciones de agua en todo el mundo, se prevén grandes aumentos para la

**Figura 5** Estimación de las concentraciones de demanda bioquímica de oxígenos (DBO) en los cursos de agua en África, Asia y América Latina (febrero de 2008-2010)\*



\* El gráfico de barras muestra las estimaciones mensuales mínimas y máximas de tramos de ríos en la categoría de contaminación grave por continente en el período de 2008 a 2010.

Fuente: PNUMA (2016, Fig. 3.13, p. 33).

industria y la producción de energía (WWAP, 2015). El cambio en los patrones de consumo, lo que incluye cambiar las dietas hacia alimentos que requieren grandes cantidades de agua, como la carne (es decir, se necesitan 15.000 litros de agua para 1 kg de carne vacuna) empeorará la situación. Por lo tanto, no debe sorprender que el Foro Económico Mundial (WEF, por sus siglas en inglés) haya evaluado consecutivamente la crisis del agua como uno de los principales riesgos mundiales en los últimos cinco años. En 2016 se determinó que la crisis del agua será el riesgo mundial más preocupante para las personas y las economías en los próximos diez años (WEF, 2016).

## Calidad del agua ambiente<sup>1</sup>

La disponibilidad de recursos hídricos está intrínsecamente ligada a la calidad del agua. La contaminación de las aguas superficiales y subterráneas puede hacer imposible su utilización ante la ausencia de tratamientos previos costosos. Se

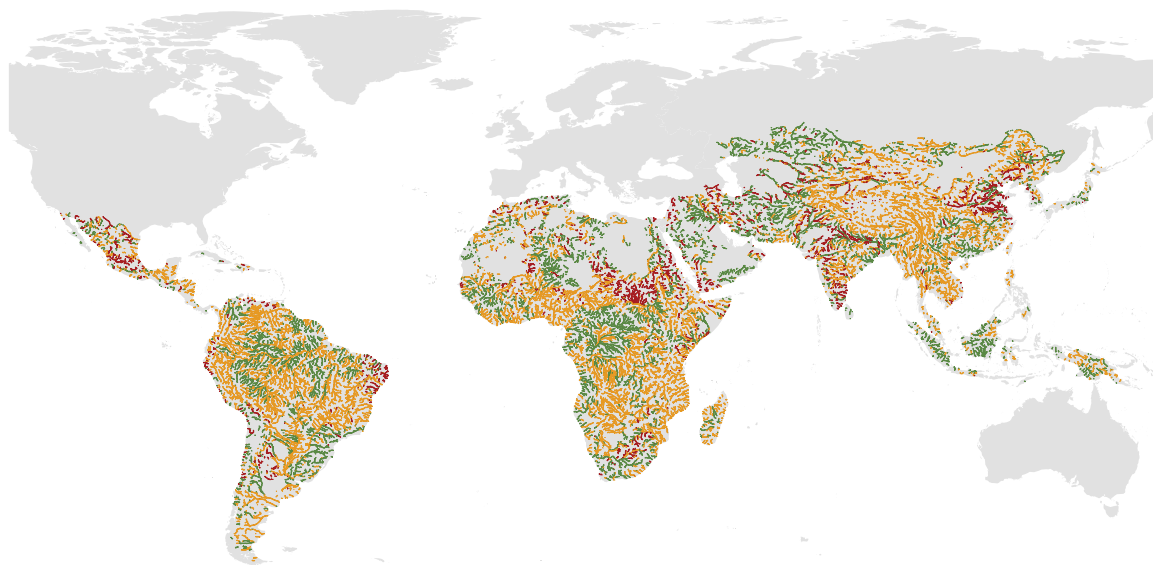
prevé que el deterioro de la calidad del agua aumente aún más en las próximas décadas, especialmente en los países con pocos recursos en las zonas secas, lo que pondrá aún más en peligro la salud humana y el medio ambiente, al tiempo que limitará el desarrollo económico sostenible (Veolia/IFPRI, 2015). La descarga de aguas residuales no tratadas como consecuencia de la expansión de los asentamientos humanos y el aumento de la producción industrial genera contaminación física, química y biológica que afecta tanto la salud humana como el medio ambiente.

La presencia de coliformes fecales, que se originan en excrementos humanos y animales, se utiliza como indicador de la presencia de cualquier patógeno potencial en las aguas superficiales. Los primeros hallazgos del programa mundial de monitoreo de la calidad del agua muestran que la contaminación grave de patógenos afecta a alrededor de un tercio de todos los tramos fluviales en África, Asia y América Latina (ver Figura 4), lo que pone en riesgo la salud de millones de personas (PNUMA, 2016). Aunque la cobertura de saneamiento ha aumentado y los niveles de tratamiento han mejorado en algunos países (UNICEF/OMS, 2015), estas mejoras deben realizarse simultáneamente para evitar el aumento de las cargas de contaminantes. Esto podría explicar,

<sup>1</sup> Esta sección se basa en gran medida en el informe «Snapshot» (PNUMA, 2016), que ofrece una visión general exhaustiva de la calidad actual del agua.



**Figura 6** Tendencia de las concentraciones de DBO en los ríos entre 1990-1992 y 2008-2010\*



#### Tendencia de la concentración de BOD en de los cursos de agua

■ No calculado	■ Tendencia creciente
■ No creciente	■ Tendencia creciente de especial preocupación

© CESR, Universidad de Kassel, Abril de 2016, WaterGAP3.1

\* Los tramos de los ríos marcados con naranja o rojo tienen concentraciones crecientes entre estos dos períodos. Los tramos de los ríos marcados con rojo tienen una «tendencia creciente de especial preocupación», lo que significa que en estos tramos el nivel de contaminación aumentó y pasó a la categoría de contaminación grave entre 2008 y 2010, o que ya estaba en la categoría de contaminación grave entre 1990 y 1992 y aumentó aún más su concentración en el período 2008-2010.

Fuente: PNUMA (2016, Fig. 3.15, p. 34).

**A nivel mundial, es probable que más del 80% de las aguas residuales sean vertidas al medio ambiente sin un tratamiento adecuado**

probablemente, el aumento de las cargas de bacterias coliformes fecales (CF) observadas en África, Asia y América Latina en las últimas dos décadas.

A nivel mundial, es probable que más del 80% de las aguas residuales sean vertidas al medio ambiente sin un tratamiento adecuado y los medios de subsistencia, afectando peligrosamente a las comunidades rurales pobres que dependen de la pesca de agua dulce. La grave contaminación orgánica ya afecta a alrededor de un séptimo de todos los tramos de los ríos en África, Asia y América Latina (ver Figura 5), y ha ido aumentando constantemente durante años (ver Figura 6) (PNUMA,

2016). La contaminación orgánica (medida en términos de demanda bioquímica de oxígeno - DBO) puede tener impactos significativos en la pesca en aguas interiores, la seguridad alimentaria y los medios de subsistencia, afectando gravemente a las comunidades rurales pobres que dependen de la pesca de agua dulce.

El vertido de nutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio) y agroquímicos procedentes de la agricultura intensiva y de los desechos animales puede acelerar aún más la eutrofización de los ecosistemas marinos de agua dulce y costera y aumentar la contaminación de las aguas subterráneas. La mayor parte de los lagos más grandes de América Latina y África han visto aumentar las cargas antropogénicas de fósforo, lo que puede acelerar los procesos de eutrofización.

El aumento del vertido de aguas residuales tratadas de forma inadecuada, consecuencia del desarrollo económico e industrial, la intensificación y expansión de la agricultura y el crecimiento de los volúmenes de aguas negras de las zonas urbanizadas rápidamente contribuyen a la degradación de la calidad del agua superficial y subterránea en todo el mundo. Dado que la contaminación del agua afecta gravemente la disponibilidad de agua, es necesario gestionarla adecuadamente para mitigar los efectos de su creciente escasez.

# PARTE 1

## BASE DE REFERENCIA Y CONTEXTO

Capítulo 1 | Introducción

Capítulo 2 | Las aguas residuales y la Agenda de desarrollo sostenible

Capítulo 3 | Gobernabilidad

Capítulo 4 | Aspectos técnicos de las aguas residuales





# CAPÍTULO 1

WWAP | Richard Connor, Angela Renata Cordeiro Ortigara, Engin Koncagül y Stefan Uhlenbrook

Con los aportes de : Birguy M. Lamizana-Diallo (PNUMA) ; Sara Marjani Zadeh (FAO) y Manzoor Qadir (UNU-INWEH)

# INTRODUCCIÓN

Planta de tratamiento de aguas residuales



*Este capítulo introductorio enmarca el informe mediante la presentación de los principales problemas y desafíos relacionados con la gestión de los flujos de aguas residuales en el contexto más amplio de la gestión de los recursos hídricos, y subraya la importancia de las aguas residuales como un recurso olvidado pero valioso, en particular en condiciones de escasez de agua.*

Las aguas residuales son un componente crítico del ciclo del agua y deben ser tomadas en cuenta durante todo el ciclo de gestión del agua: desde la captación de agua dulce, el tratamiento, la distribución, el uso, la recolección y el tratamiento posterior hasta su reutilización y retorno final al medio ambiente, donde se repone la fuente para las subsiguientes captaciones de agua (ver Figura 1.1). Sin embargo, la mayoría de las veces, la atención que se da a la gestión del agua después de su uso ha sido un componente del ciclo de gestión del agua a menudo pasado por alto. La gestión de las aguas residuales generalmente recibe poca atención social y política en comparación con los retos del abastecimiento de agua, especialmente en el contexto de la escasez de agua. Sin embargo, ambos están intrínsecamente relacionados: actuar con negligencia en relación con las aguas residuales puede tener impactos altamente perjudiciales para la sostenibilidad del abastecimiento de agua, la salud humana, la economía y el medio ambiente.

Las aguas residuales siguen siendo un recurso infravalorado, visto con demasiada frecuencia como una carga que debe eliminarse o una molestia que debe ignorarse. Esta percepción debe cambiar para reflejar correctamente su valor: las aguas residuales son una fuente potencialmente asequible y sostenible de agua, energía, nutrientes, materia orgánica y otros subproductos útiles. Una mejor gestión de las aguas residuales, incluida la recuperación y la reutilización segura del agua y otros componentes clave, ofrece muchas oportunidades. Esto es especialmente cierto en el contexto de una economía circular<sup>2</sup>, donde el desarrollo económico se equilibra con la protección de los recursos y la sostenibilidad ambiental, y donde una economía más limpia y más sostenible tiene un efecto positivo en la calidad del agua.

Las aguas residuales, también conocidas como «aguas servidas» o «efluentes», pueden y han sido definidas de varias maneras diferentes. Por tanto, no existe una única definición universalmente aceptada para el término. Por ejemplo, las aguas residuales han sido definidas como «agua que ha sido utilizada y contiene materiales de desecho disueltos o suspendidos» (US EPA, s.f.a.), o «agua cuya calidad ha sido negativamente afectada

por actividad antropogénica» (Culp y Culp, 1971, p. 614). La expresión aguas residuales también ha sido equiparada con aguas negras, lo que implica que la definición se limita al agua usada (proveniente de fuentes domésticas, industriales o institucionales) arrastrada por la red de alcantarillado, excluyendo así la escorrentía no recolectada de los asentamientos urbanos y sistemas agrícolas. Sin embargo, como la escorrentía urbana y agrícola puede estar muy contaminada (y puede posiblemente mezclarse con otros cursos de aguas residuales), también es un elemento importante del ciclo de gestión de aguas residuales.

El presente informe adopta una definición amplia e inclusiva de aguas residuales, adaptada de Raschid-Sally y Jayakody (2008), que se utiliza principalmente en el documento «*Sick Water*» producido por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), el Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos (ONU-Hábitat) (Corcoran *et al.*, 2010) y el Informe analítico de ONU-Agua sobre la gestión de aguas residuales (ONU-Agua, 2015a):

**Las aguas residuales se consideran como una combinación de uno o más de los siguientes: efluentes domésticos que consisten en aguas negras (excremento, orina y lodos fecales) y aguas grises (aguas servidas de lavado y baño); agua de establecimientos comerciales e instituciones, incluidos hospitales; efluentes industriales, aguas pluviales y otras escorrentías urbanas; y escorrentías agrícola, hortícola y acuícola** (Raschid-Sally y Jayakody, 2008, p. 1).

Otros términos relacionados son igualmente difíciles de definir. Por ejemplo, en algunos casos los términos «reutilizado», «reciclado» y «regenerado» han sido utilizados como sinónimos, mientras que en otros casos cada uno ha sido definido específicamente, aunque de formas diferentes. Los términos utilizados en este informe reflejan las definiciones adoptadas en el contexto de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (ver Capítulo 2) y en otras diversas «normas» internacionales. Los mismos se describen en el Léxico (ver Anexo 1). Lamentablemente, estos términos no siempre distinguen entre aguas residuales tratadas, parcialmente tratadas o no tratadas, que es información esencial en muchos contextos. Por lo tanto, a lo largo de este informe se ha intentado

---

<sup>2</sup> Definición proporcionada en Léxico (Anexo 1).



especificar explícitamente el «nivel» de tratamiento existente o exigido según corresponda. Sin embargo, es importante reconocer el dilema que existe con respecto a la multiplicidad de términos y reconocer que será necesario realizar esfuerzos para desarrollar un conjunto claro de definiciones a fin de asegurar la coherencia en el monitoreo y la presentación de informes en materia de aguas residuales. Esto es particularmente importante para la selección de indicadores adecuados (ver, por ejemplo, el Cuadro 1.1: Los términos «seguro» y «mejorado» en el contexto de los ODM [WWAP, 2015, p. 15]).

Históricamente, las aguas superficiales han sido utilizadas como un medio para la eliminación directa de aguas residuales y otras formas de desechos, contaminando las masas de agua abajo de ciudades, pueblos y aldeas (ver Cuadro 1.1). Esta práctica ha disminuido en la mayoría de los países desarrollados desde finales del siglo XIX y principios del XX con el desarrollo de sistemas de recolección y tratamiento de aguas residuales (PNUMA, 2015a) y los avances en la gestión de desechos sólidos, lo que dio lugar a importantes beneficios en materia de salud pública. Sin embargo, el vertido de aguas residuales no tratadas en el medio ambiente sigue siendo una práctica

### CUADRO 1.1 SISTEMAS ARQUEOLÓGICOS DE AGUAS RESIDUALES: EL CASO DE LA ANTIGUA ROMA

La gestión de aguas residuales ha sido practicada por varios milenios, y ha evolucionado y mejorado a lo largo de la historia humana. Los etruscos, por ejemplo, desarrollaron sistemas de canales para recolectar diferentes flujos de agua, y los romanos posteriormente asimilaron estas técnicas, mejorándolas y adaptándolas a sus necesidades.

Las primeras alcantarillas de la antigua Roma fueron construidas por Tarquinius Superbus alrededor del siglo VII a.C. Consistían en un sistema de canales a cielo abierto que drenaba el agua de los pantanos en el fondo de los valles de las siete colinas (tierra inhabitable en ese entonces) y la transportaba al Tíber. Estos sistemas de drenaje evolucionaron lentamente y los romanos finalmente construyeron un complejo sistema de alcantarillas cubierto por piedras, similar a los drenajes modernos. La evacuación de las letrinas se realizaba hacia el sistema de alcantarillado principal y luego, a través de un canal central, al río o arroyo más cercano.

El segmento más sofisticado del sistema de alcantarillado romano fue la Cloaca Maxima cubierta, el colector más grande entre los diversos colectores de aguas residuales. Construido primero como un canal de agua dulce abierto, alrededor de los siglos II y I a.C. se transformó en un monumental túnel subterráneo con paredes de toba y bóvedas.

Conocida como la «máxima cloaca» de Roma (traducción literal de su nombre), la Cloaca Maxima es una obra maestra de la ingeniería hidráulica y la arquitectura. Es uno de los artefactos sanitarios más impresionantes del mundo antiguo, que proporcionó el drenaje necesario para la creación del Foro Romano y se convirtió en la pieza central de una red de saneamiento que brindó servicios de higiene a las colinas alrededor de Roma. Un grabado de Piranesi muestra el colector, tal como lucía en 1778, donde las aguas residuales se vertían al río Tíber cerca del Ponte Palatino.

Sin embargo, con el tiempo el río Tíber llegó a estar sumamente contaminado, lo que causó graves problemas para los romanos que usaban su agua para beber, cocinar, lavar y otros fines. El vertido de las alcantarillas aguas abajo de la ciudad no fue suficiente para garantizar una adecuada calidad del agua aguas arriba. Además, debido a que el sistema de drenaje transportaba aguas negras y escorrentía urbana (es decir, era un «sistema de alcantarillado combinado»), durante fuertes precipitaciones subía el refluo por las grandes aberturas a lo largo de las calles, exponiendo así a los romanos a las aguas residuales.

Para drenar el agua de lluvia de las calles hacia la Cloaca, los romanos construyeron drenajes circulares especiales en forma de grandes máscaras, que representaban a los dioses del río tragando agua (la famosa Boca de la Verdad era probablemente una de ellas). Otro rasgo distintivo del sistema de alcantarillado romano fue la tarifa establecida para el uso de las letrinas públicas o el alquiler de orinales, lo que lo convierte en uno de los primeros ejemplos históricos del principio de «usuario-pagador» para los servicios de saneamiento.

Un estudio de 1889 de la Cloaca Máxima y otras alcantarillas llevó a la restauración de ciertas partes que podían ser conectadas al sistema de alcantarillado «moderno» y ser utilizadas en un proyecto que sigue beneficiando a Roma hasta el día de hoy.

Fuentes: Ammerman (1990), Bauer (1993), Narducci (1889), Lanciani (1890) y Bianchi (2014).

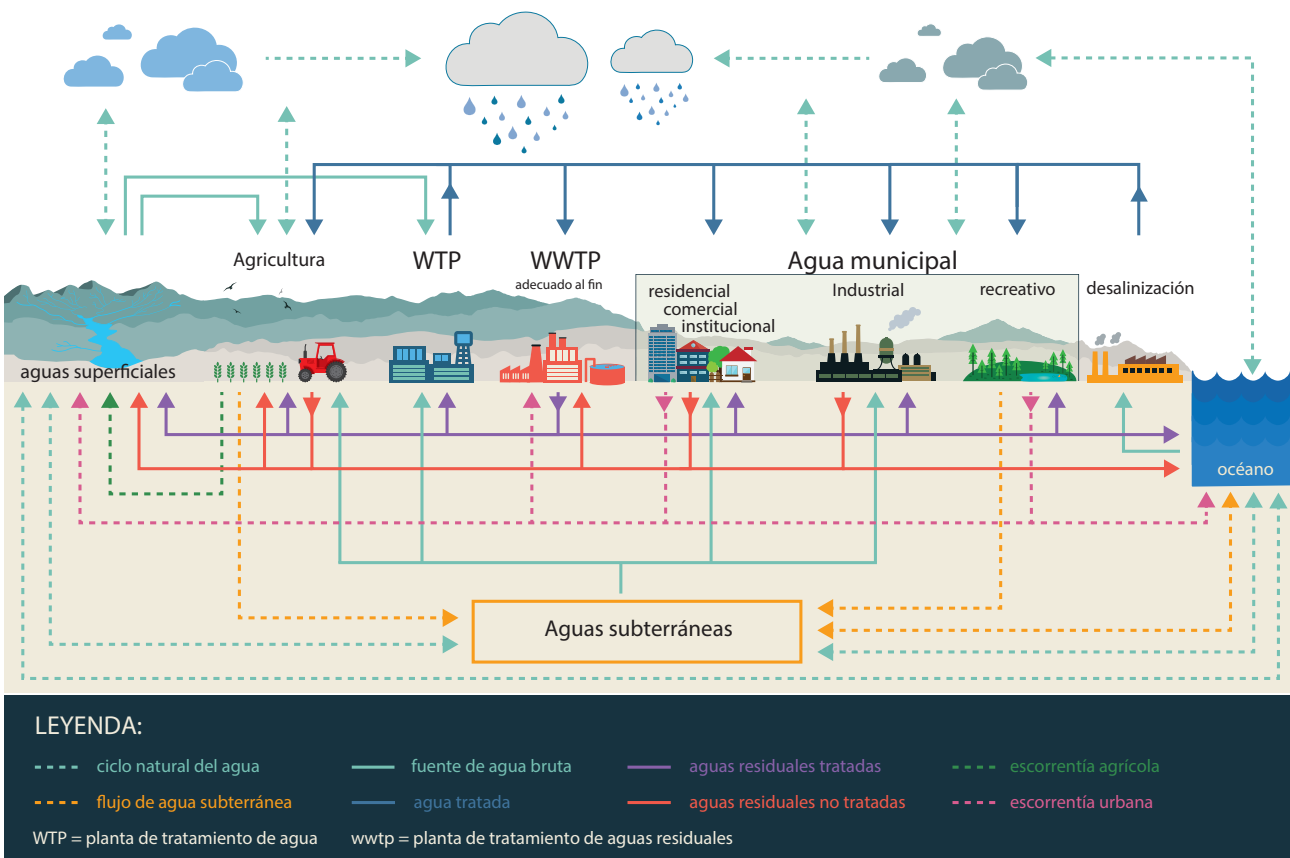
Con los aportes de Chiara Biscarini y Lucio Ubertini (UNESCO-PHI Italia).

**Tabla 1.1** Ejemplos de impactos negativos de las aguas residuales no tratadas en la salud humana, el medio ambiente y las actividades productivas

Impactos en	Ejemplos de impactos
Salud	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento de la carga de morbilidad debido a la reducción de la calidad del agua potable</li> <li>• Aumento de la carga de morbilidad debido a la reducción de la calidad del agua de baño</li> <li>• Aumento de la carga de morbilidad debido a alimentos nocivos (pescado contaminado, verduras y otros productos de regadío)</li> <li>• Aumento del riesgo de morbilidad cuando se trabaja o se juega en un área irrigada por aguas residuales</li> </ul>
Medio ambiente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disminución de la biodiversidad</li> <li>• Degradación de los ecosistemas acuáticos (por ejemplo, eutrofización y zonas muertas)</li> <li>• Olores desagradables</li> <li>• Disminución de oportunidades recreativas</li> <li>• Aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero</li> <li>• Aumento de la temperatura del agua</li> <li>• Bioacumulación de toxinas</li> </ul>
Economía	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducción de la productividad industrial</li> <li>• Reducción de la productividad agrícola</li> <li>• Reducción del valor de mercado de los cultivos cosechados, si se usan aguas residuales peligrosas para el riego</li> <li>• Reducción de las oportunidades de actividades recreativas acuáticas (reducción del número de turistas o reducción de la disposición a pagar por los servicios recreativos)</li> <li>• Reducción de las capturas de peces y mariscos, o reducción del valor de mercado de pescados y mariscos</li> <li>• Aumento de la carga financiera sobre la asistencia sanitaria</li> <li>• Aumento de las barreras al comercio internacional (exportaciones)</li> <li>• Costos más altos del tratamiento del agua (para el suministro humano y otros usos)</li> <li>• Reducción de precios de propiedades cerca de masas de agua contaminadas</li> </ul>

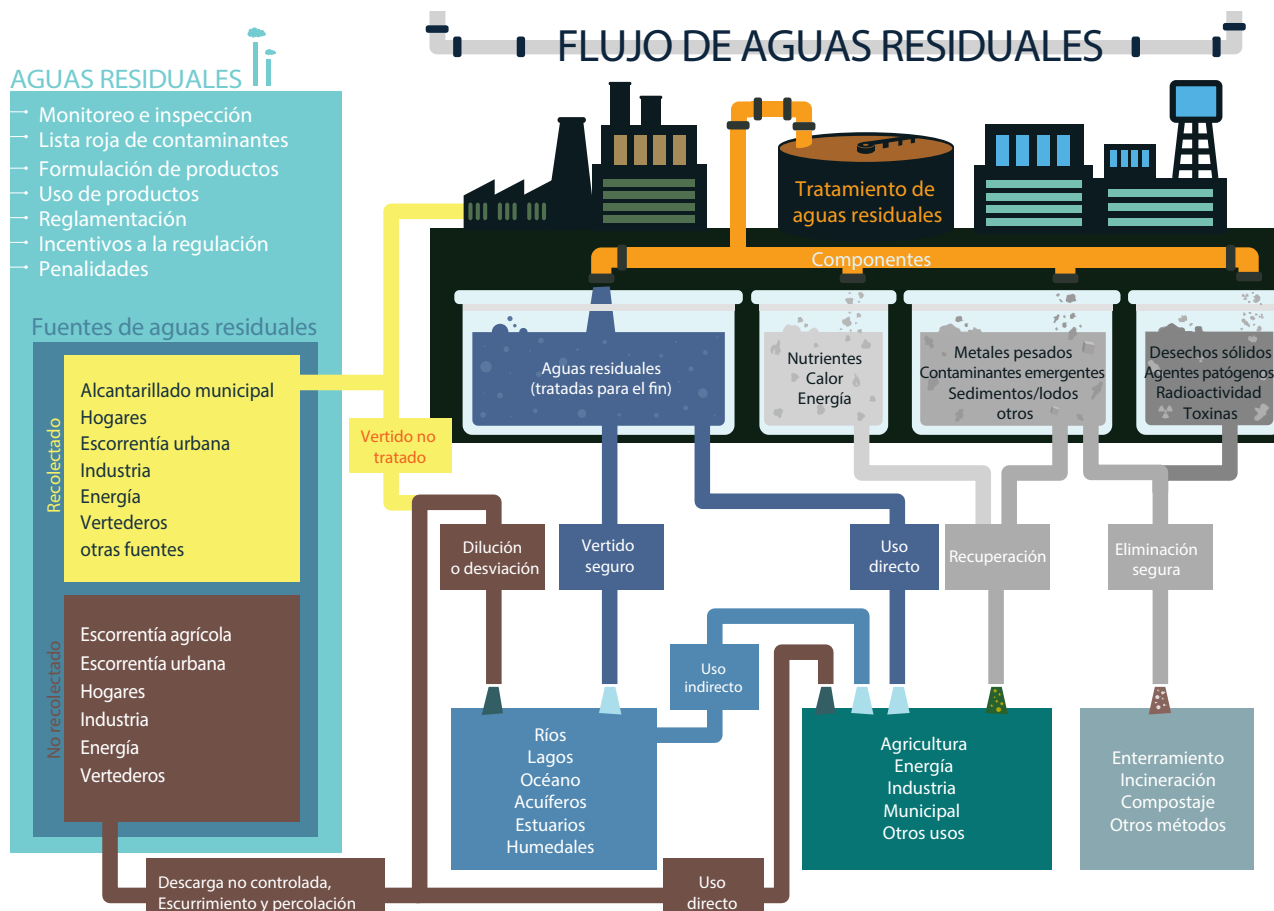
Fuente: Adaptado del PNUMA (2015b, Tabla 1, p. 15).

**Figura 1.1** Las aguas residuales en el ciclo del agua



Fuente: WWAP

Figura 1.2 Flujos de aguas residuales



Fuente : WWAP.

común, especialmente en los países en desarrollo, con repercusiones directas en la salud humana (con mayores riesgos para las mujeres, principalmente), el medio ambiente y la productividad económica (ver Tabla 1.1).

Con tan escasa cantidad de aguas residuales sometidas a tratamiento y aún menos utilizadas después del tratamiento, sigue existiendo una enorme oportunidad de reutilizar el agua tratada de manera sostenible y de extraer algunos de los subproductos recuperables que contiene. Siempre que se controle de forma debida, el uso de aguas residuales no tratadas también ofrece un gran potencial para disminuir la carga sobre los suministros de agua dulce superficial y subterránea, especialmente en regiones áridas y semiáridas, y en otros lugares que experimentan escasez de agua crónica o recurrente.

## 1.1 Flujos de aguas residuales

Los flujos de aguas residuales son tan variados como sus fuentes y los tipos de componentes que contienen, siendo estos últimos una función de los primeros. En la Figura 1.2 se ofrece una visión general de los principales flujos de aguas residuales, desde su generación en la fuente hasta su destino final. Las aguas residuales no recolectadas (y todos sus

componentes) terminan en el medio acuático. Esto también ocurre con las aguas residuales que se recogen y se eliminan sin tratamiento, cuya proporción, en algunos casos, puede ser considerable (ver Figuras 4.4 y 4.5). El tratamiento de aguas residuales puede permitir la separación del agua y otros componentes, que luego pueden ser reutilizados o eliminados.

### 1.1.1 El ciclo de gestión de aguas residuales

Controlar y regular los diversos flujos de aguas residuales es el fin último de la gestión de aguas residuales. El ciclo de gestión de aguas residuales puede desglosarse en cuatro fases o etapas básicas interconectadas:

- La prevención o reducción de la contaminación en la fuente, en términos de carga de contaminación y volumen de aguas residuales producidas.** Prohibir o controlar el uso de ciertos contaminantes para eliminar o limitar su entrada en las corrientes de aguas residuales a través de medios regulatorios, técnicos y/o de otro tipo. Esta etapa también incluye medidas para reducir los volúmenes de aguas residuales generadas (por ejemplo, gestión de la demanda y mayor eficiencia en el uso del agua).

- b) **La eliminación de contaminantes de las corrientes de aguas residuales.** Sistemas operativos (incluida la infraestructura de recolección) y procesos de tratamiento que eliminan diversos componentes de las aguas residuales (es decir, contaminantes) para que puedan utilizarse o devolverse de forma segura al ciclo del agua con mínimos impactos ambientales. Existen varios tipos y niveles de tratamiento de aguas residuales cuya elección depende de la naturaleza de los contaminantes, de la carga de contaminación y del uso final anticipado del efluente.
- c) **El uso de aguas residuales (es decir, reutilización del agua).** Uso seguro de aguas residuales tratadas o no tratadas bajo condiciones controladas para fines beneficiosos. Históricamente utilizadas, en primer lugar, para el riego, las tecnologías de tratamiento de aguas residuales han avanzado para permitir que las aguas residuales tratadas tengan otros usos, siempre que el nivel de tratamiento y la calidad del efluente sean “aptos para el fin”.
- d) **La recuperación de subproductos útiles.** Se pueden extraer varios componentes de las aguas residuales, ya sea directamente (por ejemplo, calor, nutrientes, materia orgánica y metales) o a través de procesos de transformación adicionales (por ejemplo, biogás procedente de lodos o biocombustibles de microalgas). Existe un número creciente de oportunidades potencialmente rentables para extraer materiales útiles de las aguas residuales, como nitrógeno y fósforo, que pueden transformarse en fertilizantes.

Una función adicional del ciclo de gestión de aguas residuales es mitigar cualquier impacto negativo en la salud humana, la economía y el medio ambiente.

Si se tienen en cuenta los múltiples beneficios de una mejor gestión de las aguas residuales, varios de estos procesos pueden considerarse rentables, lo que agrega valor a lo largo del ciclo de gestión de aguas residuales, al tiempo que apoya el desarrollo de sistemas de abastecimiento de agua y saneamiento.

Sobre la base de la suposición de que es posible alinear los requisitos de calidad del agua con las ubicaciones de uso del agua, múltiples sistemas de uso con reutilización del agua en cascada, de mayor a menor calidad, pueden hacer que la reutilización del agua sea más asequible que proporcionar un tratamiento generalizado de agua en cada punto de captación a lo largo de una cuenca (PNUMA, 2015c).

## 1.2 Las aguas residuales como recurso: Aprovechar las oportunidades

En la práctica, el objetivo es ir más allá de la simple reducción de la contaminación y buscar obtener valor de las aguas residuales, si no por otra razón, como un medio adicional para pagar la gestión de las aguas residuales y para mejorar la sostenibilidad económica del sistema.

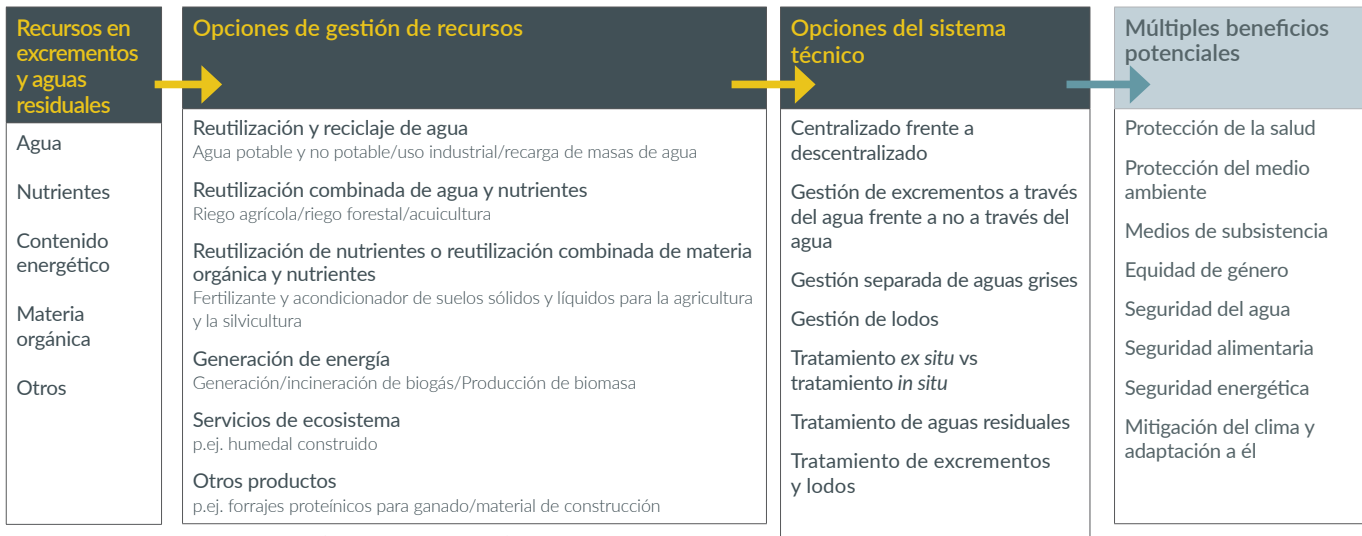
Sin embargo, la gestión de las aguas residuales ya es una parte importante de varios ciclos de recursos diferentes y está bien posicionada para desempeñar un papel central en la economía circular. El uso adecuado de agua tratada para la agricultura y la generación de energía aumenta las oportunidades de seguridad alimentaria y energética y puede ayudar a aliviar las tensiones provocadas por el aumento de la demanda de agua. Esto tendrá repercusiones positivas en los suministros de agua dulce, la salud humana y ambiental, la generación de ingresos (medios de subsistencia) y la reducción de la pobreza. Además, la reutilización del agua puede generar nuevas oportunidades comerciales y apoyar el avance de una economía verde.

Los ecosistemas acuáticos (por ejemplo, estanques, humedales y lagos) ofrecen soluciones adicionales y de bajo costo para mejorar la gestión de las aguas residuales, siempre y cuando se gestionen de manera sostenible. Aunque el uso planificado y los mercados funcionales de aguas residuales para los servicios de ecosistemas son fenómenos relativamente recientes, la valoración del uso de aguas residuales tratadas para los servicios de ecosistemas revela beneficios ambientales y económicos favorables.

El uso informal de aguas residuales no tratadas ya está ocurriendo de forma generalizada, ya sea simplemente por conveniencia o por necesidad, y con demasiada frecuencia sin medidas apropiadas de control de la seguridad. Si bien las medidas que promueven el uso directo de ciertos tipos de aguas residuales no tratadas pueden ser relativamente fáciles de implementar, el costo de desarrollar sistemas de tratamiento para la recuperación de aguas residuales de ciertas actividades humanas específicas puede ser prohibitivo en algunos casos. También puede haber un desfase entre la ubicación y la elección del momento oportuno de la fuente de aguas residuales, y su uso final. Por lo tanto, los sistemas de gestión de las aguas residuales deben diseñarse en función de sus características (por ejemplo, origen, componentes y nivel de contaminantes) y del uso final previsto de la corriente de efluentes, incluidos los subproductos útiles, ya que estos indicarán cuáles son las fuentes más apropiadas y prácticas de aguas residuales.



**Figura 1.3** Marco de gestión de aguas residuales desde una perspectiva de recursos



Fuente: Andersson et al. (2016, Fig. 3.1, p. 27).

Existen fuertes argumentos económicos a favor de la optimización de la eficiencia del uso del agua dulce, la gestión de aguas residuales como recurso y la eliminación (o al menos la reducción) de la contaminación en el punto de uso. La utilización de las aguas residuales en la fuente, o lo más cerca posible de ella, generalmente aumenta la rentabilidad debido a los menores costos de transporte. El hecho de que se esté realizando tan poca gestión de las aguas residuales, particularmente en los países en desarrollo, significa que hay grandes oportunidades para la reutilización del agua y para la recuperación de subproductos útiles, siempre que existan incentivos y modelos empresariales adecuados para ayudar a cubrir los costos sustanciales. Estudios de mercado recientes también muestran que hay una tendencia positiva a realizar inversiones en agua y tratamiento de aguas residuales en los países en desarrollo. En todo el mundo, los gastos de capital anuales en infraestructura de agua e infraestructura de aguas residuales por parte de los servicios públicos se han estimado en USD 100.000 millones y USD 104.000 millones, respectivamente (Heymann *et al.*, 2010).

Dado que la gestión de las aguas residuales se lleva a cabo a nivel local, las respuestas y las soluciones técnicas deberán ser específicas según la ubicación (ver Capítulo 3). A este respecto, existen oportunidades para integrar aún más la gestión de aguas residuales, incluido el saneamiento y la gestión de lodos fecales (FSM, por sus siglas en inglés), con recursos hídricos y gestión de desechos sólidos. Esto requiere estructuras de gobierno que fomenten la colaboración a través de las fronteras institucionales, así como la rendición de cuentas y el cumplimiento de las regulaciones para el uso de aguas residuales

y la extracción/el uso de subproductos recuperados. Por encima de todo, la gestión de las aguas residuales debe planificarse desde «aguas arriba», en la fuente, para complementar las soluciones de la etapa final «aguas abajo».

Una serie de presiones sobre los recursos hídricos están impulsando la necesidad de un mejor uso de las aguas residuales. El crecimiento de la población, la urbanización, los cambios en los patrones de consumo, el cambio climático, la pérdida de biodiversidad, el crecimiento económico y la industrialización tienen impacto en los recursos hídricos y las corrientes de aguas residuales, con repercusiones en la contaminación atmosférica, terrestre y del agua. Un método mejorado para la gestión de aguas residuales ayudará a aliviar el impacto de algunas de estas presiones.

Desde una perspectiva de recursos (ver Figura 1.3), la gestión sostenible de las aguas residuales requiere: i) políticas propicias que reduzcan la carga de contaminación por adelantado; ii) tecnologías personalizadas que permitan un tratamiento apto para el fin específico para optimizar la utilización de los recursos; y iii) tener en cuenta los beneficios de la recuperación de recursos. Esta perspectiva promueve la aplicación de mecanismos financieros innovadores, al tiempo que se adopta un enfoque de precaución y el principio de que quien contamina paga. Es responsabilidad de los gobiernos nacionales proporcionar el entorno normativo para estructuras tarifarias equitativas que ayuden a asegurar el funcionamiento y mantenimiento de la infraestructura existente y atraigan nuevas inversiones a lo largo del ciclo de gestión de las aguas residuales.

# CAPÍTULO 2

WWAP | Angela Renata Cordeiro Ortigara y Richard Connor

**Con los aportes de:** Birguy M. Lamizana-Diallo (PNUMA),; Marianne Kjellén (PNUD), Carlos Carrión-Crespo y María Teresa Gutiérrez (OIT), Pay Drechsel (IWMI), Manzoor Qadir (UNU-INWEH), Kate Medicott (OMS) y Shigenori Asai (Foro del Japón sobre el agua)

# AGUAS RESIDUALES y la AGENDA DE DESARROLLO SOSTENIBLE



En este capítulo se examina la gestión de las aguas residuales en el contexto de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible y se presta especial atención a los esfuerzos necesarios para promover sinergias y abordar posibles conflictos entre el objetivo del agua y otros ODS.

## 2.1 Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible

El 25 de setiembre de 2015, 193 Estados Miembros de la Asamblea General de las Naciones Unidas adoptaron la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible con un conjunto de objetivos para poner fin a la pobreza, proteger el medio ambiente y garantizar la prosperidad para todos. La Agenda incluye 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (ver Figura 2.1), cada uno con metas específicas a alcanzar en un período de 15 años (AGNU, 2015a). Los ODS están interrelacionados y son indivisibles, se basan en los progresos y lecciones aprendidas de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM, 2000-2015).

Figura 2.1 Los Objetivos de Desarrollo Sostenible



Fuente: ONU (s.f.a.).

Dentro del marco de los ODM, la Meta 7c hizo un llamado a los Estados Miembros a reducir a la mitad, para 2015, la proporción de personas sin acceso sostenible al agua potable y a servicios básicos de saneamiento. Si bien la meta relacionada con el agua potable se notificó como alcanzada tres años antes del plazo (UNICEF/OMS, 2012), no se logró la meta de saneamiento. De hecho, mientras que 2.100 millones han obtenido acceso a instalaciones sanitarias mejoradas desde 1990, 2.400 millones de personas aún no tienen acceso a saneamiento mejorado y casi 1.000 millones de personas en todo el mundo siguen practicando la defecación al aire libre (UNICEF/OMS 2015).

La experiencia de los ODM demostró que se necesitaba un objetivo más amplio, más detallado y adaptado al contexto para el agua, que fuera más allá

de las cuestiones de abastecimiento y saneamiento, que el ODS 6 de la Agenda 2030 ha abordado haciendo un llamado a mejorar la gestión de los recursos hídricos de manera amplia, inclusiva e integrada. En este sentido, hace especial hincapié en: el agua potable, saneamiento e higiene; la calidad del agua y aguas residuales; la eficiencia en el uso del agua y escasez; la gestión integrada del agua; la protección de los ecosistemas; la cooperación internacional y creación de capacidades, y la participación de las partes interesadas (ver Tabla 2.1).

Los objetivos y las metas serán monitoreados y revisados mediante un conjunto de indicadores mundiales, pero corresponde a cada país definir sus objetivos nacionales tanto en el tratamiento de aguas residuales como en la calidad del agua (AGNU, 2015a).

La medición del progreso en la Agenda 2030 dependerá de cuán específicos, medibles, alcanzables, pertinentes y limitados en el tiempo (SMART, por sus siglas en inglés) sean los indicadores para esta tarea. Se estableció el Grupo Interinstitucional y de Expertos sobre los Indicadores de los ODS para elaborar un marco de indicadores que permitan cuantificar el progreso para el seguimiento de las metas y objetivos de la Agenda 2030 a nivel mundial y apoyar su aplicación. Es probable que los Estados Miembros también desarrollen sus propios indicadores a nivel nacional y regional para complementar los indicadores propuestos a nivel mundial a ser aprobados por la Asamblea General de las Naciones Unidas.

Se han propuesto dos indicadores globales para monitorear el progreso de la meta 6.3 de los ODS, que es la más estrechamente vinculada a la gestión de aguas residuales (ONU-AGUA, 2016a):

**6.3.1** Proporción de aguas residuales tratadas de forma segura: Las aguas residuales generadas por los hogares (lodos residuales y fecales) y las actividades económicas (p. ej., las industrias) tratadas de forma segura en proporción al total de aguas residuales generadas por los hogares y las actividades económicas.

**6.3.2** Proporción de las masas de agua con buena calidad del agua ambiental: Proporción de masas de agua (área) en un país con buena calidad de agua ambiental en comparación con todas las masas de agua en el país. «Bueno» indica una calidad de agua ambiental que no daña las funciones del ecosistema ni la salud humana de acuerdo con los indicadores centrales de la calidad del agua ambiental.



## El mejoramiento del tratamiento de aguas residuales y el aumento de la reutilización del agua, como se exhorta en la Meta 6.3 de los ODS, apoyarán la transición a una economía circular.

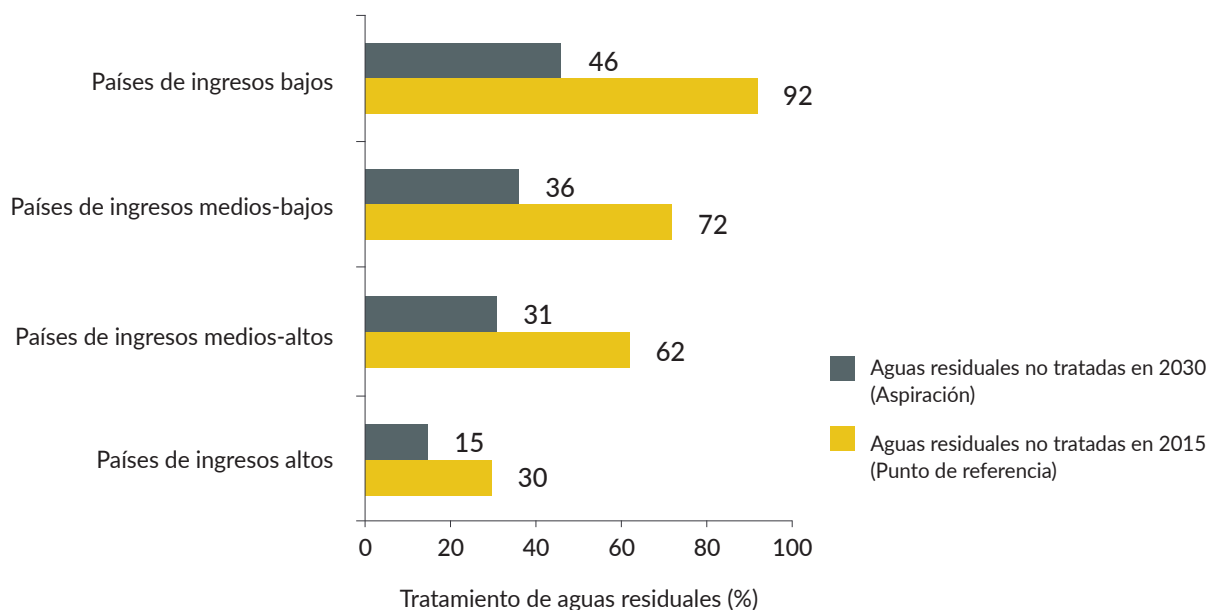
**Tabla 2.1** Metas e indicadores del ODS 6

<b>ODS 6</b>	
<b>Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos</b>	
META	INDICADORES
6.1 Para 2030, lograr el acceso universal y equitativo al agua potable, a un precio asequible para todos	6.1.1 Proporción de la población que utiliza servicios de agua potable administrados de forma segura
6.2 Para 2030, lograr el acceso equitativo a servicios de saneamiento e higiene adecuados para todos y poner fin a la defecación al aire libre, prestando especial atención a las necesidades de las mujeres y las niñas y las personas en situaciones vulnerable	6.2.1 Proporción de la población que utiliza servicios de saneamiento administrados de forma segura que incluyan instalaciones para lavarse las manos con agua y jabón
6.3 Para 2030, mejorar la calidad del agua mediante la reducción de la contaminación, la eliminación del vertimiento y la reducción al mínimo de la descarga de materiales y productos químicos peligrosos, la reducción a la mitad del porcentaje de aguas residuales sin tratar y un aumento sustancial del reciclado y la reutilización en condiciones de seguridad a nivel mundial	6.3.1 Proporción de aguas residuales tratadas de forma segura 6.3.2 Proporción de las masas de agua con buena calidad de agua ambiental
6.4 Para 2030, aumentar sustancialmente la utilización eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce para hacer frente a la escasez de agua y reducir sustancialmente el número de personas que sufren de escasez de agua	6.4.1 Cambio con el tiempo en la eficiencia en el consumo de agua 6.4.2 Nivel de estrés hídrico: extracción de agua dulce en proporción a los recursos de agua dulce disponibles
6.5 Para 2030, poner en práctica la gestión integrada de los recursos hídricos a todos los niveles, incluso mediante la cooperación transfronteriza, según proceda	6.5.1 Grado de aplicación de la gestión integrada de los recursos hídricos (0-100) 6.5.2 Proporción de zonas de cuencas transfronterizas para las que existe un acuerdo operacional de cooperación en materia de recursos hídricos
6.6 Para 2020, proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua, incluidos los bosques, las montañas, los humedales, los ríos, los acuíferos y los lagos	6.6.1 Cambio con el tiempo en la extensión de los ecosistemas relacionados con el agua
6.a Para 2030, ampliar la cooperación internacional y el apoyo prestado a los países en desarrollo para la creación de capacidad en actividades y programas relativos al agua y el saneamiento, incluidos el acopio y almacenamiento de agua, la desalinización, el aprovechamiento eficiente de los recursos hídricos, el tratamiento de aguas residuales y las tecnologías de reciclaje y reutilización	6.a.1 Cuantía de la asistencia oficial para el desarrollo relacionada con los recursos hídricos y el saneamiento que forma parte de un plan de gastos coordinado por el gobierno
6.b Apoyar y fortalecer la participación de las comunidades locales en la mejora de la gestión del agua y el saneamiento	6.b.1 Proporción de unidades administrativas locales con políticas y procedimientos establecidos y operativos para la participación de las comunidades locales en la gestión de los recursos hídricos y el saneamiento

\*Fuente de indicadores: ONU-Agua (2016a).

Fuente: AGNU (2015a).

**Figura 2.2** Porcentaje de aguas residuales no tratadas en 2015 en países con niveles de ingresos y aspiraciones diferentes para 2030 (50% de reducción respecto al punto de referencia de 2015)



Fuente: Basado en datos de Sato et al. (2013).

Uno de los retos para el monitoreo de los indicadores de la Meta 6.3 de los ODS es la falta de datos relativos a prácticamente todos los aspectos de la calidad del agua y la gestión de las aguas residuales, particularmente en los países en desarrollo. Los datos fiables generan beneficios sociales, económicos y ambientales tanto en el sector público como en el privado, ya que pueden respaldar la promoción, estimular el compromiso político y las inversiones e informar sobre la toma de decisiones a todos los niveles (ONU-Agua, 2016a).

Para alcanzar la Meta 6.3 de los ODS se requerirán inversiones significativas en nuevas infraestructuras (gris y verde, en combinaciones apropiadas a nivel local) y tecnologías apropiadas para incrementar el tratamiento y uso de aguas residuales. También se necesitan inversiones para mejorar la infraestructura actual, operar y mantener las infraestructuras existentes y nuevas, desarrollar la capacidad en la gestión de los recursos hídricos y monitorear y controlar la calidad del agua y las aguas residuales (ONU-Agua, 2015a). Debido a las diferencias en los niveles actuales de tratamiento de aguas residuales en general, los esfuerzos requeridos para alcanzar la Meta 6.3 de los ODS supondrán una mayor carga financiera para los países de ingresos bajos y medios-bajos (ver Figura 2.2), poniéndolos en una situación de desventaja económica en comparación con los países de ingresos altos y medios-altos (Sato et al., 2013).

## 2.2 Posibles sinergias y conflictos

Para lograr la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible se requerirán esfuerzos concertados para gestionar los conflictos y sinergias potenciales entre el ODS 6 y otros

ODS. Un análisis cuidadoso de los objetivos y las metas puede resaltar condiciones donde el logro de un objetivo puede favorecer el logro de otro. En cambio, las situaciones en las que el logro de un objetivo puede dificultar el logro de otro requerirán que se identifiquen concesiones aceptables (ONU-Agua, 2016b).

### 2.2.1 Sinergias potenciales

El ODS 6 no se puede lograr completamente si cada meta se aborda de forma independiente. Por ejemplo, «se debe armonizar un mayor acceso a condiciones de saneamiento (6.2) con un aumento del tratamiento de aguas residuales (6.3) para apoyar la buena calidad del agua ambiental (6.3) y garantizar ecosistemas saludables relacionados con el agua (6.6). De manera similar, la buena calidad del agua ambiental (6.3) facilita en gran medida el suministro de agua potable segura (6.1), que debe ser proporcionada de manera sostenible (6.4), sin consecuencias negativas para los ecosistemas relacionados con el agua (6.6). El aumento del reciclado y la reutilización sin riesgos (6.3) y la eficiencia en el uso del agua (6.4) aumentan el agua disponible para beber (6.1) y otros usos (6.4) y pueden reducir los impactos en los ecosistemas relacionados con el agua (6.6). El abastecimiento y uso sostenibles de agua (6.4), la buena calidad del agua ambiental (6.3) y los ecosistemas saludables relacionados con el agua (6.6) son interdependientes» (ONU-Agua, 2016b).

El logro de la meta 6.3 de los ODS es también una condición previa para el logro de otros ODS y el objetivo general de erradicar la pobreza (ver Cuadro 2.1). La recolección y el tratamiento adecuados de las aguas residuales ayudan a proteger la calidad del agua en las cuencas fluviales y los bienes y servicios que estas proporcionan, al tiempo que reducen considerablemente

## CUADRO 2.1 POBREZA, GESTIÓN DE AGUAS RESIDUALES Y DESARROLLO SOSTENIBLE - MÚLTIPLES CONEXIONES

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (AGNU, 2015a) reconoce que la erradicación de la pobreza es el mayor de todos los desafíos mundiales. La pobreza es multidimensional e incluye privaciones como mala salud y alimentación, falta de acceso a los servicios, escolaridad deficiente y el trauma psicológico de tener que lidiar con la descortesía y la humillación (Narayan *et al.*, 2000; PNUD, 2010). Las poblaciones que viven en las regiones más pobres del mundo son las más afectadas por problemas de salud relacionados con el medio ambiente (OMS, 2016a).

La prevalencia de la enfermedad diarreica está vinculada a problemas relacionados con el agua, el saneamiento y la higiene (Prüss-Üstün *et al.*, 2014). El acceso a mejores fuentes de agua y al saneamiento es considerablemente menor entre las comunidades más pobres de los países de bajos ingresos (UNICEF/OMS, 2015; UNICEF/OMS, 2014).

La carga sanitaria de un saneamiento deficiente y una mala gestión de las aguas residuales afecta principalmente a los niños: entre los niños menores de 5 años se podrían haber evitado 361.000 muertes en 2012 mediante la reducción de los riesgos relacionados con la inadecuada higiene de manos, el saneamiento y el agua (Prüss-Üstün *et al.*, 2014), mientras que la recolección diaria de agua es realizada principalmente por niñas y mujeres (UNICEF/OMS, 2011). Las tareas domésticas son más onerosas en condiciones de pobreza, lo que implica que el mantenimiento de la salud de la familia recae desproporcionadamente sobre las mujeres.

Los miembros que viven en condiciones de pobreza y más vulnerables de las sociedad son quienes más ganan con la mejora del saneamiento y la gestión de las aguas residuales. Por lo tanto, las inversiones en saneamiento rural y urbano, así como en la recolección y el tratamiento de aguas residuales pueden tener altos rendimientos en términos de desarrollo social y económico. El retorno promedio de las inversiones en saneamiento es de USD 5.5 por cada USD 1 invertido (Hutton y Haller, 2004). Algunas soluciones al problema de las aguas residuales, como el reciclaje de nutrientes o la extracción de energía, también pueden generar nuevas oportunidades de generación de ingresos y ampliar la base de recursos disponibles para los hogares (Winblad y Simpson-Hébert, 2004). Un ejemplo son los inodoros de compostaje, que proporcionan una solución de bajo costo para mejorar la productividad agrícola junto con el aumento de la nutrición y la reducción de los impactos ambientales y de salud de la defecación al aire libre (Kvarnström *et al.*, 2014).

*Con aportes de Marianne Kjellén (PNUD) y Johanna Sjödin (Órgano de la gobernabilidad del agua del PNUD en SIWI).*

la cantidad de personas expuestas a las enfermedades relacionadas con el agua (Metas 3.3 y 3.9 de los ODS), proporcionan beneficios sanitarios y económicos relacionados y contribuyen al alivio de la pobreza (Metas 1.1 y 1.2 de los ODS).

Las enfermedades relacionadas con el agua y la malnutrición impiden que las personas trabajen y asistan a la escuela, lo que acentúa el ciclo de la pobreza (PNUD, 2006). La inversión en la gestión del agua y de las aguas residuales proporcionaría retornos particularmente altos al romperse el vínculo entre el agua no apta para el consumo y las enfermedades que causan diarrea, particularmente en los países en desarrollo. La diarrea prolongada intensifica la mala salud y la malnutrición en los niños y, a menudo, conduce a un retraso del crecimiento debido a la mala absorción de nutrientes y la pérdida de apetito (UNICEF/OMS, 2009). Por lo tanto, la mejora de las condiciones sanitarias y la gestión de las aguas residuales contribuye al éxito de las estrategias de mejora de la nutrición (Meta 2.2 de los ODS), reduce las muertes evitables de niños (Meta 3.1 de los ODS) y aumenta la asistencia de los niños a la escuela y su desempeño (Meta 4.7 de los ODS).

Reducir la carga de la enfermedad también reduce el tiempo dedicado a cuidar de los miembros de la familia enfermos, deja más tiempo para participar en

## CUADRO 2.2 FUNCIONES ASIGNADAS A CADA GÉNERO Y LA INTRODUCCIÓN DEL USO SEGURO DE AGUAS RESIDUALES

Cuando el tratamiento de las aguas residuales es insuficiente y el riego con aguas residuales es común, pueden ponerse en práctica medidas de seguridad en ciertos puntos críticos de control a lo largo de la cadena alimentaria (de la «granja a la mesa»), como lo describe la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2006a) y lo ilustran Amoah *et al.* (2011), entre otros. Debe tenerse cuidado con las funciones asignadas a cada género, que pueden cambiar desde el nivel de granja hasta el comercio mayorista y al minorista (Drechsel *et al.*, 2013). Cuando la conciencia del riesgo es baja y no es fácil de desarrollar, es importante determinar la mejor manera para motivar y fomentar el cambio de comportamiento y alentar la adopción de medidas de mitigación del riesgo sensibles al género (Drechsel y Karg, 2013). En muchas culturas, las mujeres no solo tienen la responsabilidad principal de la higiene y la salud, sino que también se encargan del uso de aguas grises o aguas residuales como se ha visto, por ejemplo, en Jordania (Boufaroua *et al.*, 2013), Túnez (Mahjoub, 2013) y Vietnam (Knudsen *et al.*, 2008). Este vínculo brinda amplias posibilidades para que los métodos de formación innovadores mejoren la aceptación social del uso seguro de aguas residuales (Boufaroua *et al.*, 2013).

*Con aportes de Carlos Carrión-Crespo y María Teresa Gutiérrez (OIT).*



la economía formal (ODS 8) y en la toma de decisiones sociales y políticas. Las mujeres, que suelen ser las principales cuidadoras y responsables del suministro de agua dentro de los hogares, también se beneficiarían de mejores condiciones de saneamiento y gestión de aguas residuales, ya que frecuentemente son responsables de la gestión y el uso de aguas grises o aguas residuales en la agricultura (ver Cuadro 2.2). Las políticas de gestión del agua inclusivas y que tienen en cuenta las cuestiones de género también apoyan el logro de la igualdad entre los géneros (ODS 5).

La mejora del tratamiento de aguas residuales y el aumento de la reutilización del agua, como se exhorta en la Meta 6.3 de los ODS, apoyarán la transición a una economía circular al ayudar a reducir las extracciones de agua y la pérdida de recursos en sistemas de producción y actividades económicas. Los intercambios de energía, agua y flujos de materiales en los subproductos de las aguas residuales pueden permitir a las empresas mejorar su desempeño ambiental y su capacidad competitiva. Estos intercambios suelen ser mutuamente beneficiosos ya que favorecen una reducción en los costos de producción, consumo de agua y/o costos de tratamiento de aguas residuales (Metas 8.2 y 8.4 de los ODS).

La creación de redes de infraestructura de aguas residuales resilientes al clima puede disminuir las pérdidas económicas directas causadas por los desastres (Meta 11.5 de los ODS), al tiempo que aumenta la capacidad de los asentamientos humanos para recuperarse de desastres naturales como inundaciones y sequías (Meta 13.1 de los ODS). La gestión mejorada de las aguas residuales también tiene un gran potencial para reducir las emisiones de GEI (Meta 13.2 de los ODS). Las aguas residuales pueden considerarse una fuente confiable de agua en la planificación y el desarrollo de nuevos asentamientos y proyectos de recursos hídricos (Meta 11.6 de los ODS).

El logro de la Meta 6.3 de los ODS también contribuye a la reducción de la contaminación de origen terrestre en los ecosistemas terrestres y marinos (ODS 14 y 15).

### 2.2.2 Conflictos potenciales

En los casos en que las interrelaciones entre la Meta 6.3 de los ODS y los demás ODS no sean mutuamente beneficiosas, será importante equilibrar las necesidades en conflicto y evaluar las concesiones.

Poner fin al hambre, aumentar la suficiencia alimentaria (Meta 2.1 de los ODS) y duplicar la productividad y los ingresos de los pequeños agricultores (Meta 2.3 de los ODS) son esenciales para apoyar la erradicación de la pobreza (ODS 1). Sin embargo, el logro del ODS 2 también implica un aumento de la productividad agrícola, lo que puede conducir a un aumento de la demanda de agua y el uso de herbicidas, pesticidas y fertilizantes, con

### CUADRO 2.3 «PÉRDIDA» DE AGUA POR DESPERDICIOS ALIMENTARIOS

La agricultura es el mayor consumidor mundial de agua. Diversos tipos de alimentos, como las verduras, tienen un contenido de agua muy alto (en algunos casos, muy por encima del 90%). En Europa, por ejemplo, la fabricación de productos alimenticios consume, en promedio, unos 5 m<sup>3</sup> de agua por persona por día (Förster, 2014). Al mismo tiempo, con 1.300 millones de toneladas de alimentos desperdiciados anualmente (WWF, 2015), se «pierden» 250 km<sup>3</sup> de agua al año debido a los desperdicios de alimentos en todo el mundo (FAO, 2013a). Los desperdicios de alimentos pueden definirse como el descarte de alimentos que eran aptos para el consumo humano pero se echaron a perder, se vencieron o no se quisieron por algún motivo (FAO, 2015). También pueden incluirse cultivos que no se cosechan (por ejemplo, debido a los bajos precios del mercado). A nivel mundial, la carne y los cereales se destacan claramente en la proporción mundial de desperdicios de alimentos con un 21,7% y 13,4%, respectivamente (Lipinski *et al.*, 2013).

*Con aportes de la Universidad de Kassel.*

la consecuente disminución de la calidad y cantidad del agua si los recursos no se gestionan adecuadamente. Debe promoverse la utilización de las mejores prácticas agrícolas paralelamente a la reducción de los desperdicios de alimentos (ver Cuadro 2.3).

El mejoramiento de la cobertura de agua potable en los asentamientos formales e informales (ODS 11) es un asunto de fundamental importancia para el cumplimiento del derecho humano al agua y al saneamiento. Esto debe ir junto con la expansión de la recolección y el tratamiento de aguas residuales para evitar impactos en la calidad del agua, la salud humana y el medio ambiente.

El aumento del crecimiento económico (ODS 8) y el desarrollo de pequeñas industrias (Meta 9.3 de los ODS) también presentan potenciales conflictos con el logro de la Meta 6.3 de los ODS en lo que respecta a la contaminación y el vertido de aguas residuales no tratadas. El desarrollo económico o la mejora del «acceso de las pequeñas empresas industriales en los países en desarrollo a los servicios financieros» deben realizarse de conformidad con las reglamentaciones de salud y seguridad relativas al medio ambiente. La creación de un entorno propicio en el que las pequeñas industrias estén obligadas a respetar las reglamentaciones relativas al medio ambiente para acceder a los servicios financieros puede ser un incentivo positivo.

Por último, la reducción de la desigualdad en y entre los países (Meta 10.1 de los ODS) significa asegurar que los servicios adecuados de gestión de aguas residuales están disponibles para todos. Esta es una de las claves para lograr el desarrollo sostenible y garantizar que haya suficiente agua de buena calidad para las generaciones futuras.

# CAPÍTULO 3

PNUD | Marianne Kjellén y Johanna Sjödin

Centro sobre la Legislación, las Políticas y las Ciencias relativas al Agua (con el auspicio de la UNESCO), Universidad de Dundee | Sarah Hendry

Con los aportes de: Erik Brockwell y Anna Forslund (SIWI), Florian Thevenon y Lenka Kruckova (WaterLex) y Nataliya Nikiforova (CEPE)

# GOBERNABILIDAD





*En este capítulo se describen los marcos de gobernabilidad a través de los cuales se gestiona el agua residual, incluidos los distintos actores y sus funciones, los instrumentos legales y regulatorios, las dificultades económicas y oportunidades de financiamiento y los aspectos sociales y culturales.*

La gestión de aguas residuales presenta numerosos desafíos. En los casos en que las aguas residuales se vierten sin tratamiento, las personas afectadas pueden estar geográfica o temporalmente lejos del contaminador. Por esta y otras razones, la sociedad debe actuar de forma colectiva para promover la salud humana y proteger los recursos hídricos de la contaminación. Los desafíos relacionados con la gobernabilidad incluyen cuestiones jurídicas, institucionales, financieras, económicas y culturales.

En este capítulo se profundiza en los procesos de formulación de políticas, regulación y financiamiento, así como en los desafíos socioculturales relacionados con el cumplimiento y la aplicación de políticas.

### **3.1 Actores y funciones**

Para lograr los objetivos de mejora de la calidad del agua y la protección de los recursos hídricos, los individuos y las organizaciones deben cumplir y actuar en el interés colectivo. Las intenciones políticas, o los objetivos de gestión de aguas residuales, se traducen en leyes y reglamentos, con responsabilidades asignadas a diferentes actores. Los resultados de las políticas dependen en gran medida de la forma en que se aplican esas responsabilidades, en todos los niveles, teniendo en cuenta los costos. En la Tabla 3.1 se ofrece una visión general de las funciones de gobernabilidad relacionadas con la gestión de aguas residuales. Desde la formulación de políticas y la legislación hasta la investigación y el desarrollo de capacidades, se describen funciones típicas primarias y secundarias y las colaboraciones cruzadas necesarias para lograr una aplicación coordinada de las políticas. La mayoría de las funciones están vinculadas a las soluciones más centralizadas para la gestión de aguas residuales, mientras el saneamiento y el drenaje alternativo y local pueden involucrar a muchos actores adicionales. Además, en las zonas remotas o de bajos ingresos puede haber una falta de actores responsables o capaces para gestionar el desarrollo y la aplicación de políticas, lo cual exige apoyo y atención especiales por parte de los encargados

de formular políticas. En todos lados, la regulación debe estar bien diseñada y los recursos deben estar disponibles para su cumplimiento. Superar las dificultades prácticas de la aplicación de reglamentos sobre la calidad del agua puede suponer un reto particularmente complejo para las organizaciones del sector público, incluso en los países altamente desarrollados.

La coordinación de los actores en todos los sectores es un desafío que va mucho más allá de la gestión de aguas residuales. Existen diversos métodos integrados e intersectoriales que apuntan a la gestión del agua y la tierra (dinámicas aguas arriba-aguas abajo, recursos hídricos urbanos, etc.) que ayudan a superar el pensamiento «aislado», sin los cuales los actores pueden perseguir intereses estrechos o conflictivos (cf. DAES, 2004; GWP, 2013). La coordinación de sistemas con múltiples tecnologías o cobertura desigual es un desafío particular que puede resolverse ya sea asegurando que las conexiones de alcantarillado se extiendan a todas partes en un área de servicio o integrando las soluciones reales en el suelo (por ejemplo, MLF por vehículos o letrinas gestionadas por los hogares en un sistema de funcionamiento coherente).

Las asociaciones entre los sectores público y privado en la prestación de servicios de aguas residuales impulsaron una ola de revisión de la reglamentación, especialmente durante los años noventa. En muchos países se instituyeron nuevas formas de autorización y supervisión de las operaciones con el fin de contratar empresas privadas locales o internacionales para prestar los servicios antes realizados por los departamentos del gobierno o paraestatales (Finger y Allouche, 2002). Cada vez se reconoce más el hecho de que es necesario contar con una mejor fiscalización reglamentaria de los proveedores de servicios, tanto públicos como privados (Kjellén, 2006; Gerlach y Franceys, 2010).

Hay importantes diferencias en la escala de las operaciones. La infraestructura a gran escala, que predomina en los países de altos ingresos, se beneficia de economías de escala, pero exige fuertes capacidades técnicas y de gestión centralizadas. En los países de bajos ingresos, los sistemas centralizados a gran escala suelen omitir

**Figura 3.1** Niveles institucionales de formulación y ejecución de políticas



Fuente: Desarrollado por los autores; diseño de Johanna Sjödin.

los asentamientos informales o de bajos ingresos. La descentralización puede servir como estrategia para superar la cobertura desigual de servicios de los sistemas centralizados, pero también se produce como respuesta de la comunidad ante la cobertura incompleta del servicio (ver Capítulo 15).

Aproximadamente dos tercios de la población mundial tienen acceso a servicios de saneamiento mejorados (UNICEF/ OMS, 2015). Las conexiones de alcantarillado a los grandes sistemas centralizados son más comunes en los países de ingresos altos, en las zonas urbanas en China y en los países de ingresos medios de América Latina (Kjellén *et al.*, 2012). La mayoría de las personas depende de algún tipo de servicio descentralizado o autogestionado, a veces con apoyo de las ONG, pero comúnmente sin ninguna ayuda de las autoridades centrales (ver Figura 5.1). El ODS 6 (ver Capítulo 2) establece un objetivo de «acceso equitativo a servicios de saneamiento e higiene adecuados para todos» para 2030 (AGNU, 2015a) y reconoce que es poco probable que los sistemas hídricos lleguen a ser universales.

La planificación, la construcción, el financiamiento y la operación de sistemas alternativos deben involucrar especialmente a los propios habitantes, lo cual ayuda al desarrollo del liderazgo local, el emprendimiento y la ingeniería práctica. Los dueños de las propiedades pueden tomar medidas y podrían tener responsabilidades con respecto a la reducción de los volúmenes de escorrentía y los impactos, pero problemas como el drenaje no son fáciles de manejar

a nivel local. Las autoridades municipales o los departamentos de obras públicas suelen ser los principales responsables de la escorrentía urbana. Sin embargo, para evitar la contaminación, la basura y el vertido de residuos, es fundamental la colaboración de todos los residentes y las empresas, y esto requiere una combinación de campañas de promoción, incentivos y regulación. El proyecto piloto de Orangi en Karachi, Pakistán, es un ejemplo clásico en el que la comunidad, con la ayuda de filántropos, logró construir un sistema de alcantarillado de condominios asequible pagado por la comunidad local (Hasan, 1988).

### 3.2 Políticas, legislación y normativa

Los marcos de políticas mundiales para las aguas residuales incluyen la Agenda 2030 (AGNU, 2015a), la cual parte de otros instrumentos de política mundial para el agua, el medio ambiente y el desarrollo, así como principios ambientales como los principios de prevención y precaución y el principio de quien contamina paga (CNUMAD, 1992). El reconocimiento mundial del derecho humano al agua y al saneamiento (AGNU, 2010, AGNU, 2015b) también tiene repercusiones en la política de aguas residuales, al instar a los Estados Miembros a adoptar políticas para aumentar el acceso al saneamiento y asegurar que los recursos hídricos estén protegidos contra la contaminación (AGNU, 2014).

**Tabla 3.1** Actores, papeles y funciones para gestionar las aguas residuales

Actores / Funciones	Legislador/político/ responsable de la formulación de políticas	Reguladores (medio ambiente, salud, económicos)	Propietario del sistema (ciudad, ministerio, organismo de cuenca)
Elaboración de leyes	Definir y adoptar leyes a través del proceso consultivo inclusivo	Compartir expectativas en cuanto al papel de la gobernabilidad	Compartir expectativas en cuanto al papel de la gobernabilidad-
Formulación de políticas	Definir y adoptar políticas para aplicar la ley a través de procesos consultivos inclusivos	Compartir información sobre la situación actual y las preferencias de políticas	Compartir información sobre la situación actual y las preferencias de políticas
Planificación, coordinación y presupuestación	Definir modalidades para planificación, coordinación y presupuestación	Compartir preferencias a través de participación constructiva	Dirigir consultas, definir normas para la prestación de servicios; asignar y desembolsar presupuesto
Financiamiento de la gestión de aguas residuales	Decidir sobre subvenciones y modalidades de financiamiento	Regular tarifas y calidad del servicio	Planificación financiera estratégica, decisión sobre tarifas
Desarrollo de infraestructura de aguas residuales y operación de servicios e instalaciones de aguas residuales	Normas/reglamentos guía para la construcción y operación de infraestructura	Regular tarifas y calidad del servicio	Coordinar la planificación espacial, las decisiones de emplazamiento/zonificación; preparar llamados a licitación dependiendo del tipo deservicios/bienes
Reglamentación - monitoreo y aplicación	Definir marco regulatorio	Aplicar marco regulatorio (incluida la recolección de información de los proveedores de servicios y los titulares de permisos, garantizando el cumplimiento, inspecciones, etc.)	Denunciar acciones sospechosas
Mecanismos de reparación (incluido el Poder Judicial)	Definir las autoridades competentes para la reparación	Responsable o parte en una queja	Responsable o parte en una queja
Cumplimiento y prevención de la contaminación	Desarrollar incentivos para prevención y medidas disuasivas contra la contaminación	Aplicar incentivos (incluidos monitoreo y promoción para prevención de contaminación y eficiencia del uso del agua)	Apoyar la aplicación
Promoción y comunicaciones	Definir objetivos de política y defender el espacio para la comunicación	Promoción de la prevención de la contaminación y la eficiencia del uso del agua	Sensibilización e información al público; solicitar comportamientos conformes de la industria y los hogares
Creación de capacidades	Definir objetivos de política para el sector; crear capacidades	Monitorear las capacidades e incentivar el desarrollo	Apoyar el desarrollo
Investigación e innovación	Destacar las necesidades de investigación, asegurar el apoyo a la investigación y desarrollo (I+D)	Destacar las necesidades de investigación; incentivar I+D	Destacar las necesidades de investigación; guiar y participar en I+D

\* El sombreado se refiere al nivel típico de responsabilidad: más oscuro = importante, más claro = menos involucrado

Fuente: Desarrollado por autores y contribuyentes.



Operador/proveedor de servicios	Academia/institutos de políticas/grupos de reflexión	Productor/consumidor (agricultura, industria, hogares)	Sociedad civil, ONG
Compartir expectativas en cuanto al papel de la gobernabilidad	Hacer aportaciones para la elaboración de leyes	Compartir expectativas en cuanto al papel de la gobernabilidad a través de la participación	Compartir opiniones de la sociedad civil sobre los procesos de gobernabilidad para aportar información para la elaboración de leyes
Compartir información sobre la situación actual y las preferencias de políticas	Compartir datos basados en evidencia para el diseño de políticas	Compartir información sobre la situación actual y las preferencias de políticas	Compartir información sobre la situación actual y las preferencias de políticas
Compartir preferencias a través de participación constructiva	Compartir preferencias a través de participación constructiva	Compartir preferencias a través de participación constructiva	Compartir preferencias a través de participación constructiva
Reunir información sobre las necesidades de inversión y los costos de suministro	Puede proporcionar información y asesoramiento	Pagar tarifas y proporcionar información sobre la voluntad y la capacidad de pago	Monitorear la responsabilidad financiera; sensibilizar sobre el costo de los servicios
Construcción; mantenimiento; operación; facturación; recaudación de recolección, relaciones con los clientes	Puede monitorear procesos y actuar como testigo social en pactos de integridad (herramienta de prevención de corrupción)	Debe estar involucrado en asuntos como decisiones de ubicación/zonificación, aceptabilidad, etc.	Puede monitorear procesos y actuar como testigo social en pactos de integridad (herramienta de prevención de corrupción)
Proporcionar información a solicitud	Realizar estudios a largo plazo y analizar procesos	Industria para proporcionar información a solicitud	Denunciar acciones sospechosas a las fuerzas del orden
Responsable o parte en una queja	Experto ( <i>amicus curiae</i> )	Responsable o parte en una queja	Parte en una queja y/o experto ( <i>amicus curiae</i> )
Cumplir con la normativa; mejorar la tecnología y la organización	Apoyar la aplicación	Aplicar tecnología de producción y reutilización más limpia; eliminación correcta de desechos; mejorar las prácticas agrícolas	Promoción de la prevención de la contaminación y la eficiencia del uso del agua
Promoción de la prevención de la contaminación y la eficiencia del uso del agua	Estudios y análisis a largo plazo de procesos; sensibilización	Dialogar con los socios y el público en general sobre los mensajes de políticas	Sensibilizar
Desarrollo de habilidades y profesionalización de la gestión de aguas residuales y prestación de servicios	Proporcionar capacitación y educación		
Participar en investigación, desarrollo y prueba de nuevas soluciones tecnológicas	Investigar sobre contaminantes, cargas contaminantes, funciones ecológicas, interacciones del sistema, comportamiento humano	Participar en investigación, desarrollo y prueba de nuevas soluciones tecnológicas	Destacar las necesidades de investigación, participar en investigación

\* El sombreado se refiere al nivel típico de responsabilidad: más oscuro = importante, más claro = menos involucrado

Los organismos regionales y los gobiernos nacionales reflejan estas agendas mundiales en sus políticas de gestión de recursos hídricos, el suministro de servicios de agua y la gestión de aguas residuales y residuos sólidos. Los responsables de la formulación de políticas establecen objetivos que abarcan o se relacionan con principios más generales (ver los círculos en la Figura 3.1), que pueden consagrarse en el derecho general y en reglamentaciones detalladas (ver las capas en la Figura 3.1).

### 3.2.1 Marcos legales

Al igual que las políticas discutidas anteriormente, las leyes aplicables también operan en diferentes niveles.

Las obligaciones internacionales pueden ser pertinentes cuando las aguas residuales (por ejemplo, efluentes o escorrentías agrícolas) fluyen hacia ríos y lagos internacionales o acuíferos. Hay dos tratados mundiales principales que abordan la gestión del agua dulce transfronteriza:

1. La *Convención sobre el Derecho de los Usos de los Cursos de Agua Internacionales para Fines Distintos de la Navegación* (ONU, 1997, entró en vigor en 2014) exige que los Estados adopten todas las medidas apropiadas para evitar causar «daño considerable» a otros Estados que comparten un curso de agua internacional (Art. 7) y que los Estados cooperen para proteger los cursos de agua internacionales (Ar. 8). Muchas convenciones regionales también utilizan estos principios porque reflejan el derecho internacional consuetudinario.
2. El *Convenio sobre la Protección y Utilización de los Cursos de Agua Transfronterizos y de los Lagos Internacionales* (el Convenio del Agua) fue desarrollado como un instrumento regional por la Comisión Económica para Europa (CEPE, 1992). Entró en vigor en 1996 y ha estado abierto a los Estados Miembros de la ONU de todo el mundo desde 2013. La Convención del Agua aborda los impactos transfronterizos, los principios de sostenibilidad, de precaución y de quien contamina paga (Art. 2) e incluye las obligaciones de controlar las emisiones de contaminantes y de autorización previa del vertido de aguas residuales.

Estos convenios han enmarcado el desarrollo de tratados y acuerdos regionales y bilaterales. El derecho ambiental internacional es aplicable a la gestión de residuos sólidos, incluidos los desechos peligrosos, y la gestión de la contaminación del aire que pueden afectar la calidad del agua, a veces lejos del punto de vertido.

#### CUADRO 3.1 MARCO INSTITUCIONAL INTERNACIONAL PARA LA PROTECCIÓN CONJUNTA DE LA CALIDAD DEL AGUA EN EL DANUBIO Y EN EL MAR NEGRO

La cuenca del Danubio, que es el segundo río más largo de Europa, drena el agua de 19 estados al Mar Negro. Históricamente, la Comisión Internacional para la Protección del Río Danubio\* se ocupaba de la navegación. La cooperación en el área del Danubio y el Mar Negro es un ejemplo de asociaciones que trabajan a diferentes escalas para alcanzar múltiples objetivos, involucrando a diferentes actores y en el marco de leyes transfronterizas, regionales y nacionales.

La Comisión, que es el grupo de gestión general, elaboró una estrategia de participación para involucrar a las partes interesadas. Una parte considerable de los fondos provinieron de los proyectos de Aguas Internacionales del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM). Esto incluyó el trabajo con los Estados y con la Comisión para identificar y ejecutar una cartera de inversiones de casi 500 proyectos, lo que implica inversiones para la reducción de la contaminación por un total de más de USD 5 mil millones (Hudson, 2012).

La falta de tratamiento de aguas residuales fue un factor importante que motivó este programa de inversiones. En 2010, la Planta Central de Tratamiento de Aguas Residuales de Budapest comenzó a funcionar como parte del proyecto Living Danube, el cual garantiza que el 95% de las aguas residuales de Budapest sean tratadas antes de su retorno al medio ambiente, al tiempo que recupera nutrientes y energía.

\*Para más información, ver [www.icpdr.org/main/danube-basin](http://www.icpdr.org/main/danube-basin)

A nivel regional, la Directiva Marco sobre el Agua de la Unión Europea (UE) (2000/60/EC) (UE, 2000) se aplica a la gestión de la calidad del agua, incluidas las aguas residuales. La Directiva marco sobre residuos utiliza el método de las «3R» –reducir, reciclar, reutilizar–, así como los principios de precaución y de quien contamina paga (2008/98/EC) (UE, 2008). La legislación sobre residuos sólidos es muy importante para el saneamiento no a través del agua y para la gestión de lodos. El Protocolo sobre Agua y Salud del Convenio sobre el Agua (CEPE/OMS, 1999, que entró en vigor en 2005) exige que las Partes fijen objetivos nacionales y locales que cubran todo el ciclo del agua, incluido el saneamiento, con el fin de proteger la salud y el bienestar humanos mediante una mejor gestión del agua; la protección de los ecosistemas hídricos y la prevención, el control y la reducción de las enfermedades relacionadas con el agua.

Otros tratados regionales sobre el agua, como el Protocolo sobre Cursos de Agua Compartidos en la región de África Meridional, firmado por primera vez en 1995 por la Comunidad de África Meridional para el Desarrollo (SADC, por sus siglas en inglés) y revisado en 2000 (SADC, 2000), y el Acuerdo de Cooperación para el Desarrollo Sostenible de la cuenca del río Mekong (MRC, por sus siglas en inglés, 1995) reflejan las disposiciones generales del Convenio de las Naciones Unidas sobre los cursos de agua (ONU, 1997) y el derecho internacional consuetudinario, como la norma de no causar daños y la notificación de las medidas planificadas, pero no tienen el mismo nivel de detalle con respecto a la gestión transfronteriza de aguas residuales.

La mayoría de las leyes de control de la contaminación se elaboran y se aplican a nivel nacional o local. Sin embargo, en una cuenca fluvial transfronteriza, las aguas residuales vertidas en un país pueden tener efectos aguas abajo en otro país.

Los marcos internacionales y regionales pueden ayudar a los Estados a gestionar estos efectos transfronterizos. El Cuadro 3.1 muestra un ejemplo de las medidas adoptadas a nivel regional, nacional y local para gestionar el agua y las aguas residuales.

### 3.2.2 Normativa

Con respecto a la protección del medio ambiente, la normativa suele contemplar el uso de permisos y licencias, la aplicación de normas de calidad de emisiones o aguas residuales o la zonificación para el uso de la tierra (Sternier, 2003). La normativa también sustenta el establecimiento de sistemas de recolección y de instalaciones de tratamiento al fijar normas adecuadas para el tratamiento y la reutilización con diferentes fines. La normativa «económica» se utiliza en los servicios urbanos, lo que incluye el suministro de agua potable y la gestión de aguas residuales municipales. Esto garantiza que se cumplan las normas técnicas y de servicio y que las tarifas y los niveles de inversión sean suficientes para cubrir los costos del servicio, a la vez que proporcionan una tasa de rendimiento razonable para futuras inversiones (Groom *et al.*, 2006). Las soluciones también deben ser adaptadas de acuerdo al contexto y reflejar los distintos niveles de desarrollo. El control o la prohibición del uso de determinadas sustancias es otro medio para evitar que ingresen en las corrientes de aguas residuales (ver Cuadro 4.2 y Sección 5.4.1).

Las regulaciones pueden abordar el nivel de tratamiento o el proceso en sí al especificar el «tratamiento secundario» o el uso de las «mejores técnicas disponibles» que pueden definirse más

adelante. Estos también pueden regular la calidad del efluente mediante el establecimiento de estándares de emisión. Si existen normas ambientales aguas abajo para las aguas receptoras, se puede hacer que estas contemplen las tendencias y los efectos acumulativos.

Cuando un Estado tiene poca o ninguna normativa con respecto a las aguas residuales y sus recursos son limitados, la OMS recomienda que se mida un pequeño número de parámetros clave, aquellos que tengan la mayor relevancia para la calidad del agua, en lugar de un conjunto más amplio de normas que no puedan aplicarse (Helmer y Hespanhol, 1997). Se pueden emitir directrices que incluyan una gama más amplia de parámetros a fin de ayudar a gestionar los impactos aguas abajo.

Los grandes sistemas centralizados se benefician de economías de escala, pero tardan en desarrollarse y son difíciles de adaptar a diferentes circunstancias socioeconómicas (ver Capítulo 12). En los países de bajos ingresos, es frecuente constatar que las prácticas descritas en las intenciones de las políticas y en las instrucciones reglamentarias difieren considerablemente de lo que ocurre realmente en el terreno (Ekane *et al.*, 2012 y 2014).

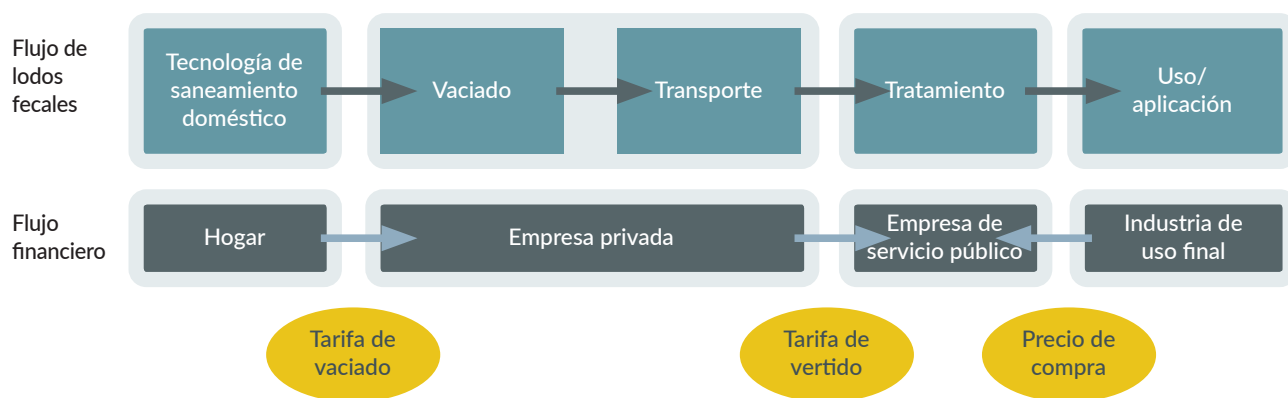
Los asentamientos urbanos informales en todo el mundo también enfrentan desafíos particulares. Los servicios relacionados con las aguas residuales (por ejemplo, las compañías de desagüe de pozos y las de eliminación de lodos) pueden ser prestados por proveedores privados informales sin el control o el apoyo adecuados de las autoridades pertinentes. Si la gestión de la recolección y el transporte, o el reciclaje, de los lodos fecales no es adecuada puede tener repercusiones importantes en la salud humana.

Las aguas residuales industriales pueden ser tratadas *in situ* y recicladas inmediatamente o vertidas en la corriente de aguas residuales municipales (ver Capítulo 6).

La viabilidad de la reutilización del agua depende de su origen y de la reutilización prevista. En Australia, varios estados tienen metas para el uso de aguas residuales y el gobierno del Commonwealth proporciona una guía extensa sobre la reutilización del agua (NRMMC/EPHC/NHMRC, 2009). Algunos estados han desarrollado marcos regulatorios, incluso para el uso directo de agua potable (ATSE, 2013).

Las precauciones de seguridad son particularmente importantes en el caso de la recuperación de aguas residuales para fines de consumo. Esto requiere el uso de barreras múltiples, el despliegue de varias técnicas en serie para asegurar la calidad del agua, así como

**Figura 3.2** Modelo de flujo financiero para el manejo de lodos fecales



Fuente: Strande et al. (2014, Fig. 13.3, p. 279).

sistemas avanzados de control y, sobre todo, excelentes registros de calidad del agua. En consecuencia, estos sistemas a menudo presentan estándares de calidad de agua más altos que otras fuentes de agua (no tratada). No obstante, se requieren amplias campañas de información y la participación del público para crear confianza en el sistema (ver Capítulo 16).

Las aguas residuales no tratadas se utilizan habitualmente para el riego agrícola y para la acuicultura (ver Capítulos 7 y 16).

Si bien el uso de aguas negras puede proporcionar nutrientes valiosos, también puede presentar peligros, no solo para los trabajadores, sino también para los consumidores de productos alimenticios (OMS, 2006a).

### 3.3 Financiamiento

La gestión de aguas residuales es costosa y plantea problemas de acción colectiva; el público y las generaciones futuras reciben los beneficios y no directamente quienes invierten en mejorar el tratamiento o reducir la contaminación. Además, los beneficios reales solo se perciben una vez que todos (o un número suficiente de actores) cumplen las normas para proteger los recursos hídricos de la contaminación. En este sentido, el saneamiento y la gestión de aguas residuales son notoriamente más complicados y costosos que el suministro de agua potable (Jackson, 1996; Hophmayer-Tokich, 2006).

Pueden utilizarse instrumentos económicos para incentivar la prevención de la contaminación pero, para ser eficaces, deben combinarse con información, promoción y reglamentación eficaz. Las normas de responsabilidad por el vertido de contaminantes o los impuestos sobre efluentes pueden establecerse de conformidad con el principio de quien contamina paga (Olmstead, 2010).

El financiamiento de la infraestructura centralizada de aguas residuales está dominado por los costos de capital. En la mayoría de los países, la nueva infraestructura ha sido financiada mediante transferencias de dinero público (OCDE, 2010). Varios países de bajos ingresos dependen principalmente de las transferencias de ayuda para financiar sus sectores de agua y saneamiento (OMS, 2014a). Los países de ingresos medios también dependen de las transferencias de ayuda. En Panamá, donde existe una fuerte objeción política contra los aumentos de tarifas, estas no han sido modificadas durante más de dos décadas (OMS, 2014a; Fernández *et al.*, 2009).

La reticencia a asignar recursos directos al saneamiento y las aguas residuales se refleja en la iniciativa TrackFin<sup>3</sup> que se llevó a cabo en Brasil, Ghana y Marruecos. Según se informó en la encuesta de evaluación anual mundial sobre saneamiento y agua potable (GLAAS, por sus siglas en inglés) de ONU-Agua, la mayoría de los fondos estaban dirigidos al suministro de agua potable en el sector urbano, a pesar de que la cobertura del servicio de saneamiento rural era mucho menor (OMS, 2014a). Tanto en las tarifas de suministro de agua como en las de aguas residuales se pueden contemplar políticas favorables o medidas de asequibilidad destinadas a la población en condiciones de pobreza. Según la encuesta de GLAAS, más del 60% de los países indicaron que existen esquemas de asequibilidad para el saneamiento, pero solo en la mitad de los casos se utilizaban en forma generalizada (OMS, 2014a).

Cuando la infraestructura ya ha sido instalada, cada vez es más común que los costos de operación, mantenimiento y capital a futuro se cubran por medio de las tarifas aplicadas a los usuarios. No obstante, la recuperación total de los costos suele ser problemática.

<sup>3</sup> TrackFin: Seguimiento del financiamiento al saneamiento, la higiene y el agua potable. Para más información, ver [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/monitoring/investments/trackfin/en/](http://www.who.int/water_sanitation_health/monitoring/investments/trackfin/en/)



En los países de ingresos bajos y medios, es más común que los costos de operación y mantenimiento del saneamiento estén cubiertos por subsidios gubernamentales (OMS, 2014a). Por otro lado, si los subsidios gubernamentales son insuficientes, la falta de financiamiento puede conducir a un mantenimiento diferido, operaciones defectuosas y deterioro del sistema.

La gestión de residuos humanos aporta beneficios considerables a la sociedad, tanto para la salud pública como para el medio ambiente. Por cada USD 1 gastado en saneamiento, el retorno estimado es de USD 5.5 (Hutton y Haller, 2004). Aunque a menudo es difícil de medir en términos monetarios, es importante reconocer e identificar maneras de evaluar estos beneficios sociales y ambientales más amplios y canalizar recursos financieros hacia la realización de dichas inversiones (PNUMA, 2015b).

Los beneficios económicos y ambientales potenciales del uso de aguas residuales son notorios (PNUMA, 2015b), pero puede ser difícil financiar tales proyectos a través de tarifas ya que, en la mayoría de las áreas urbanas, los usuarios pagan el agua potable, el alcantarillado y el tratamiento de aguas residuales en una sola factura (por lo que no es posible pagar solo por un servicio y no por los demás) y los beneficios son difíciles de calcular en términos monetarios. Por lo tanto, la mayoría de los proyectos de reutilización de agua se basan en subsidios financiados por impuestos (Molinos-Senante *et al.*, 2011).

Cuando se trata de la recuperación de nutrientes a través del manejo de lodos fecales, existen varios modelos de negocio viables (ver Capítulo 16). En la figura 3.2 se muestra uno sencillo, en el que una empresa de servicios públicos logra una recuperación total de costos gracias a las tasas de vertido y los ingresos por la venta de lodos fecales tratados (Strande *et al.*, 2014).

El análisis de la relación costo-beneficio es la herramienta más utilizada y aceptada en materia de análisis económico para la evaluación de proyectos. Un análisis del costo de la inacción frente al costo de la acción es útil para evaluar los beneficios económicos de invertir en aguas residuales (PNUMA, 2015b). Guest *et al.* (2009) destacan la importancia de la participación temprana de las partes interesadas en cualquier toma de decisiones para asegurar la aceptación de las propuestas, independientemente de cualquier evidencia de beneficios económicos o ahorros de costos.

### 3.4 Aspectos socioculturales

La integración de la ciudadanía en la toma de decisiones en todos los niveles fomenta la participación y el sentido de pertenencia. Esto incluye decisiones acerca de qué tipo de instalaciones de saneamiento son deseadas y aceptadas, cómo financiarlas de forma segura y cómo mantenerlas en el futuro (ver Tabla 3.1). Es especialmente importante llegar a grupos marginados, minorías étnicas, personas que viven en extrema pobreza en zonas rurales remotas o en asentamientos urbanos informales, y comprometerse con las mujeres que son quienes sufrirán las consecuencias de salud en caso de una gestión inadecuada de los desechos humanos.

La percepción pública influye en la toma de decisiones y limita lo que es posible poner en práctica, especialmente cuando se trata de la reutilización del agua. Algunas veces, las opciones de reutilización económicamente racionales no son viables, por ejemplo, debido a la percepción de que todavía puede haber rastros de material fecal en aguas residuales que puedan no haber sido suficientemente tratadas. Por lo tanto, es importante considerar cuáles son los usos seguros, apropiados y aceptables con cada tipo de agua. Las percepciones, la sensibilización sobre los riesgos y la división del trabajo en función del género son también factores importantes que determinarán cómo las personas protegerán su propia salud y la de los demás con respecto al uso de aguas residuales en la producción de alimentos (ver Cuadro 2.2).

Además, la aplicación de políticas puede suponer complejos problemas sociopolíticos. La corrupción es común en los servicios relacionados con el agua y las aguas residuales, en parte debido al monopolio de los proveedores y la frecuencia de los proyectos de grandes capitales (Transparencia Internacional, 2008). Las oportunidades para las prácticas corruptas abundan con respecto a los permisos de contaminación, monitoreo y cumplimiento, y el hecho de que se «haga la vista gorda» permite que el problema persista. Cuando la corrupción es prevalente, es importante promover la imparcialidad en el cumplimiento de la normativa (Rothstein y Tannenber, 2015).

Se puede promover la integridad en el proceso de gestión de los recursos hídricos mediante la construcción de sistemas más resistentes a la corrupción. Al aumentar la transparencia, la rendición de cuentas y la participación en el sector, se pueden reducir las oportunidades de corrupción (Órgano de la Gobernabilidad del Agua del PNUD en SIWI/Cap-Net/Water- Net/WIN, 2009; WIN, 2016).

# CAPÍTULO 4

WWAP | Angela Renata Cordeiro Ortigara y Richard Connor

Con los aportes de: Jack Moss (AquaFed), Kate Heal (IAHS), Birguy M. Lamizana-Diallo (PNUMA), Peter van der Steen y Tineke Hooijmans (UNESCO-IHE), Sarantuyaa Zandaryaa (UNESCO-PHI), Manzoor Qadir (UNU-INWEH) y Kate Medicott (OMS)

## ASPECTOS TÉCNICOS de las AGUAS RESIDUALES





En este capítulo se resumen, para quienes no son especialistas en agua, algunos aspectos técnicos básicos sobre las diferentes fuentes de aguas residuales, las posibles repercusiones de un tratamiento inadecuado, las tecnologías de recolección y tratamiento, y las necesidades en materia de datos e información.

## 4.1 Fuentes y componentes de las aguas residuales

Existe una estadística frecuentemente citada de que las aguas residuales están compuestas aproximadamente en un 99% de agua y en un 1% de sólidos en suspensión, coloidales y disueltos (ver, por ejemplo, ONU-Agua, 2015a). Aunque la composición exacta de las aguas residuales varía, obviamente, según las diferentes fuentes y a lo largo del tiempo, el agua sigue siendo, sin duda, su principal componente. Las distintas fuentes de aguas residuales pueden presentar otros tipos de componentes en concentraciones variables (ver Tabla 4.1).

Es probable que las aguas residuales domésticas y municipales contengan altas cargas bacterianas, si bien la mayoría de las bacterias presentes en las heces humanas no son inherentemente patógenas. No obstante, cuando se produce una infección, un gran número de microorganismos patógenos (como bacterias, virus, protozoos y helmintos) se propagan en el medio ambiente a través de las heces. La eliminación de patógenos es a menudo el objetivo principal de los sistemas de tratamiento de aguas residuales con el fin de reducir la carga de la enfermedad.

Las aguas residuales de las actividades industriales y mineras, así como de la gestión de los desechos sólidos (por ejemplo, lixiviados de vertederos), también pueden contener compuestos orgánicos tóxicos como hidrocarburos, bifenilos policlorados (PCB, por sus siglas en inglés), contaminantes orgánicos persistentes (COP), compuestos orgánicos volátiles (COV) y disolventes clorados. Cantidades muy pequeñas de ciertos compuestos orgánicos pueden contaminar grandes volúmenes de agua. Un litro de gasolina, por ejemplo, es suficiente para contaminar un millón de litros de agua subterránea (Gobierno de Canadá, s.f.).

Los «contaminantes emergentes» (ver Cuadro 4.1) pueden definirse como «cualquier sustancia química sintética o natural o cualquier microorganismo que no se detecte comúnmente en el medio ambiente, pero que pueda entrar en él y causar efectos adversos ecológicos y/o para la salud humana» (USGS, s.f.). Las principales categorías de contaminantes emergentes presentes en las aguas residuales son los productos

### CUADRO 4.1 CONTAMINANTES EMERGENTES

Los contaminantes emergentes se encuentran en concentraciones variables en aguas residuales tratadas y no tratadas, efluentes industriales y escorrentías agrícolas que se infiltran en ríos, lagos y aguas costeras (UNESCO, 2011). También se han detectado en el agua potable (Raghav *et al.*, 2013), ya que los procesos convencionales de tratamiento de aguas residuales y de purificación de agua no son eficaces para eliminarlos. Las tecnologías avanzadas de tratamiento de aguas residuales (filtración por membrana, nanofiltración, ultrafiltración y ósmosis inversa) pueden eliminar parcialmente algunos productos químicos y compuestos farmacéuticamente activos (González *et al.*, 2016). Los riesgos potenciales para la salud humana de los contaminantes emergentes por medio de la exposición a través del agua potable y los productos agrícolas continúan siendo una preocupación.

Los efectos de los contaminantes individuales en la salud humana y en los ecosistemas han sido evaluados solo de forma marginal y los efectos acumulativos no han sido estudiados en absoluto. Existen pruebas científicas de que muchos productos químicos reconocidos como contaminantes emergentes podrían causar alteraciones endocrinas en los seres humanos y en la fauna acuática (provocando anomalías congénitas y trastornos del desarrollo, y afectando la fertilidad y la salud reproductiva), incluso en concentraciones muy bajas (Poonthai *et al.*, 2007), así como tumores cancerosos y el desarrollo de resistencia a patógenos bacterianos, incluida resistencia a múltiples fármacos.

Fuente: Adaptado de Muñoz *et al.* (2009).

Con los aportes de Sarantuyaa Zandaryaa (UNESCO-PHI).

farmacéuticos (por ejemplo, antibióticos, analgésicos, antiinflamatorios, medicamentos psiquiátricos, etc.), esteroides y hormonas (es decir, anticonceptivos), productos para el cuidado personal (por ejemplo, fragancias, filtros solares, repelentes de insectos, microperlas y antisépticos), pesticidas y herbicidas, agentes tensioactivos y metabolitos tensioactivos, retardantes de llama, aditivos industriales, productos químicos, plastificantes y aditivos de gasolina. Los contaminantes emergentes raramente son controlados o monitoreados y se necesitan más investigaciones para evaluar sus impactos sobre la salud humana y el medio ambiente.

**Tabla 4.1** Ventajas y desventajas de determinados tipos de sistemas de tratamiento de aguas residuales

Fuentes de aguas residuales	Componentes típicos
Aguas residuales domésticas	Excrementos humanos (microorganismos patógenos), nutrientes y materia orgánica. También pueden contener contaminantes emergentes (por ejemplo, productos farmacéuticos, fármacos y disruptores endocrinos)
Aguas residuales municipales	Muy amplia gama de contaminantes, tales como microorganismos patógenos, nutrientes y materia orgánica, metales pesados y contaminantes emergentes
Escorrentía urbana	Muy amplia gama de contaminantes, incluidos productos de combustión incompletos (por ejemplo, hidrocarburos aromáticos policíclicos y carbón negro/hollín procedentes de la combustión de combustibles fósiles), caucho, aceite de motor, metales pesados, basura no degradable/orgánica (especialmente plásticos de carreteras y estacionamientos), partículas suspendidas y fertilizantes y pesticidas (de césped)
Escorrentía agrícola (flujo superficial)	Microorganismos patógenos, nutrientes de los fertilizantes aplicados a los suelos y pesticidas e insecticidas derivados de las prácticas agrícolas
Acuicultura terrestre	Los efluentes de los estanques de asentamiento son típicamente ricos en materia orgánica, sólidos en suspensión (partículas), nutrientes disueltos, y metales pesados y contaminantes emergentes
Aguas residuales industriales	Los contaminantes dependen del tipo de industria (ver Tabla 6.4 para más detalles)
Actividades mineras	El drenaje de relaves, a menudo contiene sólidos en suspensión, alcalinidad, acidez (necesita ajuste de pH) sales disueltas, cianuro y metales pesados. Puede contener también elementos radiactivos, dependiendo de la actividad de la mina (ver Tabla 6.4 para más detalles)
Generación de energía	El agua generada en el sector energético suele ser una fuente de contaminación térmica (agua caliente) y normalmente contiene nitrógeno (por ejemplo, amoníaco, nitrato), total de sólidos disueltos, sulfatos y metales pesados (ver Tabla 6.4 para más detalles)
Lixiviados de vertedero	Contaminantes orgánicos e inorgánicos, con concentraciones potencialmente altas de metales y químicos orgánicos peligrosos
Lixiviados de vertedero	Contaminantes orgánicos e inorgánicos, con concentraciones potencialmente altas de metales y químicos orgánicos peligrosos

Fuente: Basado en EPA EUA (2015 y s.f.b.), ONU (s.f.b.), Akcil y Koldas (2006), Gobierno de Columbia Británica (1992) y Tchobanoglous et al. (2003).

#### CUADRO 4.2 PROHIBIR CONTAMINANTES DE AGUAS RESIDUALES: EL EJEMPLO DE LAS MICROPERLAS

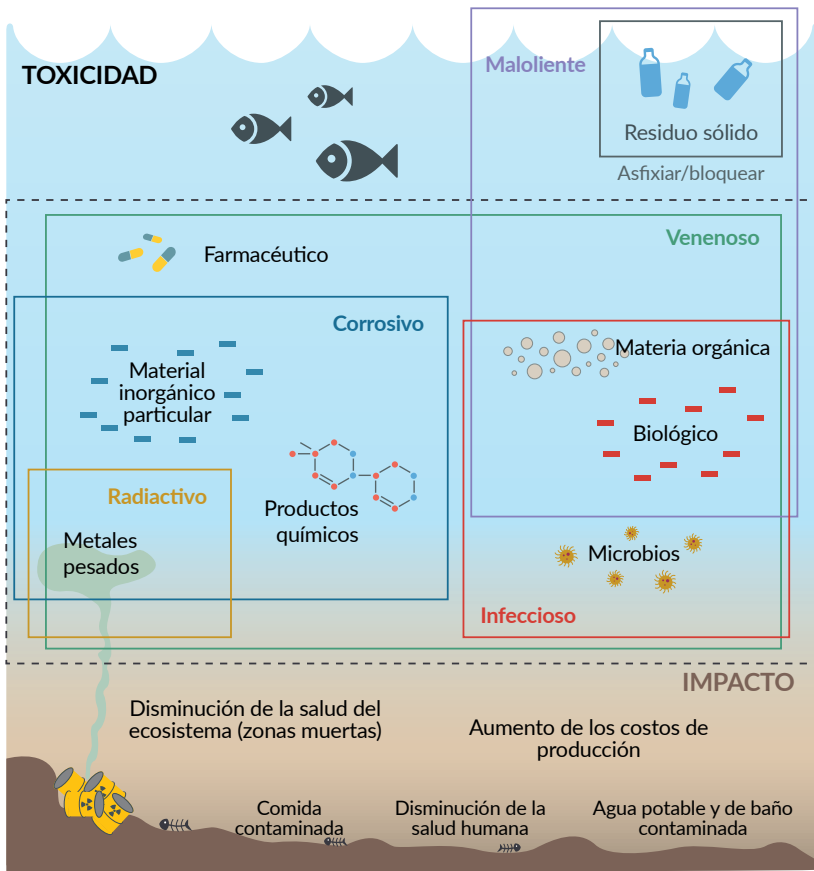
Las microperlas se encuentran en ciertos productos de consumo, tales como limpiadores faciales y pasta de dientes. Después de su uso, estas partículas esféricas hechas de polietileno o polipropileno terminan en aguas residuales. Una vez que las microperlas entran en el sistema de aguas residuales pocas instalaciones de tratamiento de aguas residuales son capaces de eliminarlas de las corrientes de agua. Aún no se conocen bien los riesgos para la vida acuática y la salud pública, pero las propias partículas pueden contener toxinas o atraer a otras toxinas en el agua (Copeland, 2015).

En diciembre de 2015, el Gobierno de los Estados Unidos exigió a los fabricantes estadounidenses que dejaran de utilizar microperlas en los productos antes del 1 de julio de 2017, y que suspendieran la venta de productos que contuvieran microperlas antes del 1 de julio de 2018. En junio de 2016, Canadá añadió las microperlas a la lista de sustancias tóxicas en virtud de la Ley Canadiense de Protección del Medio Ambiente (CEPA, por sus siglas en inglés), lo que permitió al gobierno regular y prohibir el uso de microperlas (Gobierno de Canadá, 2016). En setiembre de 2016, el Gobierno del Reino Unido anunció planes para prohibir las microperlas en cosméticos y productos de cuidado personal (DEFRA, por sus siglas en inglés, 2016).

Las microperlas pueden sustituirse fácilmente por ingredientes naturales como cáscara de almendras y carozo de damascos, muchas de las grandes empresas ya han anunciado que van a poner fin al uso de estos productos microplásticos. La acción conjunta entre los sectores público y privado eliminó de forma efectiva los argumentos económicos para retrasar la prohibición de estas sustancias.

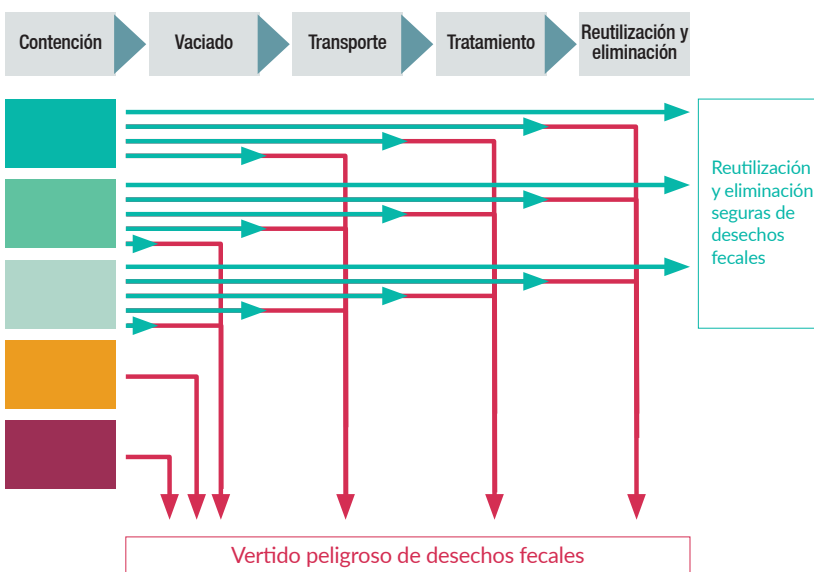


**Figura 4.1** Componentes de aguas residuales y sus efectos



Fuente: Adaptado de Corcoran et al. (2010, Fig. 5, p. 21).

**Figura 4.2** Marco de residuos fecales para estimar la proporción de saneamiento y aguas residuales gestionada de forma segura



Fuente: Adaptado de UNICEF/OMS (2015, Fig. 39, p. 44).

Es posible reducir/mitigar el uso y el vertido de ciertos tipos de contaminantes emergentes mediante la normativa gubernamental (ver Cuadro 4.2) y la participación del sector privado.

## 4.2 Consecuencias del vertido de aguas residuales no tratadas o con tratamiento inadecuado

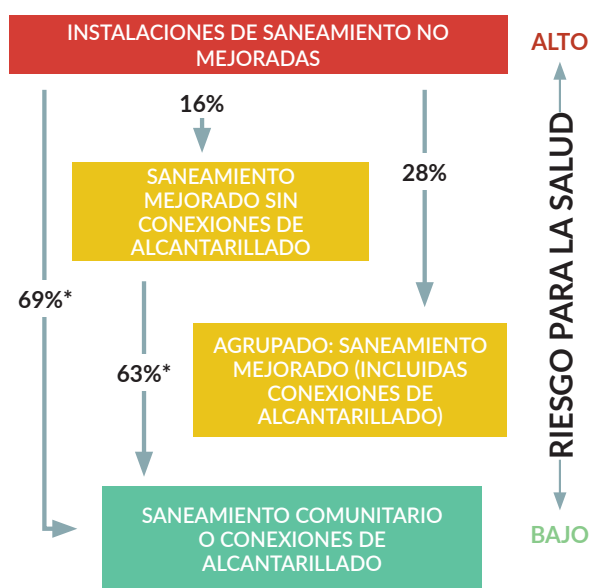
El vertido de aguas residuales no tratadas o parcialmente tratadas en el medio ambiente provoca la contaminación de las aguas superficiales, el suelo y las aguas subterráneas. Una vez vertidas en las masas de agua, las aguas residuales se diluyen y son transportadas aguas abajo, o se infiltran en los acuíferos, donde pueden afectar la calidad (y, por lo tanto, la disponibilidad) de los suministros de agua dulce. El destino final de las aguas residuales vertidas en ríos y lagos es, a menudo, el océano.

El vertido de aguas residuales sin tratar o con tratamiento inadecuado tendrá consecuencias que se clasifican en tres grupos, según tengan: efectos adversos para la salud humana por la reducción de la calidad del agua; efectos ambientales negativos debido a la degradación de las masas de agua y de los ecosistemas; y posibles efectos en las actividades económicas (PNUMA, 2015b). En la Figura 4.1 se muestran los componentes de aguas residuales y sus efectos.

### 4.2.1 Efectos en la salud humana

A pesar de que las instalaciones de saneamiento de los hogares se han mejorado cada vez más desde 1990, los riesgos para la salud pública permanecen debido a la mala contención, las fugas durante el vaciado y el transporte y el tratamiento ineficaz de las aguas residuales (ver Figura 4.2). Se estima que solo el 26% de los servicios urbanos de saneamiento y de gestión de aguas residuales y el 34% de los servicios rurales previenen el contacto de los humanos con excrementos en forma efectiva a lo largo de la cadena de saneamiento y son considerados como una gestión eficiente (Hutton y Varughese, 2016).

**Figura 4.3** Transiciones de saneamiento y reducciones asociadas de las enfermedades diarreicas



\*Estas estimaciones se basan en pruebas limitadas, por lo que deben considerarse preliminares y no se han utilizado en la estimación actual de la carga de enfermedad.

Fuente: OMS (2014b, Fig. 11, p. 12).

Las enfermedades asociadas al saneamiento y aguas residuales siguen siendo comunes en los países donde la cobertura de estos servicios es baja, donde el uso informal de aguas residuales no tratadas para la producción de alimentos es alto y donde la dependencia del agua superficial contaminada para consumo y uso recreativo es habitual. Se estima que en 2012 842.000 muertes en países de ingresos medios y bajos fueron causadas por agua potable contaminada, instalaciones para el lavado de manos y servicios de saneamiento inadecuados (OMS, 2014b).

Mejorar el saneamiento y el tratamiento de aguas residuales es también una estrategia de intervención clave para controlar y eliminar muchas otras enfermedades, como el cólera y algunas enfermedades tropicales desatendidas, como el dengue, la dracunculiasis, la filariasis linfática, la esquistosomiasis, los helmintos transmitidos por el suelo y el tracoma (Aagaard-Hansen y Chaignat, 2010).

El acceso a instalaciones de saneamiento mejoradas puede ayudar a reducir notoriamente los riesgos para la salud (ver Figura 4.3) y se pueden obtener aún mayores beneficios para la salud a través de la provisión de servicios de saneamiento gestionados de forma eficiente y aguas residuales tratadas de forma segura.

## 4.2.2 Efectos ambientales

El vertido de aguas residuales no tratadas en el medio ambiente tiene un impacto en la calidad del agua que, a su vez, afecta la cantidad de recursos hídricos disponibles para uso directo. Las preocupaciones por la calidad del agua están aumentando como una dimensión importante de la seguridad del agua en todo el mundo (ver Prólogo). Desde 1990, la contaminación del agua ha aumentado en la mayoría de los ríos de África, Asia y América Latina, debido a la creciente cantidad de aguas residuales como resultado del crecimiento demográfico, el aumento de la actividad económica y la expansión de la agricultura, así como el vertido de aguas residuales sin tratamiento (o apenas con niveles mínimos) (PNUMA, 2016). La gestión inadecuada de las aguas residuales también tiene un impacto directo en los ecosistemas y los servicios que prestan (Corcoran *et al.*, 2010) (ver Capítulo 8).

La eutrofización, impulsada por el exceso de nitrógeno y fósforo, puede provocar floraciones de algas potencialmente tóxicas y disminución de la biodiversidad. El vertido de aguas residuales sin tratar en mares y océanos explica en parte por qué cada vez son más las zonas muertas desoxigenadas: se estima que 245.000 km<sup>2</sup> de ecosistemas marinos están afectados, con repercusiones en la industria pesquera, medios de vida y cadenas alimenticias (Corcoran *et al.*, 2010).

“  
**Cuando el vertido de aguas residuales causa daños ambientales, se generan costos externos (externalidades) y se pierden los beneficios potenciales del uso de aguas residuales**

### 4.2.3 Efectos económicos

Dado que la disponibilidad de agua dulce es fundamental para mantener el bienestar económico de cualquier comunidad humana, la mala calidad del agua constituye un obstáculo adicional al desarrollo económico. La mala calidad del agua dificulta la productividad agrícola en entornos rurales y periurbanos. El agua contaminada puede afectar directamente a las actividades económicas que utilizan el agua, como la producción industrial, la pesca, la acuicultura y el turismo (PNUMA, 2015b), y puede limitar indirectamente la exportación de ciertas mercancías debido a restricciones, e incluso prohibiciones, de productos contaminados.

Por ejemplo, en el Caribe, muchas pequeñas economías insulares dependen casi totalmente de la salud de sus arrecifes para el turismo, la pesca y la protección de la costa (Corcoran *et al.*, 2010), pero estos arrecifes están amenazados por el vertido de aguas residuales no tratadas. Si bien la contaminación de los entornos naturales puede obstaculizar las actividades económicas, el turismo en sí y la creciente demanda de instalaciones favorables al medio ambiente pueden proporcionar apalancamiento para las inversiones en el mantenimiento de entornos naturales y, por lo tanto, actuar como un factor motivador adicional para mejorar la gestión de las aguas residuales.

Cuando el vertido de aguas residuales causa daños ambientales, se generan costos externos (externalidades) y se pierden los beneficios potenciales del uso de aguas residuales. Puede contemplarse un argumento económico para mejorar la gestión de las aguas residuales con el fin de minimizar los impactos negativos que puede causar y maximizar los beneficios que puede generar. Si las aguas residuales son reconocidas como un bien económico, adecuadamente tratadas pueden tener un valor positivo tanto para quienes las producen como para quienes las consumen (PNUMA, 2015b).

## 4.3 Recolección y tratamiento de aguas residuales

Aunque en el Capítulo 15 se examinan las oportunidades de mejorar los sistemas de recolección y tratamiento de aguas residuales, en esta sección se describen los procesos básicos desde un punto de vista más técnico. Existen fundamentalmente dos tipos de sistemas de recolección y tratamiento de aguas residuales:

- Sistemas *ex situ*, donde los residuos son transportados a través de una red de alcantarillado a una planta de tratamiento o punto de eliminación.
- Sistemas *in situ*, donde los residuos se acumulan en una letrina o fosa séptica. Esta fosa puede vaciarse periódicamente o puede abrirse una nueva letrina/fosa séptica en otro lugar. Ciertos sistemas *in situ* tienen lechos de lixiviación que infiltran el agua parcialmente tratada de las fosas sépticas en el suelo (los sistemas viejos y sobreexigidos son una causa importante de contaminación en algunas zonas). En caso de vaciado, los desechos se transportan para su tratamiento y/o eliminación. Los sistemas *in situ* también pueden incluir sistemas de alcantarillado a pequeña escala que transportan las aguas residuales a las plantas de tratamiento situadas cerca.

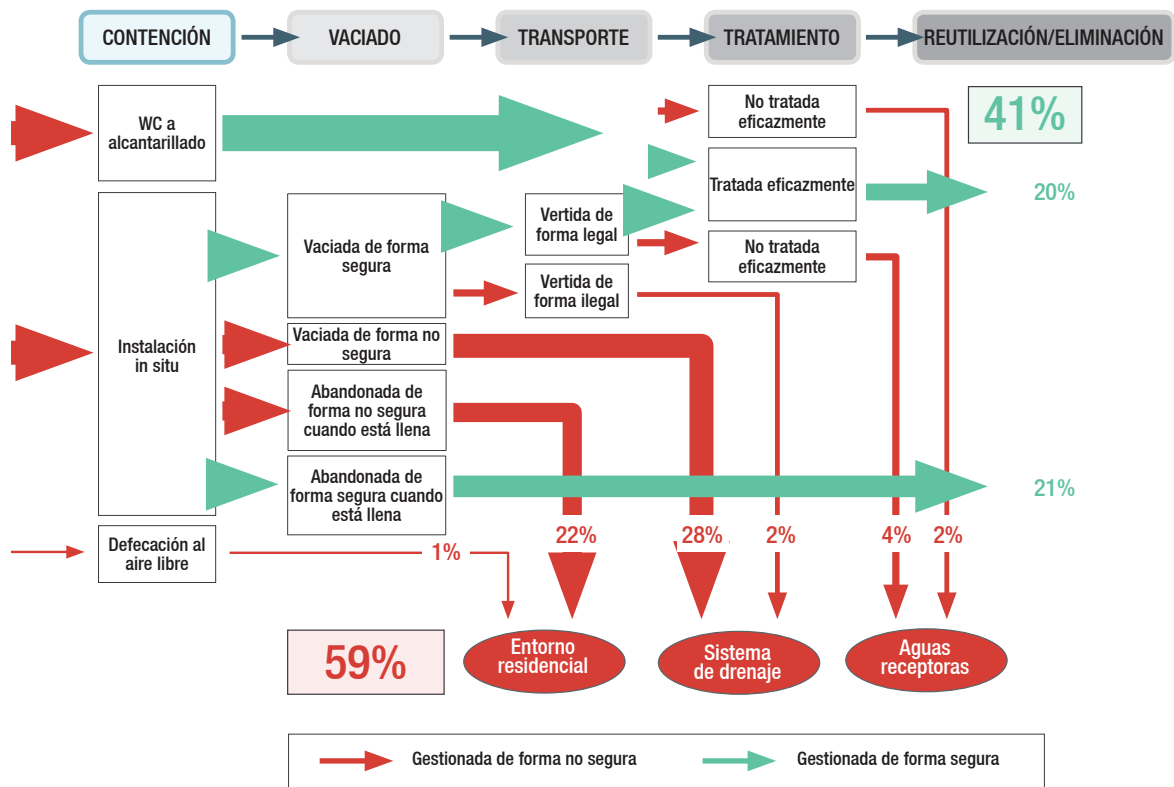
Las aguas residuales generadas en las industrias pueden ser tratadas *in situ* o vertidas a los sistemas municipales, pero deben otorgarse permisos de descarga y respetarse los límites de calidad. Las aguas residuales generadas en el sector agrícola (por ejemplo, la producción ganadera, los invernaderos), si son recolectadas y tratadas, pueden utilizarse en el mismo establecimiento para riego u otros fines.

En las figuras 4.4 y 4.5 se muestran sistemas de gestión de aguas residuales en Kampala (Uganda) y Dhaka (Bangladesh), respectivamente, que ilustran cómo pueden diferir según los países. Las ilustraciones también revelan la necesidad urgente de mejorar la eficiencia de los sistemas de gestión de aguas residuales con el fin de aumentar la proporción de aguas residuales gestionadas de forma segura.

### 4.3.1 Recolección de aguas residuales

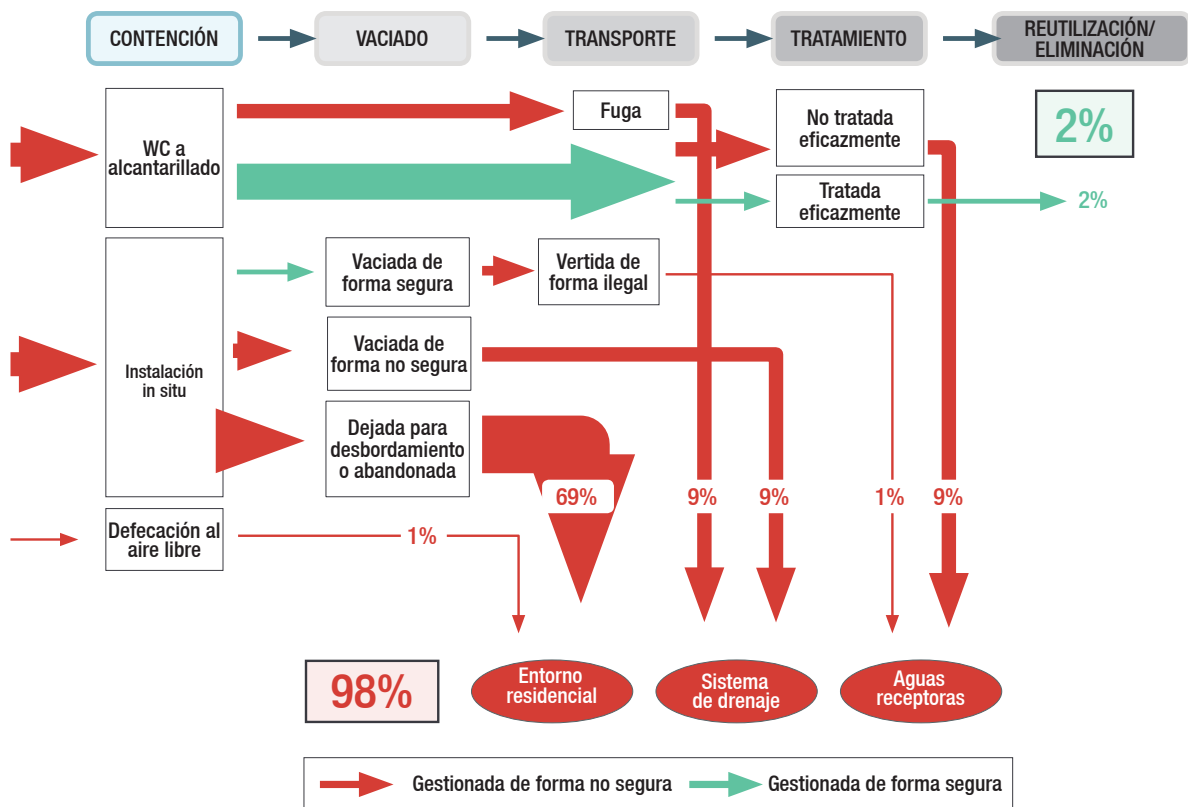
La red de alcantarillado utilizada para el transporte de aguas residuales puede ser separada o combinada. En los sistemas separados se utilizan diferentes conjuntos de tuberías para transportar las aguas residuales y la escorrentía urbana,

Figura 4.4 Sistema de gestión de agua en Kampala (Uganda)



Fuente: Peal et al. (2014, Fig. 6, p. 571).

Figura 4.5 Sistema de gestión de agua en Dhaka (Bangladesh)



Fuente: Peal et al. (2014, Fig. 4, p. 570).



mientras que en los sistemas combinados ambos flujos se transportan juntos. Se espera que los sistemas separados instalados, operados y controlados de manera adecuada reduzcan la cantidad de aguas residuales a tratar, para así evitar desbordamientos y hacer frente de manera más eficaz a los volúmenes periódicos y potencialmente grandes de escorrentía urbana que se producen en condiciones de tormenta. Sin embargo, las alcantarillas separadas no siempre funcionan tan eficientemente como se espera, por ejemplo, cuando los controles no son suficientes y se favorecen conexiones cloacales ilegales a las tuberías de escorrentía.

El punto final de una red de alcantarillado debe ser una planta de tratamiento, cuyo objetivo es eliminar los contaminantes de las aguas residuales para que puedan volver a usarse de forma segura (tratamiento adecuado a los fines) o devolverse al ciclo del agua con mínimos impactos ambientales.

El tratamiento de aguas residuales puede seguir un método centralizado o descentralizado. En los sistemas centralizados, las aguas residuales se recolectan de un gran número de usuarios, como una zona urbana, y se tratan en uno o más sitios. Los costos de recolección representan más del 60% del presupuesto total para la gestión de aguas residuales en un sistema centralizado, particularmente en comunidades con baja densidad de población (Massoud *et al.*, 2009).

Los sistemas descentralizados emplean una combinación de sistemas *in situ* y/o en grupo para el tratamiento de aguas residuales, y se usan a menudo para viviendas individuales, comunidades dispersas y de baja densidad y zonas rurales. Si bien los sistemas de tratamiento descentralizados frecuentemente reducen los costos de recolección, pueden no proporcionar el mismo nivel de beneficios y aún requerir un nivel de funcionamiento y mantenimiento tan efectivo como los sistemas centralizados.

### 4.3.2 Tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de las aguas residuales consiste en una combinación de procesos físicos, químicos y biológicos para eliminar los componentes de las aguas residuales.

Los procesos físicos permiten la eliminación de sustancias mediante el uso de fuerzas naturales (por ejemplo, la gravedad), así como de barreras físicas, tales como filtros y membranas o radiación ultravioleta (UV), que se utilizan principalmente para la desinfección. El uso de membranas está aumentando debido a la alta calidad de los efluentes después del tratamiento y para la eliminación efectiva de microcontaminantes orgánicos, desde pesticidas hasta productos farmacéuticos y de cuidado personal

## CUADRO 4.3 EVALUACIÓN DE RIESGOS EN LA GESTIÓN DE SISTEMAS DE AGUAS RESIDUALES

Un sistema de tratamiento de aguas residuales gestionado constituye a menudo una cadena larga y multifacética de componentes interconectados (tuberías, bombas, instalaciones de tratamiento, etc.). Evaluar y gestionar los riesgos involucrados en estos componentes requiere técnicas similares a las empleadas en las evaluaciones de impacto ambiental, las evaluaciones de salud y seguridad y la gestión de activos. El objetivo es identificar riesgos potenciales (que pueden clasificarse de acuerdo con la naturaleza, gravedad, probabilidad de ocurrencia, consecuencias, etc.) y aplicar medidas de control para cada uno.

Un proceso de «seguimiento del flujo» suele ser una buena manera de proceder. Comienza con la elaboración de un inventario del tipo de contaminantes (composición física/química/bacteriológica, etc.), su concentración y la frecuencia probable de su ocurrencia/vertido, que puede verse afectada por las condiciones meteorológicas y el comportamiento del contaminador. Este paso es fundamental para identificar y predecir impactos y eventos en toda la cadena de componentes.

Cada eslabón de la cadena (tanto activos como procesos) debe entonces ser examinado para determinar cómo debe funcionar, cómo podría funcionar mal, cómo podría interactuar con el contaminante, cuáles serían los impactos de la falla, cuánto tiempo llevaría solucionar una falla, y así sucesivamente. Algunas fallas pueden ocurrir por las interacciones entre el contaminante y la infraestructura. Por ejemplo, muchos contaminantes pueden causar corrosión de tuberías y equipos o bloquear y atascar bombas. Otros pueden surgir de eventos «externos», como fallas eléctricas, daños por tráfico o vandalismo.

También hay un número considerable de riesgos para la salud y la seguridad que pueden afectar tanto al personal operativo como al público en general. Estos van desde riesgos de ahogamiento hasta la liberación de gases peligrosos, desde lesiones físicas hasta enfermedades a largo plazo. Al final de la cadena están los puntos de vertido, más allá de los cuales también se debe evaluar la sensibilidad de los usuarios aguas abajo, ya sea el medio ambiente natural u otros usuarios de agua. La eficacia y la imagen de la gestión de las aguas residuales pueden verse gravemente afectadas si los intereses de estos usuarios aguas abajo no se tienen debidamente en cuenta en el proceso de evaluación de riesgos.

Un proceso de evaluación de riesgos efectivo normalmente exige una puesta en práctica eficiente de competencias distintas y complementarias entre sí.

*Con los aportes de Jack Moss (AquaFed).*

**Tabla 4.2** Ventajas y desventajas de determinados sistemas de tratamiento de aguas residuales

Tipo	Naturaleza de las aguas residuales	Ventajas	Desventajas	Componentes eliminados
Sistemas sépticos	Aguas residuales domésticas	Simple, duradero, de fácil mantenimiento, requiere un espacio pequeño	Baja eficiencia de tratamiento; necesidad de un tratamiento secundario; efluente no inodoro; el contenido debe eliminarse a intervalos frecuentes	DQO, DBO, TSS; grasa
Sanitarios de compostaje	Excrementos humanos, papel higiénico, aditivo de carbono, residuos de alimentos	Reducir el consumo de desechos y apoyar el reciclaje de nutrientes (por ejemplo, el uso de lodos resultantes en la agricultura)	Necesidad de diseño y mantenimiento adecuados para proteger el medio ambiente y la salud humana	Volumen reducido de 10 a 30%; patógenos
Filtro anaeróbico	Aguas residuales domésticas e industriales depositadas previamente de relación DQO/DBO estrecha	Simple y bastante duradero, si está bien construido y las aguas residuales han sido tratadas previamente de forma adecuada; alta eficiencia de tratamiento; se requiere poca superficie	El material del filtro puede causar altos costos de construcción; se puede obstruir el filtro; efluente no inodoro	DBO, total de sólidos disueltos, TSS
Tratamiento anaeróbico (por ejemplo, biodigestor, RAFA, etc.)	Excrementos humanos, desechos animales y agrícolas	Reciclado del recurso; el gas producido se puede utilizar para generación de energía, cocina e iluminación	Funcionamiento y mantenimiento complejos, que pueden llevar a fugas de gas o a una reducción de la producción y bloqueo del tanque digestor con sólidos; el tratamiento anaeróbico a menudo proporciona poca eliminación de nutrientes	DQO, DBO, TSS; grasa
Estanques de estabilización  Estanques anaeróbicos, facultativos y de maduración	Aguas residuales domésticas, industriales y agrícolas; buenas para ciudades pequeñas y medianas	Los estanques de maduración pueden lograr una buena eliminación bacteriana; necesitan ser desenlodados a intervalos regulares –no hacerlo puede tener consecuencias graves–; el biogás puede ser recuperado como fuente de energía	Uso intensivo de tierra; a veces DBO y SS altos en efluentes de algas pero relativamente inofensivos; vistos a veces como proceso del clima cálido pero puede ser utilizado en climas moderados	DBO, SS, TN, TP
Estanques de estabilización de aguas residuales a base de lentejas de agua	Aguas residuales domésticas y agrícolas	No hay riesgo de obstrucción; altas tasas de eliminación de nutrientes	Uso intensivo de tierra; necesidad de cosecha constante; inadecuado en regiones muy ventosas	DBO, SS, TN, TP, metales
Humedales artificiales	Aguas residuales domésticas y agrícolas; pequeñas comunidades; tratamiento terciario para industrias	Baja o ninguna necesidad de energía; bajos costos de mantenimiento; proporciona valor estético, comercial y para el hábitat	Uso intensivo de tierra; se puede obstruir el sistema	TSS, DQO, TN, TP
Tratamiento biológico aeróbico (es decir, lodos residuales activados)  Aguas residuales domésticas e industriales	Los aireadores de acero inoxidable son resistentes a las aguas residuales corrosivas y las hacen adecuadas para las plantas industriales de pulpa y papel, la industria química y otros entornos extremos  Buena eliminación de la DBO y la planta se puede operar para facilitar la eliminación de nitrógeno y fósforo	Rápido, económico comparado con otros métodos, libre de olores  Requisitos de mantenimiento altos; ineficaces en aguas profundas (por lo tanto, las cuencas son generalmente poco profundas) y en condiciones climáticas de congelación	Poca eliminación de cargas bacterianas y alta producción de lodos	DBO, SS, TN, TP
Sistema de membrana  Microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración, RO	Aguas residuales depositadas previamente; pueden utilizarse en combinación con procesos biológicos (MBR, MBBR)	Procesos que cierran el ciclo del agua y producen agua de alta pureza para su reutilización	Costos más altos y mayores requisitos en funcionamiento, mantenimiento y consumo de energía	La microfiltración y la ultrafiltración eliminan todos los agentes biológicos y las macromoléculas; la nanofiltración elimina las moléculas orgánicas simples; la ósmosis inversa elimina los iones inorgánicos

**DBO** Demanda biológica de oxígeno - **DQO** Demanda química de oxígeno - **MBBR** (por sus siglas en inglés) Reactor de lecho móvil con biofilm - **MBR** (por sus siglas en inglés) Reactores biológicos de membrana - **RO** (por sus siglas en inglés) Ósmosis inversa - **SS** Sólidos en suspensión - **TDS** (por sus siglas en inglés) Total de sólidos disueltos - **TN** (por sus siglas en inglés) Nitrógeno total - **TP** (por sus siglas en inglés) Fósforo total - **TSS** Total de sólidos en suspensión - **RAFA** Reactor anaerobio de flujo ascendente

Fuente: Compilado por Birguy M. Lamizana-Diallo(PNUMA) y Angela Renata Cordeiro Ortigara (WWAP), basado en OMS (2006) y ONU-Agua (2015a).

**Los contaminantes emergentes rara vez son controlados o monitoreados y se necesitan más investigaciones para evaluar sus impactos sobre la salud humana y el medio ambiente**

(Liu *et al.*, 2009). Los sistemas de membrana se caracterizan por un alto consumo energético y altos niveles de funcionamiento y mantenimiento (Visvanathan *et al.*, 2000).

Los procesos químicos se usan a menudo para la desinfección y la eliminación de metales pesados. El tratamiento primario químicamente asistido, por ejemplo mediante el uso de sales férricas o polielectrolito, puede eliminar la DBO y los sólidos, pero el lodo generado es frecuentemente difícil de tratar y eliminar (ONU-Agua, 2015a). Se ha demostrado que la oxidación químicamente avanzada elimina los compuestos perturbadores endocrinos (EDC) (Liu *et al.*, 2009).

Los procesos biológicos en el tratamiento de aguas residuales reproducen la degradación que ocurre naturalmente en ríos, lagos y arroyos. Estos procesos se utilizan en plantas de tratamiento de aguas residuales donde los reactores biológicos están diseñados para potenciar la degradación bioquímica en condiciones cuidadosamente controladas, aumentando así la eliminación de contaminantes y la estabilización de los lodos.

Los procesos que tienen lugar en los biorreactores pueden ser aeróbicos o anaeróbicos. Los primeros a menudo necesitan más energía para mantener las condiciones aeróbicas dentro del reactor, y los desechos orgánicos se convierten en biomasa (lodo) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Sin embargo, impide la formación de metano ( $\text{CH}_4$ ), que tiene un mayor potencial de calentamiento climático que el  $\text{CO}_2$  (Cakir and Stenstrom, 2005). Los procesos de tratamiento anaeróbico generalmente requieren menos energía y tienen una menor producción de lodos y generan  $\text{CH}_4$ , pero esto puede ser capturado y usado como una fuente de energía.

Los procesos físicos, químicos y biológicos se combinan para lograr diferentes «niveles» de aguas residuales: preliminares, primarios, secundarios, terciarios y cuaternarios (ver Léxico para una descripción más detallada).

La selección de las tecnologías más adecuadas depende del tipo de componentes, de la carga contaminante, del uso anticipado de las aguas residuales tratadas y de la asequibilidad económica. En la Tabla 4.2 se ofrecen algunos ejemplos de tecnologías, el tipo de aguas residuales para las que se usan generalmente y sus ventajas y desventajas.

Uno de los subproductos del tratamiento de aguas residuales es el lodo residual. El lodo generado es rico en nutrientes y materia orgánica, lo que le confiere un potencial considerable como acondicionador del suelo y fertilizante (ver Capítulo 16). En muchos casos, sin embargo, no se percibe el valor beneficioso de los lodos residuales debido a las preocupaciones acerca de los patógenos, metales pesados y otros compuestos que puedan contener. Otros subproductos útiles de las aguas residuales incluyen biogás (es decir,  $\text{CH}_4$ ) y calor, que pueden recuperarse para un uso beneficioso en la planta de tratamiento o en la comunidad adyacente.

La gestión y el funcionamiento reales de los sistemas de tratamiento de aguas residuales son actividades complejas que pueden beneficiarse de un método de evaluación de riesgos que analiza la cadena de componentes que conforman el sistema. Dichas evaluaciones pueden ayudar a garantizar su correcto funcionamiento con los niveles de eficiencia esperados y poner de relieve los eslabones débiles en la cadena que podrían causar problemas de salud y seguridad (ver Cuadro 4.3).

## 4.4 Necesidades en materia de datos e información

Los datos sobre recolección y tratamiento de aguas residuales son escasos, en particular (pero no únicamente) en los países en desarrollo. De acuerdo con Sato *et al.* (2013), solo 55 de los 181 países analizados contaban con información estadística fidedigna sobre la generación, el tratamiento y el uso de aguas residuales, 69 países tenían datos sobre uno o dos aspectos y 57 países no tenían ninguna información. Además, los datos de aproximadamente dos tercios (63%) de los países tenían más de cinco años. La principal base de datos de AQUASTAT de la FAO contiene una sección sobre aguas residuales municipales en la

que se puede encontrar información relacionada con las aguas residuales en las secciones «recursos hídricos» y «uso del agua» de cada perfil de país. Sin embargo, algunos de estos datos pueden tener más de cinco años de antigüedad.

El desafío clave de la recopilación de datos tiene que ver con la necesidad de generar datos a nivel nacional que sean suficientemente detallados, coherentes y comparables con otros países.

El GLAAS (por sus siglas en inglés), una iniciativa de ONU-Agua puesta en práctica por la OMS, proporciona perfiles de países sobre saneamiento y cobertura de agua potable. El GLAAS también contiene información sobre temas relacionados con la gobernabilidad, el monitoreo de datos sobre el agua y los recursos humanos. A partir del ciclo de presentación de informes 2016/2017, también se incluirá el financiamiento, que podría revelar información adicional sobre algunos aspectos de la gestión de aguas residuales.

La División de Estadística de las Naciones Unidas (UNSD, por sus siglas en inglés) es responsable del desarrollo de los principios fundamentales de las estadísticas oficiales para guiar el trabajo de los organismos nacionales de estadística. En 2012 adoptó el Marco Central del Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica (SCAE), que incluye el Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica para el Agua (SCAEA). El SCAEA propone un marco conceptual para entender las interacciones entre la economía y el medio ambiente, y aborda las necesidades de datos sobre el agua (UNSD, 2012). El SCAEA contiene tablas estandarizadas sobre los gastos financieros para la gestión de aguas residuales, incluida la medición de los flujos de aguas residuales dentro de la economía, que los países deben completar.

Existen otras iniciativas mundiales para mejorar la recolección de datos en materia de las aguas residuales a nivel regional. La OCDE y Eurostat llevaron a cabo una encuesta conjunta sobre aguas continentales que incluía preguntas sobre la capacidad de las plantas de tratamiento de aguas residuales, la producción de lodos y las emisiones químicas de la industria, la agricultura y los asentamientos humanos (Eurostat, 2014). La UNSD y el PNUMA realizan una campaña bienal de recolección de datos ambientales en todos los países, excepto los que están cubiertos por la encuesta conjunta de la OCDE y Eurostat. La encuesta de la UNSD y el PNUMA obtiene estadísticas sobre recursos de agua dulce renovables, extracción y uso de agua dulce, generación y tratamiento de aguas residuales y la población que cuenta con tratamiento de aguas residuales (UNSD, s.f.). Los datos sobre las características generales y la calidad de los desechos industriales y las aguas residuales se pueden encontrar en los registros de emisiones y transferencias de contaminantes (PRTR, por sus siglas en inglés) de los países (ver Capítulo 14).

Además de la información sobre la generación, el tratamiento y el uso de aguas residuales, un análisis de los estudios sobre la gestión de aguas residuales de ONU-Agua (2015a) reveló otras brechas de datos importantes, incluida información sobre la condición de la infraestructura existente de aguas residuales, el rendimiento del tratamiento de aguas residuales, el destino de los lodos fecales y el volumen, la calidad y la ubicación de las aguas residuales utilizadas en el riego. AQUASTAT (s.f.a.) está desarrollando un conjunto de datos mundiales precisos para la producción de aguas residuales.



# PARTE

# EJE TEMÁTICO

**Capítulo 5** | Aguas residuales  
municipales y urbanas

**Capítulo 6** | Industria

**Capítulo 7** | Agricultura

**Capítulo 8** | Ecosistemas



# CAPÍTULO 5

ONU-Habitat | Graham Alabaster, Andre Dzikus y Pireh Otieno

# AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES Y URBANAS





En este capítulo se examinan las fuentes y las consecuencias de las aguas residuales municipales y urbanas, y se destacan las perspectivas futuras para la generación de aguas residuales. Además, se establecen las oportunidades para la reutilización y el reciclaje de aguas.

Las aguas residuales municipales provienen de fuentes domésticas, industriales, comerciales e institucionales dentro de un asentamiento o comunidad de humanos. Las aguas residuales incluyen las aguas residuales municipales y la escorrentía urbana.

Como la generación de aguas residuales municipales y urbanas depende en gran medida de la forma y función de los sistemas urbanos, es necesario analizar con ojo crítico los patrones actuales y futuros de urbanización para elaborar métodos más sostenibles en la gestión de aguas residuales en las décadas venideras.

En la Figura 5.1 se presenta el desglose de la cobertura del saneamiento por región y, por ende, de la recolección formal de aguas residuales. Es claro que la primera opción para la recolección de aguas residuales de la mayor parte de los países desarrollados es el alcantarillado, si bien se utilizan servicios *in situ* en muchas áreas rurales y en zonas de urbanización no planificada (ver Capítulo 15).

## 5.1 La urbanización y sus consecuencias en la generación de aguas residuales

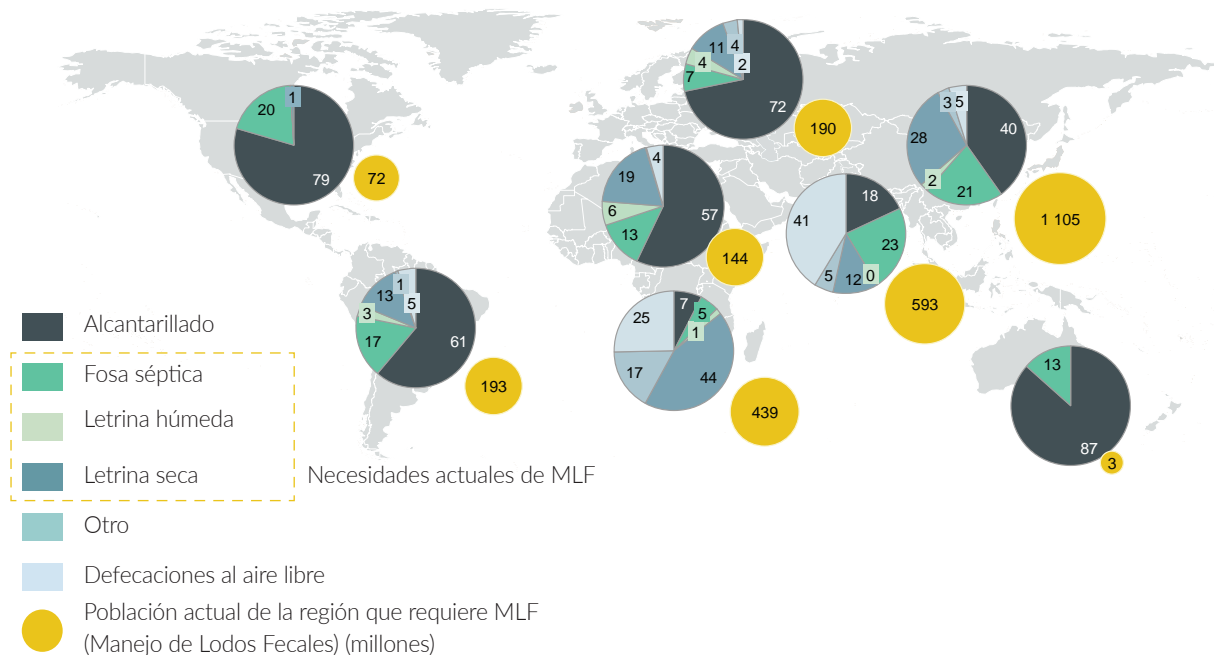
En todo el mundo las áreas urbanas enfrentan enormes desafíos. La aceleración del crecimiento urbano, los

cambios en las prácticas familiares y laborales, y la proliferación de asentamientos informales implicarán un reto cada vez mayor para la prestación de servicios. Esto se suma al impacto de los eventos extremos, el cambio climático y la migración en zonas en conflicto. La modificación de los patrones de urbanización produjo una mayor inequidad ya que las personas que viven en condiciones de pobreza en algunas regiones desarrolladas enfrentan los mismos desafíos que aquellas en regiones en desarrollo. Para el año 2030 se espera que la demanda mundial de energía y agua aumente 40% y 50%, respectivamente (ONU-Hábitat, 2016). Dicho crecimiento tendrá lugar sobre todo en las ciudades, lo cual implicará la aplicación de nuevos métodos para la gestión de aguas residuales. A su vez, la gestión de aguas residuales puede también brindar algunas de las respuestas necesarias para resolver otros desafíos, como la producción de alimentos y el desarrollo industrial.

## 5.2 Tipos urbanos

La definición de rural y urbano suele basarse en definiciones técnicas nacionales relativas a límites geográficos y no a la densidad de la población u otras características distintivas. Sin embargo, para comprender la generación de aguas residuales municipales es necesario analizar el concepto de

**Figura 5.1** Porcentaje de la población que cuenta con diferentes sistemas de saneamiento



Fuente: Cairns-Smith et al. (2014, Fig. 8, p. 25, basado en datos de OMS/UNICEF JMP). Cortesía de Boston Consulting Group.

«urbano» como tipos urbanos diferentes que no solo generan aguas residuales de maneras distintas, sino que determinan las posibles opciones para la recolección, tratamiento y utilización de aguas residuales (ver Tabla 5.1). Según un análisis de los tipos urbanos habituales, se observa que las siguientes tipologías cubren la mayoría de los casos en los países desarrollados y en desarrollo:

- Los **grandes centros urbanos** incluyen megaciudades, áreas urbanas con un distrito comercial central (DCC) y zonas residenciales desarrolladas con diferentes niveles de población que disminuye progresivamente y se encuentra a mayor distancia del DCC. El centro de mayor tamaño puede estar conectado (o no) con centros satélites más pequeños por medio de corredores de transporte. Por lo general, estas ciudades cuentan con amplias redes de alcantarillado, pero algunas de ellas, como Lagos, Nigeria, prácticamente no reciben el servicio (ver Cuadro 5.1).
- Grandes **centros urbanos formados a partir de aglomeraciones urbanas**, donde dos o más centros urbanos definidos crecen paulatinamente, junto con su densidad de población, hasta que se fusionan, de cierta forma, en una única área metropolitana. Dichas áreas cuentan con amplias redes de alcantarillado en las zonas desarrolladas de lo que antes era el centro de cada ciudad, cuya conformación pudo ser variada, y suelen tener instalaciones de tratamiento y administraciones municipales independientes. Estos tipos de centros urbanos también cuentan con extensas áreas sin alcantarillado. Algunos ejemplos: la aglomeración urbana Accra-Tema en Ghana o la aglomeración urbana de pequeños centros en Metro Manila.
- Los **centros urbanos más pequeños** suelen ser ciudades con un pequeño DCC, quizás algunos satélites y una expansión radial lineal en las principales rutas. Generalmente, estos centros urbanos más pequeños cuentan con redes de alcantarillado muy limitadas y suelen depender de un sistema de saneamiento *in situ*. Pueden estar cerca de otros centros, pero tienen administraciones municipales diferentes y, por lo tanto, responsabilidad institucional independiente.
- Las **grandes aldeas y las pequeñas ciudades** suelen ser compactas, pero prácticamente no presentan expansión periférica. Podría ser también el caso de asentamientos establecidos en torno a actividades industriales o comerciales. Algunos ejemplos: campus universitarios, aeropuertos y minas.

#### CUADRO 5.1 ALCANTARILLADO Y ELIMINACIÓN DE DESECHOS EN LAGOS, NIGERIA

Si bien en el Estado de Lagos se genera 1,5 millones de m<sup>3</sup> de aguas residuales por día (aproximadamente 550 millones m<sup>3</sup> anualmente), la megaciudad no cuenta con un sistema central de alcantarillado. Menos del 2% de la población cuenta con plantas de tratamiento de aguas residuales externas y solo las aguas residuales de inodoros están conectadas a fosas sépticas y pozos de infiltración. Otros desechos líquidos del hogar se vierten directamente en las canaletas, casi todas abiertas, frente a las casas o en la calle. A la larga, las aguas residuales se filtran o son arrastradas por la lluvia hacia las masas de agua. Las fosas sépticas y los pozos de infiltración que se utilizan en la recolección de aguas residuales de inodoros suelen contaminar las aguas subterráneas poco profundas, que constituyen una fuente hídrica vital para la mayoría de los residentes de ingresos bajos y medios. Además, la megaciudad no cuenta con una planta de tratamiento de lodos fecales, que, en su mayoría se evacúa en la Laguna de Lagos, especialmente en áreas como Iddo, Makoko, Ajegunle y otros. La contaminación fecal del sistema hídrico y el ambiente de la megaciudad a causa de la gestión deficiente de las aguas residuales constituye un problema sanitario de magnitud. La negligencia de las autoridades, la corrupción y la extrema pobreza, junto con una población que crece rápidamente y sin control, deterioraron la infraestructura actual de Lagos. Con una población actual de aproximadamente 18 millones y una tasa de crecimiento anual del 3%, se estima que el Estado de Lagos superará los 23 millones de personas para el año 2020. Es necesario aunar esfuerzos de forma urgente para evitar que se sigan contaminando los recursos hídricos.

Fuente: Major et al. (2011) y Nlé (2012).

- Las **zonas rurales** suelen contar únicamente con sistemas *in situ*, sin ningún tipo de sistema de alcantarillado formal. Es posible que se realicen algunas tareas de gestión de la escorrentía urbana.

La clasificación de los centros se realiza según la región. En China, por ejemplo, un centro urbano con una población de cinco millones se puede considerar una ciudad «pequeña». Además, las categorías mencionadas anteriormente pueden incluir poblaciones de barrios marginales. La proporción de barrios marginales suele ser mayor en grandes ciudades porque hay mayores oportunidades de conseguir empleo y es necesario contar con viviendas sociales (ONU-Hábitat, 2016) pero, a su vez, estos barrios representan un desafío para los centros urbanos más pequeños.

En los próximos diez o veinte años, las mayores tasas de urbanización se darán en centros urbanos más pequeños de entre 500.000 y un millón de habitantes (ONU-Hábitat,



**Tabla 5.1** Tipologías urbanas y aguas residuales, y drenaje urbano sostenible

Tipología urbana	Probabilidad de amplias redes de alcantarillado	Presencia de sistemas <i>in situ</i>	Poblaciones barrios marginales	Tipo de tratamiento	SUDS*	Nivel generación aguas residuales	Potencial reutilización/recuperación
Grandes centros urbanos	Sí	Improbable	Generalizados	Centralizado/descentralizado	Óptimo		Alto
Grandes centros urbanos a partir de aglomeraciones urbanas	Sí, pero no hay una para cada centro	Improbable	Considerable	Centralizado	Óptimo	Alto	Alto
Centros urbanos urbanos	Improbable	Probable	Posible	Descentralizado o fosa séptica		Medio	Alto/localizada
Grandes aldeas y pequeñas ciudades	Muy poco probable	Muy probable	Posible	Fosa séptica		Reducido	Posible
Zonas rurales	Inexistente	Muy probable	Improbable	Centralizado		Insignificante	Insignificante/reutilización doméstica

\* SUDS: Sistema de alcantarillado sostenible

Fuente: Autor.

2016). Esto tendrá un impacto notable en la generación de aguas residuales y el potencial del tratamiento y utilización descentralizados.

### 5.3 Fuentes de las aguas residuales en los sistemas municipales y urbanos

La composición de las aguas residuales municipales varía considerablemente ya que refleja la gama de contaminantes liberados por las diferentes combinaciones de fuentes domésticas, industriales, comerciales e institucionales.

A través del tipo urbano específico y el entorno legislativo o institucional se suele establecer la forma en que se recolectan y tratan estas aguas residuales (ver Capítulos 3, 4 y 15). Sin embargo, en la mayoría de los países, solo se recolecta formalmente una parte de las aguas residuales. Un porcentaje elevado de estas aguas, que provienen sobre todo de entornos de bajos ingresos, se elimina en el drenaje de agua superficial o el canal de drenaje informal más próximo.

En aquellas economías altamente industrializadas o en vías de desarrollo, y donde los sistemas legislativos no son fuertes, gran parte de las aguas residuales se mezcla antes de su tratamiento y vertido. Donde el saneamiento hídrico es la norma, el llamado «alcantarillado combinado» sigue siendo habitual. Se trata de un método perfectamente

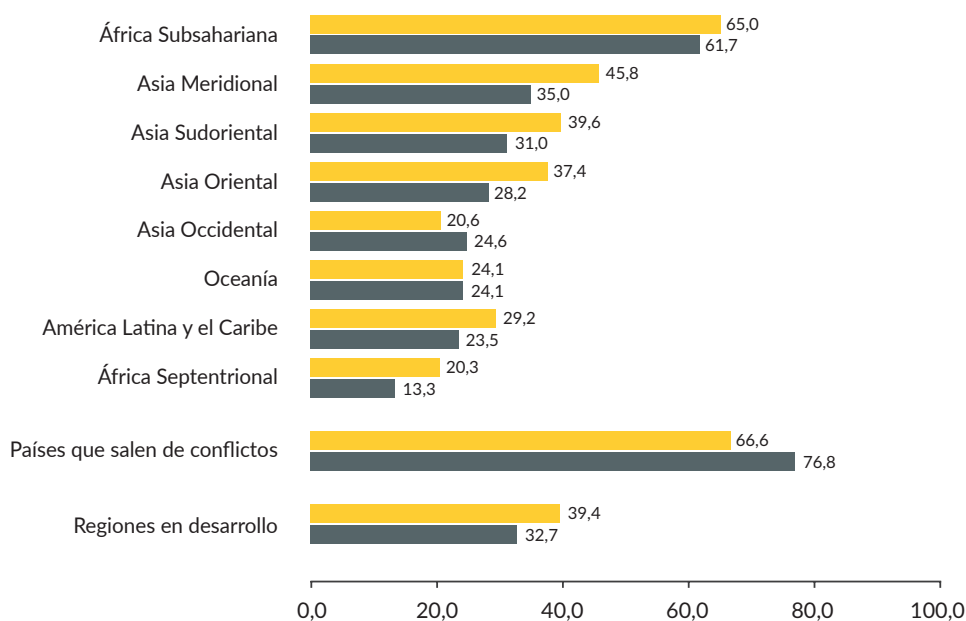
lógico cuando se utilizan grandes volúmenes de agua para activar la cisterna, lo cual genera lodos residuales diluidos que se mezclan con otras fuentes de aguas residuales (ONU-Hábitat, s.f.).

Es importante señalar que, en muchos casos, los grandes volúmenes de aguas residuales que se vierten lícitamente en redes de saneamiento deterioradas y operadas deficientemente, tanto redes combinadas como separadas, nunca llegan a una planta de tratamiento. Un gran porcentaje se pierde en el camino por daños en las tuberías o termina en drenajes de agua superficial, lo cual contamina cursos de agua subterráneos y superficiales. Existen también muchos casos de comunidades que reutilizan el agua de forma ilegal, al modificar intencionalmente los sistemas de colectores principales.

#### 5.3.1 Saneamiento y generación de aguas residuales en barrios marginales

La generación de aguas residuales implica uno de los mayores retos asociados con el crecimiento de asentamientos informales (barrios marginales) en los países en desarrollo. Si bien la proporción de habitantes de barrios marginales en las zonas urbanas disminuyó levemente a partir de 2000 en porcentaje (ver Figura 5.2), hay más habitantes en dichos barrios en 2012 que en 2000. En el África Subsahariana, el 62% de la población urbana vive en barrios marginales. Los datos estadísticos más inquietantes provienen de países que salen de conflictos y de Asia Occidental, donde la proporción

**Figura 5.2** Proporción de población urbana en barrios marginales 2000-2012



Nota: Países que salen de conflictos incluidos en las cifras totales: Angola, Camboya, República Centroafricana, Chad, República Democrática del Congo, Guinea-Bisáu, Iraq, República Democrática Popular Lao, el Líbano, Mozambique, Sierra Leona, Somalia y Sudán.

Fuente: Basado en datos de ONU-Hábitat (2012, Tabla 3, p. 127).

de habitantes que viven en barrios marginales pasó de 67% a 77%, y de 21% a 25%, respectivamente (ONU-Hábitat, 2012).

Los barrios marginales varían según tipo, formato y densidad de población. Sin embargo, la mayoría carece de carreteras pavimentadas, vivienda sostenible, infraestructura hídrica y de saneamiento y drenaje. En estas situaciones, los altos niveles de materia fecal y desechos sólidos se eliminan en los canales y cunetas de drenaje de agua superficial. La precaria eliminación de desechos sólidos provoca obstrucciones en los sistemas de drenaje, lo cual causa inundaciones. Los flujos de aguas residuales y escorrentía urbana que no son recolectados suelen conllevar los mismos niveles de toxicidad y riesgos para la salud que las aguas residuales de alcantarillado. Si bien numerosos barrios marginales dependen del saneamiento *in situ*, habitualmente no se logra contener la materia fecal y las aguas residuales se generan de todas formas, ya que los residentes suelen utilizar letrinas como baños para higiene personal con las llamadas «duchas con balde».

Los habitantes de los barrios marginales generalmente deben utilizar sanitarios comunales que no están conectados a una red de saneamiento, espacios abiertos, o recurren a eliminar las heces en bolsas de polietileno (es decir, inodoros voladores). Los sanitarios comunales no son muy utilizados por la falta de agua, mantenimiento y el costo que le implica al usuario. Según un estudio realizado en los barrios marginales de Nueva Delhi, una familia promedio de bajos ingresos con cinco integrantes llegaba a destinar el 37% de sus ingresos en

instalaciones sanitarias comunales (Sheikh, 2008). Poder encontrar un lugar adecuado para ir al baño resulta particularmente problemático para las mujeres, implica riesgos en materia de seguridad personal e higiene y es un motivo de vergüenza.

## 5.4 Composición de las aguas residuales municipales y urbanas

La composición exacta de las aguas residuales varía en el mundo y está determinada por un amplio conjunto de factores, entre ellos el uso doméstico del agua y el nivel de comercialización/industrialización. En la Tabla 5.2 se muestran parámetros seleccionados (ONU-Agua, 2015a). En las regiones desarrolladas, es probable que la relación DBO:DQO<sup>4</sup> sea menor que en el mundo en desarrollo, por una mayor proporción de aguas residuales industriales. Esto implicará una menor idoneidad del agua para

<sup>4</sup> La **demanda bioquímica de oxígeno** (DBO) es la cantidad de oxígeno disuelto que necesitan (es decir, requieren) los organismos aerobios para descomponer el material orgánico presente en determinada muestra de agua a determinada temperatura en un periodo específico.

La **demanda química de oxígeno** (DQB) es un parámetro estándar que mide el grado de contaminación (que no puede ser oxidada por medios biológicos) en una muestra de agua. A mayor demanda química de oxígeno, mayor contaminación (sobre todo inorgánica) en la muestra.

Si la **relación DBO:DQO** de las aguas residuales es igual o mayor a 0,5, se considera que el agua puede ser tratada fácilmente con medios biológicos. Si la relación es menor a 0,3 aproximadamente, quizás los desechos tengan componentes tóxicos, o tal vez se necesiten microorganismos aclimatados para lograr su estabilización.

**Tabla 5.2** Composición de las aguas residuales sin tratar en determinados países

Parámetros	EE. UU.	Francia	Marruecos	Pakistán	Jordania
Demanda bioquímica de oxígeno	110-400	100-400	45	193-762	152
Demanda química de oxígeno	250-1000	300-1000	200	83-103	386
Sólidos suspendidos	100-350	150-500	160	76-658	nd
Potasa y nitrógeno totales	20-85	30-100	29	nd	28
Fósforo total	4-15	1-25	4-5	nd	36

Fuente: ONU-Agua (2015a, Tabla 5, p. 28, basado en Hanjra et al., 2012).

**Tabla 5.3** Principales contaminantes de las aguas residuales, su fuente y efectos

Contaminante	Parámetros representativos principales	Fuente				Posibles efectos del contaminante
		Aguas residuales		Escorrentía		
		Domésticas	Industriales	Urbana	Agrícola y de pastoreo	
Sólidos suspendidos	Total de sólidos suspendidos	xxx	← →	xx	x	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Problemas estéticos</li> <li>• Depósitos de lodos</li> <li>• Adsorción del contaminante</li> <li>• Protección de patógenos</li> </ul>
Materia orgánica biodegradable	Demanda bioquímica de oxígeno	xxx	← →	xx	x	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consumo de oxígeno</li> <li>• Muerte de peces</li> <li>• Condiciones sépticas</li> </ul>
Nutrientes	Nitrógeno, fósforo	xxx	← →	xx	x	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Crecimiento excesivo de algas</li> <li>• Toxicidad para los peces (amoníaco)</li> <li>• Enfermedades en recién nacidos (nitrato)</li> <li>• Contaminación del agua subterránea</li> </ul>
Patógenos	Coliformes	xxx	← →	xx	x	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Enfermedades transmitidas por el agua</li> </ul>
Materia orgánica no biodegradable	Pesticidas, algunos detergentes, otros	x	← →	x	xx	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Toxicidad (varios)</li> <li>• Espuma (detergentes)</li> <li>• Reducción de la transferencia de oxígeno (detergentes)</li> <li>• No biodegradabilidad</li> <li>• Mal olor (es decir, fenoles)</li> </ul>
Metales	Elementos específicos (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn, etc.)	x	← →	x		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Toxicidad</li> <li>• Inhibición del tratamiento biológico de lodos residuales</li> <li>• Problemas con el uso agrícola de lodos</li> <li>• Contaminación de las aguas subterráneas</li> </ul>
Sólidos inorgánicos disueltos	Total de sólidos disueltos, conductividad	xx	← →		x	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Salinidad excesiva – daño a las plantaciones (riego)</li> <li>• Toxicidad para las plantas (algunos iones)</li> <li>• Problemas con la permeabilidad del suelo (sodio)</li> </ul>

x: pequeño      xx: medio    xxx: alto    flechas: variable      vacío: por lo general, sin importancia

Fuente: Von Sperling (2007, Tabla 1.2, p. 7).

**Tabla 5.4 Lista roja de sustancias**

1	1.2-dicloroetano [1.2-DCA o EDC]
2	Aldrina
3	Atrazina
4	Metil azinfos
5	Cadmio
6	Isómeros DDT
7	Diclorovós
8	Dieldrina
9	Endrina
10	Fenitrotión
11	Hexaclorobenceno [HCB]
12	Hexaclorobutadieno [HCBD]
13	Hexaclorociclohexano [HCH]
14	Malatión
15	Mercurio
16	Pentaclorofenol [PCP]
17	Bifenilo policlorado [PCB]
18	Simazina
19	Tributilestaño [TBT]
20	Triclorobenceno [TCB]
21	Trifluralina
22	Trifenilitina [TPT]

Fuente: Environment Agency (2009, p. 4).

recibir tratamiento biológico. En algunas zonas, los altos niveles de sustancias inorgánicas, sulfatos y alcalinidad, por ejemplo, pueden afectar la idoneidad de las aguas residuales para usos postratamiento. Generalmente, los sulfatos suelen producir sulfuro de hidrógeno, que puede corroer el alcantarillado. Es probable que por una alta alcalinidad o la dureza del agua se formen depósitos de cal y afecten la idoneidad del agua para su reutilización como agua de proceso, por ejemplo. En la Tabla 5.3 se presentan algunos de los principales contaminantes probablemente presentes en diferentes fuentes de agua residuales (ver también Tabla 4.1).

#### 5.4.1 Aguas residuales de fuentes especialmente peligrosas

Si bien las aguas residuales de fuentes domésticas no suelen contener sustancias peligrosas, preocupa cada vez más la posibilidad de que algunos medicamentos que se utilizan habitualmente, aun en bajas concentraciones, puedan tener consecuencias a largo plazo, especialmente los alteradores (Falconer, 2006).

Aquellas industrias que utilizan sustancias de la «Lista Roja» (ver Tabla 5.4) en sus procesos productivos deben garantizar el cumplimiento de las normas de vertido, lo cual no siempre sucede. Los entornos normativos varían de forma apreciable. En este sentido, cobran especial importancia las industrias artesanales y los negocios de pequeña escala, a los que les está «permitido» operar o lo hacen de forma ilegal. En contextos informales, actividades como la recuperación de plomo de baterías, la minería y el procesamiento de minerales a pequeña escala y el funcionamiento de talleres automotrices, estaciones de lavado de vehículos pueden conllevar graves riesgos. No se ha publicado suficiente información sobre estas industrias informales.

Existen pequeños hospitales y clínicas (y algunos establecimientos de mayor tamaño), sobre todo en países en desarrollo, donde se vierten residuos hospitalarios sin tratar. Los métodos de cultivo intensivo y el uso excesivo de antibióticos en la cría de animales han provocado altas concentraciones de estos desechos en las aguas residuales municipales cuando dichos establecimientos vierten sus aguas en el alcantarillado municipal. Es así que aumenta el riesgo de resistencia a los antimicrobianos (RAM) (Harris *et al.*, 2013).

Otras fuentes incluyen las unidades de agricultura intensiva y los grandes desagües de aguas pluviales en zonas peligrosas e industriales. En la Tabla 5.5 se aprecian cifras aproximadas de la generación de aguas residuales en establecimientos comerciales e industrias. Si bien no hay datos en esta tabla, cabe destacar que las aguas residuales que provienen de establecimientos donde se procesan bebidas y alimentos también suele contener concentraciones relativamente altas de DBO. No es fácil tratar este tipo de desechos, lo cual representa una excelente oportunidad para las actividades de recuperación del energía (ver Capítulo 6).

## 5.5 Tipos urbanos y el potencial de uso de las aguas residuales municipales y urbanas

Diferentes aspectos determinan el potencial de utilización de aguas residuales municipales y urbanas: en primer lugar, el nivel de contaminación cruzada de las aguas residuales y, en segundo lugar, la aplicación y su ubicación. La escasez de agua y el costo y disponibilidad de nuevas fuentes de agua también constituyen factores importantes. Es claro que es preferible limitar el vertido de sustancias peligrosas al alcantarillado, especialmente aquellas que hacen que el agua sea difícil de tratar. La escorrentía urbana, por ejemplo, se podría reutilizar directamente para determinados fines, pero cuando se mezcla con aguas negras necesita tratamiento adicional.



## CUADRO 5.2 REUTILIZACIÓN POTABLE INDIRECTA EN FUNCIONAMIENTO, SAN DIEGO, CALIFORNIA

En San Diego se bebe agua reciclada porque la ciudad importa el 85% de su agua de California del Norte y del Río Colorado, donde las comunidades aguas arriba, tales como Las Vegas, vierten aguas residuales que son luego tratadas para transformarse en agua para el consumo. San Diego, donde se reciclan las aguas residuales para destinarlas al riego, invirtió USD 11,8 millones para investigar la posibilidad de aplicar la reutilización potable indirecta (RPI) debido a las restricciones recientes sobre el agua de California del Norte y por la sequía del Río Colorado. El proyecto piloto realizado en la planta de recuperación de agua North City Water Reclamation Plant finalizó en 2013. En su momento, en su establecimiento para la purificación avanzada del agua se generaban casi 3,8 millones de litros de agua purificada por día, si bien no se enviaba agua al depósito.

En San Diego resulta más económico recurrir a la RPI que reciclar aguas residuales para el riego, porque el agua para riego debería transportarse a través de tuberías de color morado para separarla del agua potable, y ampliar la infraestructura de dichas tuberías sería más costoso que la RPI. A su vez, reciclar agua es menos costoso que desalinizar el agua del mar. Por ejemplo, en el condado de Orange, la RPI tiene un costo de USD 800-850 para generar agua potable suficiente para dos familias de cuatro integrantes durante un año. La desalinización de la misma cantidad de agua de mar costaría USD 1.200-1.800 debido al consumo energético que se necesita.

Para hacer frente a su creciente población y a la intrusión salina en las aguas subterráneas, en enero de 2008 el Distrito de Recursos Hídricos del Condado de Orange, en California, abrió una planta de recuperación de agua con tecnología de punta con un valor de USD 480 millones, la mayor de su clase en los Estados Unidos. Su funcionamiento insume USD 29 millones al año. Luego del tratamiento avanzado de aguas, la mitad del agua reciclada se inyecta en el acuífero para crear una barrera contra la intrusión salina. La otra mitad se destina a un estanque de percolación para que continúe el proceso de filtración en los suelos y, luego de aproximadamente seis meses, el agua potable se deposita en los pozos correspondientes. En 2011 se estimaba que la producción era de más de 300 millones de litros por día.

Fuente: Fragmento de Cho (2011).

**Tabla 5.5** Ejemplos de datos de aguas residuales industriales

Tipo de industria	Generación de aguas residuales (m <sup>3</sup> /tn)	Rango (m/tn)	DQB (kg/m)	Rango de DQB (kg/m)
Refinado de alcohol	24	16-32	11	5-22
Cerveza y malta	6,3	5-9	2,9	2-7
Café	n/d	n/d	9	3-15
Productos lácteos	7	3-10	2,7	1,5-5,2
Procesado de pescados	n/d	8-18	2,5	
Carne y aves	13	8-18	4,1	2-7
Químicos orgánicos	67	0-400	3	0,8-5
Refinerías de petróleo	0,6	0,3-1,2	1,0	0,4-1,6
Plástico y resinas	0,6	0,3-1,2	3,7	0,8-5
Pulpa y papel (combinados)	162	85-240	9	1-15
Jabón y detergentes	n/d	1-5	n/d	0,5-1,2
Producción de almidón	9	4-18	10	1,5-42
Refinado de azúcar	n/d	4-18	3,2	1-6
Aceites vegetales	3,1	1-5	n/d	0,5-1,2
Verduras, frutas y jugos	20	7-35	5,0	2-10
Vino y vinagre	23	11-46	1,5	0,7-3,0

n/d: No disponible

Fuente: Doorn et al. (2006, Tabla 6.9, p. 622, basado en Doorn et al., 1997).

### CUADRO 5.3 USO DE AGUAS RESIDUALES EN SISTEMAS DE ACUICULTURA EN CALCUTA: UNA INNOVACIÓN CENTENARIA DE LOS AGRICULTORES

Hace ya casi cien años, los agricultores cercanos a la ciudad de Calcuta crearon una técnica de utilización de las aguas residuales para la piscicultura y otras actividades agrícolas. Es una técnica muy utilizada para cubrir la demanda creciente de pescado en esta ciudad de la India, tan densamente poblada. Se trata de una técnica única, que conforma el mayor sistema operativo del mundo donde se convierten los desechos en productos consumibles. Las aguas residuales y la escorrentía urbana generadas en el área metropolitana de Calcuta (más de 13 millones de habitantes) representan aproximadamente 600 millones de litros de efluentes al día. En la década de los años 30 comenzó la utilización de aguas residuales a gran escala para la piscicultura. Tras el éxito de las actividades de piscicultura en estanques de aguas residuales estabilizados, que se utilizaban como fuente de agua para cultivar verduras, se impulsó la ampliación a gran escala de un sistema de piscicultura con aguas residuales. El área donde se aplica este sistema de cultivo único llegó a tener 12.000 ha, pero en los últimos años se registró una fuerte disminución por el aumento de la presión que representa la urbanización. En la actualidad, el área que se destina a esta práctica cuenta con menos de 4.000 ha, y se han visto gravemente afectadas las personas que viven en condiciones de pobreza que dependen de estos humedales para tener un medio de subsistencia. Sin embargo, incluso en la actualidad, una proporción importante del pescado que se consume en la ciudad de Calcuta proviene de este sistema. Se ha llamado al gobierno a declarar santuario el área actual de acuicultura con aguas residuales, y a protegerla de la invasión de la creciente población de la ciudad de Calcuta. Además, también se destinan 12.000 ha al cultivo de verduras.

Fuente: Fragmento de Nandeesha (2002, p. 28).

Las motivaciones para la reutilización son legislativas y tienen un trasfondo sobre todo de carácter económico. Si se dispone de agua previamente utilizada a un precio menor o similar (incluido el costo del transporte), esta será considerada por sobre las fuentes tradicionales de agua dulce. En algunos países o regiones donde escasea el agua, la necesidad se impone y propicia un alto nivel de reutilización.

La reutilización de agua en la agricultura constituye una de las áreas con gran potencial. Ya se realiza formal e informalmente en muchos países (ver Capítulos 6 y 16). En las zonas periurbanas, la reutilización permite producir alimentos cerca del área de consumo.

#### 5.5.1 Reutilización como agua potable

Si bien se realiza en algunos lugares (ver Sección 16.1.2), la utilización de aguas residuales municipales tratadas para el consumo no es una práctica demasiado habitual. La población de algunos países, a saber Australia, Namibia y Singapur, ya bebe aguas residuales tratadas, así como también lo hacen personas en los Estados Unidos, inclusive en California, Virginia y Nuevo México. Por lo general es agua segura, pero la opinión pública se ve influenciada por aquellos que hablan de la reutilización «del inodoro al grifo» para desalentar este uso.

Cada vez es más común la reutilización potable indirecta (RPI), en la que las aguas residuales tratadas se suman a las fuentes subterráneas o superficiales (donde son tratadas nuevamente) y donde se transforman en agua potable (ver Cuadro 5.2). Luego del tratamiento terciario, el agua se vierte en un depósito de almacenamiento donde permanece durante seis meses o más. Con este nivel de tratamiento se puede apaciguar el miedo del

público con respecto al agua «del inodoro al grifo». En la práctica, un gran porcentaje de las aguas residuales tratadas y no tratadas se vierte en cursos de agua y se utiliza aguas abajo como suministro de agua.

#### 5.5.2 Reutilización como agua no potable: industrial, comercial, recreativa y en la agricultura periurbana.

La reutilización local presenta una mejor viabilidad económica si el lugar de la reutilización se encuentra cerca del sitio de producción. Muchos establecimientos industriales y comerciales necesitan agua de proceso y pueden instaurar mejores procedimientos internos para reducir su dependencia del consumo de agua y de la generación de aguas residuales, así como también los costos asociados. Las empresas pueden reutilizar directamente parte de las aguas residuales sin tratar, siempre que las mismas tengan la calidad necesaria. Entre las fuentes aceptables se encuentran el agua de proceso para refrigeración o calefacción, y las aguas pluviales de la recolección de techos de industrias y comercios o de plataformas y pistas de aeropuertos.

Se suele recurrir a la simbiosis industrial (ver Capítulo 6) para describir las asociaciones y la cooperación entre dos o más industrias diferentes para mejorar tanto el rendimiento ambiental como la capacidad competitiva al intercambiar y optimizar recíprocamente material, energía y flujos de agua. En el caso de la reutilización de aguas, a menudo sucede algo similar a escala local.

Los subproductos de una industria se transforman en materias primas en otras. De forma análoga, el agua de refrigeración se puede utilizar para la recuperación del calor o en la producción (Industrial Symbiosis Institute,

2008). Algunas veces las asociaciones comparten la gestión de los servicios principales o auxiliares (ver Cuadro 6.4).

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA, 2004) explica claramente los sistemas urbanos de reutilización que proporcionan aguas residuales parcialmente tratadas (tratamiento «adecuado a los fines») para diversos usos no potables, inclusive:

- riego de parques y centros de recreación públicos, campos de deportes y atletismo y patios de escuelas, islas y banquinas en carreteras, y zonas ajardinadas circundantes a edificios y servicios;
- riego de zonas ajardinadas circundantes a residencias de una o varias familias, lavado en general y otras actividades de mantenimiento;
- riego de zonas ajardinadas circundantes a establecimientos comerciales, de oficinas e industriales;
- riego de campos de golf;
- usos comerciales, como locales de lavado de vehículos, lavaderos, lavado de ventanas, y la mezcla de agua para pesticidas, herbicidas y fertilizantes líquidos;
- usos paisajísticos ornamentales y usos decorativos del agua, como fuentes, piscinas reflectoras y cascadas.

En los sistemas de distribución dual, las aguas residuales parcialmente tratadas llegan a los clientes a través de una red paralela de cañería de distribución, independiente del sistema de distribución de agua potable de la comunidad. El sistema de distribución de agua recuperada pasa a ser un tercer servicio hídrico, junto con las aguas residuales y el agua potable. Los sistemas de agua recuperada se operan, mantienen y gestionan de forma similar al sistema de agua potable (US EPA, 2012). Hace ya un tiempo que se practica el uso directo de aguas residuales municipales, por ejemplo, en San Petersburgo, Florida, donde se suministra agua recuperada a diferentes propiedades residenciales, locales comerciales y parques industriales, y también a una central eléctrica de recuperación de recursos, un estadio de béisbol y algunas escuelas (US EPA, 2004).

El suministro de alimentos seguros y con valor nutricional a los habitantes de las ciudades representa un verdadero desafío. La agricultura periurbana constituye una solución pero, a su vez, necesita agua adecuada. Las aguas residuales municipales, si bien informalmente, suelen usarse sin tratamiento, lo cual presenta graves riesgos tanto para los agricultores como para los consumidores del alimento. Las costumbres sociales y los hábitos alimenticios destacan el riesgo que implica dicha práctica. Un ejemplo de reutilización directa de aguas

residuales lo constituyen los estanques que se utilizan en Calcuta, India (ver Cuadro 5.3).

## 5.6 Gestión de la escorrentía urbana

La adaptación al cambio climático intenta reducir los riesgos de inundación asociados con tormentas intensas. Sin embargo, cuando se realiza conjuntamente con el desarrollo urbano, se pueden atender algunos de los problemas relacionados con la gestión de aguas residuales urbanas. En las ciudades existe cada vez más preocupación sobre los efectos del cambio climático, que incluyen un riesgo mayor de sufrir inundaciones y temperaturas altas, sumado a una mayor demanda de agua potable segura (State of Green, 2015).

Las aguas pluviales en forma de escorrentía superficial aportan el equilibrio hídrico que necesitan las ciudades y también pueden recolectarse, para crear así áreas de recreación atractivas. En Dinamarca hallamos un buen ejemplo (ver Cuadro 5.4) que ilustra la posibilidad de utilizar aguas pluviales como recurso para crear ciudades más resilientes y habitables.

### CUADRO 5.4 TRATAMIENTO DE ESCORRENTÍA DE AGUAS PLUVIALES EN ZONA INDUSTRIAL, KOLDING, DINAMARCA

El servicio público de aguas residuales de la ciudad de Kolding debía limpiar la escorrentía en un área altamente contaminada para proteger el ecosistema de un riachuelo cercano. El río estaba contaminado con aceites y sustancias peligrosas que provenían de una zona industrial donde se cargaban camiones y se almacenaban materiales en el exterior, en el patio de almacenamiento. Para resolver el problema, aplicaron HydroSeparator®, una solución automatizada y efectiva para mejorar la calidad del agua en varios recipientes y a la vez minimizar la necesidad de contar con cuencas de retención, todo lo cual implicaba un costo total mucho menor para los propietarios. Se estableció la capacidad máxima del HydroSeparator® a partir del requisito de un flujo máximo de vertidos de 200 l/s en el riachuelo. Cuenta con dos HydroSeparators estándar de 100 l/s cada uno, que funcionan de forma paralela o independiente. En la actualidad, la planta funciona automáticamente con costos operativos muy bajos. Se puede monitorear y controlar desde internet y con el sistema SRO conectado desde el servicio de aguas residuales de Kolding Spildevand.

Fuente: Fragmento de State of Green (2015, p. 18).

# CAPÍTULO 6

ONUDI | Unidad de Eficiencia Industrial de Recursos y John Payne, John G. Payne & Associates Ltd.

# INDUSTRIA

Canal de tratamiento de aguas residuales en una planta de energía





*En este capítulo se explica el alcance y la naturaleza de la generación de aguas residuales industriales. También se destacan las oportunidades de uso y reciclaje de aguas residuales y la recuperación de energía y subproductos útiles al abordar desafíos sobre los recursos naturales en el contexto del desarrollo industrial sostenible.*

Los albores de la revolución industrial del siglo XVIII, en los países actualmente desarrollados, marcó el comienzo del dilema de las aguas residuales industriales que enfrenta la sociedad. En ese entonces y ahora, como suele ser el caso, se vertían en cauces naturales creyendo erróneamente que «la solución a la contaminación es la dilución» y que las aguas pluviales eran los purgantes de la naturaleza.

La presión social y medioambiental, con el tiempo, dio lugar a un creciente movimiento que instó a la industria a reducir la cantidad de aguas residuales que produce y a tratarla antes de su eliminación. Esto se ha convertido en un cambio de paradigma importante. Ahora se ve a las aguas residuales como un potencial recurso y a su uso o reciclaje, después de un tratamiento adecuado, como una posibilidad de beneficiar tanto a la industria financiera y como económicamente. A su vez, esto complementa el panorama general de la industria verde, la responsabilidad social corporativa (RSC), la administración del agua y el desarrollo sostenible, que incluyen los ODS y específicamente las Metas 6.3 y 6.a, que tratan sobre las aguas residuales (ver Capítulo 2).

Estas consideraciones se aplican principalmente a las grandes industrias, algunas de las cuales tienen un alcance mundial en los países en desarrollo: muchas se están trasladando de los países de altos ingresos a mercados emergentes (WWAP, s.f.). Estas industrias tienen el tamaño y los recursos necesarios para aprovechar oportunidades e ingresar en la economía circular. Por el contrario, al carecer de este impulso, las pequeñas y medianas empresas (PYMES) y los sectores informales a menudo vierten sus aguas residuales en los sistemas municipales o directamente en el medio ambiente, lo cual conlleva diversos desafíos y oportunidades potencialmente perdidas (ver Capítulo 5).

## 6.1 Magnitud de la generación de aguas residuales industriales

Ya que se informa sobre el volumen de aguas residuales industriales en forma limitada y esporádica, el alcance real del potencial de este se desconoce en gran medida. A nivel mundial, los datos y la información relativos al volumen de aguas residuales producidas por la industria son muy escasos. Por otra parte, se debe distinguir entre el volumen total de generación de aguas residuales producidas y el volumen que en realidad

se elimina, que suele ser más bajo debido al reciclaje. Se estima que el volumen de aguas residuales industriales se duplicará para el año 2025 (PNUMA IF, 2007).<sup>5</sup>

Sí se dispone de parte de la información consolidada sobre países desarrollados. En la UE, por ejemplo, datos limitados indican que la generación de aguas residuales ha disminuido en general (Eurostat, s.f.). Los datos también muestran que el sector manufacturero es el mayor generador de aguas residuales en los principales sectores industriales (ver Tabla 6.1). Por otra parte, los datos de algunos países indican que la industria es un contaminante importante, ya que solo parte de aguas residuales recibieron tratamiento antes de su eliminación (ver Tabla 6.2).

Un ejemplo atípico de información detallada a nivel de país (ver Tabla 6.3) es Canadá, que realiza encuestas bienales de aguas industriales que incluyen datos de las industrias de manufactura, minería y generación termoeléctrica (ver Cuadro 6.1).

Statistics Canada (2014) informa que la industria del papel genera casi el 40% del volumen de descargas de efluentes en el sector manufacturero, de las cuales casi el 80% recibe tratamiento secundario o biológico. Estos representaron el 32% del volumen de agua recirculada, mientras los metales primarios representaron casi el 50%. En general, en el sector manufacturero la tasa de recirculación (agua recirculada como un porcentaje de entrada) fue de casi 51%. En materia de gastos de agua relacionados con el sector manufacturero, alrededor del 38% se destinó al tratamiento de efluentes y casi el 10% a su recirculación. El sector de la energía termoeléctrica fue claramente el mayor consumidor y vertedor de agua, de la cual casi el 58% se vertió principalmente a cuerpos de aguas superficiales sin ser tratada. Su tasa de recirculación fue baja, aunque el volumen fue aproximadamente el doble del volumen del sector manufacturero.

La minería fue un poco diferente, con una tasa de recirculación superior al 100% (se utiliza principalmente para el procesamiento) y los volúmenes de descarga fueron superiores a los de entrada por la deshidratación.

<sup>5</sup> Es de suponer que se refiere a 2007, cuando se publicó el informe.

**Tabla 6.1** Generación de aguas residuales por tipo de industria, 2011 (millones de m<sup>3</sup>)

	Total industria	Minas y canteras	Sector manufacturero*	Producción y distribución de electricidad (excepto agua de enfriamiento)**	Construcción
Alemania <sup>1</sup>	1 534,6	227,6	1 180,6	75,4	0,6
Austria <sup>1</sup>	1 487,2	n/d	889,6	363,3	n/d
Bélgica <sup>2</sup>	530,0	42,0	239,9	7,9	0,4
Bosnia y Herzegovina	9,5	n/d	9,5	n/d	n/d
Bulgaria	153,6	12,5	91,3	37,9	0,6
Chipre <sup>5</sup>	1,9	n/d	1,9	0,0	n/d
Croacia	84,7	1,7	81,4	0,5	n/d
España <sup>1</sup>	6 335,2	47,2	602,0	n/d	n/d
Ex República Yugoslava <sup>2</sup>	687,7	9,2	408,1	251,6	n/d
Finlandia	n/d	n/d	14,4	26,5	14,7
Hungría <sup>4</sup>	154,3	17,8	129,7	3,9	0,0
Letonia <sup>3</sup>	45,5	5,5	20,2	6,1	1,3
Lituania	40,4	0,6	33,9	2,6	0,7
Polonia	n/d	342,9	484,6	79,8	6,6
Rumania	n/d	47,3	n/d	n/d	3,6
Serbia	76,8	10,3	36,3	30,2	n/d
Eslovaquia	192,2	20,5	163,0	7,9	0,1
Eslovenia	n/d	0,1	42,8	n/d	0,1
Suecia <sup>1</sup>	878,0	26,0	839,0	14,0	n/d
Turquía <sup>1</sup>	528,7	41,9	460,8	26,1	n/d

n/d: No disponible

<sup>1</sup> 2010

<sup>2</sup> 2009

<sup>3</sup> 2007

<sup>4</sup> 2006

<sup>5</sup> 2005

Notas:

\*El sector manufacturero incluye: productos alimenticios; textiles; papel y productos de papel; productos refinados de petróleo, químicos y productos químicos; metales básicos; vehículos de motor, remolques, semirremolques y otros equipos de transporte; otros tipos de manufactura.

\*\* La producción y distribución de energía eléctrica incluye la actividad de suministro de energía eléctrica, gas natural, vapor, agua caliente y similares a través de una infraestructura permanente (red) de líneas, cañerías y tuberías.

Fuente: Eurostat (n./d., Tabla 7). © Unión Europea, 1995-2016.

**Tabla 6.2 Descarga de aguas residuales industriales después del tratamiento (como % del total de descargas), 2007-2011**

	2007	2008	2009	2010	2011
Alemania	46,7	n/d	n/d	46,5	n/d
Bosnia y Herzegovina	0,0	56,0	62,5	65,4	58,5
Bulgaria	59,7	57,1	49,6	50,8	46,8
Croacia	0,0	17,0	16,8	25,7	8,5
Ex República Yugoslava de Macedonia	4,4	25,9	7,2	n/d	n/d
Lituania	0,0	73,5	72,5	60,4	51,8
República Checa	47,7	44,3	45,7	52,4	60,2
Rumania	0,0	12,7	9,7	14,1	5,6
Turquía	0,0	38,1	n/d	71,9	n/d

n/d: No disponible

Fuente: Eurostat (n./d., Fig. 5). © Unión Europea, 1995-2016.

### CUADRO 6.1 ENCUESTAS SOBRE AGUA INDUSTRIAL EN CANADÁ

Tres sectores participan en la Encuesta sobre Agua Industrial en Canadá: manufactura, extracción de minerales y combustibles fósiles y plantas nucleares generadoras de energía eléctrica.

Cada sector tiene su propio cuestionario donde se recogen datos sobre el volumen de agua que va al establecimiento, incluida información sobre el origen, el propósito, el tratamiento y la posible recirculación del agua, y también los volúmenes y niveles de tratamiento antes de su eliminación.

Los cuestionarios se elaboran en colaboración con los usuarios de datos para satisfacer sus necesidades de información estadística. También se consultó a los encuestados en reuniones individuales para garantizar que la información solicitada estuviera disponible y que el cuestionario se podía llenar en un plazo razonable. Los datos se recogen directamente de los encuestados por medio de cuestionarios impresos enviados por correspondencia. La correspondencia se realiza en el año siguiente al año de referencia y se dirige a un «gestor o coordinador ambiental». Responder a la encuesta es obligatorio y se pide a los encuestados que envíen las respuestas dentro de los 30 días siguientes a la recepción. En el paquete enviado por correo y los recordatorios por fax que se envían 45 días después del envío del correo se incluye una carta que explica el propósito de la encuesta, la fecha de devolución solicitada y la obligación legal de responder.

Los cuestionarios y guías de informes se pueden encontrar en: [www23.statcan.gc.ca/imdb/p2SV.pl?Function=getSurvInstrumentList&Id=253674](http://www23.statcan.gc.ca/imdb/p2SV.pl?Function=getSurvInstrumentList&Id=253674)

Fuente: Adaptado de Statistics Canada (s.f.).

Si bien muchas compañías recaban y, de hecho, proporcionan datos sobre aguas residuales según la reglamentación, con algunas excepciones, en todos los sectores hay grandes vacíos en la recopilación de datos a escala nacional y mundial. Será necesario subsanar dichos vacíos antes de que la política de gestión de agua pueda avanzar para coordinar la utilización y consumo de agua con la generación de aguas residuales y vertidos, siendo esto último a menudo desestimado.

## 6.2 Naturaleza de las aguas residuales industriales

Existe una mayor disponibilidad de datos relativos a las características generales y la calidad de las aguas residuales industriales. La toxicidad, movilidad y carga de contaminantes industriales pueden tener mayores consecuencias que los volúmenes reales de agua en los recursos hídricos, la salud humana y el medio ambiente. Esto se refleja en los Registros de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (PRTR, por sus siglas en inglés) (ver Capítulo 14), que contienen información de los países desarrollados sobre las cantidades de sustancias contaminantes seleccionados (por encima de ciertos umbrales) emitidas por la industria en agua, tierra y aire (OCDE, s.f.). Se pueden analizar estas bases de datos para obtener una idea integral del nivel general de los posibles recursos recuperables entre los muchos contaminantes indeseables.

Diversas actividades industriales generan aguas residuales que se caracterizan por tener un amplio espectro de contaminantes (ver Tabla 6.4). Ya existe la tecnología necesaria para eliminar (o «minar»)

**Tabla 6.3** Entrada de agua, descarga y recirculación en la industria canadiense, 2011 (millones de m3)

	Total	Sector manufacturero	Energía termoeléctrica (inclusive nuclear)	Minería
Entrada total	27.600	3.677,5	23.497,2	429,2
% volumen total	100	13,3	85,1	1,6
Vertido total <sup>1</sup>	26.900	3.226,8	23.082,6	587,9
% volumen total	100	12,0	85,8	2,2
<b>Tratamiento de vertido (%)</b>				
Sin tratar		34,0	57,9	43,8
Primario		17,9	n/d	47,6
Secundario		36,2	<<1	n/d
Terciario		12,0	n/d	n/d
Recirculación	6.000	1.870,0	3.711,2	465,1
% volumen total	100	30,9	61,4	7,7
Tasa de recirculación <sup>2</sup> (como % de entrada)		50,8	15,8	108,4
<b>Uso de recirculación (%)</b>				
Agua de proceso		49,7		90,8
Enfriamiento, condensación, vapor		50,0	98,1	n/d
Control de contaminación			0,1	
Otros		0,3	<<1,7	n/d

<sup>1</sup> El volumen de vertido es mayor al volumen de entrada debido a la deshidratación de las aguas subterráneas en algunas minas.

<sup>2</sup> Tasa de recirculación = Cantidad de agua recirculada como porcentaje de la entrada. La misma agua puede dejar un subsistema y volver a ingresar en él, o se utiliza en otro subsistema muchas veces, lo que genera una tasa de recirculación superior al 100%.

n/d: No disponible

Fuente: Statistics Canada (2014).

estos contaminantes, cuya utilización se explica únicamente por su coste-efectividad en determinadas situaciones industriales. Se crean así dos productos: el agua tratada y los materiales recuperados. El agua se puede reciclar dentro de una planta u otra industria vinculada o simplemente eliminarse, volviendo así al ciclo hidrológico para uso de otros. En los EE.UU., se ha estimado que para algunos grandes ríos el agua se ha utilizado y reutilizado más de 20 veces antes de llegar al mar (TSG, 2014). Se pueden recuperar materiales útiles, tales como minerales (fosfatos) y metales (ver Capítulo 16). El agua de enfriamiento puede proporcionar calor. Los lodos residuales podrían producir biogás o quizás solo puedan ser eliminados.

## 6.3 El abordaje de las dificultades que implica el recurso

Si se aceptan a las aguas residuales como un insumo positivo en lugar de un producto no deseado de la actividad industrial que requiere eliminación, hay

un proceso lógico y preferido que transforma la eliminación en un uso proactivo y el reciclaje.

### 6.3.1 Reducción y prevención de la contaminación

Al igual que con muchos problemas ambientales, el primer paso es prevenir o minimizar la contaminación. El objetivo es mantener el volumen y la toxicidad de la contaminación al mínimo en el punto de origen. Esto es fundamental en la nueva ingeniería industrial verde, donde la eliminación de la contaminación y aguas residuales es parte de la ecuación desde su concepción hasta el diseño para las operaciones y el mantenimiento. Sin embargo, si bien es posible rediseñar las plantas ya establecidas, quizás la contaminación sea la única opción. Esto incluye la utilización de materiales sin tratar y procesos químicos biodegradables más ecológicos, así como la educación y formación del personal para identificar los problemas de contaminación y así mitigarlos.



**Tabla 6.4** Contenido de aguas residuales típicas en algunas industrias importantes

Industria	Contenido típico de los efluentes
Pulpa y papel	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ácidos lignosulfónicos clorados, ácidos de resina clorados, fenoles clorados e hidrocarburos clorados. Alrededor de 500 compuestos orgánicos clorados identificados</li> <li>Compuestos coloreados y halógenos orgánicos absorbibles (AOX)</li> <li>Contaminantes que se caracterizan por DBO, DQO, sólidos en suspensión (SS), toxicidad y color</li> </ul>
Hierro y acero	<ul style="list-style-type: none"> <li>Agua de enfriamiento que contiene amoníaco y cianuro</li> <li>Productos de gasificación: benceno, naftaleno, antraceno, cianuro, amoníaco, fenoles, cresoles e hidrocarburos aromáticos policíclicos</li> <li>Aceites hidráulicos, sebo y sólidos en partículas</li> <li>Agua ácida de enjuague y residuos de ácidos (clorhídrico y sulfúrico)</li> </ul>
Minas y canteras	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mezcla de partículas de roca</li> <li>Tensioactivos</li> <li>Aceites y aceites hidráulicos</li> <li>Minerales no deseados, i.e., arsénico</li> <li>Limos con partículas muy finas</li> </ul>
Industria de alimentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>Altos niveles de concentraciones de DBO y SS</li> <li>DBO y pH variable según la verdura, fruta o carne y la estación</li> <li>Procesamiento de verduras: partículas altas, algunos compuestos orgánicos disueltos, tensioactivos</li> <li>Carne: orgánicos fuertes, antibióticos, hormonas de crecimiento, pesticidas e insecticidas</li> <li>Gastronomía: material orgánico vegetal, sal, saborizantes, materia colorante, ácidos, álcalis, aceite y grasa</li> </ul>
Destilación	<ul style="list-style-type: none"> <li>DBO, DQO, SS, nitrógeno, fósforo, variable por procesos individuales</li> <li>Variable de pH debido a agentes de limpieza ácidos y alcalinos</li> <li>Temperatura alta</li> </ul>
Productos lácteos	<ul style="list-style-type: none"> <li>Azúcares disueltos, proteínas, grasas y residuos de aditivos</li> <li>DBO, DQO, SS, nitrógeno, fósforo</li> </ul>
Químicos orgánicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pesticidas, productos farmacéuticos, pinturas y tintes, productos petroquímicos, detergentes, plásticos, etc.</li> <li>Materiales de productos base, subproductos, material de producto en forma soluble o en partículas, agentes de lavado y limpieza, disolventes y productos de valor agregado tales como plastificantes</li> </ul>
Textiles	<ul style="list-style-type: none"> <li>DBO, DQO, metales, sólidos en suspensión, urea, sal, sulfuro, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, NaOH</li> <li>Desinfectantes, biocidas, residuos de insecticidas, detergentes, aceites, lubricantes de tejer, acabados para hilar, solventes usados, compuestos antiestáticos, estabilizantes, agentes tensioactivos, auxiliares orgánicos de procesamiento, materiales catiónicos, color</li> <li>Acidez o alcalinidad alta</li> <li>Calor, espuma</li> <li>Materiales tóxicos, residuos de limpieza, tamaño</li> </ul>
Energía	<ul style="list-style-type: none"> <li>Producción de combustibles fósiles: Contaminación de pozos de petróleo y gas y <i>fracking</i></li> <li>Agua de calefacción/enfriamiento</li> </ul>

Fuentes: Basado en IWA Publishing (s.f.), PNUMA (2010) y Moussa (2008).

### 6.3.2 Eliminación de contaminantes

Las industrias que descargan efluentes en los sistemas municipales o en aguas superficiales deben cumplir con ordenanzas de descarga u otras normativas para evitar multas, por lo que en muchos casos se requiere un tratamiento en la etapa final en la planta antes de su eliminación. En algunas situaciones, a las industrias les resulta también más económico pagar multas que invertir en el tratamiento para cumplir con la normativa (WWAP, 2015).

Los efluentes mixtos requieren complejos procesos de tratamiento y generan una calidad de vertido de aguas residuales que debe cumplir con la normativa local. Esta agua, como a menudo debe cumplir con una

normativa muy estricta, puede ser innecesariamente de mayor calidad de la que se requiere para otros propósitos, como el reciclaje. Como suele ser más difícil y costoso tratar aguas residuales que contienen muchos contaminantes que aquellas con una sola de estas sustancias, frecuentemente es conveniente separar los flujos. También se debe evitar la mezcla de aguas residuales más concentradas con flujos que podrían ser adecuados para la descarga directa o el reciclaje (WWAP, 2006). Sin embargo, en algunos casos específicos, la mezcla apropiada de flujos de aguas residuales procedentes de diversas fuentes podría tener efectos beneficiosos en el tratamiento. De cualquier manera, el tratamiento adecuado a los fines puede optimizar la calidad del agua para su próximo uso.

Existe una gran variedad de posibles opciones de tratamiento, incluyendo las lagunas de estabilización, la digestión anaeróbica y los biorreactores para la producción de biogás, lodos residuales activados, diferentes tipos de membranas, radiación ultravioleta, ozonización, oxidación avanzada y el uso de los humedales de varios tipos (ver Tabla 4.2). En 2015, se esperaba que las industrias del petróleo y gas, alimentos y bebidas, y la minería dieran cuenta de más de la mitad de todos los gastos en tecnologías de tratamiento de aguas residuales y se esperaba un mayor crecimiento de la tecnología para cumplir con los estrictos requisitos de descarga, por ejemplo, en el sector de la minería (ver Cuadro 6.2). Para 2020, se prevé que el mercado de las tecnologías de tratamiento de aguas industriales crezca 50% (GWI, 2015).

### 6.3.3 Reciclaje de aguas residuales y recuperación de subproductos

Con respecto al reciclaje dentro de una planta, en general, la industria está en buenas condiciones para utilizar o reciclar sus aguas residuales internamente. Esto podría implicar el uso directo de aguas residuales sin tratar, siempre que su calidad sea lo suficientemente buena para el propósito previsto. El agua de enfriamiento y calefacción, así como las aguas pluviales, pueden ser adecuadas para el lavado, ajuste del pH y protección contra incendios. Sin embargo, el agua de procesos que no se trata lo suficiente para que su calidad sirva para los fines previstos tiene más potencial para reciclaje, por ejemplo en materiales de transporte, agua de enjuague, torres de enfriamiento de agua, alimentación de calderas, necesidades de línea de producción, supresión de polvo y lavado (ver Cuadro 6.3). Esta calidad se logra mediante sistemas de tratamiento descentralizados. Si bien generalmente la tecnología está disponible, como se indica en el cuadro 6.2, y hay una tendencia a reducir la brecha entre el tratamiento y el reciclaje (GE Reports, 2015), los obstáculos pueden incluir su aplicación, costos que no superen los beneficios, períodos prolongados de recuperación, mantenimiento y aumento de consumo de energía. Por otra parte, la ubicación y la disponibilidad (intermitente, por lotes o producción continua) del flujo de aguas residuales deben coincidir con el uso previsto.

El uso de aguas residuales o aguas residuales tratadas por reciclaje es un proceso que se puede realizar muchas veces. No solo permite reducir los costos para la industria de la adquisición de agua dulce debido a la disminución de entrada de agua, en particular en áreas o tiempos de escasez, sino que también tiene la ventaja añadida de reducir las descargas. De esta manera, la necesidad de cumplir con las normas reglamentarias y el riesgo de multas se reducen al mínimo. Por otra parte, la práctica beneficia el medio ambiente y añade peso para que cualquier licencia social pueda operar.

Para 2020,  
se prevé que  
el mercado de las  
tecnologías de  
tratamiento de aguas  
industriales crezca  
un 50%

#### CUADRO 6.2 PROYECTO DE ANGLO AMERICAN DE RECUPERACIÓN DE AGUA EN EMALAHLENI, MPUMALANGA, SUDÁFRICA

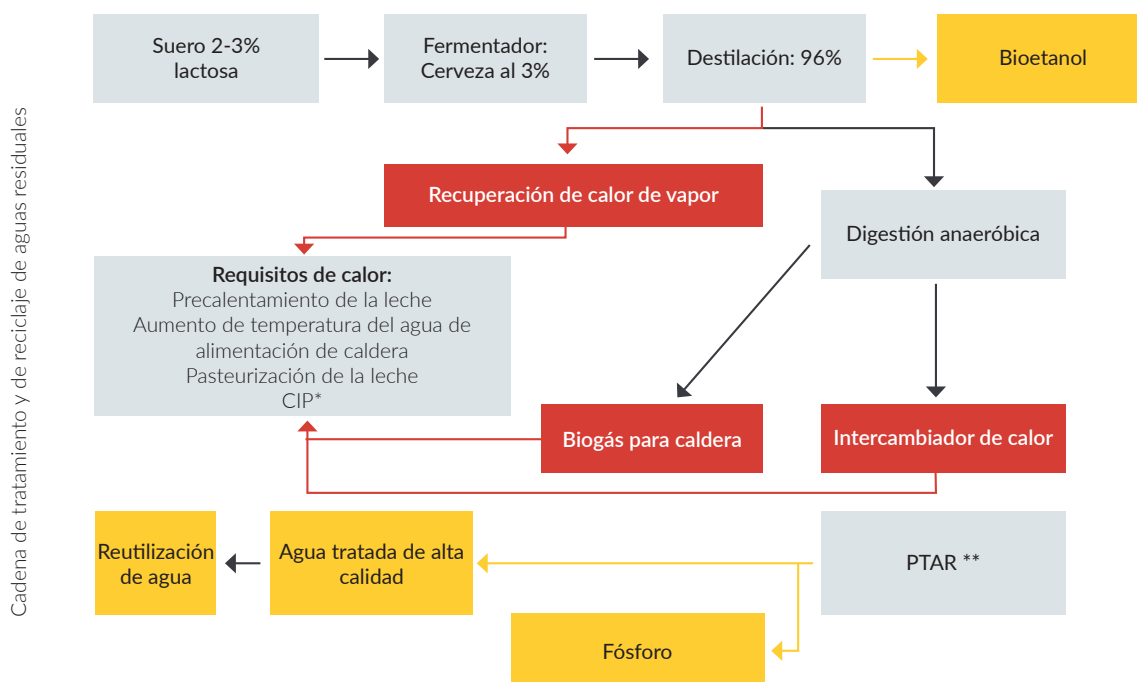
Los yacimientos de carbón de Witbank se encuentran alrededor de Emalahleni, una ciudad de medio millón de habitantes en el noreste de Sudáfrica. La región sufre de escasez de agua que se espera empeorará en el futuro, a su vez que Emalahleni ya tiene dificultades para cubrir las demandas de suministro de agua de su creciente población. La iniciativa de recuperación de agua se estableció para asegurar una gestión ambientalmente responsable del exceso de agua en las minas y un suministro continuo de agua tratada para actividades mineras, al tiempo que elimina la necesidad de importar agua y la consiguiente competencia con otras partes interesadas por un recurso escaso.

La planta de recuperación de agua de Emalahleni trata el agua de las tres operaciones de carbón térmico de Anglo American y utiliza la tecnología de desalinización. El agua de la mina se convierte en agua potable, agua de procesos/industrial y agua que puede evacuarse con seguridad en el ambiente. En el proceso de tratamiento, el yeso se separa del agua y se utiliza como material de construcción.

Parte de esta agua tratada se utiliza directamente en operaciones mineras, pero la mayoría es para uso social y cubre el 12% de la demanda diaria de agua de Emalahleni, a la vez que ofrece un suministro de agua fiable y potable. Anglo American está minimizando su huella hídrica e impacto ambiental al tiempo que ofrece beneficios a largo plazo de acceso seguro e ininterrumpido a las reservas de carbón de las minas en funcionamiento, y elimina tanto la necesidad de importar agua como el vertido sin control de agua de las minas participantes.

Fuente: Adaptado de WBCSD/IWA (s.f.).

## CUADRO 6.3 USO CREATIVO DE AGUAS RESIDUALES EN CARBERY MILK PRODUCTS EN CORK, IRLANDA



\*CIP: Limpieza *in situ* (por sus siglas en inglés)

\*\*PTAR: Planta de tratamiento de aguas residuales

La industria láctea en los EE.UU. genera grandes cantidades de aguas residuales: por cada litro de leche se utilizan 1,5-3 litros de agua. Por lo general, el agua residual tiene aproximadamente 10 veces la carga orgánica de las aguas residuales municipales. El suero constituye un subproducto de la fabricación del queso y se usa habitualmente para alimentar cerdos o para la fabricación de otros productos. Sin embargo, hay un gran excedente cuyo tratamiento como aguas residuales es de alto consumo energético. El ingrediente principal del suero es la lactosa, la cual se puede fermentar y así transformar en etanol en un proceso creativo de reciclaje de aguas residuales. Carbery Milk Products de Cork, Irlanda, fue el primer productor lácteo en el mundo que hizo esto.

El suero se somete a una microfiltración y ósmosis inversa, y la lactosa pasa a un fermentador en donde se convierte en cerveza antes de pasar a un sistema de destilación para generar así un producto 96% etanol para el mercado de combustible bioetanol. Todo el bioetanol en Irlanda proviene de esta fábrica y este es el único país europeo que no utiliza el etanol en base a caña de azúcar de Brasil.

El vapor del proceso de destilación se recupera y utiliza para precalentar el agua de la caldera, el agua para la limpieza *in situ* (CIP) y para la pasteurización, con el consiguiente ahorro de energía.

El flujo de residuos de la fermentación se envía a un digestor anaeróbico y produce biogás que se utiliza para generar calentamiento adicional.

El agua caliente residual del digestor anaeróbico pasa a través de un intercambiador de calor para precalentar la leche entrante enfriada. Por lo tanto, el agua residual se enfría a una temperatura adecuada para luego ser vertida en el río local sin afectar el medio ambiente.

Al mismo tiempo, las aguas residuales tienen una gran concentración de fósforo del cual 99% se debe retirar antes de la descarga. El fósforo se recicla y vuelve a la tierra agrícola.

La compañía desea ampliar la planta, y el efluente tratado resultante de alta calidad puede servir para el reciclaje *insitu*, especialmente como agua de alimentación de la caldera, ya que la cantidad de agua que la planta puede extraer del río local es limitada. Por otra parte, el reciclaje reduciría el volumen de vertido al río, especialmente en el flujo bajo estacional, cuando la capacidad de dilución es menor. Se está investigando la opción de depurar el efluente de alta calidad utilizando oxidación avanzada, ya que es más económico que comprar agua potable. El agua entraría en la planta de ósmosis inversa, que desmineraliza el agua. Esto tiene el beneficio añadido de reducir el ensuciamiento de la membrana y la contaminación cruzada ya que no tiene contacto directo con los productos alimenticios.

Fuente: Adaptado de Blue Tech Research (s.f.).

## CUADRO 6.4 SIMBIOSIS DE KALUNDBORG EN KALUNDBORG, DINAMARCA

La simbiosis industrial de Kalundborg es un «ecosistema industrial» donde se utilizan los subproductos de una empresa como recurso de otras empresas, en un ciclo cerrado. Se inició en 1961 con la creación de un nuevo proyecto con el fin de utilizar las aguas superficiales del lago Tissø para una nueva refinería de petróleo con el objetivo de aprovechar los limitados suministros de agua subterránea. La ciudad de Kalundborg estuvo a cargo de la construcción de la tubería mientras la refinería fue responsable de la financiación.

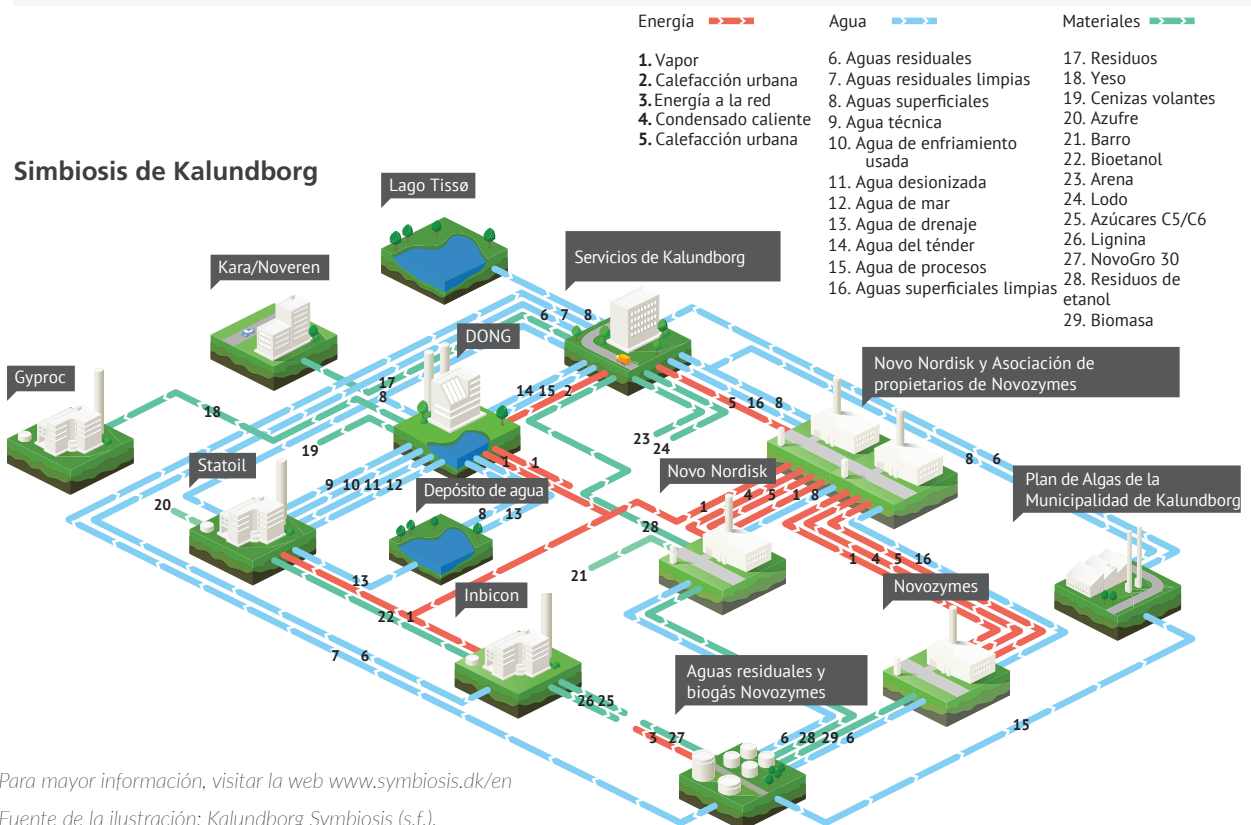
La simbiosis industrial de Kalundborg se estableció durante varias décadas de iniciativas y cooperación individual entre empresas de diferentes sectores impulsadas por ventajas económicas, con el apoyo del Municipio de Kalundborg. Hoy en día, se trata de un proyecto financiado principalmente por los socios de simbiosis.

La simbiosis implica el intercambio de todo tipo de materiales, inclusive aguas residuales, como se muestra en el diagrama de flujo a continuación.

**Iniciativas de agua en cascada:** La Central Eléctrica de Asnæs recibe 700.000 m<sup>3</sup> de agua de enfriamiento de Statoil cada año, que trata para su utilización como agua de alimentación de calderas. También utiliza alrededor de 200.000 m<sup>3</sup> al año de aguas residuales tratadas de Statoil para limpieza. El agua de enfriamiento se convierte en vapor de agua, que vuelve a Statoil, así como a otras empresas, como una granja de peces locales. El ahorro de los recursos hídricos locales es notorio: casi 3 millones de m<sup>3</sup> de agua subterránea y 1 millón de m<sup>3</sup> de aguas superficiales por año (Domenech y Davis, 2011).

La planta de energía utiliza agua salada del fiordo para cubrir algunas de sus necesidades de enfriamiento. Como resultado, reduce las extracciones de agua dulce del lago Tissø. El subproducto generado es agua salada caliente, parte de la cual se deriva a 57 estanques de la granja de peces.

**Iniciativas de calentamiento en cascada:** En 1981, Asnæs comenzó a suministrar vapor de agua a la ciudad para su nuevo sistema de calefacción urbana. Luego, Novo Nordisk y Statoil se sumaron a los clientes para consumo de vapor. Este sistema de calefacción urbana contó con el respaldo de la ciudad y del gobierno danés, por lo que se sustituyeron cerca de 3.500 hornos de aceite.



Para mayor información, visitar la web [www.symbiosis.dk/en](http://www.symbiosis.dk/en)

Fuente de la ilustración: Kalundborg Symbiosis (s.f.).

Fuentes: Adaptado de la CE (2016, Cuadro 9, p. 25) e Industrial Ecology (s.f.).



**Simbiosis industrial.** Una oportunidad notable para el uso de aguas residuales industriales y el reciclaje es la cooperación entre plantas en la simbiosis industrial (SSWM, s.f.). Esto puede implicar el intercambio de agua de procesos o el reciclaje de aguas residuales tratadas para fines similares a los del reciclaje dentro de la planta. Los ejemplos incluyen vapor o agua residual caliente, o agua residual que contiene material orgánico y nutrientes, y materias primas no convertidas que pueden tener una recuperación económica: aceite, solventes usados, almidón y otras sustancias que pueden ser comercializadas o recicladas, tal vez a través de registros de desechos entre industrias (WWAP, 2006). Las opciones de la tecnología de tratamiento son similares a aquellas para propósitos internos de planta y pueden emplear sistemas descentralizados. Estos pueden incluir el uso de una planta de tratamiento de aguas residuales centralizada específica que atiende a todas las industrias.

**Parques eco-industriales.** La simbiosis industrial se considera más en parques industriales ecológicos que localizan estratégicamente industrias adyacentes entre sí para aprovechar de mejor manera la gestión y el reciclaje de aguas residuales (ver Cuadro 6.4). Para las PYMES, esto puede implicar grandes ahorros en el tratamiento de aguas residuales. Los factores importantes son el intercambio de información que contemple las necesidades, la proximidad razonable y la fiabilidad de la oferta en términos de cantidad y calidad. Las plantas de producción combinada de electricidad y calor (CHP por sus siglas en inglés, o cogeneración), que requieren mucha menos agua de enfriamiento que la generación convencional, son más eficientes cuando se encuentran cerca de la demanda de calor y electricidad, tal como un complejo industrial, y como fuente de abastecimiento descentralizada (Rodríguez *et al.*, 2013). Se encuentran ejemplos interesantes de parques ecoindustriales en muchos países, por ejemplo el Parque Industrial Químico de Shanghai en China (WWAP, 2015).

La simbiosis industrial de Kalundborg es un «ecosistema industrial» donde se utilizan los subproductos de una empresa como recurso de otras empresas, en un ciclo cerrado. Se inició en 1961 con la creación de un nuevo proyecto para utilizar las aguas superficiales del lago Tissø para una nueva refinería de petróleo con el objetivo de aprovechar los limitados suministros de agua subterránea. La ciudad de Kalundborg estuvo a cargo de la construcción de la tubería mientras la refinería fue responsable de la financiación.

El lado positivo de la disposición de los residuos de parques ecoindustriales es similar al de los de reciclaje interno (SSWM, s.f.). La desventaja incluye la necesidad de compromisos a largo plazo para justificar los gastos iniciales de capital y la necesidad de realizar un tratamiento adicional para satisfacer algunas necesidades de la industria y posiblemente para sortear obstáculos normativos de aprobación.


## CUADRO 6.5 USO INDUSTRIAL Y ENERGÉTICO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES

La **unidad de Tarragona** de depuración de agua en el sur de Cataluña, España, utiliza efluentes secundarios de dos plantas de aguas residuales municipales y los trata para usuarios industriales. La zona de Tarragona sufre de escasez de agua: dicha falta de disponibilidad retrasa el crecimiento de la región. El reciclaje de agua en un parque industrial (un complejo petroquímico) liberará los derechos de agua sin tratar existentes para satisfacer la futura demanda local (municipal y de turismo). El objetivo final es satisfacer 90% de la demanda de agua del parque industrial con agua reciclada (DEMOWARE, s.f.).

**Terneuzen** está ubicado en el suroeste de los Países Bajos. El complejo industrial de Dow Terneuzen fue previsto inicialmente para utilizar agua de mar desalinizada, pero el aumento del costo resultó ser problemático por inconvenientes de calidad, corrosión, etc. Como resultado, se rediseñó una planta de tratamiento de aguas residuales municipales en las inmediaciones para proporcionar agua depurada al complejo industrial (10.000 m<sup>3</sup> por día). El agua se utiliza para generar vapor de agua y así abastecer las plantas de fabricación. Después de utilizar el vapor en los procesos de producción, el agua se utiliza nuevamente en torres de enfriamiento hasta que finalmente se evapora en la atmósfera (por lo que se «recicla» una segunda vez). En comparación con el costo de la energía necesaria para la desalinización convencional del agua de mar para el mismo uso, Dow Terneuzen redujo su consumo de energía 95% con la recuperación de aguas residuales urbanas, el equivalente a reducir sus emisiones de dióxido de carbono en 60.000 toneladas cada año. Dow aplica en la actualidad la experiencia adquirida en Europa en Freeport, Texas, EE.UU. (World Water, 2013).

El **proyecto LIFE WIRE** es un proyecto LIFE12 que se realiza en Barcelona, España, cuyo objetivo es impulsar el reciclaje industrial de aguas residuales tratadas, demostrando así la viabilidad del reciclaje de agua mediante el uso de tratamientos satélites capaces de producir calidad del agua apta para su uso. El proyecto estudia la viabilidad de configuraciones tecnológicas con base en la combinación de ultrafiltración, filtración de material nanoestructurado de carbono y ósmosis inversa para utilizar aguas residuales urbanas tratadas en las industrias. El proyecto evalúa técnica y económicamente los beneficios de utilizar el esquema de tratamiento propuesto en comparación con los tratamientos convencionales actuales en tres sectores industriales: electrorrevestimiento, químico y de eliminación de residuos líquidos.

Fuentes: Fragmento de CE (2016, Cuadro 8, p. 25).



## La industria necesita «producir más con menos», que en el caso del agua significa usar menos cantidad

**Los sistemas de uso múltiple** (MUS, por sus siglas en inglés) que implican la reutilización en cascada de agua de mayor a menor calidad dentro de una cuenca hidrográfica pueden tener componentes industriales, por ejemplo, donde las aguas residuales domésticas pueden recuperarse para lavado y enfriamiento (PNUMA, 2015c).

**Recuperación de aguas residuales.** La industria puede ayudar en la otra cara de la ecuación de aguas residuales al utilizar aguas residuales urbanas recuperadas de municipios (ver Cuadro 6.5): esta reutilización del agua entre sectores crece rápidamente en muchos países (WBCSD, s.f.). Es una medida de sostenibilidad fundamental, ya que reduce los requisitos de consumo de agua dulce, de particular importancia en regiones con escasez de agua y, además, reduce los vertidos municipales generales. Quedan por resolver cuestiones de tiempos de disponibilidad de aguas residuales y su transporte hasta las plantas industriales de destino. En algunos casos, los municipios adaptarán el tratamiento de aguas residuales para industrias específicas que pueden no necesitar agua potable perfectamente limpia. En California, por ejemplo, los distritos municipales Central y de la Rivera Occidental ofrecen agua recuperada de diferentes calidades y costos, inclusive agua de procesos para la refinación de petróleo. La Junta Estatal de Control de Recursos Hídricos también promueve el uso de aguas residuales para el enfriamiento de plantas de energía (Departamento de Recursos Hídricos de California, 2013).

### 6.4 Las aguas residuales y el desarrollo industrial sostenible

El agua no es solo un reto operativo y un elemento costo en la industria, sino que también es una oportunidad de crecimiento ya que los incentivos para minimizar su uso (que incluye el uso y reciclaje de aguas residuales) reducen los costos y la dependencia del agua (WBCSD, s.f.). La industria necesita «producir más con menos», que en el caso del agua significa usar menos cantidad (ONUUDI, 2010).

Ya que la reducción del consumo de agua dulce lleva a menos vertidos de aguas residuales, las iniciativas de producción más limpia que se centran en la reducción del uso del agua en general, y que cierran el ciclo del agua, eliminan el vertido de aguas residuales (vertido cero),

y reducen o eliminan solventes y productos químicos tóxicos, pueden desempeñar un papel importante (PNUMA, 2010). La producción más limpia a través de la industria verde crea valor al reducir costos operativos ya que se eliminan ineficiencias mediante la estrategia 3R (reducir, reciclar, reutilizar), lo que también ayuda a limitar los impactos ambientales (ONUUDI, 2010). Por ejemplo, el programa de Transferencia de Tecnologías Ambientalmente Racionales (TEST, por sus siglas en inglés) de la ONUUDI se ha centrado en la contaminación de aguas residuales de la industria en el río Danubio para mejorar la eficiencia del agua y reducir el vertido de aguas residuales mediante el análisis de situaciones y problemas y la introducción de soluciones de producción más limpia y nueva tecnología (ONUUDI, 2011). Incluso se ha demostrado que la eficiencia de los recursos y el mejor desempeño ambiental generan beneficios económicos para determinadas PYMES (ver Cuadro 14.3).

En términos más generales, la producción más limpia ocupa un lugar importante en la ecología industrial, que también incluye el control de la contaminación, la eficiencia ecológica, el concepto de ciclo de vida y la producción de circuito cerrado. Estos permiten identificar oportunidades para tener una mayor eficiencia de los recursos y contar con actividades de valor añadido. El objetivo final es el vertido cero, situación en la que se recicla toda el agua dentro de una planta o se la comercializa a otra, y el único consumo es a través de la evaporación, que en teoría significa que todas las aguas residuales se utilizan o se reciclan y no hay vertido alguno (excepto pérdidas menores). En ese momento, la extracción de agua (entrada) es igual al consumo (WWAP, 2006). Sin embargo, puede surgir la paradoja de Jevons<sup>6</sup>: a medida que la eficiencia del agua mejora, su uso total puede de hecho aumentar, con un menor costo de producción y el correspondiente aumento de la producción industrial.

Una vez que la industria conoce su huella hídrica y pedigrí, puede enfocarse en su generación de aguas residuales para buscar posibilidades de reutilización y reciclado del agua. Por otra parte, puede ampliar sus esfuerzos en la neutralidad del agua (Hoekstra, 2008), lo que significa que después de que la industria ha tomado medidas para utilizar o reciclar sus aguas residuales, los efectos negativos de la contaminación del agua restante pueden compensarse al invertir en proyectos que promuevan el manejo sostenible del agua (es decir, tratamiento de aguas residuales) en entornos locales. Por lo tanto, las aguas residuales también podrían constituir recursos para promover la inversión.

<sup>6</sup> En el siglo XIX, William Stanley Jevons sostuvo que los avances en eficiencia tecnológica no redujeron el uso de carbón y otros recursos, sino que en realidad aumentaron su consumo y producción (Alcott, 2005).



# CAPÍTULO 7

FAO | Sara Marjani Zadeh

IWMI | Javier Mateo-Sagasta

**Con los aportes de:** Andreas Antoniou (IGRAC), Manzoor Qadir (UNU-INWEH), John Chilton (AIH), Carlos Carrión-Crespo (OIT), Marlos de Souza, Olcay Unver y Vittorio Fattori (FAO), Sarantuyaa Zandaryaa (UNESCO-PHI) y Kate Medlicott (OMS)

# AGRICULTURA



Sistema de riego en Tailandia

En este capítulo se analizan los principales contaminantes de la agricultura y sus consecuencias, y también se presentan algunas opciones clave para mitigar la contaminación. Asimismo, se explican los beneficios que puede aportar el uso de aguas residuales y cómo se puede lograr que la práctica sea segura.

La agricultura es tanto productora como usuaria de aguas residuales. Por consiguiente, el sector puede, a la vez, provocar la contaminación y sufrir sus consecuencias.

En los últimos años se han intensificado las actividades agrícolas, tanto en las explotaciones agrícolas industriales como en las tradicionales, lo que no solo aumenta la productividad agrícola, sino que también genera mayores cargas de contaminantes en el agua que afectan los ecosistemas y la salud humana. Al mismo tiempo, las industrias y ciudades están en expansión, lo que contribuye a aumentar la carga de contaminación que se incorpora al agua que se usa en la agricultura, con efectos perjudiciales para el sector.

## 7.1 La agricultura<sup>7</sup> como fuente de contaminación del agua

Au cours des cinquante dernières années, En los últimos cincuenta años, la agricultura se ha extendido e intensificado para satisfacer la creciente demanda de alimentos provocada principalmente por el crecimiento poblacional y los cambios en la alimentación. La superficie equipada para el riego aumentó más del 100%, de alrededor de 1,4 millones de km<sup>2</sup> en 1961 a alrededor de 3,2 millones de km<sup>2</sup> en 2012 (AQUASTAT, 2014). El inventario total de ganado se triplicó con creces y pasó de 7.300 millones de unidades en 1970 a 24.200 millones en 2011 (FAOSTAT, s.f.a). La acuicultura, en especial la acuicultura continental con uso de aguas residuales, creció más de veinte veces desde la década del 80, sobre todo en Asia (FAO, 2012).

Con frecuencia, la intensificación de la agricultura viene acompañada de un aumento de la erosión de los suelos, mayores cargas de sedimentos en el agua y un uso excesivo (o un uso indebido) de los insumos agrícolas (como, por ejemplo, los pesticidas y fertilizantes) para mejorar la productividad. Cuando el uso de estos productos supera la capacidad de asimilación de los sistemas agrícolas, las cargas de contaminantes en el medio ambiente son mayores.

El uso excesivo de agua de riego también aumenta el flujo de aguas residuales agrícolas que vuelve a ingresar a las masas de agua en forma de percolación profunda a los acuíferos y en forma de escorrentía a las aguas superficiales.

### 7.1.1 Contaminantes agrícolas: fuentes e impactos

Las actividades agrícolas liberan diversos tipos de contaminantes al medio ambiente (ver Tabla 7.1). Estos contaminantes afectan los ecosistemas acuáticos como consecuencia de su pasaje por las explotaciones agrícolas, el acarreo a lo largo del ciclo hidrológico y la concentración en las masas de agua. Las vías típicas de contaminación son: i) percolación hacia las aguas subterráneas; ii) escorrentía superficial, agua de drenajes, y flujos hacia corrientes de agua, ríos y estuarios; y iii) adsorción en los sedimentos provenientes de la erosión de los suelos natural o causada por actividades humanas a corrientes de agua ricas en sedimentos (FAO/CGIAR WLE, de próxima publicación).

#### NUTRIENTES

Desde el siglo XIX, las fuentes naturales de nutrientes (y el reciclaje de nutrientes) se complementan con fertilizantes para mejorar la producción agrícola. Actualmente se afirma que la movilización excesiva de nutrientes ha superado los límites planetarios (Rockström *et al.*, 2009).

En la producción de cultivos, la contaminación del agua por nutrientes tiene lugar cuando se aplica una cantidad de fertilizantes mayor que la que los cultivos pueden absorber o cuando estos son arrastrados de la superficie del suelo antes de que puedan incorporarse a las plantas. El excedente de nitrógeno y fosfatos puede pasar por lixiviación hacia aguas subterráneas o a las vías navegables como escorrentía superficial. Los nitratos y el amoníaco son muy solubles, pero el fosfato no lo es y tiende a adsorberse a partículas del suelo; por consiguiente, ingresa a las masas de agua unido a los sedimentos a través de la erosión del suelo.

En la producción ganadera, los corrales de engorde suelen ubicarse en las orillas de cursos de agua para que los desechos animales (es decir, la orina), que son ricos en nutrientes, puedan liberarse directamente al curso de agua. Los desechos sólidos (estiércol) suelen recogerse para usarse como fertilizante orgánico.

En muchos casos, sin embargo, no se almacena en lugares cerrados y la escorrentía superficial lo arrastra hacia los cursos de agua cuando hay precipitaciones copiosas. En la acuicultura con uso de aguas

<sup>7</sup> En este capítulo, «agricultura» se refiere a las actividades de producción de plantas y cultivos, acuicultura y ganadería.



**Tabla 7.1** Categorización de los principales contaminantes del agua provenientes de la agricultura y la contribución relativa de los sistemas de producción agrícola

Categoría de contaminante	Indicadores/ejemplos	Contribución relativa de		
		Producción de cultivos	Ganado	Acuicultura
Nutrientes	Principalmente nitrógeno y fósforo, que están presentes en los fertilizantes químicos y orgánicos, los excrementos animales y, en el agua, como nitrato, amoníaco o fosfato	***	***	*
Pesticidas	Herbicidas, insecticidas, fungicidas y bactericidas, incluidos los pesticidas de organofosfatos, carbamatos, piretroides, organoclorados y otros (muchos, como el DDT, están prohibidos en la mayoría de los países, pero se siguen usando en forma ilegal)	***	-	-
Sales	Incluidos los iones sodio (Na+), cloruro (Cl-), potasio (K+), magnesio (Mg2+), sulfato (SO42-), calcio (Ca2+) y bicarbonato (HCO3-), entre otros*	***	*	*
Sedimento	Medido en el agua como total de sólidos suspendidos o unidades nefelométricas de turbidez, especialmente del drenaje de estanques durante la cosecha	***	***	*
Materia orgánica	Sustancias químicas o bioquímicas que necesitan oxígeno disuelto en el agua para degradarse (materiales orgánicos, como materia vegetal y estiércol de ganado)**	*	***	**
Patógenos	Indicadores de bacterias y patógenos, incluidos E. coli, coliformes totales, coliformes fecales y enterococos	*	***	*
Metales	Incluidos selenio, plomo, cobre, mercurio, arsénico, manganeso y otros	*	*	*
Contaminantes emergentes	Residuos de medicamentos, hormonas, aditivos de alimentos para animales, etc.	-	***	**

\*Medido en el agua, directamente como total de sólidos disueltos o indirectamente como conductividad eléctrica

\*\*Medido en el agua como DBO y DQO

Fuente: FAO/CGIAR WLE (de próxima publicación).

residuales, las cargas de nutrientes que se vierten al agua dependen, esencialmente, de la composición del pienso y de la conversión del mismo (desechos fecales). El desperdicio de alimentos (que no son consumidos por los peces) en la acuicultura intensiva puede contribuir en gran medida a las cargas de nutrientes del agua.

Estas cargas de nutrientes pueden llevar a la eutrofización de lagos, embalses y estanques, lo que provoca floraciones de algas que afectan a otras plantas y animales (FAO, 2002). La acumulación excesiva de nutrientes también podría aumentar los efectos perjudiciales en la salud, como el síndrome del niño azul, que puede deberse a la presencia de altos niveles de nitratos en el agua potable (OMS, 2006a).

## PESTICIDAS

En muchos países se aplican grandes cantidades de insecticidas, herbicidas y fungicidas en la agricultura (Schreinemachers y Tipraqsa, 2012). Cuando se seleccionan y administran de forma indebida, pueden

contaminar los recursos hídricos con carcinógenos y otras sustancias tóxicas que pueden afectar a los seres humanos y diversas formas de vida silvestre. Al destruir malezas e insectos los pesticidas también pueden afectar la biodiversidad, con efectos negativos más arriba en la cadena alimenticia. Si bien en el mundo desarrollado el uso de los antiguos pesticidas de amplio espectro sigue siendo habitual, hay una tendencia a utilizar pesticidas más nuevos que son más selectivos y menos tóxicos para los seres humanos y el medio ambiente, y que exigen una cantidad menor por hectárea para ser eficaces.

Actualmente se utilizan millones de toneladas de principios activos de pesticidas en la agricultura (FAOSTAT, s.f.b) y los casos de intoxicación aguda por pesticidas representan una causa importante de morbilidad y mortalidad, especialmente en los países en desarrollo (OMS, 2008), donde los agricultores que viven en condiciones de pobreza generalmente usan formulaciones de pesticidas extremadamente peligrosas, en lugar de alternativas más seguras.

## SALES

En las últimas décadas, el drenaje de aguas salobres y la generación de agua lixiviada provenientes de la agricultura crecieron de forma proporcional al aumento de la irrigación.

El riego (fracciones de lixiviación) puede movilizar las sales acumuladas en los suelos, que luego son acarreadas por el agua de drenaje y provocan la salinización de las masas de agua receptoras. Asimismo, el riego excesivo puede elevar los niveles freáticos de los acuíferos salinos y esto puede aumentar la filtración de aguas subterráneas salinas a los cursos de agua e incrementar su salinización. La intrusión de agua de mar salina en los acuíferos es otra causa importante de salinización de los recursos hídricos en las zonas costeras. Con frecuencia esta intrusión es consecuencia de la excesiva extracción de aguas subterráneas para la agricultura (Mateo-Sagasta y Burke, 2010).

Se han detectado importantes problemas de salinidad en el agua en los Estados Unidos, Australia, China, India, Argentina, Sudán y varios países de Asia Central (FAO, 2011). En 2009, aproximadamente 1.100 millones de personas vivían en regiones que tenían aguas subterráneas salinas a profundidades bajas e intermedias (van Weert *et al.*, 2009).

Las aguas muy salinas modifican los ciclos geoquímicos de otros elementos fundamentales como, por ejemplo, carbono, nitrógeno, fósforo, azufre, sílice y hierro (Herbert *et al.*, 2015), lo que tiene efectos generalizados en los ecosistemas. La salinización puede afectar la biota de agua dulce en tres niveles: i) cambios dentro de las especies; ii) cambios en la composición de la comunidad; y iii) con el tiempo, pérdida de la biodiversidad y migración. En general, cuando aumentan los niveles de salinidad se observa una disminución de la biodiversidad (incluidos los microorganismos, algas, plantas y animales) (Lorenz, 2014).

## SEDIMENTOS Y OTROS CONTAMINANTES

En la agricultura, el uso no sostenible de la tierra, así como el manejo del suelo y la labranza inadecuados, son importantes causas de erosión y escorrentía de sedimentos hacia ríos, lagos y embalses. Los sedimentos de los sistemas fluviales son una compleja mezcla de materia mineral y orgánica que puede provocar el atarquinamiento de los embalses y afectar la vida acuática, al modificar y asfixiar los hábitats y obstruir las branquias de los peces. Los sedimentos también pueden transportar contaminantes químicos, como los pesticidas o fosfatos.

La agricultura también puede ser fuente de otros tipos de contaminantes, entre ellos, materia orgánica, patógenos, metales y contaminantes emergentes. El exceso de materia reduce el oxígeno de las masas de

agua y aumenta el riesgo de eutrofización y floraciones de algas en lagos y embalses. En los últimos 20 años surgieron nuevos contaminantes agrícolas, como los antibióticos, vacunas, promotores del crecimiento y hormonas, todos los cuales pueden filtrarse de explotaciones ganaderas y acuícolas al agua, lo que aumenta los riesgos para los ecosistemas y la salud humana. Los residuos de metales pesados en insumos agrícolas, como los fertilizantes o alimentos para animales, también son amenazas emergentes.

## 7.1.2 Respuestas a la contaminación agrícola

### CONOCIMIENTO E INVESTIGACIÓN

Los vacíos de conocimiento sobre la contaminación del agua proveniente de la agricultura son considerables. En la mayoría de las cuencas y países, especialmente aquellos en desarrollo, no se ha identificado la verdadera incidencia de los cultivos, la cría de ganado y la acuicultura en la contaminación del agua. Esta información es fundamental para que los gobiernos nacionales puedan comprender la magnitud del problema y elaborar políticas sólidas y con una buena relación costo-beneficio. Por otra parte, si no se conoce bien la fuente de contaminación, no se puede aplicar el principio de «quien contamina paga». Para entender mejor las vías de contaminación se necesita realizar un esfuerzo sostenido de investigación y modelización, y vigilar la calidad del agua. También se deben realizar rigurosas evaluaciones para comprender las vías de contaminación, así como los riesgos que representan para la salud y el medio ambiente los contaminantes agrícolas emergentes, como las hormonas animales, los antimicrobianos y otros productos farmacéuticos.

### POLÍTICAS E INSTITUCIONES

Se necesita un marco de políticas adecuado para controlar eficazmente la contaminación del agua proveniente de la agricultura. Las políticas pueden aplicarse a través de distintos tipos de instrumentos: leyes y normativas, planes y programas, instrumentos e información económicos, y programas de sensibilización y educación (FAO, 2013b). Estos instrumentos deben brindar a los agricultores los incentivos necesarios para que adopten buenas prácticas agrícolas para controlar la contaminación.

Como las políticas ambientales y relativas a la producción de alimentos suelen ser elaboradas por ministerios diferentes, a menudo se carece de un sentido de responsabilidad compartida en la legislación y el control de la contaminación. En muchos casos esto ha ocasionado conflictos entre políticas dirigidas a aumentar la producción de alimentos y los ingresos de las explotaciones agrícolas, por una parte, y a mitigar la contaminación en las costas y tierra adentro, por otra. Se necesitan mejores mecanismos de cooperación

interministerial para generar políticas más coherentes. Se deben adoptar planes y programas para controlar la contaminación del agua a nivel de las cuencas o áreas de drenaje. Estas deben abarcar distintas fuentes de contaminación, como la industria y las zonas urbanas, además de la agricultura, e idealmente identificar los casos en los que las aguas residuales de un sector pueden pasar a ser un recurso para otro sector en una economía circular.

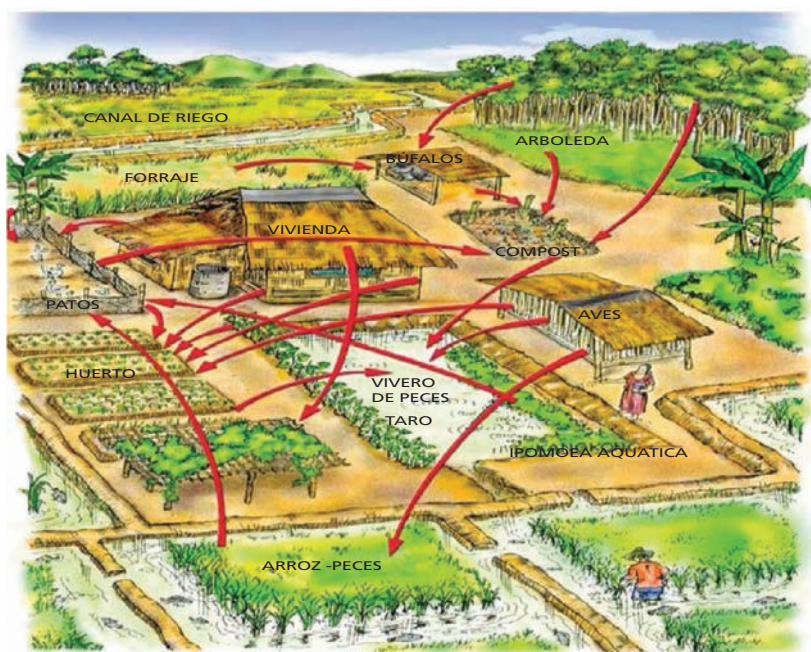
## PRÁCTICAS EN LAS EXPLOTACIONES AGRÍCOLAS

Las prácticas que se realizan en las explotaciones agrícolas desempeñan un papel fundamental en el control y la reducción de la contaminación agrícola. En la producción de cultivos, las medidas de control para reducir el riesgo de contaminación del agua de fertilizantes y pesticidas orgánicos e inorgánicos incluyen: i) la limitación y optimización de los tipos, cantidades y frecuencia de aplicación de fertilizantes y pesticidas a los cultivos; ii) la creación de franjas de amortiguación a lo largo de los cursos de agua superficiales; y iii) la creación de zonas de protección alrededor de las fuentes de suministro de aguas subterráneas. Además, los sistemas de riego eficientes pueden ayudar a reducir en gran medida la pérdida tanto de agua como de fertilizantes (Mateo-Sagasta y Burke, 2010). Para controlar la erosión se necesita un buen control (por ejemplo, labranza en contorno) o restricciones sobre el cultivo en suelos con pendientes pronunciadas (US EPA, 2003).

El problema de la calidad del agua en los sectores ganadero y acuícola es consecuencia de los desechos sólidos y líquidos (FAO, 2013b). El estiércol generado en explotaciones ganaderas, por ejemplo, es un valioso material para mejorar la fertilidad de los suelos y puede ayudar a ahorrar en costos de fertilizantes. Sin embargo, es sumamente contaminante si se esparce en el momento equivocado o en el lugar incorrecto. Si no se toman precauciones suficientes, las prácticas de la ganadería y la acuicultura también pueden contribuir a la contaminación microbiológica de ríos y aguas subterráneas. Por lo tanto, es vital tomar medidas para controlar y eliminar la propagación de patógenos (por ejemplo, bacterias del estiércol semilíquido) y otros contaminantes (por ejemplo, nitrato).

También deben controlarse los riesgos asociados al drenaje de aguas agrícolas salobres o salinas (flujo de retorno). Las opciones adecuadas para la gestión del agua incluyen minimizar el drenaje conservando agua, tratar el agua de drenaje (por ejemplo, en estanques de evaporación para el drenaje de agua salina) o reutilizar el agua. El agua de drenaje de aguas salobres o salinas puede reutilizarse directamente aguas abajo o mezclarse con agua dulce. Estos procedimientos demandarían una planificación a nivel de la cuenca para adaptar las prácticas agrícolas y los cultivos al creciente nivel de sal luego de diferentes ciclos de reutilización, que también puede incluir la producción de camarones y peces en aguas salobres o salinas.

**Figura 7.1** Agro-acuicultura integrada



Fuente: FAO (2013b, Fig. 7.3, p. 93).

La agro-acuicultura integrada (ver Figura 7.1), donde cultivos, vegetales, ganado, árboles y peces se organizan de forma colectiva, puede incrementar la estabilidad de la producción, la eficiencia en el uso de los recursos y la sostenibilidad ambiental. La producción integrada garantiza que los desechos de un establecimiento sean insumos para otro; de este modo se optimiza el uso de los recursos y se reduce la contaminación (FAO, 2013b).

## 7.2 La agricultura como usuaria de aguas residuales

Ante la creciente demanda de productos agrícolas básicos, los agricultores están investigando fuentes de agua no convencionales. Debido a su alto contenido de nutrientes, las aguas residuales domésticas y municipales son una opción atractiva, especialmente en los lugares en los que los recursos hídricos convencionales son escasos o insuficientes.

Si se usan aguas residuales en la agricultura sin tomar las precauciones de seguridad necesarias, los contaminantes microbiológicos y químicos pueden acumularse en los cultivos, los productos animales, el suelo o los recursos hídricos, esto puede afectar gravemente la salud de los consumidores de alimentos y los trabajadores expuestos. Sin embargo, si se tratan adecuadamente y se utilizan en forma segura, las aguas residuales constituyen una valiosa fuente tanto de agua como de nutrientes y su uso contribuye a la seguridad alimentaria y a mejorar los medios de subsistencia.

Las aguas residuales pueden usarse directa o indirectamente en la agricultura. El uso directo implica la planificación y el uso intencional de aguas residuales tratadas o no tratadas para un fin beneficioso, que puede ser riego, acuicultura o ganadería. El uso indirecto tiene lugar cuando se vierten aguas residuales tratadas, parcialmente tratadas o no tratadas a embalses, ríos y otras masas de agua, incluidas aguas subterráneas, que suministran agua a la agricultura. El uso indirecto representa los mismos riesgos que los proyectos de uso de aguas residuales planificados, pero tiene un mayor potencial para causar problemas de salud porque el usuario del agua desconoce la presencia de aguas residuales (FAO, 1997).

Otra forma importante de usar las aguas residuales en la agricultura es la gestión de la recarga de acuíferos, en la que se infiltran aguas residuales tratadas o parcialmente tratadas en acuíferos a través de estanques, zanjas, lagunas o pozos de inyección para su posterior recaptación (Dillon *et al.*, 2012). En muchos casos, el suelo y la zona no saturada del acuífero ayudan a eliminar los contaminantes de las aguas residuales para que las aguas subterráneas recaptadas puedan usarse en todo tipo de cultivo.

Las aguas residuales suelen ser ricas tanto en sólidos en suspensión (partículas) como en nutrientes disueltos. Para optimizar la reutilización del agua, es importante considerar factores como su calidad, cantidad y ubicación (Iannelli *et al.*, 2011).

**Si se tratan adecuadamente y se utilizan en forma segura, las aguas residuales constituyen una valiosa fuente tanto de agua como de nutrientes, y su uso contribuye a la seguridad alimentaria y a mejorar los medios de subsistencia.**

## 7.2.1 Uso de aguas residuales: una oportunidad para la agricultura

### RIEGO

Conforme a la información de la base de datos AQUASTAT de la FAO (s.f.b.), cada año se extraen aproximadamente 3.928 km<sup>3</sup> de agua en todo el mundo (ver Figura 1, Prólogo), de los cuales el 44% (1.716 km<sup>3</sup> por año) se consume y el 56% (2.212 km<sup>3</sup> por año) se libera como agua residual, incluidos el drenaje agrícola y las aguas residuales.

Las aguas residuales municipales representan la mayor parte de las aguas residuales que se usan directamente en la agricultura. La demanda municipal de agua corresponde al 11% de la extracción de agua a nivel mundial (AQUASTAT, s.f.b.). De este porcentaje, solo el 3% se consume y el 8% restante se vierte como agua residual, lo que representa 330 km<sup>3</sup> al año (Mateo-Sagasta *et al.*, 2015), gran parte de lo cual podría utilizarse para riego en la agricultura.

El drenaje y las aguas residuales agrícolas, por otra parte, representan el 32% (1.257 km<sup>3</sup> por año) del agua extraída. Se destaca así la necesidad de que las políticas, la planificación y la aplicación no deberían centrarse exclusivamente en la gestión de las aguas residuales municipales, sino también en la sostenibilidad del drenaje agrícola, el flujo de retorno y la gestión de aguas residuales. Como se observa anteriormente, la reutilización de agua para la agricultura puede traer importantes beneficios para la salud, incluida una mayor seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición.

En la actualidad, el uso planificado de las aguas residuales municipales es una práctica habitual en países del Oriente Medio y África Septentrional, Australia y el Mediterráneo, así como también en México, China y los Estados Unidos (AQUASTAT, s.f.b.). No obstante, además de los incipientes esfuerzos de instituciones como AQUASTAT (s.f.a.), no hay un inventario completo de la magnitud de aguas residuales tratadas o no tratadas que se usan en la agricultura. El tratamiento inadecuado de las aguas residuales, y como resultado la contaminación del agua a gran escala, sugieren que la superficie regada con aguas residuales peligrosas probablemente sea diez veces mayor que la superficie donde se usan aguas residuales tratadas (Drechsel y Evans, 2010).

De acuerdo con la FAO, la superficie efectivamente regada a nivel mundial es de 2,75 millones de km<sup>2</sup> de tierra (AQUASTAT, 2014). Con los aproximadamente 330 km<sup>3</sup> de aguas residuales municipales que se generan cada año se podrían regar 40 millones de hectáreas (con aproximadamente 8.000 m<sup>3</sup> por hectárea) (Mateo-Sagasta *et al.*, 2015) o el 15% de todas las tierras de regadío. Las estimaciones de la superficie total que



”  
**Actualmente se utilizan millones de toneladas de principios activos de pesticidas en la agricultura y los casos de intoxicación aguda por pesticidas son una causa importante de morbilidad y mortalidad, especialmente en los países en desarrollo**

se riega con aguas residuales no tratadas y diluidas siguen siendo parciales, pero probablemente las cifras se encuentren en el rango de 5 a 20 millones de hectáreas, y es probable que la mayor parte se encuentre en China (Drechsel y Evans, 2010), que representa entre el 2% y 7% de la superficie de regadío total del mundo.

El bajo porcentaje de aguas residuales que se está utilizando en la agricultura de forma planificada y su aplicación, que en la mayoría de los casos es peligrosa, confirma el vasto potencial para mejorar y aumentar el uso de agua previamente utilizada (de fuentes municipales, industriales y agrícolas) para satisfacer la demanda de agua de la producción de alimentos en todo el mundo.

### ACUICULTURA Y GANADERÍA

El objetivo de fertilizar un estanque de acuicultura con excremento o aguas residuales es producir alimentos naturales para los peces (ver Cuadro 5.4). Se ha cultivado una amplia gama de peces de esta manera. Los peces pueden criarse en estanques que reciben efluentes o lodos, donde pueden alimentarse de algas y otros organismos que crecen en el agua rica en nutrientes. Así, los peces eliminan los nutrientes de las aguas residuales y con el tiempo se los cosecha para consumo humano o como alimento para animales.

La calidad y el estado del pescado influirán sobre la aceptación que tenga a nivel local. La flora microbiana de un pescado refleja la flora del agua del que fue recogido (por ejemplo, en el tracto digestivo, sobre la piel o en los líquidos de las cavidades). Puede haber inquietudes respecto a la contaminación del pescado, especialmente cuando se los recoge, limpia y prepara. Si se cocina bien, debería ser seguro, pero es aconsejable pasar los peces a un estanque de agua limpia y que permanezcan allí varias semanas antes de la cosecha para consumo humano.

El uso de agua en la ganadería, así como la contribución de la ganadería al agotamiento de las fuentes de suministro de agua, es elevado y está aumentando (FAO, 2006). Los productos de origen animal requieren un gran volumen de agua por unidad de energía nutricional en comparación con los alimentos de origen vegetal (Gerbens-Leenes *et al.*, 2013). El uso seguro de las aguas residuales podría ayudar en gran medida a reemplazar el agua dulce en la producción de forraje (por ejemplo, heno o forraje ensilado) o a reemplazar el agua de los servicios de mantenimiento (por ejemplo, en la refrigeración y limpieza de instalaciones). La utilización de aguas residuales en el sector ganadero, sean de origen municipal, industrial o de la misma explotación ganadera, dependerá de su calidad. En general se recomienda, como mínimo, realizar tratamiento

secundario y desinfección. Además, se deben tratar las aguas recuperadas destinadas al ganado para eliminar los helmintos. Dicho tratamiento puede realizarse mediante lagunaje (durante 25 días o más) o con un método de filtración por arena o de membrana (EPA Victoria, 2002).

### 7.2.2 Riesgos


El uso de aguas residuales para el riego ha tenido más éxito en zonas urbanas y periurbanas, donde hay una gran disponibilidad de aguas residuales de fuentes confiables, por lo general sin costo alguno, y donde hay una mayor demanda de productos agrícolas. A veces puede ser necesario almacenar las aguas residuales para realizar un tratamiento parcial o porque las tendencias de suministro pueden no coincidir con la demanda (por ejemplo, variaciones estacionales).

Las aguas residuales recolectadas pasarán por ciertos procedimientos en la planta de tratamiento antes de utilizarse en el campo o con otros fines. Si bien el nivel de tratamiento necesario varía en función de la fuente de aguas residuales (tipo y concentración de contaminantes) y el uso previsto (tipo de cultivo, método de cosecha, etc.), habitualmente se considera que el tratamiento secundario es suficiente para su uso en la agricultura.

A continuación, las aguas residuales tratadas y el agua reutilizada deben someterse a técnicas de aplicación correctamente controladas y, de ser necesario, se les podrá realizar un tratamiento adicional.

### RIESGOS PARA LA SALUD

Debido a la posible contaminación microbiana y química, la utilización de aguas residuales representa un riesgo para la salud de los agricultores, las personas que trabajan en toda la cadena alimentaria y los consumidores. El uso de mano de obra de bajo costo es una práctica habitual entre los agricultores que utilizan aguas residuales, y son las mujeres quienes se encargan de gran parte de esta tarea. Por consiguiente, enfrentan mayores riesgos para la salud, incluida la exposición a patógenos y la posibilidad de transmisión a sus familiares (Moriarty *et al.*, 2004).



**La reutilización de agua para la agricultura puede conllevar importantes beneficios para la salud, incluida una mayor seguridad alimentaria y una mejor nutrición.**

Se han propuesto distintos enfoques para mitigar los riesgos para la salud. Muchos de ellos se centran en la calidad del agua y estrictas normativas en lo que respecta al punto de uso. Así, el tratamiento de las aguas residuales pasa a ser un elemento fundamental para la reutilización del agua (Asano y Levine, 1998; Mara y Cairncross, 1989). En la Unión Europea, por ejemplo, en el proyecto Aquarec se proponen siete categorías de calidad (en función del tratamiento) para distintos tipos de reutilización y se establecen límites microbianos y químicos para cada categoría (Salgot *et al.*, 2006).

No obstante, en los países de bajos ingresos, en general se considera que las normas muy rigurosas en materia de calidad del agua para la reutilización tienen un costo prohibitivo y, por lo tanto, fracasan en la práctica. En las Guías de la OMS para el Uso Seguro de Aguas Residuales, Excretas y Aguas Grises en la Agricultura (OMS, 2006a) se reconocen los posibles riesgos para la salud de las aguas residuales no tratadas o con tratamiento inadecuado y la necesidad de reducir estos riesgos. En estas guías se propone emplear una serie de barreras (enfoque de barreras múltiples) para proteger la salud pública, junto con el saneamiento y las cadenas alimentarias desde la generación de aguas residuales hasta su consumo, en lugar de centrarse únicamente en la calidad de las aguas residuales en el punto de uso (ver Cuadro 7.1).

### **RIESGOS AMBIENTALES**

Si bien el uso de aguas residuales tratadas y la optimización del aporte de nutrientes a los suelos regados con aguas residuales pueden ofrecer múltiples beneficios para el medio ambiente, el uso de aguas residuales no tratadas o parcialmente tratadas para el riego conlleva algunos riesgos ambientales. Estos riesgos incluyen la contaminación de los suelos y las aguas subterráneas, así como la degradación del agua superficial.

El intercambio de aguas residuales de origen urbano parcialmente tratadas (para riego) por acceso a fuentes de agua dulce (para otros usos en zonas urbanas y periurbanas) puede ayudar a mejorar en gran medida el manejo de los recursos hídricos y a reducir los impactos negativos en la salud y el medio ambiente (Hanjra *et al.*, 2012).

La movilidad de los contaminantes y su capacidad de acumulación agravan la amenaza que representan para el medio ambiente y la sociedad.

**Suelo:** las aguas residuales para riego añaden nutrientes, sólidos disueltos, sales y metales pesados al suelo. Con el tiempo pueden acumularse cantidades excesivas de estos elementos en la zona de raíces, lo que puede ser perjudicial para el suelo. El uso de aguas residuales a largo plazo podría ocasionar en el suelo: salinidad, sobresaturación, desintegración de su estructura, una reducción generalizada de su capacidad productiva y reducir el rendimiento de los cultivos. Las consecuencias dependerán de factores como la fuente, la intensidad del uso y la composición de las aguas residuales, así como de las propiedades del suelo y las características biofísicas propias de cada cultivo.

**Aguas subterráneas:** el uso de aguas residuales posee el potencial de recargar los acuíferos (externalidad positiva) y de contaminar los recursos hídricos subterráneos (externalidad negativa). La percolación del exceso de nutrientes, sales y patógenos a través del suelo puede provocar la degradación de las aguas subterráneas. No obstante, el impacto real dependerá de una gama de factores, incluida la magnitud del uso de aguas residuales, la calidad de las aguas subterráneas, la profundidad hasta el nivel freático, el drenaje del suelo y las características de los suelos (por ejemplo, poroso, arenoso). Es probable que, en las zonas de riego con niveles freáticos poco profundos, las consecuencias del riego con aguas residuales con tratamiento inadecuado sean considerables.

**Aguas superficiales:** cuando la escorrentía de los sistemas de riego con aguas residuales desemboca en aguas superficiales, especialmente pequeños lagos y masas de agua cerrados, los restos de los nutrientes pueden producir eutrofización, en particular si existen fosfatos en forma de ortofosfatos. A su vez, los desequilibrios en las comunidades de plantas y microbiológicas de las masas de agua podrían afectar otras formas superiores de vida acuática y reducir la biodiversidad. Si se trata de masas de agua que abastecen comunidades locales, los impactos ecológicos pueden transformarse en consecuencias económicas.

Este método se ha aplicado en Jordania, donde se promueve el uso planificado de las aguas residuales desde 1977 y donde más del 90% de las aguas residuales tratadas se usa actualmente para el riego. En 2014, con fin de atender las inquietudes en materia de salud y su limitada capacidad de control, las autoridades jordanas implantaron las guías nacionales sobre calidad del agua de riego. En el marco de la Estrategia Nacional del Agua 2016-2025, en las guías nacionales se optó por el método de adopción de metas en función de la salud, que es un enfoque más flexible, descritas en las Guías de la OMS de 2006 (MWI, 2016a).

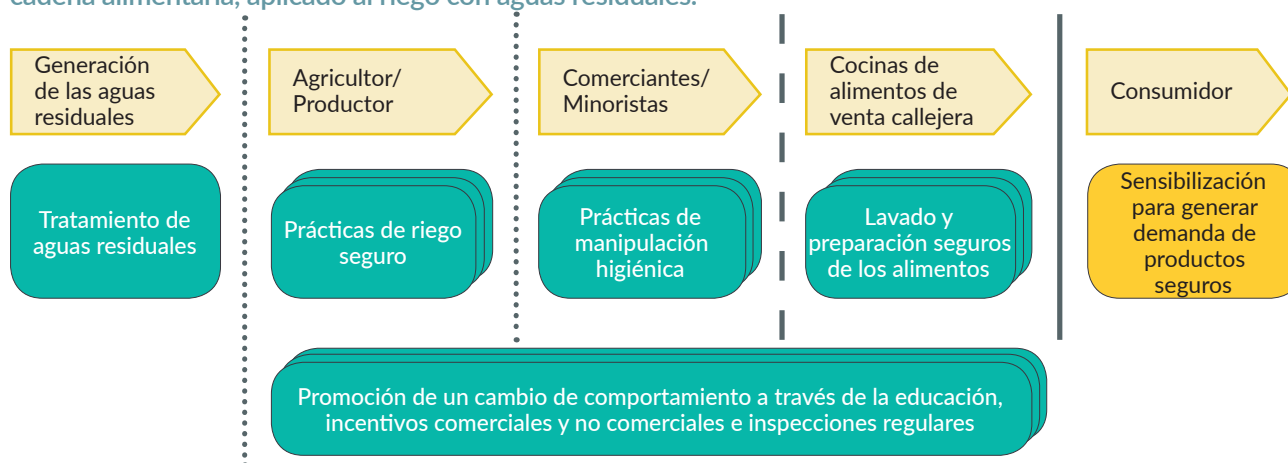
## La perspectiva de barreras múltiples va más allá de la calidad del agua de riego, ya que contempla también las inquietudes relativas a la contaminación poscosecha, con la aplicación de barreras en puntos de control fundamentales en toda la cadena de producción alimentaria

### CUADRO 7.1 UN MÉTODO DE BARRERAS MÚLTIPLES PARA REDUCIR LOS RIESGOS DEL RIEGO CON AGUAS RESIDUALES PARA LA SALUD

En las Guías de la OMS para el Uso Seguro de Aguas Residuales, Excretas y Aguas Grises en la Agricultura (OMS, 2006a) se establece un método integral de evaluación y gestión de riesgos para proteger la salud pública, que busca maximizar los beneficios de la reutilización segura del agua para la salud (OMS, 2010). En el manual de planificación de la seguridad del saneamiento (OMS, 2016b) se ofrecen directrices prácticas por etapas sobre la aplicación del método de evaluación y gestión de riesgos.

La perspectiva de barreras múltiples va más allá de la calidad del agua de riego para contemplar también las inquietudes relativas a la contaminación poscosecha, con la aplicación de barreras en puntos de control fundamentales en toda la cadena de producción alimentaria (ver Figura 7.1a). Con estas barreras se busca minimizar los riesgos y, aunque una de ellas falle, pueden ser eficaces en su conjunto. Este enfoque se aplica tanto en países de bajos ingresos, donde el riego con aguas residuales no tratadas es habitual y el tratamiento

Figura 7.1a Método de barreras múltiples para reducir los riesgos relacionados con el consumo en la cadena alimentaria, aplicado al riego con aguas residuales.



Fuente: Amoah et al. (2011, Fig. 1, p. 3).

de las aguas residuales es limitado, como en países desarrollados que han adoptado los principios del análisis de peligros y puntos críticos de control (APPCC) (Ilic et al., 2010).

Este método se ha aplicado en Jordania, donde se promueve el uso planificado de las aguas residuales desde 1977 y donde más del 90% de las aguas residuales tratadas se usa actualmente para el riego. En 2014, con fin de atender las inquietudes en materia de salud y su limitada capacidad de control, las autoridades jordanas implantaron las guías nacionales sobre calidad del agua de riego. En el marco de la Estrategia Nacional del Agua 2016-2025, en las guías nacionales se optó por el método de adopción de metas en función de la salud, que es un enfoque más flexible, descritas en las Guías de la OMS de 2006 (MWI, 2016a).

Aporte de la OMS.



# CAPÍTULO 8

**PNUMA** | Birguy M. Lamizana-Diallo y Carla Friedrich

**Con los aportes de:** Manzoor Qadir (UNU-INWEH), Javier Mateo-Sagasta y Mathew MacCartney (IWMI), Maite M. Aldaya (Observatorio del Agua, Fundación Botín y Universidad Pública de Navarra) y Paul Ouedraogo (Convención de Ramsar)

# ECOSISTEMAS

Humedales de tratamiento de aguas provenientes del desbordamiento del sistema de alcantarillado combinado en Washington, Indiana (Estados Unidos) diseñados por Lochmueller Group





En este capítulo se analiza la función que cumplen los ecosistemas en la gestión de aguas residuales y el uso de aguas residuales para mejorar los servicios de los ecosistemas.

Las aguas residuales, cuando no se gestionan de manera adecuada, pueden perjudicar los ecosistemas. Sin embargo, hay numerosas oportunidades para generar sinergias entre los servicios de los ecosistemas y la gestión de aguas residuales. Estas interacciones pueden analizarse desde dos perspectivas. En primer lugar, los servicios de los ecosistemas pueden contribuir al tratamiento de las aguas residuales como alternativa o complemento de los sistemas de tratamiento de agua convencionales. El proceso de purificación del agua que tiene lugar en los ecosistemas acuáticos y terrestres puede suministrar agua limpia apta para beber, para la industria, la recreación y los hábitats silvestres. En segundo lugar, los recursos incorporados en las aguas residuales (como agua, nutrientes y carbono orgánico) en las circunstancias adecuadas pueden usarse para rejuvenecer y rehabilitar ecosistemas, lo que mejora los servicios de los ecosistemas y, en consecuencia, se obtienen importantes beneficios para las economías y sociedades.

## 8.1 Función y limitaciones de los ecosistemas en la gestión de aguas residuales

Existe una clara relación entre la gestión sostenible de las aguas residuales y los ecosistemas saludables que, si se administra

correctamente, puede ser mutuamente beneficiosa. «Infraestructura ecológica» (IE) se refiere a ecosistemas naturales (por ejemplo, zonas de amortiguación ribereñas, humedales y manglares) o seminaturales (por ejemplo, humedales artificiales, jardines de lluvia, estanques de biorretención), que pueden prestar servicios como la filtración de sedimento y la eliminación de contaminantes, semejantes a ciertas funciones de la «infraestructura gris» (por ejemplo, drenaje convencional por tuberías y sistemas de tratamiento de agua). El abordaje de la IE se basa en la prestación de servicios de ecosistemas para ofrecer los beneficios de la gestión primaria de agua y aguas residuales, junto con una amplia gama de beneficios secundarios (por ejemplo, captura de carbono, protección de la biodiversidad, recreación), de forma económica y sostenible (PNUMA-DHI/IUCN/TNC/WRI, 2014). La protección y restauración de estos sistemas de IE benefician a la sociedad humana y favorecen la salud de los ecosistemas.

Las zonas de amortiguación ribereña son zonas con vegetación próximas a los recursos hídricos, que actúan como filtros y protegen la calidad del agua, estabilizan las márgenes y ofrecen un hábitat acuático y silvestre (ver Tabla 8.1) (Lowrance *et al.*, 1995).

**Tabla 8.1** Efectos de las zonas de amortiguación ribereña de diversos tamaños sobre la reducción de los sedimentos y nutrientes de la escorrentía superficial del campo

Ancho de la zona (m)	Tipo de zona	Sedimento			Nitrógeno			Fósforo		
		Entrada (mg/l)	Salida (mg/l)	Reducción (%)	Entrada (mg/l)	Salida (mg/l)	Reducción (%)	Entrada (mg/l)	Salida (mg/l)	Reducción (%)
4,6	Hierba	7.284	2.841	61,0	14,1	13,6	4,0	11,3	8,1	28,5
9,2	Hierba	7.284	1.852	74,6	14,1	10,9	22,7	11,3	8,6	24,2
19,0	Bosque	6.480	661	89,8	27,6	7,1	74,3	5,0	1,5	70,0
23,6	Hierba/Bosque	7.284	290	96,0	14,1	3,5	75,3	11,3	2,4	78,5
28,2	Hierba/Bosque	7.284	188	97,4	14,1	2,8	80,1	11,3	2,6	77,2

Fuente: Lowrance *et al.* (1995, Tabla 6, p. 30).

**Las aguas residuales, cuando no se gestionan de manera adecuada, pueden perjudicar los ecosistemas. Sin embargo, hay numerosas oportunidades para generar sinergias entre los servicios de los ecosistemas y la gestión de aguas residuales**

Los ecosistemas naturales son conocidos como los riñones del medio ambiente, puesto que eliminan contaminantes (ver Cuadro 8.1), regulan el flujo del agua y almacenan sedimentos. Pueden resultar muy eficaces y económicos al ofrecer servicios de tratamiento de aguas residuales, siempre que se trate de ecosistemas saludables, que se regule la carga de contaminantes (y los tipos) presentes en los efluentes y que no se supere la capacidad de transporte de contaminantes del ecosistema. La capacidad de asimilación de los ecosistemas tiene límites naturales. Cuando estos se superan, los ecosistemas están en peligro y no pueden continuar cumpliendo la función de depuración. Una vez que la concentración de contaminantes en la escorrentía alcanza los umbrales críticos, existe el riesgo de que se produzca un cambio ambiental abrupto e irreversible (Steffen *et al.*, 2015).

Se considera que los sistemas de humedales y estanques artificiales son una tecnología de tratamiento de aguas residuales confiable (ver Cuadro 8.2). En estos sistemas, la vegetación plantada aumenta considerablemente el área de la superficie de contacto, lo que ayuda a retirar los contaminantes a lo largo del lecho filtrante que, generalmente, consiste en una combinación de arena y grava.

## 8.2 El uso planificado de aguas residuales para servicios de los ecosistemas

La recuperación y reutilización del agua ya no son un lujo, sino una obligación, en especial en los países donde escasea el agua, en los que muchos organismos de protección del medio ambiente y las ciudades ya usan aguas residuales parcialmente tratadas para crear lagos o humedales artificiales, recuperar aguas subterráneas mermadas, restablecer los humedales naturales o regar campos de golf, parques y jardines

### CUADRO 8.1 EL HUMEDAL DE NAKIVUBO: RECEPTOR DE GRAN PARTE DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS E INDUSTRIALES DE KAMPALA (UGANDA)

El humedal de Nakivubo recibe directamente aguas residuales no tratadas de aproximadamente 100.000 hogares y varias industrias de Kampala, a ninguno de los cuales atiende el sistema de alcantarillado principal. El humedal, con un área de 5,3 km<sup>2</sup>, también recibe los efluentes de la principal planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad.

La bahía de Murchison y el lago Victoria están protegidos de los efectos de las aguas residuales por el humedal, que cumple una función de depuración. Dado que la toma del suministro de agua de Kampala se encuentra a solo 3 km del principal canal de salida del humedal, esta protección es fundamental. Se estima que el valor económico de los servicios de purificación de agua del humedal de Nakivubo es de entre USD 980.000 y USD 1.808.000 al año, y los beneficios adicionales alcanzan un total de USD 200.000 al año en cultivos, cosecha de papiro, elaboración de ladrillos y piscicultura (De Groot *et al.*, 2006).

*Aporte de Paul Ouedraogo (Convención de Ramsar).*

(ver Tabla 8.2). Además del riego de zonas ajardinadas, en España y México se han usado aguas recuperadas en la gestión de los humedales (Otoo *et al.*, 2015) para mantener los niveles de agua incluso en períodos de sequía.

El uso planificado de aguas residuales tratadas y residuales parcialmente tratadas para servicios de los ecosistemas es relativamente reciente. Puede mejorar la eficiencia de los recursos y aportar beneficios a los ecosistemas a través de las siguientes actividades:

- La reducción de la captación de agua dulce;
- El reciclaje y la reutilización de nutrientes esenciales, con lo que se reduce el uso de fertilizante y las emisiones de GEI;
- La minimización de la contaminación del agua y el mantenimiento de la calidad de las aguas fluviales en un nivel suficiente para el desarrollo de la industria pesquera y otros ecosistemas acuáticos; y
- La recarga de los acuíferos agotados para diversos usos beneficiosos, como la reutilización potable indirecta (RPI) (ver Secciones 16.1.2 y 16.1.5).

**Tabla 8.2** Ejemplos del uso de aguas residuales tratadas para contribuir a los servicios de los ecosistemas

Nombre del proyecto de reutilización	País	Tipo de reutilización de agua	Factores que impulsan la reutilización de agua	Objetivo de la reutilización de agua	Tecnología para el tratamiento de aguas residuales
Planta de recuperación de agua Quighe y BeiXiaoHe	China	Reverdecimiento de zonas ajardinadas	Ahorro de gastos en agua; recursos hídricos alternativos insuficientes	Riego de zonas ajardinadas; recarga de los acuíferos	Microfiltración; ósmosis inversa
Planta de tratamiento de aguas residuales de Marrakech	Marruecos				
Proyecto de recuperación de aguas residuales de Sulaibiya	Kuwait				
Proyecto de tres ríos de Jonan	Japón	Recuperación de humedales y embalses	Agotamiento de recursos hídricos naturales; recuperación de canales de agua, lagos y ríos	Recuperación de canales de agua y ríos	Lodos residuales activados; filtración por arena; tratamiento avanzado con proceso de eliminación de nutrientes
Lago Texcoco	México				

Fuente: Adaptado de Otoo et al. (2015, Tabla 10.2, pp. 177-180).

**CUADRO 8.2 HUMEDALES ARTIFICIALES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES, INDIANA, ESTADOS UNIDOS**

En Washington, Indiana (EE. UU.), los desbordamientos del sistema de alcantarillado combinado contaminaban de forma permanente las vías navegables locales. La ciudad construyó un humedal artificial para procesar aguas residuales, que le ahorró más de USD 26 millones en comparación con el costo estimado que habría tenido la edificación de un sistema de tratamiento convencional, además de ahorrar USD 1,6 millones cada año en costos operativos. El agua que proviene del sistema del humedal artificial ha superado las normas de calidad del agua de la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad y, desde la creación del humedal, la fauna y flora silvestres han vuelto a las vías fluviales del área.

Fuente: PR Newswire (2013), PNUMA-DHI/IUCN/TNC/WRI (2014) y ciudad de Washington, comunicación personal (2016).

**CUADRO 8.3 OASIS RECREATIVO CREADO CON AGUAS RESIDUALES TRATADAS EN LIMA, PERÚ**

En una ciudad de polvo y arena, los parques y jardines pueden tener un efecto positivo en el bienestar de los seres humanos. El Parque Huáscar es un parque recreativo multiuso que recibe agua de una de las 15 plantas de tratamiento de aguas residuales de Lima. El parque combina el tratamiento de aguas residuales y un parque público, una situación ventajosa para todos dado que optimiza la recuperación de recursos en una zona urbana y beneficia los ecosistemas. Las aguas residuales parcialmente tratadas proporcionan agua y algunos nutrientes al parque, que son extremadamente valiosos en Lima, donde la humedad y fertilidad de los suelos es baja. También ahorra agua dulce para otros usos y mejora la disponibilidad de nutrientes en los suelos para la vegetación, con lo que se genera una especie de oasis recreativo en medio de la capital peruana.

Se presta un importante servicio a los ecosistemas locales, dado que el área verde ofrece un entorno propicio para la relajación y recreación de los visitantes, lo que es beneficioso para su salud física y mental.

Aporte de Manzoor Qadir (UNU-INWEH).

**Tradicionalmente, los gobiernos y empresas se han concentrado en cumplir las normas sobre emisiones (normas sobre efluentes o vertidos) sin tener en cuenta las normas ambientales desde el punto de vista de los ecosistemas**

Aunque la valoración del uso de aguas residuales tratadas para los servicios de los ecosistemas presenta beneficios ambientales y económicos favorables (ver Cuadro 8.3), los mercados funcionales para muchos de los servicios de ecosistemas actualmente son incipientes o directamente no existen (Qadir *et al.*, 2015a).

Dado el deterioro de los hábitats naturales de las aves acuáticas, los humedales artificiales representan una alternativa muy válida.

### 8.3 Aspectos políticos y operativos

Para reducir la contaminación provocada por el vertido de aguas residuales no tratadas y aumentar el uso de aguas residuales tratadas será necesario coordinar esfuerzos, y esto debe hacerse a través de objetivos integrales de eficiencia de los recursos y gestión de los ecosistemas a lo largo de todo su ciclo de vida. También se necesitan políticas y metodologías que reconozcan que las aguas residuales son un recurso y que destaquen la estrecha relación entre los servicios de los ecosistemas y el bienestar de las personas.

La aplicación de normas de calidad del agua ambiental es fundamental para evitar daños al medio ambiente y para la conservación de los ecosistemas naturales. Las normas ambientales se refieren a la capacidad de los ecosistemas

naturales de absorber o asimilar la contaminación ambiental. Se miden como la cantidad máxima permitida de una sustancia en una masa de agua y se expresan como una concentración. Dado que las normas ambientales pueden fijarse a distintos niveles según los diferentes lugares, es posible utilizarlas para reducir la carga máxima total y proteger valiosos ecosistemas de una manera que no sería posible si se utilizaran controles de emisiones (Markandya *et al.*, 2001) (ver Cuadro 8.4). Si bien las legislaciones nacionales normalmente ya incluyen normas de calidad del agua ambiental, no existen normas para todas las sustancias y todos los lugares (Hoekstra *et al.*, 2011). Cuando sí existen, muchas veces no se tienen las facultades para aplicarlas efectivamente, en especial (pero no solamente) en los países en desarrollo.

#### CUADRO 8.4 VALOR AÑADIDO DE LAS NORMAS SOBRE CALIDAD DEL AGUA AMBIENTAL EN COMPARACIÓN CON LAS NORMAS SOBRE EMISIONES

Tradicionalmente, los gobiernos y empresas se han concentrado en cumplir las normas sobre emisiones (normas sobre efluentes o vertidos), sin tener en cuenta las normas ambientales desde el punto de vista de los ecosistemas. Cumplir con las normas de emisiones es una cosa, pero analizar la forma en que los efluentes influyen sobre la capacidad de asimilación de las masas de agua es otra. Para cumplir con las normas sobre efluentes, en términos de la concentración de productos químicos presentes en el efluente, solo basta con utilizar más agua para diluirlos antes de su eliminación. Sin embargo, esto no reduce la carga total de productos químicos incorporados al medio ambiente y su impacto en los ecosistemas, sin mencionar el consiguiente aumento del uso de agua a nivel general.

Fuente: Hoekstra *et al.* (2011).

Aporte de Maite M. Aldaya (Observatorio del Agua, Fundación Botín y Universidad Pública de Navarra).



# PARTE III

## ASPECTOS REGIONALES

Capítulo 9 | África

Capítulo 10 | La región árabe

Capítulo 11 | Asia y el Pacífico

Capítulo 12 | Europa y América del Norte

Capítulo 13 | América Latina y el Caribe



# CAPÍTULO 9

Oficina Regional Multisectorial de la UNESCO en Abuya | Simone Grego y Oladele Osibanjo

# ÁFRICA



En este capítulo se examinan los desafíos cruciales que plantean los asentamientos urbanos de rápido crecimiento en África y las oportunidades que conlleva la utilización de aguas residuales.

## 9.1 El agua y las aguas residuales en el África Subsahariana

Si bien en África vive el 15% de la población mundial, la región solo cuenta con el 9% de los recursos hídricos renovables disponibles a nivel mundial, distribuidos de manera desigual (Wang *et al.*, 2014). La brecha entre la disponibilidad y la demanda de agua crece con rapidez, sobre todo en las ciudades, donde se espera que la población urbana prácticamente se cuadruplique en 2037 (Banco Mundial, 2012). La mejora de los niveles de vida y el cambio en los patrones de consumo contribuyen al aumento en la demanda de agua. Por otra parte, su disponibilidad está disminuyendo debido a la superposición de las demandas de la agricultura, la minería y la industria, y el deterioro en la calidad del agua. Una gran cantidad de personas depende de las aguas subterráneas como fuente principal o alternativa de agua, pero la contaminación y la extracción excesiva atentan contra estos recursos hídricos (Banco Mundial, 2012).

De los más de 1.000 millones de habitantes del África Subsahariana, 319 millones de personas aún no tienen acceso a fuentes de agua potable mejoradas. El panorama es todavía más desolador en el caso del saneamiento, ya que 695 millones de personas no cuentan con saneamiento básico y ningún país del África Subsahariana ha alcanzado la meta de los ODM relacionada con el saneamiento (UNICEF/OMS, 2015).

Las principales industrias de la región son la minería, el petróleo y el gas, la explotación forestal y la manufactura. Todas estas industrias producen aguas residuales que con frecuencia se vuelcan al medio ambiente sin tratamiento o con un tratamiento mínimo. Según lo informado, por ejemplo, menos del 10% de las industrias de Nigeria realiza algún tratamiento a sus efluentes antes de verterlos en aguas superficiales (Taiwo *et al.*, 2012; Ebiare y

Zejjao, 2010). Además, en los casos en que se cuenta con estanques de estabilización, las concentraciones de contaminantes observadas en los efluentes llegaban a quintuplicar las registradas en Europa (Li *et al.*, 2011).

La escorrentía de tierras agrícolas, que contiene agroquímicos y desechos vegetales y del ganado, contribuye a la contaminación de las masas de agua. Por ejemplo, se ha determinado un vínculo entre la eutrofización periódica del Reservorio Oyun en Offa (estado de Kwara, Nigeria) y la escorrentía de fertilizantes de fosfato proveniente de las granjas cercanas y del estiércol de vaca que pasa de la cuenca al reservorio (Mustapha, 2008).

En la mayoría de las ciudades africanas, la lluvia arrastra desechos sólidos municipales y otros contaminantes hacia sistemas de alcantarillado rudimentarios y posteriormente hacia ríos cercanos (*cf.* Taiwo, 2011) y aguas subterráneas. La situación se agrava con la escasa aplicación y el incumplimiento de los principios y las reglamentaciones de urbanismo (Osibanjo y Majolagbe, 2012).

Si bien las aguas residuales agrícolas e industriales son fuentes reconocidas de contaminación en la región, en este capítulo se aborda especialmente el tema de las aguas residuales urbanas, ya que estas son fundamentales respecto a las nuevas oportunidades que pueden surgir de una mejor gestión, en el contexto de un crecimiento urbano acelerado.

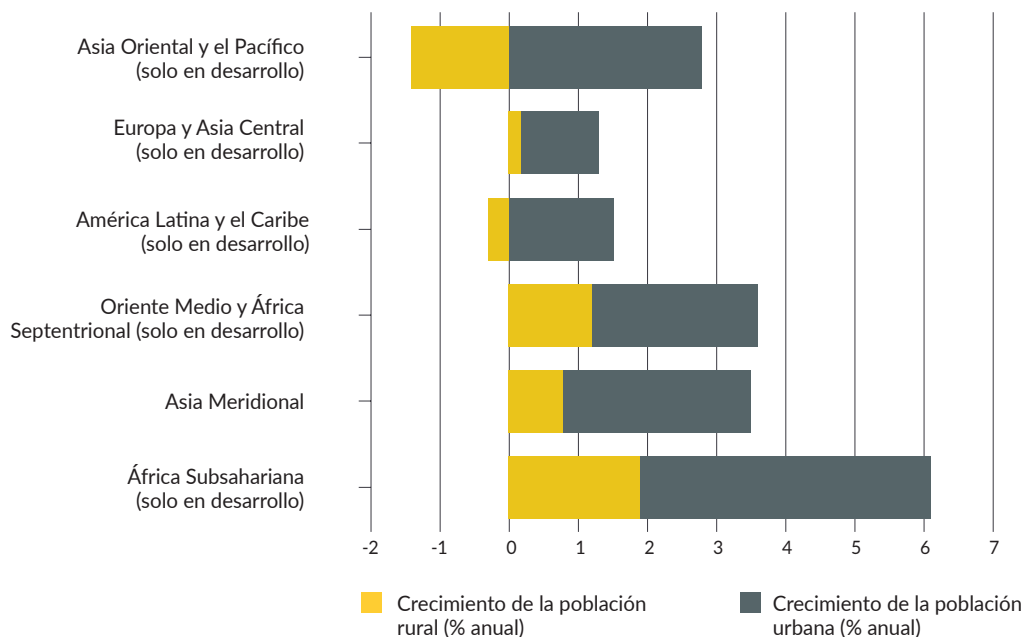
## 9.2 Desafíos cruciales

### 9.2.1 Asentamientos urbanos

Uno de los principales problemas en relación con las aguas residuales en África es la falta generalizada de infraestructura para recolección y tratamiento. Sumado a las elevadas cargas orgánicas, la ausencia de regulación del flujo de desechos, los cortes



**Figura 9.1 Población urbana y rural (% de crecimiento anual), 2013**



Fuente: Basado en datos del Banco Mundial (s.f.).

de energía, el aumento en los caudales de aguas residuales, los elevados costos de la energía y la falta de reinversiones (Nikiema *et al.*, 2013), esto provoca la contaminación de recursos hídricos superficiales y subterráneos que ya de por sí son escasos.

La recolección en alcantarillados suele ser limitada en los entornos urbanos y las conexiones de las viviendas e instalaciones a los alcantarillados municipales resultan insuficientes. Cuando existe la infraestructura, el mal manejo, la falta de mantenimiento y la escasez de profesionales capacitados limitan mucho la eficacia del proceso de tratamiento lo que, a su vez, produce una mayor concentración de contaminantes en el ambiente.

Cuando existen plantas de tratamiento, la falta de un apoyo financiero estable impide el mantenimiento y la actualización de las instalaciones y la compra y utilización de instrumentos de control adecuados (Wang *et al.*, 2014; Nikiema *et al.*, 2013). En Addis Abeba, por ejemplo, la planta de tratamiento de Kaliti, diseñada en principio para brindar servicio a 50.000 personas, estaba sirviendo a menos de 13.000. Esto se atribuyó a una falta de inversiones en la conexión de las viviendas a las tuberías del alcantarillado, lo que resultaba en una baja tasa de conexión. Se ha calculado que menos del 3% de las aguas residuales producidas por la ciudad llegaron a las instalaciones de tratamiento de aguas residuales en 2009 (Abiye *et al.*, 2009).

Otro factor que impide que los países africanos puedan gestionar adecuadamente las aguas residuales es la capacidad insuficiente para realizar un control eficaz de estas aguas antes y después del tratamiento. En Nigeria, por ejemplo, un estudio reciente (UNESCO, 2016a) reveló que son pocos los laboratorios del país que pueden detectar contaminantes emergentes.

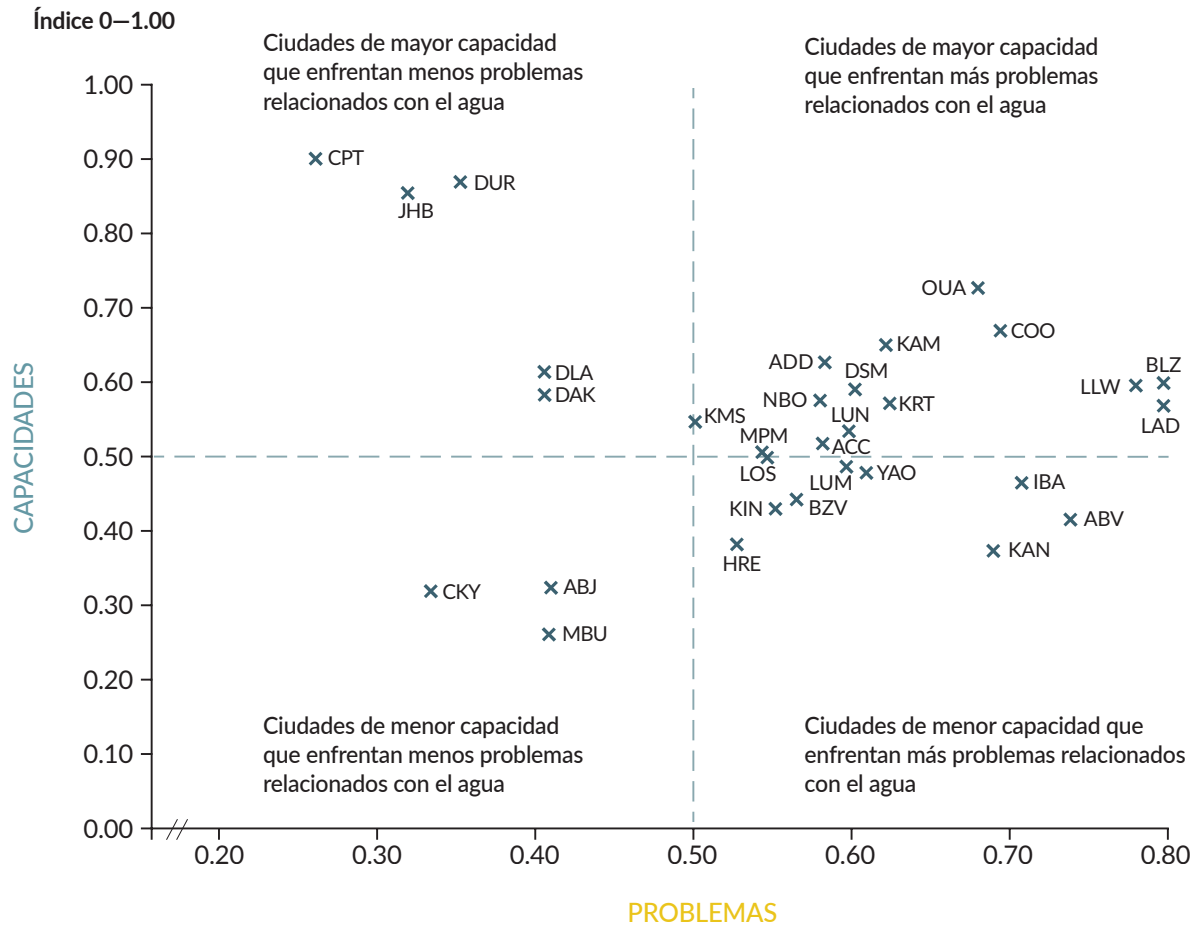
### 9.2.2 Necesidades en materia de gobernabilidad y datos

La mala gobernabilidad, que incluye instituciones y políticas ineficaces, incumplimiento de la ley, corrupción, infraestructura insuficiente y poca inversión en recursos humanos, contribuye a que persistan los problemas con la calidad del agua y las aguas residuales (PNUMA, 2010).

Un tema crucial, que limita la posibilidad de establecer políticas adecuadas para la calidad del agua, es la falta de datos sobre aguas residuales. En el África Subsahariana existen muy pocos datos cuantitativos sobre la generación, el tratamiento, la utilización y la calidad de las aguas residuales. Únicamente se dispone de datos completos en los casos de Senegal, Seychelles y Sudáfrica, y en los dos últimos países la información data de comienzos de la década de 2000 (Sato *et al.*, 2013).



**Figura 9.2** Problemas en la gestión de aguas urbanas frente a capacidades institucionales y económicas



Fuente: Banco Mundial (2012, Fig. 1, p. 5).

\* Notas: Abreviaturas de ciudades: ABJ, Abidjan, Cote d'Ivoire; ABV, Abuja, Nigeria; ACC, Accra, Ghana; ADD, Addis Abeba, Etiopía; BLZ, Blantyre, Malawi; BZV, Brazzaville, Congo; CKY, Conakry, Guinea; COO, Cotonou, Benin; CPT, Ciudad del Cabo, Sudáfrica; DAK, Dakar, Senegal; DLA, Douala, Camerún; DSM, Dar es Salaam, Tanzania; DUR, Durban, Sudáfrica; HRE, Harare, Zimbabwe; IBA, Ibadan, Nigeria; JHB, Johannesburgo, Sudáfrica; KAN, Kano, Nigeria; KIN, Kinshasa, República del Congo; KMS, Kumasi, Ghana; KRT, Khartoum, Sudán; LLW, Lilongwe, Malawi; LAD, Luanda, Angola; LOS, Lagos, Nigeria; LUN, Lusaka, Zambia; MBU, Mbuji-Mayi, República del Congo; MPM, Maputo, Mozambique; NBO, Nairobi, Kenya; OUA, Ouagadougou, Burkina Faso; YAO, Yaounde, Camerún.

\*\* Nota sobre la metodología: En esta Figura se presenta un índice que clasifica a las ciudades en virtud de dos dimensiones: problemas relacionados con el agua y capacidades institucionales y económicas. Para cada dimensión se identificaron determinadas variables para las cuales se seleccionaron indicadores. En el caso de la dimensión de problemas relacionados con el agua se seleccionaron indicadores para las siguientes variables: problemas de urbanización, gestión de desechos sólidos, servicios de suministro de agua, servicios de saneamiento, riesgos de inundaciones y disponibilidad de recursos hídricos. En el de la dimensión de capacidades institucionales y económicas se seleccionaron indicadores para las siguientes variables: políticas e instituciones del país, solidez económica, instituciones relacionadas con el agua y gobernabilidad de las empresas de suministro de agua. Los indicadores se normalizaron, por lo que el valor de las unidades varía de 0 a 1. Se asignó el mismo peso a todos los indicadores, que se sumaron para cada dimensión.

Además, la legislación y las leyes existentes para el sector hídrico en todos los niveles del gobierno no suelen tomar en cuenta las aguas residuales. En la mayoría de las leyes federales y estatales de Nigeria, por ejemplo, se hace escasa o nula mención al tema de las aguas residuales (Ajiboye *et al.*, 2012; Goldface-Irokabibe, 1999 y 2002; Goldface-Irokabile *et al.*, 2001). El cumplimiento con las reglamentaciones (*i. e.* en el caso de las industrias conectadas al alcantarillado) es casi inexistente en la mayoría de los países, lo que incide directamente en la calidad del agua abajo.

### 9.2.3 Rápida urbanización

En 2013, la tasa de crecimiento anual de la población urbana (ver Figura 9.1) en los países en desarrollo del África Subsahariana (6%) fue tres veces mayor que la de la población rural (2%). Se prevé que la proporción de personas que viven en áreas urbanas en África aumente del 40% al 45% entre 2015 y 2025 (DAES, 2014). Estas cifras indican que probablemente se registre un incremento masivo en la producción de aguas residuales en las ciudades de la región (Banco Mundial, 2012).

Las ciudades africanas crecen rápidamente y sus sistemas actuales de gestión hídrica no pueden acompañar el aumento de la demanda. Se ha estimado que aún resta construir la mitad de la infraestructura urbana que constituirá las ciudades africanas en 2035 (Banco Mundial, 2012). Al tiempo que presenta varios desafíos, este escenario ofrece oportunidades para desprenderse

**La brecha entre la disponibilidad y la demanda de agua aumenta rápidamente, sobre todo en las ciudades, donde se espera que la población urbana prácticamente se cuadruple en 2037**

#### CUADRO 9.1 USO DE AGUAS RESIDUALES EN KUMASI Y ACCRA, GHANA

Ghana es un buen ejemplo de desarrollo de la agricultura urbana y periurbana mediante el riego informal con aguas residuales sin tratar procedentes de cursos de agua y drenajes. En Kumasi y Accra, donde las principales plantas de tratamiento de aguas residuales apenas funcionan, las aguas residuales se usan con regularidad para regar los cultivos. Esta práctica, habitual en los centros urbanos de muchos países de África, proporciona alimentos a la población, genera empleo y alivia la pobreza de un gran número de ghaneses, al tiempo que ayuda a preservar los recursos de agua dulce.

En Accra, los agricultores riegan más de 15 tipos de verduras con aguas residuales sin tratar. Los tamaños de los terrenos urbanos varían entre 22 y 3.000 m<sup>2</sup> por agricultor. El cultivo de verduras con riego durante todo el año puede representar un nivel de ingreso anual promedio de USD 400 a USD 800 por agricultor. El valor de mercado anual para la producción se estima en USD 14 millones y unos 200.000 habitantes de zonas urbanas de todas las clases sociales se benefician de esta producción. Se estima que en Kumasi hay 115 km<sup>2</sup> de tierra cultivada, el doble del área total informada en virtud del riego formal en todo el país.

No obstante, se plantean algunos problemas de salud pública relacionados especialmente con la contaminación microbiana de estos productos agrícolas. Los análisis realizados a las verduras que se venden en los mercados mostraron la presencia de coliformes fecales y huevos de helmintos (Keraita y Drechsel, 2004).

Fuente: Bahri *et al.* (2008).

de los antiguos (e inadecuados) sistemas de gestión del agua y adoptar soluciones innovadoras en esta materia, como la gestión integral de aguas urbanas, que incluye el uso de aguas residuales tratadas para ayudar a satisfacer la creciente demanda de agua.

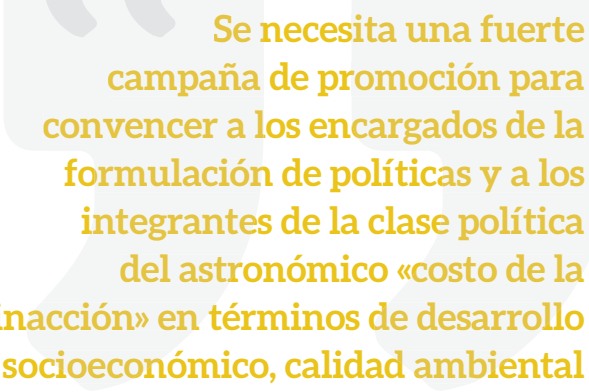
La limitación de recursos humanos, financieros e institucionales en relación con la gestión del agua supone un problema para las ciudades africanas. Si bien los principales desafíos en términos de magnitud se presentan en las ciudades más grandes, estas también se encuentran relativamente mejor ubicadas en cuanto a capacidad institucional y económica (ver Figura 9.2) para abordar los problemas mediante economías de escala. La mayoría de las ciudades más chicas carecen de esta ventaja y deben centrarse en la creación de capacidades como medida necesaria para mejorar sus sistemas de gestión de aguas y aguas residuales.

## 9.3 El camino a seguir

### 9.3.1 Utilización de aguas residuales en granjas urbanas y periurbanas

El valor de las aguas residuales como recurso desaprovechado es ampliamente reconocido, incluso en ausencia de políticas nacionales que regulen la reutilización del agua en muchos países africanos. Varios agricultores urbanos y periurbanos están dejando de lado el riego tradicional con agua dulce y realizando riegos con aguas residuales. Un ejemplo de ello es lo que ocurre con el negocio del riego con aguas residuales sin tratar en Kumasi y Accra, Ghana (ver Cuadro 9.1), donde se utiliza este tipo de agua para regar cultivos y producir verduras. Si bien esto genera oportunidades de negocio y mejora la subsistencia, también tiene graves consecuencias para la salud, tanto para los clientes como para los propios agricultores (Keraita y Drechsel, 2004; Drechsel *et al.*, 2010).

En la región existen varios ejemplos de recuperación de lodos para uso en la agricultura, lo que genera oportunidades para mejorar los medios de subsistencia de los agricultores, al tiempo que ayuda a reducir la cantidad de lodo que se vuelca al medio ambiente. En Kumasi, Ghana, se instaló una planta piloto de compostaje, cuyas operaciones se supervisaron durante 12 meses (Mensah *et al.*, 2003). Los resultados positivos –entre ellos, la aceptación de los agricultores de usar el compost como fertilizante– indican que la recuperación de nutrientes de los lodos es una opción viable para reducir el impacto de las aguas residuales en la calidad del agua y mejorar los medios de subsistencia de los agricultores en áreas urbanas y periurbanas.



**Se necesita una fuerte campaña de promoción para convencer a los encargados de la formulación de políticas y a los integrantes de la clase política del astrónomico «costo de la inacción» en términos de desarrollo socioeconómico, calidad ambiental y salud humana**

### 9.3.2 Utilización de aguas residuales tratadas

Namibia y Sudáfrica son dos buenos ejemplos de que, con el tratamiento adecuado, las aguas residuales pueden ser una fuente segura de agua para el consumo y para fines industriales. En el Cuadro 16.1 se muestra cómo se tratan las aguas residuales en Windhoek, Namibia, para cumplir con los niveles de calidad del agua potable, y en el Cuadro 9.2 se describe cómo se están reciclando las aguas residuales en la industria.

### 9.3.3 Creación de un entorno propicio para el cambio positivo

La región de África Subsahariana podrá satisfacer el enorme incremento en la demanda de agua previsto para 2030 y cumplir con el ODS 6 si comienza de inmediato a tratar de solucionar sus problemas con el agua y aprovecha las oportunidades que puede ofrecer una mejor gestión de las aguas residuales.

Esto requerirá una mejor estructura de gobernabilidad, instituciones y políticas eficaces, una infraestructura más adecuada para la recolección y el tratamiento de aguas residuales y un mejor mantenimiento de dicha infraestructura. Otros elementos fundamentales son: el incremento de la creación de capacidades humanas e institucionales para el tratamiento de aguas residuales, el control y la gestión de datos, un marco regulatorio más sólido y la supervisión del cumplimiento de las normas.

Para que la implementación de los elementos mencionados resulte exitosa es necesario contar con una sólida voluntad política. Por lo tanto, se necesita una fuerte campaña de promoción para convencer a los encargados de la formulación de políticas y

“  
**La región de África Subsahariana podrá satisfacer el enorme incremento en la demanda de agua previsto para 2030 y cumplir con el ODS 6 si comienza de inmediato a tratar de solucionar sus problemas con el agua y aprovecha las oportunidades que puede ofrecer una mejor gestión de las aguas residuales**

a los integrantes de la clase política del astronómico «costo de la inacción» en términos de desarrollo socioeconómico, calidad ambiental y salud humana.

Por último, un elemento clave es el establecimiento de mecanismos financieros adecuados. Los inversionistas pueden mostrarse reticentes a financiar proyectos de infraestructura hídrica, que exigen grandes pagos por adelantado y extensos períodos de desarrollo. Por lo tanto, es necesario explorar con los gobiernos nacionales distintas opciones para el financiamiento de la gestión de aguas residuales, como el pago de impuestos al agua/las aguas residuales, la participación del sector privado mediante la inversión en las mejores tecnologías disponibles, eficaces y de bajo costo, y las asociaciones público-privadas (ver Capítulo 15). Se debe buscar el apoyo de donantes para proyectos piloto/de demostración de modelos innovadores de negocios/suministro, así como tecnologías innovadoras probadas y eficaces en materia de costos.

#### **CUADRO 9.2 EL RECICLAJE DE AGUAS RESIDUALES EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA, SUDÁFRICA**

Sudáfrica ha sido pionera en el reciclaje y tratamiento interno de aguas residuales en la industria desde 1980. Esta práctica tiene la ventaja de reducir tanto la demanda como la cantidad de efluentes descargados.

ESKOM es la principal empresa de servicios públicos de electricidad de Sudáfrica y una de las más grandes del continente. En sus centrales térmicas interiores se utilizan grandes cantidades de agua, principalmente para refrigeración, y se producen varios litros de agua «de purga» (el agua que drena de los equipos de refrigeración). Esta agua no puede verterse sin tratamiento debido a su elevada salinidad y a la presencia de patógenos y aditivos químicos.

A comienzos de la década de 1980, ESKOM empezó a instalar plantas de ósmosis inversa para tratar el agua de purga. En la central eléctrica de Lethabo, en Sasolburg, Estado Libre, se encuentra instalada una planta de ósmosis inversa con una capacidad total de 12 millones de litros por día. Una parte de esta agua limpia regresa al sistema de refrigeración concentrada del agua y otra parte se usa como agua de alimentación para el proceso de intercambio de iones (otro proceso de desalinización). El agua del proceso de intercambio de iones tiene niveles muy bajos de sólidos disueltos totales y se reutiliza en la planta.

*Fuente : Schutte (2008).*



# CAPÍTULO 10

CESPAO | Carol Chouchani Cherfane

Con los aportes de: Ali Karnib (CESAO) y Manzoor Qadir (UNU-INWEH)

# LA REGIÓN ÁRABE



En este capítulo se aborda la generación, recolección y tratamiento de aguas residuales en la región árabe, con especial énfasis en los marcos políticos que promueven distintos usos de las aguas residuales tratadas.

## 10.1 Contexto

La región árabe es la más seca del mundo: 18 de los 22 países árabes se ubicaban por debajo del umbral de pobreza hídrica de 1.000 m<sup>3</sup> per cápita en 2014 (AQUASTAT, s.f.b). El uso de aguas residuales tratadas en forma segura se ha convertido en un medio para aumentar la disponibilidad de agua en varios Estados árabes y se ha incluido como un componente central de los planes de gestión de los recursos hídricos, tanto a nivel regional como nacional.

El acceso a instalaciones de saneamiento mejoradas se encuentra bastante extendido en la región árabe, pero las conexiones a las redes de alcantarillado y a las instalaciones de tratamiento de aguas residuales siguen siendo más limitadas. Mientras que los grandes centros urbanos suelen contar con una cobertura de red, en las áreas rurales y en los países menos adelantados de la región aún son comunes las fosas sépticas y los pozos negros (CESPAO, 2013). Los sistemas de saneamiento externos a la red, no obstante, dificultan las tareas de recolección y tratamiento de aguas residuales y reducen la capacidad de lograr una gestión sostenible de estas aguas como recurso en la mayoría de las áreas.

El Consejo Ministerial Árabe sobre los recursos hídricos (AMWC), a través de la Iniciativa MDG+, controla la supervisión y presentación de informes regionales sobre los servicios de agua, saneamiento y aguas residuales.<sup>8</sup> Los datos de MDG+ que se presentan en la Tabla 10.1 dan cuenta de que, en el año 2013, el 69% de las aguas residuales recolectadas en los estados árabes recibió un tratamiento seguro, un 46% se sometió a un tratamiento secundario y el 23%

<sup>8</sup> La Iniciativa MDG+ tiene carácter regional e intergubernamental, y compila datos de los países obtenidos por los equipos de supervisión nacional, integrados por los ministerios responsables de los servicios públicos de agua y aguas residuales y las oficinas de estadística de cada estado árabe. La iniciativa recaba información sobre el acceso al suministro de agua, el saneamiento y los servicios de tratamiento de aguas residuales en la región árabe. Los indicadores de aguas residuales medidos por la Iniciativa MDG+ establecen claramente la cantidad de aguas residuales tratadas por nivel, la cantidad de aguas residuales tratadas que ha sido utilizada y la finalidad con que se utiliza, y las tarifas que se aplican a los servicios de saneamiento. En CESPAO (2013) pueden encontrarse descripciones detalladas y métodos para calcular los indicadores de MDG+.

recibió un tratamiento terciario. Además, el 84% de las aguas residuales recolectadas en los países del Consejo de Cooperación del Golfo que tienen escasez de agua recibió un tratamiento terciario y el 44 % del volumen total de aguas residuales con tratamiento seguro se utilizó más adelante. En la región árabe se está utilizando el 23% de las aguas residuales con tratamiento seguro, sobre todo para riego y recarga de aguas subterráneas.

## 10.2 Desafíos

### 10.2.1 Servicio a poblaciones desplazadas e inundaciones

El suministro de agua, saneamiento y tratamiento de aguas residuales para los refugiados que viven en campamentos, asentamientos informales y comunidades de acogida en los Estados árabes se ha vuelto un grave problema. Jordania alberga a más de 700.000 refugiados registrados de Iraq y Siria, un 90% de los cuales no vive en campamentos (ACNUR, 2016), mientras que en el Líbano, la infraestructura hídrica tiene dificultades para abastecer al 1,5 millón de refugiados que equivale a un tercio de la población libanesa (OCAH, 2016). Los conflictos y desplazamientos internos de personas en Iraq, Libia, Palestina, Somalia y Siria también han puesto en jaque la capacidad operativa de las instalaciones de aguas residuales y han dañado las redes de alcantarillado.

La ausencia de sistemas adecuados de desagüe pluvial y de recarga artificial de aguas subterráneas con frecuencia hace que las plantas de tratamiento dejen de funcionar durante eventos de lluvias extremas, cada vez más frecuentes y de mayor intensidad debido al cambio climático. Las inundaciones han impuesto costos económicos y ambientales, y dañado infraestructuras, propiedades y áreas protegidas, como ha ocurrido en la isla Socotra en Yemen, en el golfo Pérsico y en las costas de Egipto, el Líbano y Palestina en los últimos años.

### 10.2.2 Aguas residuales industriales

La gestión de aguas residuales industriales es costosa y controversial en la región. Si bien los efluentes químicos y biológicos procedentes de la industria textil y las curtiembres en Egipto, Marruecos y otros países árabes afectan los recursos hídricos superficiales y subterráneos, el cierre de estas actividades comerciales a pequeña escala pone en riesgo los medios de subsistencia tradicionales.

## Al menos 11 de los 22 Estados árabes han aprobado leyes que permiten el uso de aguas residuales tratadas

**Tabla 10.1** Volumen de aguas residuales recolectadas, tratamiento y uso de aguas residuales (millones de m<sup>3</sup> por año), 2013

Estado	Volumen de aguas residuales recolectadas	Tratamiento primario	Tratamiento secundario	Tratamiento terciario	Volumen de aguas residuales con tratamiento seguro	Volumen de aguas residuales tratadas utilizadas	Uso de aguas residuales tratadas (% de aguas residuales con tratamiento seguro)
<b>Consejo de Cooperación del Golfo (CCG)</b>							
Arabia Saudita	1.317,2	0	580,2	736,9	1 317,1	237,1	18
Bahrein	122,8	0	0	122,8	122,8	38,1	31
Emiratos Árabes Unidos	615,7	0,3	11,7	593,6	605,3	397,2	65,6
Kuwait	n/d	0	58,0	250,3	308,3	308,3	100
Omán	26,2	0	0	26,2	26,2	20,4	78
Qatar	176,8	0	0	158,7	158,7	115,9	73
<b>Mashreq</b>							
Egipto	3.030,4	724,3	2.054,8	57,1	2.111,9	n/d	n/d
Iraq*	620,4	0	415,7	0	415,7	0	0
Jordania	130,8	0	130,8	0	130,8	113,3	87
Líbano	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d
Palestina*	61,0	0,3	45,3	0	45,3	0	0
<b>Magreb</b>							
Argelia	1.570,4	0	275,2	0	275,2	19,3	7
Libia*	291,1	0	45,8	0	45,8	14,7	32
Marruecos	144,2	38,2	0,1	6,1	6,2	n/d	n/d
Túnez	235,0	0	222,0	6,6	228,6	60,0	26
<b>Países menos adelantados (PMA)</b>							
Mauritania	0,65	0	0,65	0	0,65	0,12	18
Sudán	18,0	18,0	0	0	0	0	0
Yemen*	159,4	58,1	42,2	22,0	64,3	n/d	n/d
<b>TOTAL</b>	<b>8.520,0</b>	<b>839,2</b>	<b>3.882,5</b>	<b>1.980,3</b>	<b>5.562,8</b>	<b>1.324,4</b>	<b>23</b>

\* Los datos corresponden a 2012. n/d: No disponible.

Fuente: Compilado de LEA/CESPAO/ACWUA (2016).

A una escala más amplia, la salmuera que liberan las plantas de desalinización contiene residuos químicos que tienen efectos negativos en los ecosistemas costeros. El agua oleosa que sale a la superficie durante la extracción de petróleo contamina los sistemas acuíferos y degrada los recursos terrestres.

### 10.2.3 Integración e inversión insuficientes

Pese a las inversiones en plantas de tratamiento secundario, muchas instalaciones se encuentran sobrecargadas y producen efluentes con una calidad inferior a la esperada debido a las cambiantes presiones demográficas y al tiempo que transcurre entre el diseño y la construcción (CESPAO, 2013). Con frecuencia, en las opciones de inversión no se

consideran demasiado las condiciones climáticas calurosas y áridas que caracterizan a la región, que deben tenerse en cuenta, especialmente cuando se evalúan opciones de tratamiento aerobio y anaerobio. La capacidad técnica y los presupuestos para operar y mantener instalaciones de aguas residuales secundarias y terciarias también están desactualizados en algunos países árabes. Esto limita las oportunidades de inversión y extiende el tiempo requerido para poner las plantas en funcionamiento.

Los planes maestros relacionados con las aguas residuales pueden quedar desactualizados con rapidez en virtud de la dinámica regional (ver Cuadro 10.1). A su vez, los arreglos institucionales para la gestión de aguas residuales también pueden ser poco claros. Además,



suele haber una falta de coordinación entre los actores nacionales y municipales responsables de extender las redes de alcantarillado, los administradores de recursos hídricos y las empresas públicas de agua que operan las instalaciones de aguas residuales (ver Capítulo 3).

### 10.3 Respuestas

En 2011, el Consejo Ministerial Árabe sobre los recursos hídricos adoptó un plan de acción y una estrategia de seguridad hídrica de alcance regional con el propósito de expandir la desalinización y el uso de aguas residuales tratadas y agua de drenaje agrícola como recursos hídricos no convencionales que pueden desarrollarse para compensar el déficit hídrico en la región árabe (AMWC, 2011). Al mismo tiempo, el Consejo lanzó la Iniciativa MDG+ para supervisar e informar sobre el suministro de agua, el saneamiento y los servicios de aguas residuales en los Estados árabes, sobre la base de un conjunto de indicadores específicos para la región que analizan el agua y las aguas residuales en el contexto de entornos con escasez de agua (CESPAO, 2013).

#### 10.3.1 Marcos de políticas

Al menos 11 de los 22 Estados árabes han aprobado leyes que permiten el uso de aguas residuales tratadas. Estas leyes fueron emitidas por las instituciones nacionales responsables de la utilización y descarga de aguas residuales, como los ministerios de Medio Ambiente en Kuwait, el Líbano y Omán, de Salud en Iraq, de Agricultura en Túnez y de Vivienda en Egipto, o los institutos responsables de las normas en Jordania y Yemen (OMS, 2006b).

Jordania y Túnez abordan el tema de las aguas residuales en el contexto de sus planes y políticas nacionales vinculados al agua. En febrero de 2016, Jordania adoptó la Política de Sustitución y Reutilización del Agua, que formaliza el uso de aguas residuales tratadas como política nacional e incluye planes para fijar tarifas para la utilización de aguas residuales tratadas y aguas residuales con tratamiento mixto (MWI, 2016a). Esto se complementó con una política de gestión descentralizada de aguas residuales para brindar servicios a comunidades más pequeñas (MWI, 2016b), lo que supone un gran paso, ya que las aguas residuales tratadas representan casi el 15% de los recursos hídricos disponibles en Jordania (CESPAO, 2015).

La coordinación de los donantes y la planificación de la inversión son dos áreas que se encuentran bien desarrolladas en el sector de aguas residuales en Jordania. El Plan de Respuesta de Jordania a la crisis de Siria 2016-2018 asigna importantes recursos a la expansión de la recolección y el tratamiento de las aguas residuales en las comunidades de acogida de Jordania. También se contempló la incorporación de

#### CUADRO 10.1 ESTRATEGIA NACIONAL PARA EL SECTOR DE AGUAS RESIDUALES EN EL LÍBANO

En 2012, el Líbano tenía aproximadamente 4,3 millones de habitantes. De alrededor de 310 millones de m<sup>3</sup> de aguas residuales generados al año, se estima que 250 millones de m<sup>3</sup> procedían de fuentes domésticas y 60 millones de m<sup>3</sup> provenían de la industria (MEW, 2012).

Se estima que solo un 8% de las aguas residuales generadas en el Líbano recibe tratamiento. Alrededor del 11% de la población utiliza sistemas de aguas residuales con una gestión eficiente en las gobernaciones del Norte y el Sur del Líbano, en comparación con apenas un 7% y un 3% en el Gran Beirut y Beca, respectivamente (Karnib, 2016). La mayoría de las aguas residuales recolectadas se vierten en aguas superficiales y el Mar Mediterráneo. Las fosas sépticas *in situ* han contaminado los recursos de aguas subterráneas, como ocurrió con los manantiales de la Gruta de Jeita que proveen agua al Gran Beirut (BGR, s.f.). Los efectos nocivos de los procedimientos inadecuados de recolección, transferencia y tratamiento de aguas residuales aumentan los riesgos sanitarios y ambientales.

La Estrategia Nacional para el Sector de Aguas Residuales de 2012 tiene cinco pilares estratégicos: i) un programa de inversión integral con prioridades establecidas para la recolección, el tratamiento y la utilización de aguas residuales; ii) medidas legales, reglamentarias y de políticas para fijar y regular normas; iii) medidas institucionales para definir responsabilidades y crear capacidad para el suministro del servicio; iv) medidas financieras para viabilidad y servicios asequibles, y v) medidas para optimizar la participación de privados en el sector de aguas residuales. El costo de implementación se estimó en USD 3.100 millones para las obras previstas entre 2012 y 2020. Desafortunadamente, la puesta en marcha de la estrategia se vio interrumpida por la falta de financiamiento y la inestabilidad causada por la incertidumbre política y los continuos conflictos en la región.

medidas de eficiencia energética y contaminación atmosférica local en las plantas de tratamiento de aguas residuales, así como distintas iniciativas para garantizar la disponibilidad de instalaciones de saneamiento que tengan en cuenta las cuestiones de género en las escuelas y los establecimientos de asistencia sanitaria (MOPIC, 2016). Túnez también cuenta con un activo programa de reutilización del agua (ver Cuadro 10.2).

#### 10.3.2 Utilización del agua generada por la industria petrolera

Se han realizado distintos esfuerzos para tratar y utilizar el agua generada durante la extracción de petróleo. Omán probó el tratamiento y la utilización de aguas residuales con contenido de petróleo para riego como alternativa a la reinyección de agua en los acuíferos, con lo que se contaminan los recursos



hídricos subterráneos (JPEC, 1999). La Universidad Sultan Qaboos en Omán (Pillay *et al.*, 2010) también investigó la despetrolización del agua generada y encontró que podrían utilizarse humedales artificiales para eliminar el agua generada y tratada.

### 10.3.3 Utilización de aguas residuales tratadas para ecosistemas y recarga artificial de aguas subterráneas

La inversión de Arabia Saudita en un sistema ecológico de tratamiento de aguas residuales en los alrededores de Riad resultó en la construcción de los humedales de Wadi Hanifa a partir del redireccionamiento del drenaje y aguas residuales con tratamiento. La iniciativa recibió el Premio Aga Khan a la Arquitectura (Aga Khan Award for Architecture) por el diseño de los nuevos espacios recreativos y el resurgimiento de la biodiversidad en la zona (AKDN, n/d).

También se están aplicando sistemas externos a la red inspirados en lecciones aprendidas de ecosistemas naturales. En el Líbano, la institución encargada del río Litani (Litani River Authority) probó con éxito un humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales. Entretanto, en varias comunidades montañosas del Líbano, a las que no se puede acceder mediante redes de alcantarillado, se están adoptando estrategias descentralizadas similares, basadas en la naturaleza, para el tratamiento de aguas residuales (Difaf, 2016).

Las aguas residuales tratadas en la actualidad también se utilizan para respaldar la recarga artificial de aguas subterráneas y el almacenamiento de agua en la región árabe, que tiene escasos recursos hídricos. En Bahrein, el 7% de las aguas residuales tratadas se utiliza para recarga de aguas subterráneas (LEA/CESPAO/ACWUA, 2015). A su vez, algunos Estados árabes están redireccionando las aguas pluviales y las aguas residuales tratadas hacia acuíferos como forma de controlar los eventos de lluvias extremas y aumentar las reservas hídricas, como hizo Egipto en la costa del Mar Rojo.

### 10.3.4 Generación de energía con aguas residuales

El biogás recuperado a partir del tratamiento de aguas residuales mediante la digestión anaeróbica permite producir energía (ver Sección 16.2.2). El biogás recuperado en la región se utiliza para la generación *in situ* de calor y electricidad, e incluso podría usarse para la producción de energía *ex situ*. La planta de tratamiento de aguas residuales de As-Samra, la más grande de Jordania, brinda servicio a 2,27 millones de personas y alcanza un 80% de autonomía energética mediante un generador que funciona con biogás y cuenta con el respaldo de un

## CUADRO 10.2 REUTILIZACIÓN DEL AGUA EN TÚNEZ

La reutilización del agua ha sido una prioridad en Túnez desde comienzos de la década de 1980, cuando el país lanzó un programa de reutilización del agua de alcance nacional para aumentar los recursos hídricos utilizables. La mayoría de las aguas residuales municipales reciben tratamiento biológico secundario mediante lodos residuales activados (también hay algún tipo de tratamiento terciario, aunque limitado).

Se ha prestado considerable atención a las restricciones a la utilización de las aguas residuales tratadas para proteger la salud pública, y estas se ajustan a las recomendaciones de la OMS (OMS, 2006b). Las normas de Túnez permiten usar efluentes con tratamiento secundario en todos los cultivos, excepto las verduras, ya sea que se coman crudas o cocidas. Los departamentos de agricultura regionales supervisan la utilización de aguas residuales con tratamiento seguro y les cobran a los agricultores. Los agricultores tunecinos pagan el agua para riego en virtud del volumen de agua requerido y el área a regar.

Pese al fuerte apoyo del gobierno a la utilización de aguas residuales tratadas, los agricultores aún prefieren regar con aguas subterráneas debido a la aprobación social, a las disposiciones relacionadas con las opciones de cultivos y a otras consideraciones agronómicas. Los agricultores de las áridas tierras del sur también se han mostrado preocupados por los efectos a largo plazo de las aguas residuales salinas en los suelos y la productividad de los cultivos. Además, los agricultores ven a las restricciones sanitarias como un impedimento para plantar cultivos de alto valor, como las verduras. Para enfrentar estos problemas, los encargados de la formulación de políticas en Túnez han tratado de mejorar la coordinación y han buscado adoptar enfoques basados en la demanda para mejorar la planificación de la recuperación de aguas residuales y los proyectos de riego con efluentes tratados en forma segura (Qadir *et al.*, 2010).

*Aporte de Manzoor Qadir (UNU-INWEH).*

digestor anaerobio de lodos (CESPAO, 2015). La instalación de tratamiento de aguas residuales Gabal El Asfar en la ribera este del Nilo, en El Cairo, tiene una capacidad de procesamiento de más de 1,4 millones de m<sup>3</sup> por día e incluye una planta de cogeneración, alimentada mediante digestión anaeróbica de lodos, que produce hasta un 65% de la energía necesaria para poner en funcionamiento la instalación (Badr, 2016).

Los digestores modulares de biogás también se están considerando para la generación y el suministro de energía a los campamentos de refugiados y los asentamientos informales en el Mashreq. No obstante, antes de aplicar cualquiera de estos métodos más allá de la fase piloto, es necesario promover la sensibilización en el contexto cultural local.

# CAPÍTULO 11

CESPAP | Aida N. Karazhanova y Donovan Storey, con los aportes de Jayakumar Ramasamy, Ram S. Tiwaree y Stefanos Fotiou

# ASIA Y PACÍFICO



*En este capítulo se describe cómo cada vez más se reconoce a las aguas residuales como un posible recurso para distintos sectores en toda la región de Asia y el Pacífico, con beneficios secundarios que van desde la resiliencia climática hasta la recuperación de subproductos.*

## 11.1 Contexto y desafíos

En la región de Asia y el Pacífico, los sectores clave compiten cada vez más por los limitados recursos de agua dulce, al tiempo que entre un 80% y un 90% de todas las aguas residuales generadas en la región se vierten sin tratamiento y contaminan recursos de aguas subterráneas y superficiales, así como ecosistemas costeros (CESPAP, 2010) (ver Tabla 11.1). Para satisfacer la futura demanda de agua en la región y reducir la contaminación es necesario utilizar el agua de manera más eficiente y mejorar la generación y vertido de aguas residuales mediante soluciones técnicas y de gestión innovadoras.

La población urbana de la región se duplicó con creces entre 1950 y 2000 (CESPAP/ONU-Hábitat, 2015), lo que generó una enorme demanda de sistemas de tratamiento de aguas residuales nuevos y mejorados. Otro desafío relacionado con la gestión de aguas residuales en las zonas urbanas se vincula con las disparidades socioeconómicas. En general, los barrios marginales están subatendidos (ver Sección 5.3), mientras que los barrios más ricos tienen un mejor acceso a servicios e infraestructura de gestión de aguas residuales. Hacia 2009, el 30% de la población urbana de la región vivía en barrios marginales y más de la mitad de los residentes rurales no tenía acceso a instalaciones de saneamiento mejoradas (frente al 25% de los residentes en zonas urbanas) (CESPAP, 2014).

Para cerrar las brechas que existen entre la demanda de agua y la oferta disponible, la región debe actualizarse e implementar marcos de políticas integrales (incluso mediante consultas públicas) que faciliten las economías circulares y las iniciativas de crecimiento ecológico. En China, Japón y la República de Corea se han adoptado de manera generalizada tecnologías que mejoran la eficacia del uso del agua. En estos países, la gestión de aguas residuales y la reutilización del agua se han convertido en parte integral del ciclo de gestión del agua, incluso a través de paquetes de estímulo económico para evitar el vertido de aguas residuales y la contaminación.

Estas prácticas también van acompañadas de políticas financieras facilitadoras que ayudan a crear mercados para los subproductos de las aguas residuales (incluso aquellos vinculados con

los estudios de caso de saneamiento ecológico [EcoSan] en India y Nepal) que, a su vez, pueden tener un impacto positivo en el acceso a los servicios de saneamiento (CESPAP, 2013). El esquema NEWater de Singapur (ver Figura 11.1) es posible gracias a un innovador paquete de políticas para la gestión del agua, que fue adaptado a las condiciones geográficas, sociales, políticas y económicas específicas del país (ver Cuadro 16.9).

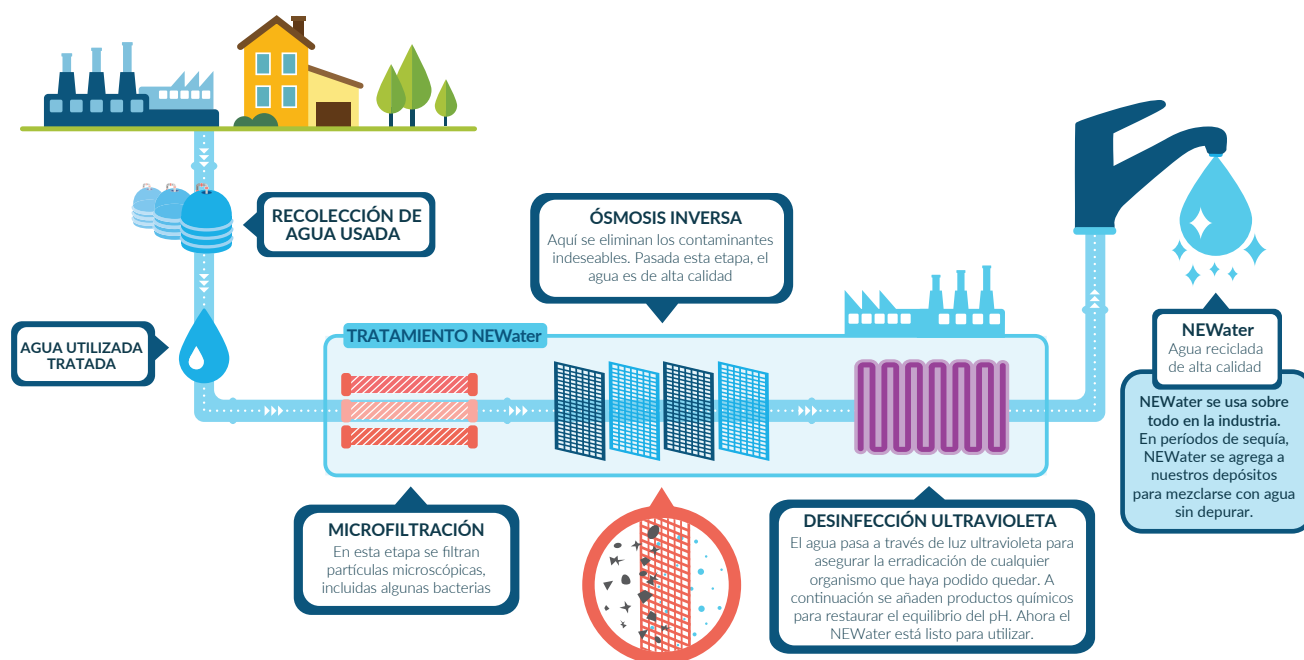
Cada vez es más habitual dejar de ver a las aguas residuales como un «subproducto desagradable» del ciclo antropogénico del agua y reconocer su potencial como recurso para distintos sectores. No obstante, la mayoría de las aguas residuales todavía se vierten sin ningún tipo de tratamiento (ver Tabla 11.1). Por ejemplo, la proporción de aguas residuales vertidas sin tratamiento se ha estimado en un 77% en el caso de Tailandia (2012), un 82% en Pakistán (2011), un 84% en Armenia (2011) y un 81% en Vietnam (2012) (CESPAP, 2015a). Mejorar la eficacia en la gestión de las aguas residuales ayudaría a cumplir con la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible en la región.

## 11.2 La creación de infraestructuras resilientes

Los desastres naturales, un 90% de los cuales se relaciona con el agua, son cada vez más frecuentes y de mayor intensidad debido al cambio climático (CESPAP, 2015b). Es necesario prestar más atención a la mejora de la resiliencia de la infraestructura física de las aguas residuales (como drenajes y tuberías) y de los sistemas de desagüe que pueden captar la escorrentía en caso de inundaciones y tormentas. Durante las inundaciones, que en 2011 causaron un daño total estimado de USD 61.000 millones en la región (BAsD, 2013), es habitual que los efluentes del alcantarillado se mezclen con aguas pluviales ya contaminadas, lo que genera una crisis de saneamiento y aumenta el riesgo de enfermedades transmitidas por el agua. En los casos en que la escorrentía urbana es una importante causa de inundaciones y contaminación, como ocurre en la mayoría de las ciudades de la región, se impone la necesidad de una nueva e innovadora planificación urbana que incluya una infraestructura hídrica resiliente al clima, que puede basarse en sistemas de captación y recolección de agua debidamente descentralizados (CESPAP, 2015a) (ver Sección 15.5).



**Figura 11.1** Esquema técnico general de NEWater en Singapur



Fuente: Cortesía de la Agencia Nacional del Agua de Singapur (PUB).

**Tabla 11.1** Países con el nivel más bajo de tratamiento de aguas residuales en la región de Asia y el Pacífico

País	Aguas residuales tratadas (%)	País	Aguas residuales tratadas (%)
Vietnam	19	Vanuatu	0
Bangladesh	17	Tuvalu	0
Papúa Nueva Guinea	15*	Timor-Leste	0
Tayikistán	12	Niue	0
Nepal	12	Nauru	0
Myanmar	10*	Islas Marshall	0
Bhután	10*	Maldivas	0
Camboya	9	Kiribati	0
República Democrática Popular Lao	6	Islas Cook	0
Samoa	5*	Afganistán	0

\*Estimado.

Nota: El porcentaje de aguas residuales tratadas depende mucho de las condiciones en las ciudades más grandes de los países, donde el porcentaje suele ser superior, y no es un indicador muy confiable de las condiciones en los centros urbanos más pequeños de las ciudades y las áreas rurales, para los que a menudo no hay datos.

Fuente: Adaptado de BASD (2013, Apéndice 4, p. 100).



Hay grandes oportunidades para que las comunidades incorporen infraestructura de mitigación de riesgos en los proyectos de construcción, tanto en los nuevos como en los que ya están en marcha, para enfrentar estos problemas. Entre otras cosas, la infraestructura de mitigación de riesgos puede incluir: techos verdes, como en Hong Kong, China (Urbis Limited, 2007); áreas verdes urbanas restauradas, humedales y estanques de estabilización de desechos en Calcuta (un humedal de diseño mitad natural y mitad artificial); edificios con eficiencia hídrica en la República de Corea; agricultura vertical, que está produciendo grandes cantidades de plantas y verduras en el interior de edificios de varios pisos en Australia, China, Japón y Nueva Zelanda (Despommier, 2011); sistemas de captación de agua de lluvia, en Kiribati; y cinturones de manglares en Sri Lanka, Tailandia y los Estados insulares del Pacífico. Según un estudio, los techos verdes pueden retener entre un 60% y un 100% de las aguas pluviales que reciben, dependiendo de la profundidad del sustrato y de la cantidad e intensidad de las precipitaciones recibidas (Thomson *et al.*, 1998).

### 11.3 Un abordaje sistémico para la recuperación de los subproductos de las aguas residuales

Los subproductos de las aguas residuales como las sales, nitrógeno y fósforo, tienen valor económico potencial que puede utilizarse para mejorar los medios de subsistencia en la región. Ante la falta de infraestructura centralizada, los hogares que supervisan sus propias instalaciones de saneamiento pueden dejar de depender de la energía al utilizar sus propios desechos, con lo que se reducen los gastos de combustible, así como los riesgos sanitarios y los efectos ambientales. La recolección de fósforo de la orina mediante el uso de inodoros con separador de orina, como se hace en Australia, China y Japón, también reduce la carga de nutrientes de los efluentes de aguas residuales y tiene un enorme potencial para aplicarse a mayor escala en la región (CESPAP/ONU-Hábitat/AIT, 2015). La biomasa (lodos fecales) puede utilizarse de manera más amplia como fertilizante en la agricultura, como históricamente se ha hecho en países de Asia Central, o puede convertirse en combustible para cocinar o calefaccionar con reactores de biogás, como en las zonas rurales de Camboya, China, Tailandia, Vietnam y el Pacífico (CESPAP/ONU-Hábitat/AIT, 2015), con lo que se reduce la contaminación del agua (Schuster-Wallace *et al.*, 2015). Los análisis de algunos estudios de caso realizados en Asia Sudoriental han revelado que los ingresos procedentes de los subproductos de aguas residuales, como los fertilizantes, son notoriamente mayores que los costos operativos de los sistemas de

Hacia 2009, el 30% de la población urbana de la región vivía en barrios marginales y más de la mitad de los residentes rurales no tenía acceso a instalaciones de saneamiento mejoradas, frente al 25% de los residentes en áreas urbanas

aguas residuales que recolectan los subproductos, lo que demuestra que la recuperación de recursos de las aguas residuales es un modelo de negocios viable y que genera ingresos para las prácticas sostenibles y el desarrollo económico (CESPAP/ONU-Hábitat/AIT, 2015).

### 11.4 Necesidades en materia de reglamentación y capacidades

Las disposiciones respecto a la contaminación de fuente puntual (como los contaminantes industriales) en las ciudades pueden ayudar a reducir los efectos nocivos de las aguas residuales urbanas en la región de Asia y el Pacífico. Con frecuencia, las ciudades dependen de instalaciones de tratamiento de aguas residuales centralizadas, cuyo establecimiento y mantenimiento resulta costoso, y no pueden satisfacer las necesidades inmediatas de las poblaciones urbanas, especialmente de las que viven en condiciones de pobreza. En relación con esto, cada vez se están utilizando más los sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales (DEWATS, por sus siglas en inglés) (CESPAP/ONU-Hábitat/AIT, 2015), tanto en zonas rurales como urbanas, con muchos beneficios (ver Sección 15.4).

Para una gestión más eficaz y eficiente de aguas residuales en la región es necesario el apoyo de distintas instituciones, incluido un mayor respaldo de las autoridades locales (GWOPA/ONU-Hábitat/ICLEI/WWF7/UCLG/WWC/DGI, 2015). Es habitual que las municipalidades y los gobiernos locales no cuenten con los recursos humanos y económicos necesarios para hacer cumplir las disposiciones ambientales y mejorar y mantener la infraestructura y los servicios hídricos. Como consecuencia, los problemas de mantenimiento son frecuentes y generalizados, y se ven exacerbados por deficiencias en el financiamiento y la recaudación de ingresos (CESPAP, 2015a). Se necesita trabajar aún más en toda la región para respaldar a los gobiernos municipales y locales en la gestión de aguas residuales urbanas y la captación de los beneficios de este recurso con miras al cumplimiento de las metas de los ODS (en particular el ODS 6 sobre agua y saneamiento y el ODS 11 sobre ciudades inclusivas y sostenibles).

# CAPÍTULO 12

CEPE | Annukka Lipponen

Con los aportes de: Grupo de Trabajo sobre el Agua del Equipo de Tareas del Programa de Acción GREEN, Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos y Agencia Europea de Medio Ambiente

# EUROPA > AMÉRICA DEL NORTE

Alcantarilla de 2.000 años - Cloaca Maxima en Roma (Italia)



*En este capítulo se abordan las respuestas a los desafíos que implica la gestión de aguas residuales en Europa y América del Norte, con especial énfasis en los instrumentos jurídicos regionales.*

Se destacan algunos adelantos relevantes en la región de la CEPE (que abarca la Unión Europea, los Balcanes, Europa Oriental, el Cáucaso, Asia Central y América del Norte) vinculados a las aguas residuales y se describen los desafíos, así como también algunas respuestas prometedoras. Cada subregión enfrenta distintos desafíos (ver Tabla 12.1).

## 12.1 Contexto

En general, el nivel de acceso a saneamiento en la región es relativamente alto, incluso en el Cáucaso y Asia Central, dos subregiones que alcanzaron la meta de los ODM relacionada con el saneamiento, ya que el acceso a instalaciones de saneamiento mejoradas llega al 95% (UNICEF/OMS, 2015). No obstante, el desarrollo de servicios de saneamiento y el tratamiento de aguas residuales en la región son desiguales, como queda demostrado en la cuenca del Danubio (Michaud *et al.*, 2015).

El tratamiento de aguas residuales en la región ha mejorado en los últimos 15 a 20 años. En la Figura 12.1 se muestra el porcentaje de la población que se encuentra conectada a un sistema de recolección y tratamiento de aguas residuales en distintas subregiones de Europa. Si bien el tratamiento terciario se ha ido incrementando en forma gradual, en Europa Sudoriental y el resto de la región paneuropea oriental aún se recolectan y descargan grandes volúmenes de aguas residuales sin tratamiento.

## 12.2 Desafíos

Amplias zonas de la región de la CEPE se encuentran cubiertas por sistemas de suministro de agua y saneamiento, pero los cambios económicos y demográficos llevaron a que algunos de los grandes sistemas centralizados hayan perdido su eficacia, lo que queda claro al observar muchos de los sistemas voluminosos y mal adaptados que subsisten en partes de la ex Unión Soviética. La baja eficacia de los sistemas hídricos, caracterizada por el uso excesivo de recursos y la falta de incentivos para utilizar el agua con eficacia, es un gran problema en Europa Oriental, el Cáucaso y Asia Central (CEPE/OCDE, 2014), donde grandes

volúmenes del agua suministrada se convierten en aguas residuales y es muy habitual que solo se realice un tratamiento primario. Las tarifas de suministro de agua y saneamiento suelen ser demasiado bajas para cubrir los costos de operación y mantenimiento de los servicios (OCDE, 2011a). Esto plantea importantes problemas para satisfacer las necesidades de inversión en infraestructura y reduce los incentivos para alcanzar niveles de utilización razonables, al tiempo que genera inquietudes respecto a la sostenibilidad (ver Cuadro 12.1).

Debido a los cambios demográficos y económicos, las aspiraciones de políticas más amplias en cuanto a la eficacia de los recursos (AEMA, 2016) y los nuevos conocimientos acerca de los riesgos y las consideraciones de equidad (por ejemplo, zonas urbanas frente a zonas rurales, minorías, etc.) (CEPE/OMS, 2013), ha quedado claro que es necesario revisar la infraestructura de saneamiento y aguas residuales en la región con el fin de asegurar la adecuación de los servicios así como el nivel y los medios de tratamiento adecuados. La necesidad de reutilizar el agua se vuelve cada vez más imperiosa, especialmente en las zonas propensas a la escasez de este recurso. Tanto en Estados Unidos como en la Unión Europea se registra un incremento de las inversiones en tecnologías de tratamiento y control (ver Cuadro 12.2).

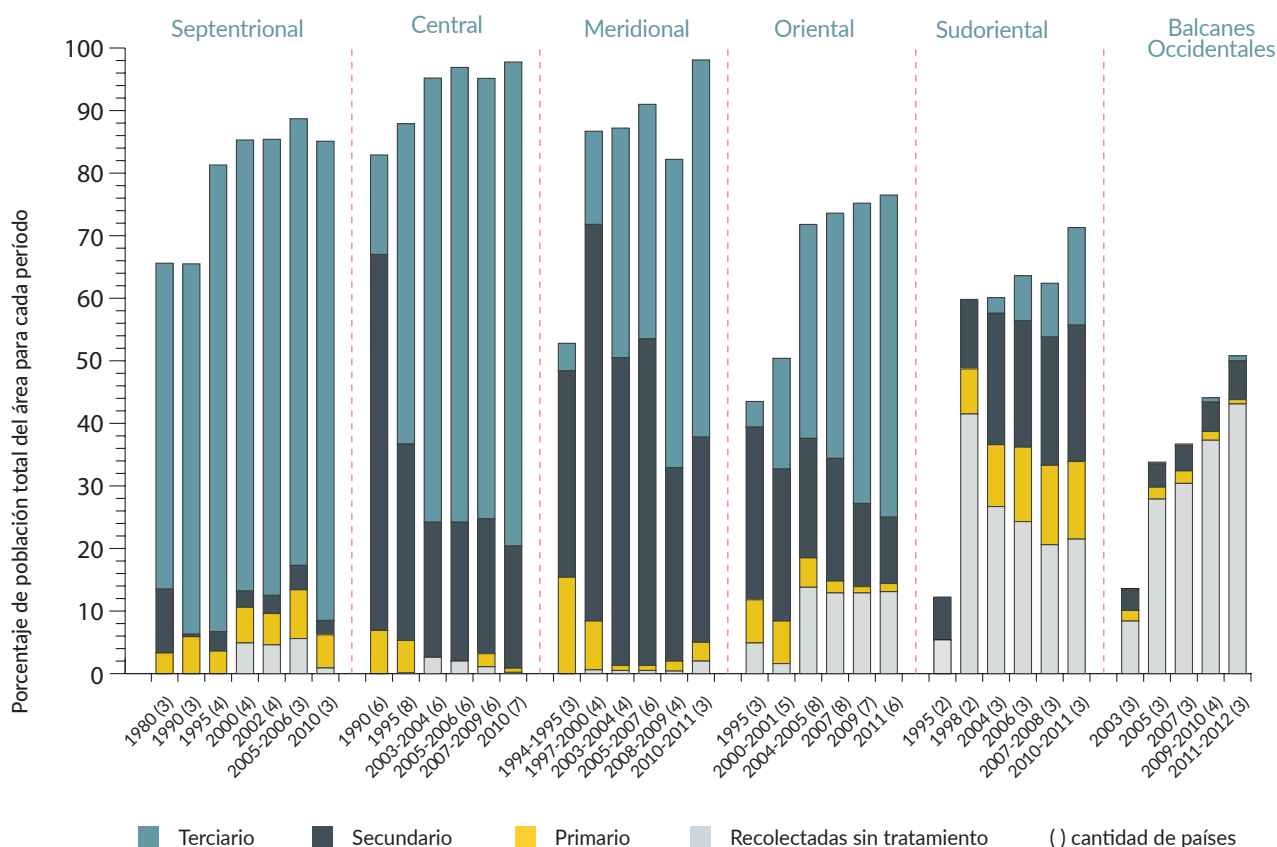
Debido a que el uso indirecto de las aguas residuales tratadas con frecuencia ocurre aguas abajo de los sitios de descarga, el desempeño y la adecuación de los sistemas tradicionales de tratamiento de aguas residuales se ha puesto en tela de juicio en la región de la CEPE. Desde comienzos de la década de 2000 se han reconocido nuevos riesgos relacionados con contaminantes emergentes (ver Cuadro 4.1), incluidos microcontaminantes (Bolong *et al.*, 2009). Entre estos se destacan los disruptores endocrinos químicos, que pueden tener efectos negativos en seres humanos, animales y ecosistemas. Los estudios nacionales han dado cuenta de la necesidad de contar con análisis más sistemáticos de su ocurrencia, transporte y efectos a fin de diseñar evaluaciones de riesgo y acciones de respuesta bien fundamentadas desde el punto de vista científico (Trachsel, 2008; MIE/PWA, 2016).



**Tabla 12.1** Problemas y respuestas de gestión seleccionados en subregiones de la región de la CEPE (lista no exhaustiva)

	América del Norte	Unión Europea	Europa Sudoriental y Europa Oriental	Cáucaso y Asia Central
<b>Problema(s)</b>	Escasez de agua	Asegurar la eliminación eficaz de contaminantes emergentes	Cumplir con normas regionales de tratamiento de aguas residuales	Atender la contaminación causada por las descargas de aguas residuales; extender la cobertura del tratamiento de aguas residuales
<b>Respuesta(s)</b>	Reutilización de aguas residuales	Mejores técnicas/ tecnologías disponibles; uso de soluciones ecológicas	Avance con instrumentos jurídicos regionales	Extensión y actualización de la infraestructura a niveles de tratamiento más avanzados

**Figura 12.1** Cambios en el tratamiento de aguas residuales en las regiones de Europa entre 1980 y 2012



\*Plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas. Nota:

Esta cifra representa el porcentaje de la población por región europea conectada a sistemas de recolección y tratamiento de aguas residuales (plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas) en el período 1980-2012. Además, se presenta un desglose por tipo de tratamiento. Los números entre paréntesis indican la cantidad de países en los grupos.

Fuente: AEMA (2013, basado en datos de Eurostat).



## **CUADRO 12.1 GESTIÓN DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES -DESARROLLO Y RESTAURACIÓN DE INFRAESTRUCTURA: TENDENCIAS RECIENTES EN PAÍSES DE EUROPA ORIENTAL, EL CÁUCASO Y ASIA CENTRAL**

Los sistemas centralizados de recolección de aguas residuales urbanas brindan servicio a una proporción relativamente alta de la población de Europa Oriental, el Cáucaso y Asia Central. La cobertura es mucho más baja en las zonas rurales, pero algunos países de la región lograron notables avances en la década de 1980. En ese período, por ejemplo, Moldova construyó alrededor de 650 plantas de tratamiento de aguas residuales en asentamientos rurales.

En los años noventa, muchos sistemas de saneamiento de la región se deterioraron debido a la descentralización de los servicios de infraestructura social hacia gobiernos locales con escasa capacidad fiscal. Por ejemplo, mientras que en Armenia el presupuesto total de todos los gobiernos locales equivalía a tan solo el 2% del presupuesto nacional, una aldea de Moldova tenía un presupuesto anual equivalente a EUR 10.000 para financiar todos los servicios de infraestructura, desde escuelas y calles hasta el suministro de agua y saneamiento (OCDE, 2011a; 2013a).

Al mismo tiempo, los servicios de suministro de agua y saneamiento en la región también se vieron afectados por la baja eficacia (sistemas voluminosos con altos costos unitarios), las reglamentaciones económicas y políticas tarifarias inadecuadas y la falta de modelos de negocios sostenibles para la operación, mantenimiento y financiamiento de sistemas de suministro de agua y saneamiento, sobre todo en pequeñas ciudades y áreas rurales. Estos problemas que enfrentan los operadores de los servicios de suministro de agua y saneamiento se agravaron con la drástica reducción y las crecientes disparidades de los ingresos de los hogares, que hicieron que muchos de ellos tuvieran problemas de asequibilidad económica. Los problemas fueron especialmente graves en las pequeñas aldeas remotas (con menos de 500 habitantes), donde los ingresos de los hogares eran más bajos y los costos unitarios de los servicios de suministro de agua y saneamiento eran de dos a tres veces superiores que en los grandes asentamientos.

Desde el año 2000, no obstante, la tendencia ha mejorado notoriamente en la mayoría de los países de Europa Oriental, el Cáucaso y Asia Central, al menos en las zonas urbanas (OCDE, 2011a), con frecuencia con el apoyo de socios para el desarrollo. En la actualidad, los países de esta región prestan más atención a la mejora del saneamiento rural. El progreso en estos países se ha vinculado a la revisión de normas técnicas desactualizadas para ajustar la capacidad de nuevos sistemas de suministro de agua y saneamiento a la demanda actual y proyectada de servicios (OCDE, 2012) y a la introducción de modelos de negocios sostenibles para los operadores de los sistemas de suministro de agua y saneamiento, incluida la «regionalización» de empresas públicas de agua municipales, organizaciones comunitarias y operadores privados (OCDE, 2013a; 2016).

*Con los aportes del Grupo de Trabajo sobre el Agua del Equipo de Tareas del Programa de Acción GREEN, OCDE.*

**Ha quedado claro que es necesario revisar la infraestructura de saneamiento y aguas residuales en la región con el fin de asegurar la adecuación de los servicios, así como el nivel y los medios de tratamiento adecuados**

## **12.3 Respuestas**

Algunos instrumentos jurídicos regionales han contribuido a la mejora general del acceso al saneamiento y han reducido el impacto de las descargas de aguas residuales; entre ellos se destacan la Directiva sobre el Tratamiento de las Aguas Residuales Urbanas de la Unión Europea (ver Cuadro 12.3) y el Protocolo sobre el agua y la salud de CEPE/OMS (CEPE/OMS, 2016) (ver Cuadro 12.4). En algunos instrumentos jurídicos de la región se contempla el progreso técnico. El concepto de «mejores técnicas disponibles», como se define en la legislación ambiental de la Unión Europea en relación con la contaminación industrial, también hace referencia a los métodos de gestión y los impactos ambientales. En el sector de los productos químicos, las mejores técnicas disponibles se usan como parte de una estrategia integral de gestión de aguas residuales, aplicando una combinación de técnicas y dando prioridad a aquellas orientadas a prevenir o reducir la generación de contaminantes hídricos y a recuperar contaminantes en la fuente. En este contexto, las mejores técnicas disponibles difieren de las «mejores tecnologías disponibles» en virtud de las cuales las Partes en el Convenio sobre la Protección y Utilización de los Cursos de Agua Transfronterizos y de los Lagos Internacionales (Convenio del Agua; ver Sección 3.2.1) (CEPE, 1992, entrada en vigor en 1996) están obligadas a fijar límites de vertido para las aguas residuales, lo que constituye una serie de requisitos que consideran aspectos técnicos (así como la disponibilidad) y también la accesibilidad financiera (CEPE, 2013).

## CUADRO 12.2 OPTIMIZACIÓN DEL POTENCIAL DE REUTILIZACIÓN: CONTROL DE CALIDAD DE LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS Y ANÁLISIS DEL SANEAMIENTO ECOLÓGICO EN EUROPA Y AMÉRICA DEL NORTE

Las aguas residuales tratadas encierran un gran potencial para aumentar el suministro de agua, incluso de agua potable, y Estados Unidos reutiliza enormes volúmenes de agua. Al permitir la detección de contaminantes químicos y biológicos, la tecnología analítica moderna y las barreras múltiples proporcionan los elementos de control necesarios para garantizar la reutilización segura del agua (Water Science and Technology Board, 2012). La instalación de Big Spring, en Texas, es un caso pionero de reutilización potable directa (RPD) en Estados Unidos, ya que utiliza microfiltración, ósmosis inversa y desinfección ultravioleta. Las aguas residuales tratadas se mezclan con agua sin depurar y se brinda servicio a unas 250.000 personas (Water Online, 2014; Woodall, 2015).

Las aguas residuales tratadas encierran un gran potencial para aumentar el suministro de agua, incluso de agua potable, y Estados Unidos reutiliza enormes volúmenes de agua. Al permitir la detección de contaminantes químicos y biológicos, la tecnología analítica moderna y los controles múltiples proporcionan los elementos de control necesarios para garantizar la reutilización segura del agua (Water Science and Technology Board, 2012). La instalación de Big Spring, en Texas, es un caso pionero de reutilización potable directa (RPD) en Estados Unidos, ya que utiliza microfiltración, ósmosis inversa y desinfección ultravioleta. Las aguas residuales tratadas se mezclan con agua sin depurar y se brinda servicio a unas 250.000 personas (Water Online, 2014; Woodall, 2015).

En principio, la separación de la orina en la fuente y la recuperación de las heces para fertilizantes podrían ofrecer oportunidades tanto para los hogares como para los emprendedores rurales, y el tratamiento reducido de aguas residuales podría, por ejemplo, acarrear beneficios en el ahorro de energía. Las interpretaciones sobre el uso de orina y heces humanas varían muchísimo (incluso dentro de la Unión Europea) y van desde seguir las mismas pautas que para el estiércol de los animales hasta prohibir decididamente la práctica.

Si bien puede estar permitido el uso de compost proveniente de inodoros secos y de orina separada en la fuente en jardines privados, su utilización en cultivos comerciales habitualmente está prohibida (O'Neill, 2015). En virtud de la voluntad de establecer procesos ecológicos de circuito cerrado, se han implementado saneamientos ecológicos mediante el uso de inodoros de compostaje y sistemas de humedales artificiales para el tratamiento de aguas grises en asentamientos ecológicos (como el de Allermöhe-East Hamburg, Alemania) y con ello se redujo el uso de agua y energía por parte de los residentes (Von Muench, 2009). La materialización efectiva de la reutilización de los productos del saneamiento y el uso seguro de los fertilizantes que contienen requieren que las leyes y las políticas ofrezcan un marco de apoyo, que los riesgos sanitarios asociados estén controlados, que se resuelvan los problemas logísticos relacionados (como en el caso de la recolección de orina, que posteriormente adquirirá una forma sólida) y que se logre la aceptación cultural (O'Neill, 2015)<sup>9</sup>.

<sup>9</sup> La autora agradece los aportes de: Sharon Megdal y Susanna Eden (Water Resources Research Center, Universidad de Arizona) sobre la utilización de aguas residuales y de Sari Huuhtanen (Global Dry Toilet Association, Finlandia) sobre saneamiento ecológico.

### CUADRO 12.3 DIRECTIVA SOBRE EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES URBANAS DE LA UNIÓN EUROPEA

La Directiva sobre el Tratamiento de las Aguas Residuales Urbanas de la Unión Europea (Unión Europea, 1991), que se complementa con los otros instrumentos de control de la contaminación y protección del medio ambiente de la Unión Europea, es una importante herramienta jurídica que ha contribuido al progreso que se observa en la Figura 12.1.

Esta Directiva, adoptada en 1991, se refiere a la recolección, descarga y tratamiento de aguas residuales urbanas. Su principal objetivo es la protección de las aguas superficiales de los efectos adversos de las descargas de aguas residuales. Esto se logra mediante la exigencia de recolección y tratamiento de aguas residuales en todos los asentamientos (conglomerados) con más de 2.000 habitantes equivalentes (h.e.).<sup>10</sup> La Directiva sobre el Tratamiento de las Aguas Residuales Urbanas dispone el tratamiento biológico de aguas residuales (tratamiento secundario) en conglomerados con más de 10.000 h.e. o incluso más pequeños. En las cuencas con aguas particularmente sensibles (que cubren casi el 75% del territorio de la Unión Europea), como las que sufren de eutrofización, puede ser necesario realizar un tratamiento terciario de las aguas residuales. En la Directiva se establece un programa de implementación gradual que requiere primero el cumplimiento por parte de los sistemas en los conglomerados más grandes (que posiblemente tengan un mayor impacto).

En virtud de los datos presentados por 28 Estados Miembros de la Unión Europea, que abarcan más de 19.000 conglomerados con más de 2.000 h.e. y generan una contaminación correspondiente a 495 millones de h.e., la Comisión Europea ubicó la tasa de cumplimiento global en un 88%. Se prevé una inversión adicional de EUR 22.000 millones, que permitirá que los Estados Miembros de la Unión Europea implementen esta Directiva por completo. Además de la inversión, uno de los principales problemas de la implementación es la planificación a largo plazo (CE, 2016b). En los casos en que la implementación de la mencionada Directiva se encuentra muy avanzada y se utilizan sistemas de alcantarillado combinado, el desbordamiento de las aguas pluviales puede cobrar más importancia como fuente de contaminación difusa. Por lo tanto, reducir ese desbordamiento es fundamental para mejorar los índices de cumplimiento (Milieu, 2016). Si bien el cumplimiento es un desafío, en especial para los países de reciente acceso, también es una oportunidad para mejorar (Michaud *et al.*, 2015).

*Aporte de la AEMA.*

<sup>10</sup> Habitante equivalente (h.e.) es la unidad que se utiliza para cuantificar la carga de contaminación en virtud de la Directiva sobre el Tratamiento de las Aguas Residuales Urbanas. Un h.e. corresponde a la carga orgánica con una demanda bioquímica de oxígeno de cinco días (DBO5), de 60 gramos de oxígeno por día (Umweltbundesamt GmbH, 2015).

### CUADRO 12.4 ESTABLECIMIENTO DE METAS A NIVEL NACIONAL EN VIRTUD DEL PROTOCOLO SOBRE EL AGUA Y LA SALUD DE LA CEPE-OMS/EUROPA: ABORDAJE DEL PROBLEMA DE LAS AGUAS RESIDUALES

El Protocolo sobre el agua y la salud del Convenio del Agua de la CEPE es un instrumento jurídico vinculante que exige que las Partes fijen metas nacionales y locales que cubran todo el ciclo del agua, incluido el saneamiento. El objetivo es proteger la salud y el bienestar de los seres humanos mediante una mejor gestión del agua, que incluye la protección de los ecosistemas hídricos y, mediante la prevención, el control y la reducción de enfermedades relacionadas con el agua. El programa de trabajo del Protocolo para el período 2017-2019 establece el objetivo de fortalecer las capacidades de los países y ampliar las estrategias de gestión basadas en los riesgos en lo que respecta al suministro de agua y al saneamiento. El enfoque de rendición de cuentas y planificación intersectorial del Protocolo ofrece un marco práctico para traducir las acciones en metas nacionales específicas a fin de alcanzar el ambicioso ODS 6, especialmente la Meta 6.3 de reducir a la mitad del porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentar sustancialmente el reciclado y la reutilización del agua en condiciones de seguridad.

*Fuentes: CEPE/OMS (2016).*

*Con los aportes de Nataliya Nikiforova (CEPE) y Oliver Schmoll (Oficina Regional de la OMS para Europa)*

# CAPÍTULO 13

CEPAL | Andrei Jouravlev

**Con los aportes de:** Caridad Canales (CESPAP), Eduardo Antonio Ríos-Villamizar, Emilio Lentini, Gustavo Ferro, Ivanildo Hespanhol, Jaime Llosa, Julio Sueros y Miguel Doria (Oficina de la UNESCO en Montevideo) y Miguel Solanes y Shreya Kumra (CEPAL)

# AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE





*Este capítulo describe los desafíos asociados al reciente crecimiento de la gestión de aguas residuales en las ciudades en rápido crecimiento de América Latina y el Caribe, y destaca los beneficios del tratamiento de aguas residuales urbanas y las lecciones aprendidas en el proceso.*

La región de América y el Caribe es predominantemente húmeda con importantes recursos hídricos, si bien también tiene zonas sumamente áridas. La actividad agrícola es la principal usuaria de agua, a la que se destina el 70% de las extracciones, mientras que los insumos domésticos y la industria representan respectivamente el 17% y 13% (AQUASTAT, 2016). La región es altamente dependiente de la energía hidroeléctrica, la cual provee más del 60% de la energía eléctrica, y una gran parte (74%) de su potencial técnico se encuentra aún subdesarrollado. Es una de las regiones más urbanizadas del mundo: el 80% de la población vive en zonas urbanas y se espera que esta tasa aumente aún más con un 86% de la población viviendo en ciudades para el año 2050 (DAES, 2014). En la actualidad, hay cuatro mega ciudades con más de 10 millones de habitantes cada una en la región y se espera añadir dos más a la lista para el año 2030.

### 13.1 El desafío de la gestión de aguas residuales urbanas

Los vertidos de aguas residuales urbanas están aumentando en la región debido a: i) el crecimiento de la población (la población urbana pasó de 314 millones en 1990 a casi 496 millones en la actualidad y se espera que alcance los 674 millones en 2050) (DAES, 2014) y ii) al aumento de los servicios de abastecimiento de agua y de saneamiento. En 2015, el 88% de la población urbana tenía acceso a instalaciones de saneamiento mejoradas (UNICEF/OMS, 2015), de las cuales probablemente menos de un 60% estaba conectado a sistemas de alcantarillado (UNICEF/OMS, 2000). Dado que no se ha visto un aumento equivalente en el tratamiento de aguas residuales en la mayor parte de la región, el saneamiento urbano continúa siendo una de las principales inquietudes de los gobiernos.

La población que no está conectada a la red de saneamiento depende principalmente de sistemas de eliminación *in situ*, como las letrinas y fosas sépticas. En estos sistemas, las aguas residuales se eliminan por escorrentía o percolación directa hacia los cursos de agua y acuíferos cercanos, lo cual generalmente contamina el agua. En

términos generales, los sistemas de alcantarillado urbanos presentan un mayor desafío porque la recolección e interceptación por tuberías concentra los efluentes en una cantidad de sitios de eliminación limitada (Idelovitch y Ringskog, 1997). La contaminación de aguas subterráneas es una inquietud común cuando se trata de sistemas de eliminación *in situ*, que siguen siendo habituales, incluso en las grandes ciudades.

La cobertura de los servicios de tratamiento de aguas residuales se mantuvo baja por muchas décadas (OPS, 1990). Los principales motivos fueron la necesidad de priorizar el crecimiento de los servicios de suministro de agua y de saneamiento, y las restricciones impuestas por los elevados costos de los tratamientos de aguas residuales. Esto resultó especialmente problemático en un contexto donde los presupuestos gubernamentales son limitados, las tarifas de los servicios hídricos no alcanzan a cubrir los costos de su prestación, el cumplimiento de la normativa vigente es poco estricto y se debe atender a otras necesidades sociales urgentes.

Por consiguiente, casi la totalidad de las aguas residuales urbanas, incluyendo todos los residuos industriales excepto los más tóxicos, eran evacuadas en las masas de agua más cercanas sin ningún tipo de tratamiento. Muchos ríos, lagos y aguas costeras, especialmente aquellos ubicados aguas abajo de las grandes ciudades resultaban, y todavía resultan, considerablemente contaminados. Esto tiene consecuencias graves, no solo para el medio ambiente, sino también para la salud y el bienestar de la población y el desarrollo socioeconómico general de la región, especialmente en el caso de la industria y el turismo (véase recuadro 13.1).

Un problema fundamental y prevalente es el uso de agua contaminada –en general se trata de aguas fluviales que poseen niveles inaceptables de contaminación, pero también aguas negras y, en contados casos, aguas residuales tratadas– para actividades de riego cerca de las grandes ciudades (es decir, agricultura periurbana), especialmente en zonas áridas y semiáridas. Esto lo realizan en general los agricultores de pequeña escala, quienes cultivan frutas y verduras para el

### RECUADRO 13.1 CONSECUENCIAS DEL VERTIDO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS NO TRATADAS: LA EPIDEMIA DE CÓLERA DE 1991

La epidemia de cólera de 1991 fue una de las más graves en la historia de Perú, con casi 323.000 casos y 2.900 muertes registradas. Muchos otros países también se vieron afectados además de Perú, lo que arrojó un total de 391.000 casos y 4.000 muertes en la región.

La merma de ingresos por turismo y las restricciones impuestas a los productos alimenticios causaron importantes pérdidas económicas a los países afectados. Solamente en Perú, las pérdidas por concepto de exportación de productos pesqueros superaron los USD 700 millones. La epidemia también desencadenó un proceso de reestructuración debido a una mayor exigencia en los requisitos sanitarios por parte de los países importadores y a un aumento de los costos de los exportadores.

Este incidente ocasionó que muchos países asignaran una especial prioridad a los sectores de abastecimiento de agua y saneamiento. En particular, la necesidad de proteger el acceso a los mercados extranjeros fue uno de los factores que motivó al gobierno chileno a iniciar un ambicioso programa de inversión, el cual condujo a la cobertura universal de los tratamientos de aguas residuales urbanas.

Fuente: Jouravlev (2004).

mercado local. El motivo principal para el riego con aguas residuales es la intensa competencia por la obtención de agua en las cuencas fluviales donde se encuentran ubicadas las grandes ciudades. El hecho de que las aguas residuales urbanas representen una fuente de agua confiable, de bajo costo y rica en nutrientes brindó un estímulo adicional. La desventaja, sin embargo, es que las normas sanitarias generalmente no son respetadas, en parte porque los sistemas de control y de monitoreo son débiles y, en algunos casos, inexistentes. No obstante, existen ejemplos de reutilización exitosa de las aguas residuales tratadas para el riego, por ejemplo en Argentina, Bolivia, Chile, México y Perú.

## 13.2 Crecimiento reciente del tratamiento de aguas residuales urbanas

La situación ha comenzado a cambiar en las últimas dos décadas y se ha prestado mayor atención no solo a los servicios de abastecimiento de agua y saneamiento, sino también a la creación de instalaciones para el tratamiento de aguas residuales. Los motivos de este cambio son: i) los altos niveles de cobertura de agua y saneamiento logrados como parte del proceso de los ODM (UNICEF/OMS, 2015), ii) la mejora en la situación económica de los prestadores de servicios, especialmente en las ciudades más grandes, que en los últimos años avanzaron notoriamente en pos de la recuperación de costos (Ferro y Lentini, 2013) y iii) el fuerte crecimiento socioeconómico de la región en la primera década del siglo, que

resultó en el nacimiento de una clase media por la salida de muchas personas de la pobreza. Otro factor que contribuyó fue la integración de las economías regionales a los mercados globales. En ese sentido, el aumento de los tratamientos de aguas residuales es muy importante, ya que los problemas medioambientales y de salud pública asociados a la contaminación del agua pueden tirar por la borda los esfuerzos realizados durante muchos años para desarrollar los mercados de exportación (véase recuadro número 1) (Jouravlev, 2004).

En algunos casos, las protestas públicas y sentencias judiciales dieron lugar a importantes programas de gestión de aguas residuales. El ejemplo más emblemático es el de la cuenca del río Matanza-Riachuelo en Argentina. En un litigio de interés público las autoridades fueron sentenciadas a limpiar el río, lo que condujo al diseño de un plan integral para la recuperación ambiental de la cuenca del río (Rossi, 2009).

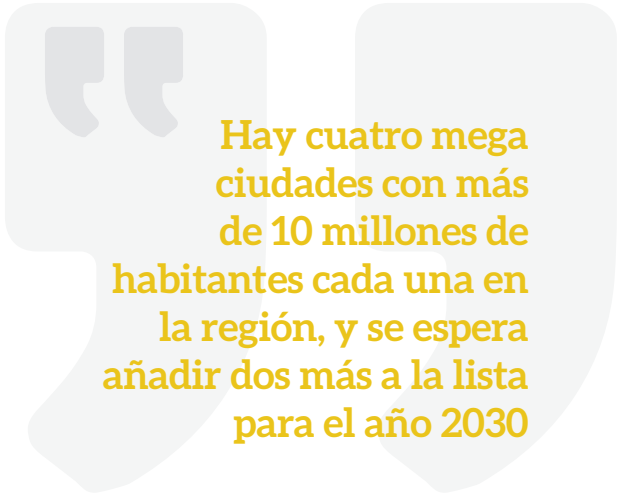
Prácticamente se duplicó la tasa de cobertura de los tratamientos de aguas residuales urbanas desde fines de la década de 1990 y se estima que alcanzó entre un 20% (Sato *et al.*, 2013) y un 30% (Ballesteros *et al.*, 2015) de las aguas residuales recolectadas en los sistemas de alcantarillado urbano. Las principales tecnologías utilizadas (cerca del 80% tanto en términos de cantidad de instalaciones como en volumen de agua tratada) son los estanques de estabilización, lodos activados y reactores anaeróbicos de flujo ascendente y manto de lodos (Noyola *et al.*, 2012).

### 13.3 Inquietudes que prevalecen y nuevas oportunidades

En términos generales, la región ha implementado numerosos proyectos puntuales de tratamiento de aguas residuales que surgieron como respuesta a determinados problemas sociales o medioambientales locales, en lugar de programas integrales y duraderos que abarcaran todo el territorio nacional. Además, muchas de las plantas de tratamiento de aguas residuales, especialmente en las comunidades más pequeñas, padecen una gestión y mantenimiento deficientes y muchas veces terminan abandonadas por falta de capacidad técnica y presupuestaria de los gobiernos y prestadores de servicios locales. La mayoría de estas instalaciones son pequeñas y no pueden sacar provecho de las economías de escala, lo cual resulta en costos elevados y una alta probabilidad de incumplir las normas de vertido. Las aguas residuales urbanas son aún consideradas desechos que generan costos adicionales, en lugar de una posible fuente de abastecimiento de agua y nutrientes que podría reducir considerablemente las presiones sobre el medio ambiente.

De todos los países de la región, Chile es el más avanzado en la materia, posee un sistema universal de tratamiento de aguas residuales urbanas (SISS, 2015). Un puñado de otros países de la región ha hecho avances importantes en cuanto al aumento de los tratamientos de aguas residuales. Algunos de los países donde se procesa más de la mitad de los efluentes urbanos son Brasil, México y Uruguay (Lentini, 2015). Existen planes ambiciosos para la ampliación de las obras de tratamientos de aguas residuales en grandes ciudades como Buenos Aires, Bogotá, Lima, México y San Pablo (Ballesteros *et al.*, 2015), pero en su mayoría han sido aplazados por muchos años debido a restricciones presupuestarias e institucionales. Las aguas residuales tratadas podrían convertirse en una importante fuente de abastecimiento de agua para algunas de estas ciudades, especialmente para aquellas que se encuentran en zonas áridas (como Lima) o para aquellas donde se necesita transporte de larga distancia para satisfacer la demanda creciente (como es el caso de San Pablo).

Para desarrollar los servicios de tratamiento de aguas residuales se requieren importantes inversiones, que hasta hace poco la mayoría



**Hay cuatro mega ciudades con más de 10 millones de habitantes cada una en la región, y se espera añadir dos más a la lista para el año 2030**

de los países no podía costear. América Latina y el Caribe deberían invertir más de USD 33.000 millones para aumentar la tasa de cobertura de los servicios de tratamiento de aguas residuales y así llegar a un 64% para 2030 (Mejía *et al.*, 2012). Según otro cálculo, se necesitarían unos USD 30.000 millones para reducir a la mitad el porcentaje de aguas residuales que no reciben tratamiento en la actualidad (Lentini, 2015). Además, se necesitan aproximadamente USD 34.000 millones para instalar sistemas de drenaje de aguas pluviales (Mejía *et al.*, 2012), que reducirían la contaminación generada por la escorrentía urbana no controlada. Se trata de un aspecto importante de la gestión de aguas residuales urbanas que también tiene marcadas repercusiones sociales y económicas: dado que la mayor parte de la región se encuentra en zonas tropicales y subtropicales caracterizadas por copiosas precipitaciones y la mayoría de las ciudades no cuenta con una infraestructura adecuada para el drenaje de aguas pluviales, las inundaciones urbanas son un fenómeno habitual y costoso que afecta a gran parte de la población.

### 13.4 Beneficios de los tratamientos de aguas residuales urbanas

Las inversiones en tratamientos de aguas residuales urbanas se justifican no solo en términos de los beneficios medioambientales y de salud que traen aparejados, sino también gracias a los efectos positivos que conlleva en cuanto al desarrollo socioeconómico. Por ejemplo, en Chile el tratamiento de aguas residuales trajo aparejados los siguientes beneficios: i) disponibilidad de agua limpia para miles de hectáreas de tierras de regadío y producción de cultivos de alto valor; ii) fomento del sector turismo y de las actividades acuáticas recreativas; iii) menor riesgo de disminución de las exportaciones por posibles quejas sobre el uso de aguas residuales para el riego; iv) mayor competitividad de los productos nacionales de alta calidad y libres de contaminación en los mercados extranjeros; v) mayor

**América Latina y el Caribe deberían invertir más de USD 33.000 millones para aumentar la tasa de cobertura de los servicios de tratamiento de aguas residuales a un 64 % para 2030**

tasa de empleo asociada a las exportaciones y el turismo; vi) mejor calidad de las masas de agua utilizadas como fuentes para su abastecimiento (SISS, 2003). Por otra parte, el desarrollo de los tratamientos de aguas residuales urbanas ha hecho posible: vii) la captura de metano y su utilización para la generación de energía eléctrica y el abastecimiento nacional de gas natural, reduciendo así las emisiones GEI; viii) la utilización de aguas residuales no solo para el riego sino también para usos industriales, entre otros.

### 13.5 Otras fuentes de aguas residuales

En tanto el tratamiento de aguas residuales urbanas se ha desarrollado, han comenzado a surgir otros problemas medioambientales, incluyendo los tratamientos de lodos cloacales (Rojas Ortuste, 2014) y la contaminación agrícola de fuente difusa, la principal causa del deterioro de la calidad del agua en muchas cuencas fluviales y acuíferos. A medida que las exportaciones regionales de productos agrícolas básicos han aumentado, también lo ha hecho la contaminación producida por la filtración y escorrentía de aguas residuales agrícolas que contienen fertilizantes, plaguicidas y otros productos agroquímicos, los que se utilizan usualmente con controles escasos o nulos. En República Dominicana, México, Nicaragua, Panamá, Perú y Venezuela, por ejemplo, se han detectado niveles importantes de contaminación del agua a causa del riego. Esta

contaminación es particularmente alarmante cuando se trata de aguas subterráneas, ya que es una fuente importante de abastecimiento tanto para los servicios de agua nacionales como para el riego.

### 13.6 Lecciones aprendidas

Las principales lecciones aprendidas de la experiencia regional en la gestión de aguas residuales son las siguientes:

- el diseño de cualquier programa de gestión de aguas residuales deberá tomar en cuenta las restricciones estructurales de las economías nacionales, analizar con ojo crítico todas las opciones disponibles (tecnologías, fuentes de financiación, estructura de propiedad, incentivos, etc.) y poseer una estructura y orden tal que no se convierta en una carga para la economía del país y sus ciudadanos;
- el establecimiento de prioridades por parte del gobierno, tal como se aprecia en la asignación de las partidas presupuestarias y la creación de instituciones efectivas, así como la no interferencia política en la toma de decisiones técnicas son aspectos fundamentales; también lo es la búsqueda de eficiencia (consideración cuidadosa de los costos y beneficios, implementación efectiva, fiscalización y control, reducción de los costos transaccionales, control de la corrupción y la captura del Estado, información de calidad, aprovechamiento de las economías de escala y de alcance, etc.); y
- para aprovechar todos los beneficios de la gestión de aguas residuales y evitar costos excesivos, en lugar de un abordaje que considere proyectos aislados limitados a un sector en particular será fundamental priorizar aquellos planes integrados a nivel de las cuencas fluviales que incorporen tanto el tratamiento de aguas residuales como su reutilización.



# PARTE IV

## OPCIONES DE RESPUESTA

**Capítulo 14** | Prevención y reducción de la generación y contaminación de las aguas residuales en la fuente

**Capítulo 15** | Mejoras en la recolección y tratamiento de aguas residuales

**Capítulo 16** | Reutilización del agua y recuperación de recursos

**Capítulo 17** | Conocimiento, investigación, innovación y creación de capacidades en materia de aguas residuales

**Capítulo 18** | La creación de un entorno propicio para el cambio





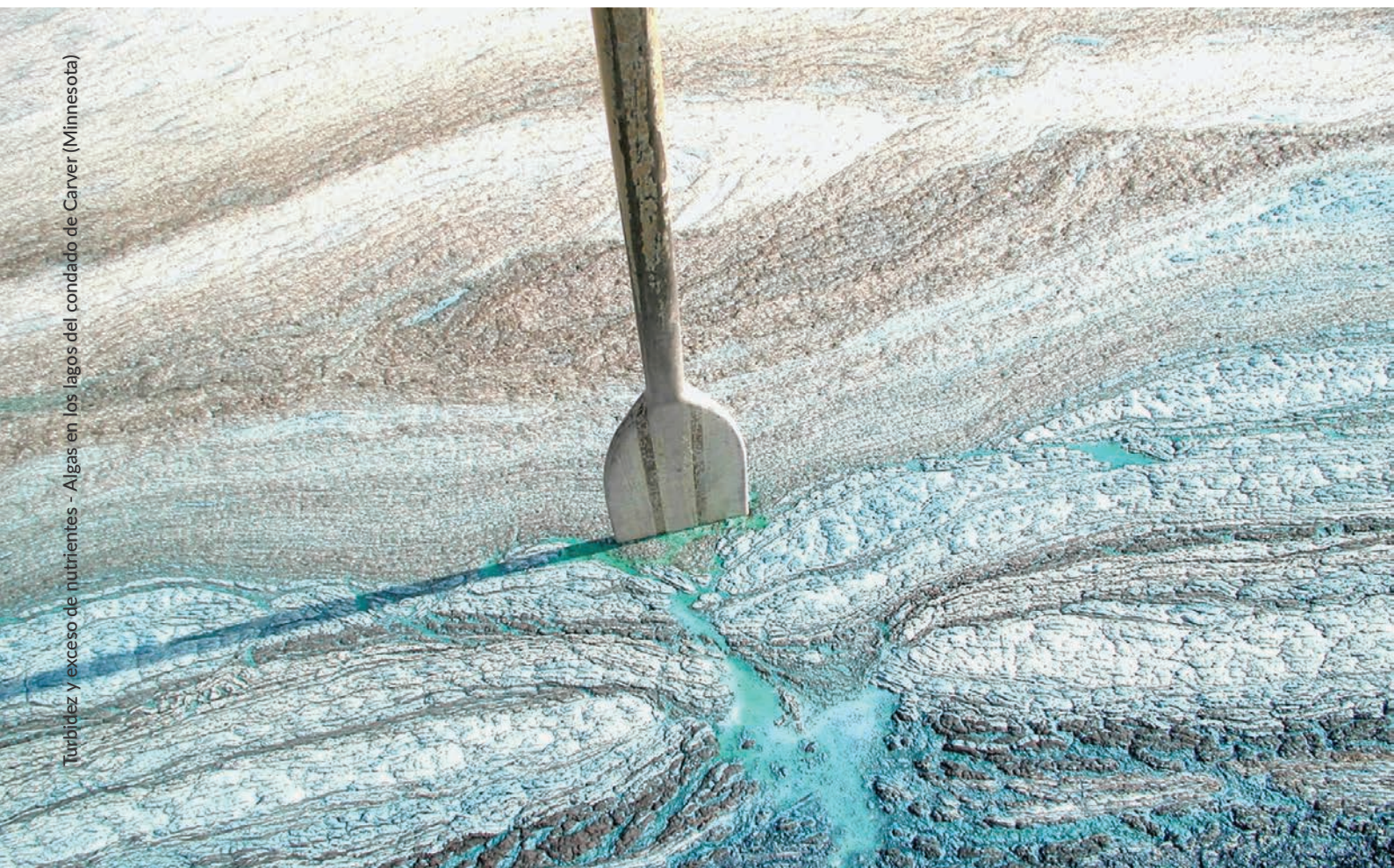
# CAPÍTULO 14

PNUMA | Birguy M. Lamizana-Diallo, Andrea Salinas, Elisa Tonda, Liazzat Rabbiosi y Llorenç Milà i Canals; y Donna Spencer (PNUMA-PAC)

Con los aportes de: Sasha Koo-Oshima (US EPA), Jack Moss (AquaFed), Jenny Grönwall (SIWI) y Claudia Wendland (WECF)

## PREVENCIÓN Y REDUCCIÓN DE LA GENERACIÓN CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES EN LA FUENTE

Turbidez y exceso de nutrientes - Algas en los lagos del condado de Carver (Minnesota)



*En este capítulo se describen distintos mecanismos institucionales, técnicos y económicos para el control y la prevención del vertido de contaminantes en los cursos de aguas residuales y para la reducción de los volúmenes de aguas residuales.*

El proverbio de Cachemira que afirma que «tirar algo al río es sencillo, pero es difícil recuperarlo» resume la importancia de las medidas para prevenir la contaminación. De hecho, generalmente las medidas correctivas para la limpieza de sitios y cursos de agua contaminados son mucho más costosas que aquellas que buscan prevenir la contaminación.

Por lo tanto, en lugar de utilizar sistemas de tratamiento en la etapa final, se deberían priorizar, siempre que sea posible, métodos de control de la contaminación hídrica que se centren en la prevención y minimización de las aguas residuales. Esto se puede lograr, por ejemplo, al reducir el consumo de agua a través del procesamiento *in situ* de las materias primas y procesos productivos y del reciclaje de los desechos. En términos más generales, la gestión hídrica sostenible busca disociar el consumo hídrico y la contaminación generada por el crecimiento económico (PNUMA, 2015c). Para evitar trasladar los problemas de una a otra etapa del ciclo de vida o entre los compartimentos ambientales, también es importante analizar cómo se utiliza y contamina el agua a lo largo de los sistemas de producción y consumo, en lugar de centrarse únicamente en una etapa específica como puede ser el tratamiento de las aguas residuales y terminar, por ejemplo, eliminando la contaminación de las aguas residuales pero, al mismo tiempo, aumentando la contaminación del aire (PNUMA, 2012a).

Para que esto suceda será necesario crear un entorno propicio, con políticas favorables que se administren de forma dinámica y con la aplicación de normativa y sanciones, tecnologías limpias y eficientes y mecanismos de financiamiento innovadores (ver Cuadro 14.1).

## 14.1 Mecanismos para la vigilancia y control de los niveles de contaminación

Las condiciones del comercio y de los mercados pueden tener repercusiones importantes y duraderas en la generación y contaminación de aguas residuales debido a las actividades productivas. Por ejemplo, el 19% de la huella hídrica mundial no se debe al consumo doméstico, sino a la exportación (Mekonnen y Hoekstra, 2011). En este sentido, los enfoques científicos

cuantitativos como el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) son importantes para evitar políticas que favorezcan la «exportación» de las industrias más contaminantes en un intento por atenuar los problemas de las aguas residuales en el ámbito nacional (PNUMA, 2012b).

Los requisitos para la certificación de los productos orgánicos son de particular interés, ya que una disminución en el uso de pesticidas reduce la contaminación química de las aguas residuales. Otros sistemas de certificación, como las etiquetas ecológicas de la ISO 14024 tipo 1<sup>11</sup> (p. ej. la etiqueta europea «European Ecolabel», la nórdica «Nordic Swan» o la alemana «Blue Angel»), generalmente incluyen criterios en materia de aguas residuales para los productos correspondientes, ya que tienden a considerar las consecuencias más importantes en todo el ciclo de vida del producto. Como implican un proceso voluntario, estos sistemas de información de producto incentivan a las empresas a mejorar su competitividad, porque hoy en día los mercados tienden a defender la producción libre de químicos y los envases reciclados, entre otras prácticas ecológicas. Sin embargo, la mayoría de los productos que se comercializan no están certificados, por lo que el efecto de estos sistemas voluntarios es limitado.

La vigilancia y presentación de informes sobre las descargas de contaminantes al medio ambiente y la calidad del agua ambiental también serán fundamentales para lograr avances. Si no se realizan mediciones, no se puede identificar el problema ni evaluar la eficacia de las políticas. Con la aprobación de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (ver Capítulo 2) y el lanzamiento de la iniciativa Seguimiento Integrado de las Metas ODS Relacionadas con el Agua y el Saneamiento (GEMI, por sus siglas en inglés) en el marco de ONU-Agua, se espera que los controles periódicos de la calidad del agua ambiental y del tratamiento de aguas residuales sirvan de guía a los mecanismos nacionales de presentación de informes para poder, a largo plazo, realizar comparaciones a nivel mundial.

<sup>11</sup> La Red Mundial de Etiquetado Ecológico es una asociación mundial de programas de etiquetado que comprende unos 25 países (GEN, s.f.).



#### CUADRO 14.1 PRINCIPIOS RECTORES PARA LA PREVENCIÓN Y REDUCCIÓN DE LA GENERACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

La creación de Registros de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (PRTR, por sus siglas en inglés) aporta experiencias útiles que podrían aplicarse al seguimiento de las aguas residuales. Los PRTR nacionales, originalmente concebidos como parte de las Directivas de la UE, el Tratado de Libre Comercio de América del Norte (NAFTA) y las normas de la OCDE, se utilizan en la actualidad en 33 países para registrar las emisiones químicas de las instalaciones industriales a la atmósfera, agua, y suelo (EEA, s.f.). Si bien los PRTR no incluyen información sobre tratamiento de aguas residuales, sí identifican claramente las fuentes de contaminación. Se respalda así la toma de decisiones en materia de inversiones para modernizar y construir plantas de tratamiento. Entre otras iniciativas de seguimiento encontramos las evaluaciones del impacto ambiental, los análisis costo-beneficio de la producción y reutilización de aguas residuales y los controles sanitarios. Sin embargo, su aplicación se limita, por lo general, a usos a nivel de proyecto o empresa.

Los tomadores de decisiones de los sectores público y privado pueden contemplar diversas alternativas para abordar la prevención, generación, seguimiento y reutilización de aguas residuales. En el sector industrial se utilizan distintos métodos de reciclaje del agua para reducir los costos de extracción y producción, cumplir con las normas sobre efluentes y medio ambiente e, incluso, en teoría, para generar ingresos. Algunas industrias, por ejemplo la industria textil de Tirupur, India (ver Cuadro 14.2), avanzó todavía más al adoptar iniciativas de Vertido Cero (ZLD, por sus siglas en inglés). Además, las iniciativas de sostenibilidad concebidas por la industria suelen abordar cuestiones de contaminación/aguas residuales con un planteamiento más integral, gracias al diseño de normas y lineamientos para evaluar la sostenibilidad medioambiental y social desde una perspectiva que contempla todo el ciclo de vida (ver Sección 6.4).

A través de los nuevos ODS, en particular el ODS 6, Meta 6.3 sobre la calidad del agua y aguas residuales, y el ODS 12 sobre consumo y producción

1. Prevenir la contaminación en lugar de tratar los síntomas. Se debe priorizar el control de la contaminación hídrica y atacar las causas de la contaminación del agua, al identificar las sustancias peligrosas que deban ser prohibidas o reguladas de forma más estricta (p. ej. la creación de «Listas rojas») y brindar capacitación y lineamientos a los usuarios.
2. Utilizar el principio de precaución. No pueden aplazarse las medidas para evitar posibles daños ambientales a causa de sustancias peligrosas por falta de evidencia científica concluyente.
3. Poner en práctica el principio de «el contaminador paga», según el cual quien contamina debe asumir el costo de las medidas de prevención, control y reducción de la contaminación. Con esta herramienta económica se intenta fomentar y promover aquellas conductas que supongan una presión menor para el medio ambiente.
4. Utilizar normas y reglamentos realistas. Las normas poco realistas y reglamentos inaplicables pueden causar más daño que su ausencia, porque fomentan una actitud de indiferencia, tanto entre los contaminadores como los administradores.
5. Encontrar un equilibrio entre las herramientas económicas y las regulatorias. El enfoque normativo de la contaminación hídrica permite a las autoridades ejercer cierto control con respecto a cuáles objetivos ambientales se pueden lograr y cuándo se puede hacer (Bartone *et al.*, 1994). Su mayor desventaja es la falta de eficiencia económica. Las herramientas económicas incentivan a los contaminadores a cambiar su comportamiento en pos del control de la contaminación y, a la vez, generan ingresos para financiar estas actividades de control.
6. Aplicar medidas de control de la contaminación en la etapa inicial del proceso. El nivel adecuado será aquel donde se registren las consecuencias más notorias.
7. Establecer mecanismos de integración transversal. Para coordinar las iniciativas de control de la contaminación hídrica en los sectores del agua, será necesario poner en marcha mecanismos y medidas formales para la cooperación e intercambio de información.
8. Fomentar un abordaje participativo que involucre a todas las partes interesadas. Esto comprende propiciar instancias de sensibilización sobre la importancia del control de contaminación hídrica con la participación de los formuladores de políticas y la ciudadanía en general.
9. Brindar acceso libre a la información en materia de contaminación hídrica. Una condición necesaria para la participación es el acceso libre a la información de que disponen las autoridades.
10. Promover la cooperación internacional en materia de control de la contaminación hídrica. La contaminación hídrica transfronteriza, habitual en los grandes ríos, requiere la cooperación internacional y la coordinación de iniciativas para lograr resultados efectivos.

Además, por medio de la aplicación de los principios de gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH), de la adopción de mejores prácticas en proyectos y programas subsectoriales y de la promoción de una gestión de múltiples actores a todo nivel, se podrán lograr buenos resultados en cuanto al control de la contaminación y también tener una mejor gestión del agua y de las aguas residuales.

Fuente: Adaptado de Helmer y Hespagnol (1997, pp. 17-20).



responsables, se fomentará la elaboración y puesta en práctica de políticas que permitan la aplicación de las medidas necesarias. Así, la prevención de la contaminación y la gestión de aguas residuales a nivel nacional se beneficiarán de la cooperación internacional y los mecanismos de transferencia de tecnologías y de los programas de creación de capacidades, entre otros medios de implementación.

## 14.2 Respuestas técnicas

### 14.2.1 Producción más limpia y eficiente en materia de recursos

La metodología de producción más limpia y eficiente en materia de recursos (RECP, por sus siglas en inglés) presenta un enfoque integral con respecto a las materias consideradas y a la aplicación continua de estrategias ambientales preventivas para trabajar con procesos, productos y servicios. Se busca fomentar la producción eficiente mediante un mejor uso de materiales, energía y aguas, a través de una gestión ambiental eficaz y la reducción de residuos y emisiones, para poder así crear un ambiente más seguro y con menores riesgos para las personas y comunidades. Se basa en el concepto del ciclo de vida, el cual se aplica a las cadenas de valor del producto (tanto bienes como servicios) para identificar los aspectos fundamentales (inclusive las aguas residuales) y sugerir distintas soluciones prácticas mediante la recuperación y reciclaje de recursos, la producción de ciclo cerrado y la ampliación de la vida útil de los productos fabricados, entre otros (PNUMA, s.f.; RECPnet, s.f.a.).

Un instrumento especial a destacar es la promoción del uso eficiente de recursos en las pequeñas y medianas empresas (PRE-SME, por sus siglas en inglés).<sup>12</sup> Está concebido para las PYMES ya que dominan ciertos sectores como la producción textil, limpieza en seco, acabado de metales, impresión, alimentos y bebidas y algunos subsectores de la electrónica, en los cuales se consume mucha agua y se generan marcados impactos sociales y ambientales. Las PYMES tienen más dificultades para mejorar el uso eficiente de sus recursos y limpiar los métodos de producción para sus operaciones por la falta de información y capacidades tanto técnicas como económicas (ver Capítulo 6). En el Cuadro 14.3 se observan ejemplos prácticos de la puesta en marcha de la metodología RECP en PYMES en Tanzania.

<sup>12</sup> Para más información, ver [www.unep.org/resourceefficiency/Business/CleanerSaferProduction/ResourceEfficientCleanerProduction/Activities/PromotingResourceEfficiencyinSMESPRE-SME/Resources/ResourceKit/tabid/105557/Default.aspx](http://www.unep.org/resourceefficiency/Business/CleanerSaferProduction/ResourceEfficientCleanerProduction/Activities/PromotingResourceEfficiencyinSMESPRE-SME/Resources/ResourceKit/tabid/105557/Default.aspx).

**Será fundamental contar con métodos participativos, una mejor comunicación y programas de sensibilización y capacitación para reducir el consumo de agua y controlar la liberación de contaminantes y subproductos.**

#### CUADRO 14.2 VERTIDO CERO (ZLD) EN LA INDUSTRIA TEXTIL DE TIRUPUR, INDIA

La industria de blanqueado y teñido en la meca de los tejidos al sur de India, Tirupur, es conocida por ser la primera en adoptar el Vertido Cero (ZLD) de forma sistemática, eliminando así el vertido de contaminantes. Los elementos del concepto ZLD, entre ellos la ósmosis inversa, permiten una amplia reutilización y recuperación de aguas y sales, por lo que este proceso disminuye la necesidad de agua dulce.

Los tintoreros de Tirupur tenían que transportar agua dulce en camiones desde otras localidades para salvaguardar la calidad de la producción, hasta que se puso en marcha un programa de suministro hídrico con un modelo de inversión público-privada, parcialmente financiado con un préstamo de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID). Como el agua es un recurso relativamente costoso, su reutilización es absolutamente sensata desde el punto de vista comercial, pero debe sopesarse con los costos energéticos y operativos de la maquinaria que permite llevar adelante esta metodología de Vertido Cero (ZLD).

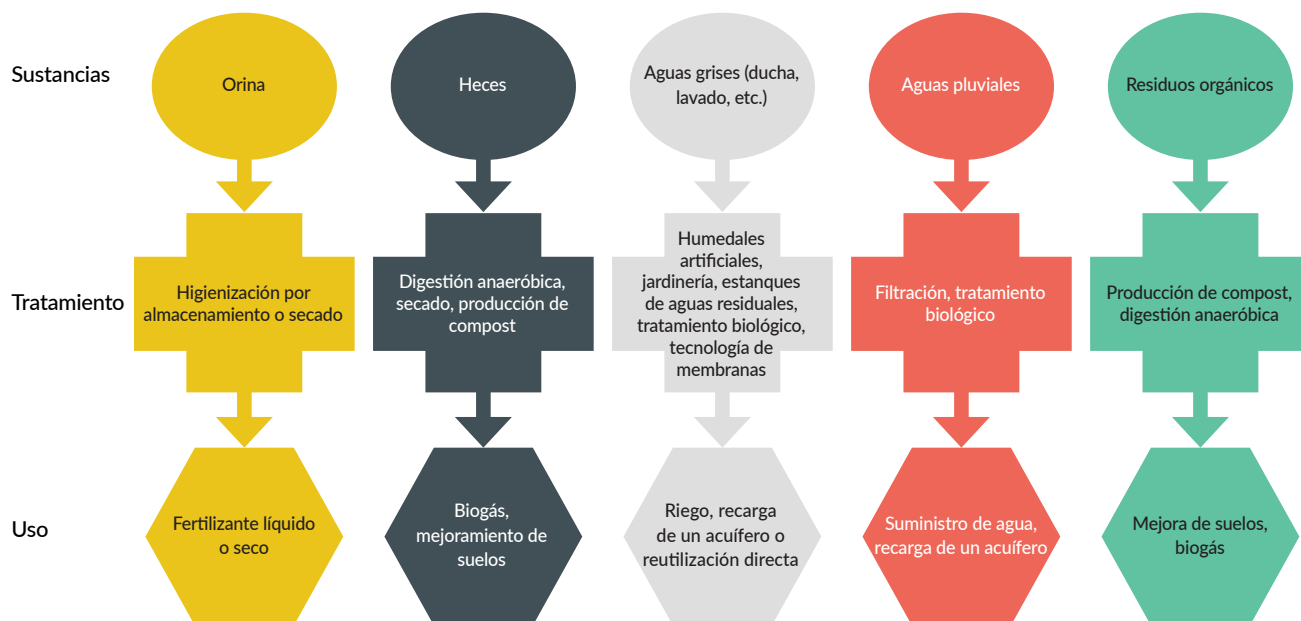
A mediados de la década del 80 no había fiscalización de las normas en materia de efluentes. La transformación fue promovida por varios actores. Los productores locales apoyaron los esfuerzos iniciales junto con la Dirección de Control de la Contaminación y el sistema judicial. Sin embargo, la presión a favor de un cambio de comportamiento a gran escala provino del Alto Tribunal en forma progresiva: luego de que dispuso el cierre de todas las fábricas de teñido en 2011, el gobierno ofreció un préstamo sin intereses de INR 2.000 millones (aproximadamente USD 30 millones) para garantizar un tratamiento más funcional.

Si bien es posible que no se alcance un pleno cumplimiento a corto o mediano plazo, en Tirupur se instituyó un nuevo método de producción ZLD.

Fuente: Grönwall y Jonsson (de próxima publicación).

Con aportes de Jenny Grönwall (SIWI).

**Figura 14.1** Separación de residuos y alternativas posibles para su uso



Fuente: UNESCO-PHI/GTZ (2006, Fig. 4, p. 15).

### 14.2.2 Tecnologías ecológicas para la separación y tratamiento de aguas residuales domésticas

En el capítulo 34 del Programa 21 se definen las Tecnologías Ecológicamente Racionales (TER) como instrumentos mejores que los que reemplazan en cuanto a la protección del medio ambiente, la reducción de la contaminación, el uso de todos los recursos en forma más sostenible, el reciclaje de desechos y productos y, lo que es aún más importante, el manejo seguro de los desechos residuales (CNUMAD, 1992, punto 34.1). Por este motivo, se pueden considerar TER los sistemas de tratamiento de aguas residuales *in situ* que aplican el principio ZLD y la separación de desechos en la fuente. Sin embargo, se recomienda realizar un análisis ACV para comparar el desempeño ambiental (así como el social y el económico) de ciertas tecnologías específicas en distintas condiciones geográficas para determinar cuál es la mejor TER para los distintos entornos.

### CUADRO 14.3 EJEMPLOS DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA Y EFICIENTE EN MATERIA DE RECURSOS EN TANZANIA

Los ejemplos de dos PYMES de Tanzania demuestran los beneficios de los métodos preventivos como el RECP, tanto por el impacto ambiental, incluyendo las aguas residuales, como también por los beneficios económicos que estos generan a las empresas.

La empresa Musoma Textile Mills Tanzania Limited (MUTEX) recibió capacitación en materia de RECP para mejorar el uso eficiente de los recursos y su desempeño ambiental. Algunos de los principales beneficios incluyen la recuperación de recursos (soda cáustica), mejora de la eficiencia hídrica y energética, reducción de emisiones, residuos sólidos y aguas residuales, mejora de la salud ocupacional y de las condiciones de seguridad. El programa RECP, en su totalidad, les permitió ahorrar más de USD 293.322 por año.

La fábrica de cervezas Tanzania Breweries Limited Mwanza puso en marcha el programa RECP para reducir el uso de agua y energía, la generación de residuos y costos operativos y, al mismo tiempo, para mejorar el cumplimiento con la sostenibilidad mundial y su imagen comercial. La puesta en marcha del programa RECP derivó en un ahorro de USD 37.000 en el consumo de servicios hídricos y de USD 56.250 en consumo energético, en la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> en un 50%, de la generación de residuos sólidos en un 39% y de la generación de aguas residuales en un 42%.

Fuente: RECPnet (s.f.b.) y CPCT (s.f.).

#### CUADRO 14.4 EL FONDO REGIONAL DEL CARIBE PARA LA GESTIÓN DE AGUAS RESIDUALES (CREW)

En la región del Gran Caribe es sumamente difícil captar fondos para sectores como educación, salud, suministro de agua potable y gestión de aguas residuales, especialmente para esta última, que es la que recibe menos inversiones. Sin embargo, si no se logran los niveles de inversión adecuados, el vertido de aguas residuales no tratadas continuará ocurriendo, lo cual amenaza el crecimiento económico de la región y la calidad de vida de sus habitantes. El fondo CREW, financiado por el FMAM y puesto en marcha por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y el PNUMA, propone una solución para contrarrestar la falta de financiamiento para una infraestructura de aguas residuales en la región.

El CREW ha probado dos tipos de mecanismos de financiación: los fondos rotatorios (en Belice, Trinidad y Tobago y Guyana) y una mejora crediticia (CEF, por sus siglas en inglés) en Jamaica. CREW desembolsó una reserva para garantía de USD 3 millones por la mejora crediticia (CEF), como un apalancamiento financiero para obtener otros USD 9 millones para patrocinar proyectos de aguas residuales. El recargo por el factor K sobre los servicios de aguas residuales, impuesto en 2008, se utiliza para reembolsar los fondos al CEF. Este innovador modelo promueve un incentivo para asignar los recursos obtenidos mediante el cobro mensual de la sobrecuota por el factor K (un porcentaje de la tarifa de los servicios hídricos) para pagar el servicio de la deuda y obtener préstamos mayores en bancos comerciales, en lugar de utilizar los fondos en inversiones directas de capital en el sector. Belice, Guyana y Trinidad y Tobago utilizan los recursos del fondo CREW (USD 5 millones, USD 3 millones, y USD 2 millones, respectivamente) para crear fondos rotatorios que otorgan préstamos a los prestadores de servicios hídricos respectivos y así financiar determinados proyectos en materia de aguas residuales. La reposición de estos fondos rotatorios depende de los ingresos obtenidos principalmente de los intereses de los préstamos y del esquema de tarifas. El caso de Guyana es particular, ya que la asignación apunta principalmente al sector privado.

Entre las lecciones aprendidas encontramos la idea de que la sostenibilidad del financiamiento en materia de aguas residuales depende principalmente del compromiso de los gobiernos; la pertinencia de las políticas, leyes y normas nacionales; el grado de fiscalización de dichas leyes y normas, y la disponibilidad de financiamiento suficiente y continuo que permita la renovación, operación y el mantenimiento. El proyecto permitió aumentar la concienciación sobre: i) el problema de la gestión deficiente de aguas residuales de los tomadores de decisiones; ii) la importancia de una gestión integrada del agua y aguas residuales; iii) los métodos innovadores para lograr el financiamiento para la gestión de aguas residuales y permitió iv) una mejor comprensión de los requisitos para lograr un financiamiento sostenible en el sector.

Fuente: CREW (s.f.) y Daniels (2015).

### La separación de residuos en la fuente puede ser más sencilla y eficiente en materia de costos que tratar de separarlos una vez mezclados

Se ha trabajado mucho en los últimos 20 años en la investigación y desarrollo de la separación en la fuente, contemplando soluciones de alta y baja tecnología tanto en contextos rurales como urbanos a diferentes escalas (Andersson *et al.*, 2016). La separación de residuos en la fuente puede ser más sencilla y eficiente en materia de costos que tratar de separarlos una vez mezclados.

Por ejemplo, los sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales (DEWATS, por sus siglas en inglés) y los de saneamiento ecológico (EcoSan) se consideran una alternativa prometedora para alcanzar un equilibrio entre el crecimiento socioeconómico y la prestación de servicios básicos en las comunidades menos privilegiadas. Estos sistemas no necesitan controles técnicos ni mantenimiento sofisticados, ni tampoco grandes insumos energéticos o hídricos. También permiten la recuperación de nutrientes para la agricultura y así preservan la fertilidad de los suelos, garantizan la seguridad alimentaria, minimizan la contaminación del agua y el uso de fertilizantes sintéticos y, en algunos casos, permiten la recuperación bioenergética (ver Sección 15.4).

Para el sistema EcoSan los desechos fecales humanos, los residuos orgánicos y las aguas residuales, son recursos con gran potencial para la reutilización hídrica y el reciclaje de componentes. Se trata principalmente de «saneamiento seco». La principal ventaja de los inodoros secos con separador de orina de EcoSan, en comparación con las letrinas de pozo convencionales, es la separación de las heces y orina y la transformación de las heces en una sustancia inocua, seca e inodora (ver Figura 14.1). El riesgo de contaminación de las aguas subterráneas y superficiales se reduce por la retención segura de heces y orina.

### 14.3 Abordajes económicos y cambios de comportamiento

En relación con los principios rectores del Cuadro 14.1, cabe destacar que muchos acuerdos multilaterales sobre el medio ambiente (AMUMA) contemplan incentivos económicos que buscan evitar y reducir la generación de aguas residuales. Estos pueden incluir el principio de precaución, el principio de «el contaminador paga», asociaciones público-privadas y políticas tarifarias innovadoras. En los Cuadros 14.4 y 14.5 se presentan casos donde mecanismos financieros innovadores funcionaron correctamente en el Caribe y los Estados Unidos.

Para poder revertir la tendencia actual en materia de generación de aguas residuales será imperioso lograr un cambio de paradigma en los cambios comportamentales. Será fundamental contar con abordajes participativos, una mejor comunicación y programas de sensibilización y capacitación para reducir el consumo de agua y controlar la liberación de contaminantes y subproductos.

Las condiciones del comercio y de los mercados pueden tener repercusiones importantes y duraderas en la generación y contaminación de aguas residuales a causa de las actividades productivas.

#### CUADRO 14.5 FONDO ROTATORIO ESTATAL (SRF) PARA EL FINANCIAMIENTO DE LA INFRAESTRUCTURA DE AGUAS RESIDUALES

En los Estados Unidos, el Fondo Rotativo Estatal (SRF, por sus siglas en inglés) es uno de los programas de financiamiento sostenible que brindan ahorro financiero para proyectos hídricos que beneficien al medio ambiente, incluyendo la salud pública y la conservación de las cuencas locales. Los aportes nacionales y estatales financian préstamos para una gran variedad de proyectos en materia de calidad del agua, por ejemplo aquellos sobre todos los tipos de escorrentía, protección o restauración de cuencas y gestión de estuarios, así como también para proyectos más tradicionales de tratamiento de aguas residuales municipales, reutilización y conservación hídrica.

Así, los estados utilizan un método de calificación por puntajes para evaluar, lo que les permite asignar recursos a los proyectos sobre calidad del agua que consideren de máxima prioridad. Los fondos para la creación o capitalización de los programas del Fondo Rotatorio Estatal para el Agua Limpia (CWSRF, por sus siglas en inglés) se asignan con subvenciones del gobierno nacional a través de US EPA y de fondos de contraparte de los estados que equivalen a un 20% de las subvenciones del gobierno nacional. Los fondos del CWSRF se conceden en préstamos a las comunidades a tipos de interés inferiores a los del mercado y los reembolsos del préstamo vuelven nuevamente al programa para financiar nuevos proyectos para la protección de la calidad del agua. La naturaleza rotativa de estos programas permite contar con una fuente permanente de financiamiento que perdurará en el futuro.



Fuente: US EPA (s.f.c.)

Con aportes de SashaKoo-Oshima (US EPA).

La planta de tratamiento en el condado de Escambia en el estado de la Florida (EE.UU.) fue destruida por el huracán Iván. Fue construida nuevamente fuera de la llanura costera, con una otra estructura para hacerla más resistente. Hoy en día la planta reutiliza el 100% de su agua.



# CAPÍTULO 15

ONU-Hábitat | Graham Alabaster, Andre Dzikus y Pireh Otieno

Con los aportes de: Xavier Leflaive (OCDE - Dirección de Medio Ambiente)

## MEJORAS EN LA RECOLECCIÓN Y TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES



Infraestructura de digestión de lodos residuales en una planta de aguas residuales que produce metano y suministra energía

En este capítulo se analizan distintas opciones y medidas para mejorar la recolección y tratamiento de aguas residuales, y se hace especial hincapié en las ventajas de los sistemas descentralizados de bajo costo.

## 15.1 Alcantarillado y saneamiento hídrico

Ya se ha demostrado la importancia del alcantarillado como medio de transporte para alejar las sustancias residuales de las fuentes humanas y otras actividades económicas, así como también sus efectos. Si bien existen otras alternativas más ecológicas, la eliminación hídrica de residuos continúa siendo el método más habitual de saneamiento y de evacuación de las aguas residuales de fuentes domésticas, comerciales e industriales. Otras opciones de saneamiento, como los sistemas *in situ*, son sumamente adecuados para las zonas rurales y lugares con baja densidad de población, pero resultan costosos y casi imposibles de gestionar en ámbitos urbanos densamente poblados, excepto en las economías más desarrolladas. En muchos casos todavía persisten dificultades importantes en la recolección y transporte de lodos fecales desde las instalaciones *in situ*. De acuerdo a un estudio reciente realizado en la ciudad de Kampala (IWMI, 2012), más del 80% de los usuarios de estas instalaciones no tenía experiencia en el vaciado de las letrinas personales y más del 60% de los residuos sépticos recolectados provino de fuentes institucionales y comerciales (ver Figura 4.4).

La cantidad de hogares conectados a sistemas de alcantarillado tiene correlación (en mayor o menor medida) con las conexiones a un servicio de suministro de agua, si bien siempre en proporciones mucho menores. En informes recientes (UNICEF/OMS, 2015) se establece claramente que el porcentaje de personas conectadas a sistemas de alcantarillado a nivel mundial (60%) es mayor de lo que se creía. Incluso en las zonas rurales, donde la cantidad es generalmente baja, hay una proporción importante de personas con conexión a un sistema de alcantarillado (16%). Esto se contradice con estimaciones publicadas en el pasado que citaban un 10% o menos (Corcoran *et al.*, 2010) (ver Figura 5.1).

Muchas de las grandes ciudades en las economías desarrolladas y en transición tienen amplios sistemas de alcantarillado, algunos de los cuales continúan funcionando en forma eficiente a 100 años de su construcción. En Londres todavía se utilizan, como parte del sistema reticular utilizado en la actualidad, colectores principales que fueron construidos en la época victoriana. Con una tasa de urbanización en aumento surgen complicaciones por la cantidad excesiva de conexiones a la red de alcantarillado, ya que exceden la capacidad del diseño original. Los sistemas de recolección de aguas residuales envejecidos causan distintos problemas, entre ellos,

la corrosión del hormigón, baldosas quebradas, derrumbes y obstrucciones. Las soluciones pueden ser costosas. La agencia US EPA (2016) estima que para corregir los desbordamientos de alcantarillado combinado (CSO, por sus siglas en inglés), rehabilitar y reemplazar los sistemas de distribución existentes e instalar nuevos sistemas de recolección de alcantarillado se necesitaría el 52% de los USD 271.000 millones de la inversión necesaria para satisfacer las necesidades de infraestructura en materia de aguas residuales que tiene el país.

## 15.2 Alcantarillado de bajo costo

Debido a los altos costos de los sistemas tradicionales, se diseñaron métodos de alcantarillado de bajo costo para afrontar las dificultades que enfrenta la mayoría de los países en desarrollo: bajas tarifas sumadas a presupuestos nacionales insuficientes, altas tasas de pobreza e infraestructura costosa. Si bien existen sistemas de bajo costo en una variedad de formatos, en general utilizan redes de tuberías con un diámetro más pequeño, colocadas en pendientes más bajas y a profundidades menores. Los principios de diseño difieren de los utilizados en el diseño de las redes de alcantarillado tradicionales. Estos se basan en el concepto de que el sistema transporta aguas residuales libres de sólidos, y poseen cajas interceptoras (similares a pequeñas fosas sépticas) que recogen las aguas negras de los hogares o grupo de hogares. Estos sistemas se prestan para la organización comunitaria y son muy adecuados para la ampliación y extensión de los sistemas actuales. Una de sus desventajas es que no sirven para el drenaje de aguas pluviales.

Este concepto nació en Brasil, liderado por Carlos Melo (2005). Los sistemas de alcantarillado de bajo costo son el método preferido en los barrios de todos los niveles, ya que poseen todas las características necesarias para convertirse en el modelo *de facto* estándar para todas las redes de alcantarillado. Sin embargo, el conservadurismo de las autoridades de salud pública y los ingenieros sanitarios ha llevado a su adopción únicamente en casos puntuales en el mundo. Australia adoptó un método de bajo costo en algunas regiones (Palmer *et al.*, 1999) y se estima que estos sistemas sean cada vez más populares. También pueden conectar las comunidades satélites con los sistemas centralizados, tal como se ha hecho en campamentos de refugiados (Van de Helm *et al.*, 2015) (ver Sección 10.2.1). Mara y Alabaster (2008) abogan por el uso de sistemas en red en los barrios como una forma eficiente en materia de costos para suministrar estos servicios a los centros urbanos

secundarios más pequeños. En la actualidad todavía no existen muchos casos de evaluación de esta tecnología, pero la información sobre costos, especialmente en países como Brasil, demuestra claramente que es sostenible desde el punto de vista financiero. En Brasil se demostró que el costo del alcantarillado simplificado (un tipo de alcantarillado de bajo costo) por persona es dos veces menor que el del alcantarillado tradicional (es decir, USD 170 frente a USD 390) (Mara, 1996).

### 15.3 Alcantarillado combinado

Un aspecto importante de la recolección de aguas residuales es su fuente. En los sistemas viejos, como los utilizados en París, las alcantarillas originales (de 1852) fueron concebidas únicamente para aguas pluviales y grises. En un decreto posterior, de 1894, se obligó a los propietarios de las viviendas a verter todo tipo de aguas residuales, inclusive aguas negras, en la red de alcantarillado combinado (Bernhardt y Massard-Guilbaud, 2002; Tréhu, 1905). Si bien una amplia variedad de usuarios se conectan a las redes de alcantarillado, la mayoría de los sistemas fueron concebidos como «sistemas combinados», donde se eliminan las aguas pluviales y otros tipos de escorrentía urbana. Esto se hizo, presumiblemente, para reducir los gastos por la compra de drenajes de gran diámetro, pero llevó a que las aguas residuales se diluyeran en períodos de precipitaciones copiosas. Si bien era admisible en épocas con menor densidad de población y con una capacidad suficiente de asimilación de las aguas receptoras, el crecimiento y la expansión recientes de las ciudades han causado una compleja, y muchas veces peligrosa, combinación de distintas sustancias químicas y biológicas. Es por eso que el alcantarillado combinado no debería considerarse, en líneas generales, una solución eficaz. En un intento por alejarse de los sistemas combinados, se han registrado notables avances en los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS, por sus siglas en inglés) (Armitage *et al.*, 2013).

Los sistemas de alcantarillado son adecuados para los llamados «focos puntuales de contaminación»; sin embargo, el verdadero desafío es la recolección de fuentes de contaminación dispersas o difusas. Dos grandes fuentes son la escorrentía de tierras agrícolas, a las cuales se les aplicó fertilizante, y la escorrentía de zonas donde se practica la ganadería intensiva, ya que por lo general en el agua se encuentran rastros de los medicamentos veterinarios utilizados (ver Capítulo 7). Si bien muchos establecimientos de agricultura intensiva instalan sistemas de recolección y tratamiento (ver Cuadro 15.1), no se trata aún de una práctica generalizada por los altos costos que conlleva y/o la falta de regulación o fiscalización (FAO, 2005).

### 15.4 Tratamiento descentralizado (DEWATS)

Además de las plantas de tratamiento de aguas residuales, también se ha observado un aumento de los sistemas descentralizados. Muchas de las iniciativas en materia de sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales (DEWATS, por sus siglas en inglés), lideradas por organizaciones como la Asociación Bremense de Investigación y Desarrollo en el Exterior (BORDA, por sus siglas en inglés) y el consorcio de la sociedad de difusión de los DEWATS, han sabido integrarse correctamente como parte de los sistemas de saneamiento para zonas urbanas en rápido crecimiento y para ciertas comunidades aisladas donde se descarta el saneamiento tradicional por motivos económicos. Los DEWATS y el saneamiento de bajo costo (ver Sección 15.2) son complementarios por naturaleza. Los DEWATS pueden ser también una solución a mediano plazo a la espera del diseño a gran escala de los sistemas centralizados y sus posibilidades de uso son sumamente flexibles.

De hecho, en muchos países, los sistemas de tratamiento de aguas residuales centralizados de gran porte ya no serían la opción más viable para la gestión de aguas urbanas por sus elevados costos de mantenimiento y demanda en materia de recursos. Además, generalmente requieren grandes extensiones de tierra, son demasiado rígidos como para satisfacer las necesidades de las zonas urbanas de rápido crecimiento. Esto es así tanto para la infraestructura de abastecimiento de agua y aguas residuales, la recolección de aguas pluviales y el drenaje.

Los DEWATS prestan servicios a propiedades individuales o a pequeños grupos de propiedades. Hacen posible la recuperación de nutrientes y energía, el ahorro de agua dulce y garantizan el acceso al agua en tiempos de escasez (OCDE, 2015b). Podrían necesitar una inversión inicial menor a la de las redes centrales por tuberías, y son más eficaces para adaptarse ante la necesidad de ampliar o reducir el servicio. Sin embargo, sí necesitan personal con un mínimo de capacitación para llevar adelante la operación y el mantenimiento. A través de las tecnologías descentralizadas, los barrios sostenibles en las ciudades podrían sustituir parcialmente los sistemas públicos tradicionales (OCDE, 2013b). Una dificultad que presentan los DEWATS es que las comunidades locales deben vivir cerca de una planta de tratamiento, por lo tanto, es necesario considerar que la estética de la planta sea aceptable. Por este motivo, generalmente se prefieren los sistemas con diseño en lecho de juncos.

### 15.5 Gestión descentralizada de aguas pluviales

El drenaje descentralizado de aguas pluviales se puede utilizar para las tecnologías de «control de fuente» que las gestionen cerca del punto de generación. Por

ejemplo, los techos verdes o las superficies permeables permiten capturar las aguas pluviales antes de que lleguen a las calles o veredas contaminadas. Estas soluciones pueden mitigar los picos de caudal máximo, minimizar los riesgos de inundaciones y contaminación urbanas y reducir la necesidad de inversiones adicionales en infraestructura física e instalaciones de tratamiento. Pueden también atraer inversiones privadas, al estimular la inversión de agentes y desarrolladores inmobiliarios en nuevas edificaciones equipadas con sistemas de drenaje localizados. Quizás sea necesario modificar las ordenanzas municipales, en tanto las normas locales determinarán, en gran medida, las decisiones finales.

Por otra parte, el drenaje descentralizado de aguas pluviales solo ofrece una solución provisoria para la retención, ya que con el tiempo el agua deberá ser trasladada a una red de alcantarillado. En algunos casos, los costos de mantenimiento serán más elevados, pero los sistemas descentralizados generarán beneficios como: un mayor bienestar de las personas, absorción de la contaminación del aire y retención de la humedad. Eso ayudará a reducir la temperatura ambiental y a atenuar el efecto de «isla de calor» en las ciudades, contribuyendo, en definitiva, a tener ciudades más verdes. Los sistemas descentralizados también pueden utilizarse para tratar la escorrentía de las autopistas.

Se acumulará experiencia con la puesta en marcha y la explotación de los sistemas de saneamiento descentralizado y drenaje urbano. Sin embargo, se deben superar ciertos obstáculos, como las percepciones sociales y las dificultades de reconversión. Por otra parte, la experiencia de Ciudad de Suwon (ver Cuadro 15.2) sugiere que esto es viable. La falta de consistencia entre políticas también puede presentar obstáculos adicionales, por ejemplo, cuando el precio de los servicios hídricos no refleja el costo de oportunidad de uso del recurso, o cuando no se toma en cuenta el riesgo de inundaciones urbanas en las iniciativas de ordenamiento territorial y desarrollo urbano. Otro reto es la necesidad de gestionar las aguas residuales a distintas escalas (desde edificios al nivel municipal o, incluso, niveles más amplios). Estos obstáculos pueden superarse con una combinación de campañas de información, un enfoque interinstitucional de gobierno en materia de gestión de aguas urbanas (inclusive políticas, leyes y regulaciones), modelos de negocios para los servicios hídricos y desarrollo territorial que contemplen las externalidades de la gestión de aguas residuales, sumado a una visión a largo plazo de los retos del sector hídrico y las oportunidades en materia de desarrollo urbano.

## 15.6 Evolución de las tecnologías de tratamiento

Se han logrado grandes avances en las tecnologías de tratamiento desde el surgimiento de los primeros sistemas aireados (p. ej. lodos activados y filtros percoladores) en la década de 1920. La elección del sistema de tratamiento se ve condicionada por la situación económica u otros factores

### CUADRO 15.1 RECOLECCIÓN Y RECICLAJE DE AGUAS RESIDUALES DE INVERNADEROS EN ETIOPÍA

Sher Ethiopia produce rosas para exportar y emplea a unos 10.000 lugareños. La producción de flores se realiza en grandes invernaderos ubicados cerca del Lago Ziway en la municipalidad etíope de Ziway, que depende del lago para su suministro de agua potable y alimentos (pesca). El agua del lago también se utiliza para el riego agrícola, inclusive una superficie de 500 hectáreas de rosas.

Antes de iniciar el proyecto, todos los tipos de aguas residuales de los invernaderos (escorrentía de aguas pluviales, agua utilizada para la limpieza de tanques, carros de pulverización, mangueras y pozos de infiltración de los sanitarios) se vertían directamente al lago. Desde 2008, Sher Ethiopia trabaja en pos del vertido cero de aguas residuales mediante la recolección y tratamiento de aguas residuales en humedales artificiales. Los efluentes luego se almacenan en depósitos y con el tiempo se añaden al agua de riego de los invernaderos. El gobierno holandés financió las iniciativas de investigación e implementación necesarias para el proyecto piloto.

Al comienzo, la compañía Sher no creía que este sistema natural tuviera tal efecto positivo, pero durante el estudio piloto decidieron aplicarlo en todos sus invernaderos. Hacia fines de 2016, contaban con 31 humedales artificiales activos y trataban 500 m<sup>3</sup> de agua por día. Esta se reutiliza dentro de los establecimientos, reduciendo así notoriamente el impacto ambiental (huella hídrica) de la compañía.

Fuente: Van Dien y Boone (2015).

Con los aportes de Frank van Dien (ECOFYT) y Angela Renata Cordeiro Ortigara (WWAP).

### CUADRO 15.2 CAPTACIÓN DESCENTRALIZADA DE AGUA DE LLUVIA EN LA CIUDAD DE SUWON, REPÚBLICA DE COREA

La ciudad de Suwon ejemplifica cómo realizar la captación descentralizada de agua de lluvia, incluso en entornos densos, construidos, donde ya existe una red central por tuberías (ver OCDE, 2015b, por más detalles y otras iniciativas). Es una ciudad de 1,1 millones de habitantes y debe obtener la mayor parte de su suministro de agua de otro lugar. Suwon se embarcó en el proyecto «Ciudad de la Lluvia» para reducir su dependencia de las fuentes de agua alejadas. En el proyecto se recurre al agua de lluvia para prepararse para futuros períodos de escasez de agua. La primera fase del proyecto (2009-11) combinó la planificación (inclusive pautas para la instalación y operación de los sistemas de captación de agua de lluvia), capacitación y un importante financiamiento público. La segunda fase (2015-2018) comprende la construcción de instalaciones para el reciclaje de aguas pluviales con una capacidad de 10.000 m<sup>3</sup> y 150 tanques pequeños de agua de lluvia, con un presupuesto municipal de KRW 10.000 millones (aproximadamente USD 9 millones) (OCDE, 2015b).



como el calentamiento global, la escasez de agua, distintos aspectos en materia de calidad ambiental y ordenamiento territorial. En los centros de rápida urbanización alrededor del mundo, la prioridad ha sido prevenir el vertido de material carbonoso para que las aguas receptoras no sufran la falta de oxígeno.

La demanda de oxígeno se vio «satisfecha» al utilizar grandes cantidades de energía para fomentar el crecimiento de biomasa microbiana (lodo), la cual era separada del sistema y utilizada en la agricultura o arrojada al mar. Otros procesos posteriores utilizaron sistemas de aireación extendida para disminuir la cantidad final de biomasa a ser eliminada, ya que esta insumía gran parte de los costos del tratamiento.

Durante la crisis del petróleo de los años 70, la digestión anaeróbica se transformó en el método preferido para tratar las aguas residuales y lodos por la poca disponibilidad de energía. En los 80 y los 90 creció el interés por eliminar nutrientes, especialmente en los países desarrollados, porque la descarga de nutrientes había llevado a la eutrofización de los cursos de agua en muchas regiones del mundo. En este mismo período, se avanzó considerablemente en el uso de sistemas de tratamiento más naturales, como los estanques de estabilización y los sistemas de lecho de juncos. Este tipo de sistemas permiten reducir eficientemente los patógenos con bajos costos operativos y de capital. De hecho, en las economías desarrolladas también se utilizan como parte de los sistemas de tratamiento en comunidades pequeñas. Las últimas tendencias incluyen sistemas de tratamiento que contemplan la reducción de emisiones GEI. Al mismo tiempo, especialmente en las regiones en desarrollo, se investigó ampliamente sobre sistemas que se centraran en la reducción de los riesgos bacteriológicos.

En la tabla 4.2 presentamos información adicional sobre los distintos tipos de tecnologías de tratamiento.

## 15.7 Aprovechamiento de vertidos y separación de componentes

El uso activo y directo de las aguas residuales y sus nutrientes es habitualmente generado por necesidad, pero en muchas regiones desarrolladas también se ha documentado su uso para actividades recreativas, entre otras (ver Cuadro 15.3).

Aparecen nuevas tecnologías que permiten mejorar las plantas de tratamiento de aguas residuales transformándolas en «fábricas» donde se separan los materiales entrantes hasta obtener unidades independientes de amoníaco, dióxido de carbono y minerales limpios. A ello le sigue un proceso sumamente intensivo y eficaz de resíntesis microbiana, donde el nitrógeno utilizado se recoge como proteína microbiana (con niveles de eficiencia cercanos al 100%), que se puede utilizar como pienso y alimento (Matassa *et al.*, 2015). Se propuso un nuevo método en el cual el agua utilizada se procesa para que la biomasa de

### CUADRO 15.3 EL APROVECHAMIENTO DE LOS VERTIDOS EN SYDNEY, AUSTRALIA

La tubería de saneamiento que atraviesa la cancha de golf transporta las aguas residuales de aproximadamente mil hogares hacia la localidad costera de Manly, donde reciben tratamiento primario (muy básico) y luego son vertidas al mar. El proyecto consistía en reciclar aguas residuales que no solo no se utilizarían sino que contribuirían a contaminar el océano. Y siempre que el club de golf desviara flujo durante las horas pico de descarga de los sanitarios y uso de las duchas, es decir, la mañana y la noche, no interferiría con la presión ni el caudal necesarios para transportar el remanente hacia Manly.

Gracias al programa de aprovechamiento o reciclaje de los vertidos, el uso de agua potable en Pennant Hills se redujo un 92%, por lo cual el club ganó un premio de la empresa Sydney Water. Debido al uso *in situ* de las aguas residuales tratadas que lleva adelante el club ya no es necesario que Sydney Water le suministre aproximadamente 70.000 m<sup>3</sup> anuales de agua potable.

Además, el nitrógeno presente en los vertidos le ha permitido eliminar casi completamente la necesidad de utilizar fertilizantes en la cancha de golf, ya que cuando se riegan los *greenes* se aplican pequeñas cantidades de nitrógeno. Sin embargo, el ahorro de fertilizante se neutraliza, hasta cierto punto, porque es necesario añadir yeso al suelo para contrarrestar el nivel adicional de sodio de las aguas recuperadas.

En términos generales, el sistema es una forma eficiente en materia de costos de proteger las canchas contra la falta de agua y de aliviar la presión sobre el suministro de agua de Sydney. Y los jugadores de golf parecen estar satisfechos.

Fuente: Fragmento de Postel (2012).

los peces absorba sus sustancias orgánicas e inorgánicas. Los peces son cosechados y procesados como materia prima para pienso o alimento. El agua remanente puede ser utilizada para el riego o eliminada. De hecho, las sustancias orgánicas e inorgánicas presentes en el agua utilizada entrante son extraídas en gran medida como peces cosechados (Crab *et al.*, 2012).

Lo fundamental de ambos conceptos para el tratamiento de aguas residuales es que ninguno opta por destruir el valor nutricional que se encuentra presente en las aguas utilizadas. Por el contrario, añaden un tipo de energía renovable para que los microbios aeróbicos mejoren los nutrientes transformándolos en células microbianas que crecen en los flóculos, y estos últimos se cosechan al permitir que los peces se alimenten de ellos. En el último ejemplo, la biomasa se procesa y recicla para servir como pienso o alimento.

Con respecto a la segregación y separación de los productos útiles de las aguas residuales, es factible que la recolección y utilización de la orina sea un elemento cada vez más importante de la gestión ecológica de aguas residuales, ya que contiene el 88% del nitrógeno y el 66% del fósforo que se encuentran en los desechos humanos (Maksimovic' y Tejada-Guibert, 2001; Vinnerås, 2001).

# CAPÍTULO 16

UNESCO-PHI | Sarantuyaa Zandaryaa y Blanca Jiménez-Cisneros

Con los aportes de: Manzoor Qadir (UNU-INWEH), Pay Drechsel (IWMI), Xavier Leflaive (OCDE - Dirección de Medio Ambiente), Takahiro Konami (UNESCO-PHI), Richard Connor (WWAP) y el Ministerio de Territorio, Infraestructura, Transporte y Turismo del Japón

## REUTILIZACIÓN DEL AGUA Y RECUPERACIÓN DE RECURSOS



En este capítulo se describe una amplia gama de posibilidades para la utilización segura y beneficiosa de aguas residuales tratadas y sin tratar y la recuperación de subproductos útiles como la energía y nutrientes. También se presentan modelos de negocios y abordajes económicos, sumado a las posibles respuestas en materia de gestión de riesgo, consideraciones normativas y aprobación social.

La reutilización del agua como fuente alternativa y confiable de agua dulce se consolida ante el crecimiento constante de la demanda. Se observa un cambio de paradigma en la gestión de aguas residuales, la cual pasa de un trámite de «eliminación» a contemplar la «reutilización y recuperación de recursos». Contar con prácticas eficientes de gestión, innovación tecnológica y políticas regulatorias adecuadas permitirá ampliar la gama de oportunidades. Las aguas residuales también son una importante fuente potencial de recursos recuperables como la energía y los nutrientes, entre otras sustancias útiles.

La ciencia y las innovaciones tecnológicas evolucionan rápidamente en el campo de la reutilización del agua y recuperación de recursos de las aguas residuales. Se observan finalidades de uso muy prometedoras, no solo en materia de reutilización segura sino también en otras áreas no convencionales, como la recuperación de subproductos y el fomento de ventajas económicas y ambientales.

En la Figura 16.1 se observa la reutilización de agua luego de haber recibido tratamiento avanzado (terciario) a nivel mundial. No obstante, cabe destacar que solo una ínfima parte del volumen total de aguas residuales generado en el mundo verdaderamente recibe tratamiento terciario (ver Prólogo).

## 16.1 Reutilización beneficiosa del agua

La reutilización del agua se torna viable y atractiva desde el punto de vista económico cuando permite la recuperación de costos. Esto se logra al tratar las aguas residuales hasta alcanzar un nivel de calidad aceptable para los usuarios. La recuperación de costos por la venta de aguas residuales tratadas para el riego es limitada. Esto se debe al gran número de subsidios que existe para las actividades de riego, especialmente en los países en desarrollo. Las aguas residuales tratadas pueden lograr un precio mayor en la industria, básicamente para lograr una mayor recuperación de costos en lugar de ganancias (ver Sección 16.3).

### 16.1.1 La reutilización del agua en la agricultura

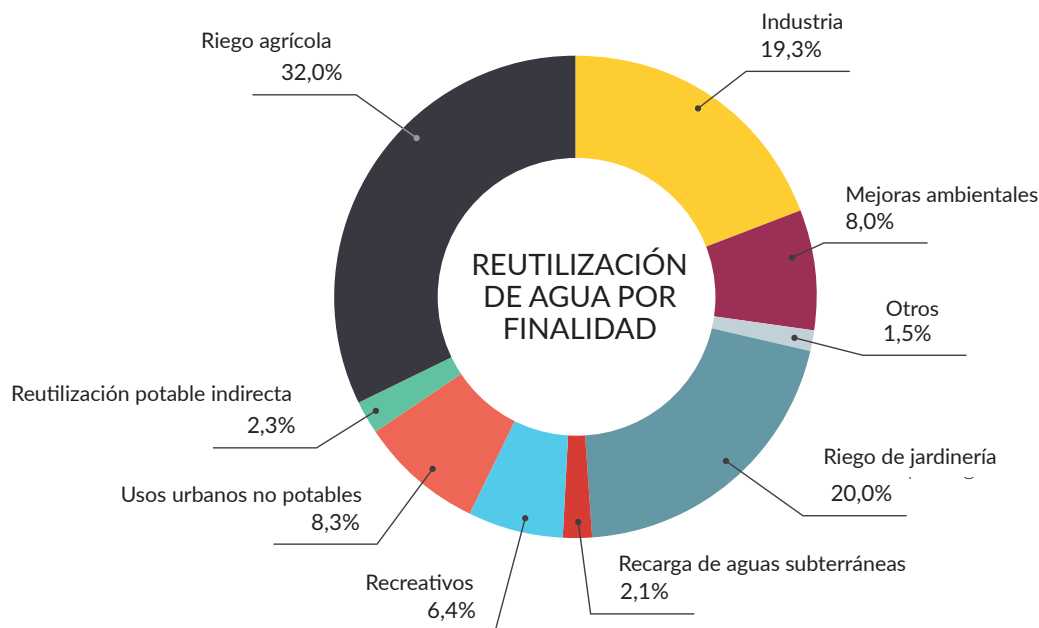
Riego con aguas residuales. La mayor parte de las aguas residuales tratadas, no tratadas y parcialmente tratadas del mundo se destina al riego (ver Capítulo 7). En Israel, por ejemplo, el 40% del agua utilizada para el riego en 2011 provino de aguas residuales (OCDE, 2011b).

Durante siglos se han utilizado aguas residuales sin tratar o diluidas para el riego. El mayor reto en la utilización de aguas residuales para el riego es pasar de un hábito de uso informal y no previsto de las aguas residuales no tratadas o parcialmente tratadas a uno previsto y seguro. Para ello será necesario encontrar incentivos y «modelos de negocios» específicos para el lugar en cuestión (Otoo y Drechsel, 2015; Saldías Zambrana, 2016; Scott *et al.*, 2010), y medidas de seguridad como las detalladas en el *Manual sobre Planificación de la Seguridad del Saneamiento de la OMS* (OMS, 2016b).

El uso de aguas residuales en la acuicultura. Si bien el uso intencional (ver Sección 7.2.1 y Cuadro 5.3) de aguas residuales para la acuicultura ha sido habitual durante siglos en casi todo el mundo, particularmente en Asia, hoy está en declive por cuestiones de seguridad y pérdida de terrenos cerca de los mercados urbanos. Esta práctica tiene efectos positivos en la producción de alimentos, ya que los animales de acuicultura alimentados con aguas residuales presentan ventajas nutricionales considerables (OMS, 2006a). El uso de aguas residuales en los viveros de peces continúa siendo una práctica habitual en China, India, Indonesia y Vietnam. La acuicultura por alimentación no intencional con residuos sucede en Bangladesh por las prácticas de piscicultura en cursos de agua contaminados con materia fecal. Si bien esta práctica está desapareciendo, todavía se utilizan desechos fecales humanos para la acuicultura en China, especialmente en las zonas rurales más remotas. Aunque el uso intencional de aguas residuales en la acuicultura no es una práctica común en África, los peces que se destinan al consumo humano son criados en lagos contaminados con materia fecal. Una alternativa



**Figura 16.1** Reutilización de agua luego del tratamiento avanzado (terciario) a nivel mundial: Cuota de mercado por finalidad de uso



Fuente: Lautze et al. (2014, Figura 2, p. 5, con base en datos de la revista *Global Water Intelligence*).

**CUADRO 16.1 LA SINGULAR EXPERIENCIA DE LA REUTILIZACIÓN POTABLE DIRECTA (RPD) EN WINDHOEK, NAMIBIA**

El uso de aguas recuperadas fue la única opción asequible en la ciudad de Windhoek para hacer frente a la escasez de agua ocasionada por el crecimiento de la población, mayor demanda y disminución de las precipitaciones luego de la crisis del agua de 1957. Esto condujo a la primera implementación a gran escala de un sistema de RPD en la Planta de Recuperación de Aguas Residuales en Windhoek, Namibia –la iniciativa de más larga data en el mundo, activa desde 1969–. En sus 40 años en funcionamiento, se realizaron estudios epidemiológicos para controlar los niveles de seguridad y no se identificaron problemas sanitarios. El proceso de tratamiento avanzado de barreras múltiples genera agua purificada de una calidad tal que siempre cumple con las normas del agua para consumo. La nueva planta, construida en 2002, incorpora importantes mejoras tecnológicas.

El éxito sostenido de la planta se debe a varios factores, entre ellos: la gran visión y dedicación de los pioneros de la recuperación potable; las eficaces campañas sobre políticas de acceso a la información y educación que promovieron la aceptación; la ausencia de problemas sanitarios asociados con el agua; un enfoque de barreras múltiples; operación confiable y procesos en línea y control de la calidad del agua; y la ausencia casi total de alternativas viables (Lahnsteiner et al., 2013).

**CUADRO 16.2 EL MAYOR CASO DE REUTILIZACIÓN NO PLANIFICADA DEL AGUA PARA EL CONSUMO HUMANO, MÉXICO**

El Valle Tula, en México, es un ejemplo claro de la reutilización no planificada del agua. Durante más de 110 años, hasta 52 m<sup>3</sup>/s de aguas residuales no tratadas provenientes de la Ciudad de México han sido destinados al riego en el Valle Tula. Esto llevó a la recarga fortuita de un acuífero, que se utiliza como suministro de agua para el consumo y otras actividades de unas 500.000 personas. Gracias a los procesos naturales la calidad del agua es compatible con la de una fuente alternativa de agua. La recarga del acuífero también tuvo un efecto positivo en las condiciones ambientales, sociales y económicas locales, y contribuyó a la recuperación de una región pobre (Jiménez-Cisneros, 2008).



### CUADRO 16.3 GESTIÓN DE AGUAS DESCENTRALIZADA Y UTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES: LA EXPERIENCIA EN SAN FRANCISCO, CALIFORNIA

La Comisión de Servicios Públicos de San Francisco (SFPUC, por sus siglas en inglés) en los Estados Unidos ha acogido los sistemas de tratamiento hídrico descentralizados para prestar servicios adicionales en materia de suministro de agua y aguas residuales. Ante la ausencia de regulación federal, la SFPUC lanzó un programa local para regular el uso *in situ* del agua llamado Programa de Agua No Potable. Este pone en marcha un proceso optimizado de iniciativas para la recolección, tratamiento y reutilización de fuentes de agua alternativas, entre ellas, las aguas grises y negras de grandes establecimientos comerciales y viviendas para satisfacer sus necesidades de agua no potable. Establece pautas para los actores interesados en instalar sistemas de agua no potable en edificios. Seguidamente, la SFPUC reorganizó las políticas gubernamentales y elaboró un nuevo marco normativo con los organismos de la ciudad de San Francisco encargados de la inspección de edificios y salud pública.

La SFPUC propició el surgimiento de micromercados al permitir que dos o más edificios compartan, compren o vendan suministro de agua sin la intermediación de un organismo público para la prestación del servicio. El programa desplaza la responsabilidad de cumplimiento con los requisitos de operación, mantenimiento y calidad del agua a manos del sector privado, mientras que el sector público continúa ejerciendo el rol de fiscalización para garantizar la protección de la salud pública y del sistema público de abastecimiento de agua (OCDE, 2015b).

*Con los aportes de Xavier Leflaive (Jefe del Grupo de Trabajo sobre el Agua, OCDE - Dirección de Medio Ambiente).*

más segura es el uso de aguas residuales para la producción de alimento para peces, como las lentejas acuáticas. La acuicultura de la tilapia para consumo en Lima (Perú) con efluentes sometidos a tratamiento terciario no solo ha creado puestos de trabajo, sino que también ha mejorado los niveles de eficiencia en la utilización del agua en un entorno desértico (PNUMA, 2002).

#### 16.1.2 Reutilización de aguas urbanas

Las aguas recuperadas (luego del tratamiento «adecuado a los fines») puede ser una fuente confiable y sostenible de aguas urbanas (ver Capítulo 5), ya que cada vez más ciudades deben abastecerse de fuentes lejanas o alternativas para satisfacer la creciente demanda.

La **utilización potable indirecta** (RPI) comprende la infiltración de aguas residuales tratadas en las aguas superficiales y subterráneas, donde los procesos naturales (como la filtración, adsorción, exposición a rayos UV, sedimentación, dilución, extinción natural) las limpian más profundamente (ver Cuadro 5.2). Luego de la nueva extracción, se trata al agua como a cualquier otra fuente de agua potable. La RPI, entonces, ofrece una alternativa viable para aumentar las fuentes de agua potable, siempre que se pongan en práctica controles estrictos para cumplir con las normas y lineamientos relativos al agua para consumo. La iniciativa NEWater de Singapur (ver Cuadro 16.9) es un ejemplo de RPI, pero debido a dificultades de aceptación popular solo una pequeña parte de las aguas recuperadas se incluye en los depósitos de agua dulce para su reutilización indirecta.

La **Reutilización potable directa** (RPD) está cobrando impulso a la luz de los avances en la disponibilidad y asequibilidad de tecnologías adecuadas para el tratamiento del agua. La reutilización potable directa del agua exige procesos sumamente meticulosos de control de calidad para eliminar todo riesgo para la salud pública y cumplir con estrictos criterios de calidad del agua. En Windhoek, Namibia, donde no se cuenta con alternativas asequibles para el abastecimiento de agua, se trata hasta un 35% de las aguas residuales municipales y se mezcla con otras fuentes de agua potable para aumentar el suministro de agua potable (ver Cuadro 16.1) (Lazarova *et al.*, 2013).

La reutilización de agua potable no planificada para el abastecimiento urbano sigue ocurriendo a través de la descarga de aguas residuales no tratadas o con tratamiento insuficiente en fuentes de agua superficiales y subterráneas (ver Cuadro 16.2) y continua siendo un reto, especialmente en los ríos y cuencas densamente poblados del mundo.

**Reutilización como agua no potable.** El principal factor que propició la popularidad de la reutilización como agua no potable en el ámbito urbano (ver Sección 5.5.2) es el hecho de que el agua no debe necesariamente cumplir con estrictos criterios de calidad (*i.e.* tratamiento «adecuado a los fines»). Sin embargo, se deben aplicar estrictas medidas de control para minimizar los riesgos de contacto directo con aguas recuperadas y la contaminación cruzada. Los elevados costos que conllevan la construcción y mantenimiento de una infraestructura adecuada para

mantener las aguas recuperadas separadas del agua potable (*i.e.* sistemas de distribución dual) pueden suponer una limitante económica. No obstante, estos sistemas, que pueden integrarse fácilmente en los nuevos desarrollos urbanos, se utilizan cada vez más en Europa, Japón y los Estados Unidos (ver Cuadro 16.3) (Asano *et al.*, 1996; Grigg *et al.*, 2013; OCDE, 2015b).

### 16.1.3 Reutilización de aguas industriales

La reutilización de aguas industriales (ver Capítulo 6) comprende el reciclado de aguas residuales industriales para usos industriales (agua de procesos) y no industriales (riego, riego de jardines, fines urbanos no potables, etc.). Las industrias también pueden utilizar aguas residuales municipales tratadas. Hace ya años que se utilizan aguas industriales recicladas como aguas de proceso en centrales eléctricas, la producción textil, la industria papelera, refinerías de petróleo, calefacción y refrigeración y en plantas siderúrgicas. Están surgiendo nuevas aplicaciones para la reutilización de aguas industriales, por ejemplo, el uso de aguas residuales tratadas como agua de enfriamiento en grandes centros de datos (p. ej. el centro de datos de Google en Bélgica y Georgia, EE. UU.). Mediante un proceso de reciclaje y tecnologías más eficientes se podrá cerrar el circuito de recirculación del agua en las industrias (ver Cuadro 14.2), mientras que se reduce el consumo de agua en más de un 90% (Rosenwinkel *et al.*, 2013).

### 16.1.4 El concepto del uso «adecuado a los fines»

La reutilización «adecuada a los fines» significa que las exigencias en materia de la intensidad del tratamiento serán dictadas por la calidad de agua necesaria para ese fin en particular. La mayoría de las opciones de reutilización como agua no potable exige una calidad menor que la del agua para consumo, por lo tanto, en general un tratamiento secundario sería suficiente (ver Sección 5.5). Sin embargo, todavía persisten obstáculos para la puesta en práctica de este abordaje, entre ellos, la falta de marcos institucionales y regulatorios adecuados y flexibles. Las medidas adecuadas de control como, por ejemplo, los enfoques de barreras múltiples también permiten minimizar riesgos para la salud y el medio ambiente (OMS, 2006a) (ver Sección 16.4).

El concepto de reutilización «adecuada a los fines» se aplica con éxito en el distrito municipal de la Cuenca Oeste en El Segundo, California, EE. UU. (Ver Cuadro 12.2), donde se tratan aguas en cinco niveles diferentes adecuados a distintos fines (Walters *et al.*, 2013).

## CUADRO 16.4 LA RECUPERACIÓN DE FÓSFORO (P) COBRA POPULARIDAD

Una de las vías más habituales para la recuperación del fósforo presente en las aguas residuales es la precipitación de estruvita. Las alternativas más atractivas desde el punto de vista económico son aquellas donde la recuperación ocurre en fases tempranas. Esto le permite al operador ahorrarse la costosa tarea de eliminar estruvita no deseada dentro del sistema de tratamiento. Sin embargo, con respecto a la venta de P recuperado, todavía no existen opciones lo suficientemente atractivas desde el punto de vista económico que puedan competir directamente con los fertilizantes a base de fosfato que se encuentran actualmente en el mercado (Schoumans *et al.*, 2015). Otros incentivos adicionales que pueden favorecer el uso de P recuperado en lugar de la minería no sostenible son la volatilidad de precios a corto plazo, el alza a largo plazo y la creciente preocupación en la agenda política con respecto a la inseguridad del P (dudas respecto a la inseguridad alimentaria y la degradación ambiental).

### Estrategias de comercialización del fósforo recuperado

La compañía Ostara Company en Canadá, que se especializa en asociaciones público-privadas con plantas de tratamiento de aguas residuales, puso en marcha en forma exitosa la recuperación de P como gránulos de estruvita cristalizada denominados Crystal Green. Este producto puede ser utilizado como fertilizante comercial, al transformar la estruvita no deseada que se forma en las tuberías. Los ingresos obtenidos por la venta de fertilizantes se comparten con la ciudad para compensar los costos de las instalaciones.

La empresa ASH DEC Umwelt AG, con sede en Austria, creó una tecnología para la incineración de lodos que logra destruir por completo los patógenos y contaminantes orgánicos. Le sigue un tratamiento químico y térmico donde se genera un fertilizante a base de cenizas con múltiples nutrientes, el cual se comercializa con la marca PhosKraft®. Si se tienen en cuenta los costos de eliminación reducidos, el precio de producción es similar al de los fertilizantes comerciales. Se estima que el período de recuperación de la inversión en una planta a escala completa es de 3 o 4 años (Drechsel *et al.*, 2015a).

*Con los aportes de Pay Drechsel (IWMI), Angela Renata Cordeiro Ortigara (WWAP), Dirk-Jan Kok y Saket Pande (TU Delft).*

### 16.1.5 La utilización del agua con fines medioambientales: El reabastecimiento de los recursos hídricos

Entre los usos habituales de las aguas residuales con fines ambientales encontramos el reabastecimiento de los recursos hídricos a través de la recarga de aguas

## CUADRO 16.5 RECUPERACIÓN DE ENERGÍA Y NUTRIENTES A PARTIR DE BIOSÓLIDOS: EL ABORDAJE INTEGRAL (LEGISLATIVO Y ECONÓMICO) DEL JAPÓN

Si bien en Japón se recupera más de la mitad de los biosólidos, solo se utiliza el 15% del potencial energético de la biomasa. El gobierno japonés se ha propuesto como meta lograr aumentar este porcentaje a un 30% para el año 2020, por medio de herramientas legislativas, ayudas económicas, promoción de la innovación, exenciones impositivas y la estandarización de los subproductos de los biosólidos.

La nueva Ley de Aguas Residuales 2015 de Japón exige a los operadores de sistemas de alcantarillado que utilicen biosólidos como una forma de energía neutra en carbono. En su máximo potencial, los 2,3 millones de toneladas de biosólidos producidos por año en las 2.200 plantas de tratamiento de aguas residuales activas en el país pueden generar 160 GWh de electricidad por año. En 2016, 91 plantas recuperaron biogás para la producción de energía eléctrica y 13 produjeron combustibles sólidos. Un buen ejemplo es la ciudad de Osaka, donde se producen anualmente 6.500 toneladas de biosólidos como combustible con base en 43.000 toneladas de lodos cloacales húmedos para la generación de energía eléctrica y producción de cemento. Como ayuda económica para incentivar a que los operadores de sistemas de alcantarillado inviertan en iniciativas de reutilización de energía proveniente de biosólidos, se paga una tarifa regulada por el suministro de la electricidad generada por biosólidos, que está fijada a un precio determinado por kWh.

El gobierno japonés promueve la innovación al subsidiar nuevas tecnologías en materia de reutilización de biosólidos. También se promueve el financiamiento privado a través de una herramienta específica de amortización para reducir la carga impositiva que recae sobre compañías privadas que invierten en equipamiento para las plantas de tratamiento de aguas residuales para la reutilización energética. Los subproductos, como el combustible de biosólidos, están atravesando procesos de estandarización para así crear un mercado.

Fuente: Ministerio de Territorio, Infraestructura, Transporte y Turismo del Japón\*

Aporte de Takahiro Konami (UNESCO-PHI).

\*Para mayor información, visite [www.mlit.go.jp/en/index.html](http://www.mlit.go.jp/en/index.html)

subterráneas, la restauración de los caudales de los ríos, el aumento de los recursos hídricos en lagos y lagunas y la restauración de humedales y biodiversidad (ver Capítulo 8).

**Recarga de acuíferos.** La recarga artificial de acuíferos mediante la introducción intencional de aguas residuales tratadas para su subsiguiente recuperación o mejora de los ecosistemas es una práctica habitual. La capacidad de almacenamiento y velocidad de recarga del acuífero son los factores que determinan las mayores limitaciones. La recarga de acuíferos ofrece múltiples ventajas, entre ellas, el aumento del suministro de agua y almacenamiento, el mantenimiento de humedales y la prevención de intrusiones salinas.

En las instalaciones Torreele Facility en Bélgica, se producen aguas de infiltración de alta calidad para el uso potable indirecto mediante la recarga de aguas subterráneas en los acuíferos de duna de St. André y, al mismo tiempo, se obtienen beneficios ambientales como la prevención de la intrusión de aguas salinas, la gestión sostenible de aguas subterráneas y la mejora de los valores naturales (Van Houtte y Verbauwhe, 2013). La recarga no intencional de acuíferos con aguas residuales no tratadas o insuficientemente tratadas todavía ocurre en muchas zonas. Es importante prestarle la atención necesaria, ya que puede implicar riesgos para la salud humana y el medio ambiente.

## 16.2 Recuperación de recursos de las aguas residuales y de los biosólidos

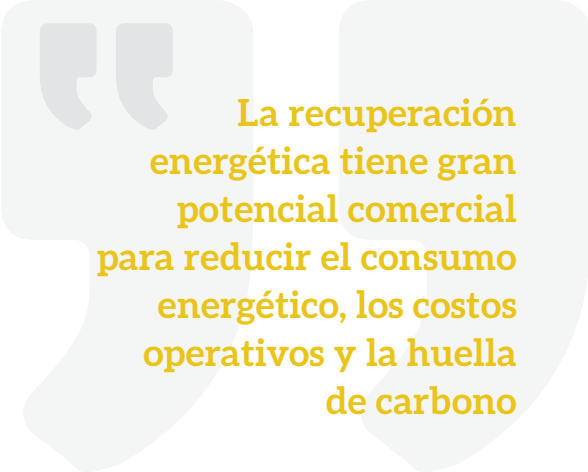
### 16.2.1 Recuperación de nutrientes

Para recuperar nitrógeno (N) y fósforo (P) de las aguas residuales o lodos cloacales se necesitan tecnologías de punta, que si bien siguen en la etapa de desarrollo, han avanzado mucho en los últimos años. Son cada vez más los casos donde (p. ej. Bangladesh, Ghana, India, Sudáfrica, Sri Lanka, etc.) las municipalidades participan en la deshidratación

## CUADRO 16.6 EJEMPLOS DE EDIFICACIONES CLIMATIZADAS Y REFRIGERADAS CON AGUAS RESIDUALES

**La villa de los Juegos Olímpicos de Invierno 2010, Vancouver, Canadá.** La antigua villa olímpica de 2010, luego adaptada para funcionar como edificio de apartamentos, está calefaccionada con efluentes de la planta de tratamiento de aguas residuales ubicada en un pueblo cercano (Godfrey *et al.*, 2009).

**Rascacielos Wintower en Winterthur, Suiza.** Para calefaccionar la torre Winterthur de 28 pisos en los fríos meses de invierno y para refrigerarla en el verano se utilizan aguas residuales. Se extraen aproximadamente 600 kW de energía térmica de las aguas residuales obtenidas de la red de alcantarillado. También se utilizan aguas residuales para refrigerar en verano, absorbiendo energía del propio edificio. Este sistema demuestra el uso de las aguas residuales como una fuente de energía neutra en carbono para la calefacción y refrigeración de edificios durante todo el año (HUBER, s.f.).



## La recuperación energética tiene gran potencial comercial para reducir el consumo energético, los costos operativos y la huella de carbono

de los lodos cloacales, cocompostaje y granulación seguros (Nikiema *et al.*, 2014). La recuperación de P en instalaciones de tratamiento *in situ* como fosas sépticas y letrinas es posible tanto desde el punto de vista técnico como económico al convertir los residuos sépticos en fertilizante orgánico u orgánico-mineral. Por otra parte, los lodos fecales presentan un riesgo de contaminación química relativamente menor en comparación con los biosólidos de las aguas residuales.

Se cree que en los próximos 50 a 100 años los recursos minerales extraíbles de P serán escasos o se habrán agotado (Steen, 1998; Van Vuuren *et al.*, 2010). Por lo tanto, la recuperación de P de las aguas residuales se ha convertido en una opción cada vez más prometedora (ver Cuadro 16.4). Se estima que un 22% de la demanda mundial de P puede satisfacerse con el reciclaje de las heces y orina humanas en todo el mundo (Mihelcic *et al.*, 2011).

A pesar de los avances tecnológicos en la recuperación de los nutrientes presentes en las aguas residuales y lodos, las oportunidades comerciales continúan siendo limitadas, especialmente por la falta de mercados. El bajo contenido de nutrientes de los biosólidos, en particular N, no permite realizar ventas rentables en el mercado. Solo se puede recuperar un 15% del N presente en las aguas residuales, mientras que es posible recuperar un 45-90% de P (Drechsel *et al.*, 2015a). Por lo tanto, el proceso estará condicionado por distintas opciones en materia de tecnología para la recuperación de P por precipitación de estruvita, lodos e incineración, con distintos niveles de eficiencia y costos.

### 16.2.2 Recuperación de energía

Las aguas residuales juegan un papel fundamental en la relación agua-energía. Si bien la recolección y tratamiento de aguas residuales exigen grandes cantidades de energía, las aguas residuales en sí mismas pueden ser una fuente de energía y su vasto

#### CUADRO 16.7 POTENCIAL TOTAL DE RECUPERACIÓN ENERGÉTICA DE LODOS RESIDUALES MEDIANTE DIGESTIÓN ANAERÓBICA Y CONVERSIÓN TÉRMICA EN ZÚRICH, SUIZA

La nueva planta Outotec, que utiliza lodos residuales de Zúrich, es un ejemplo de recuperación total de energía con una conversión energética y recuperación de nutrientes eficientes. Se establecen así nuevos estándares a nivel mundial para la conversión energética eficiente. La conversión energética eficiente es posible mediante la digestión anaeróbica, la cual produce biogás y/o energía eléctrica, y mediante la combustión, con lo cual se logra generar vapor y calor. Cada uno de estos procesos genera aproximadamente 50% del potencial energético de los lodos residuales, sumado a un rendimiento total de 6 Mwh por tonelada de lodo seco. Hay distintas opciones para su utilización, por ejemplo, mejorar la calidad del biogás convirtiéndolo en gas apto para su transporte en gasoducto e integrándolo a la red de gasoductos, o convertir el vapor en energía eléctrica y térmica para ser utilizadas en la planta de tratamiento de aguas residuales. La ciudad de Zúrich adoptó este modelo en 2015. La recuperación de fósforo es obligatoria por ley en Suiza desde enero de 2016. La dirección de aguas Zürich Water Board pondrá en marcha la recuperación de P una vez seleccionadas las tecnologías más adecuadas.

Fuente: Outotec GmbH & Co (s.f.).

Aporte de Ludwig Hermann (Outotec GmbH & Co).

potencial continúa inexplorado (WWAP, 2014). La energía química, térmica e hidráulica presente en las aguas residuales puede recuperarse como biogás, generación de electricidad y calefacción/refrigeración tanto mediante procesos *in situ* como *ex situ* (Meda *et al.*, 2012). Las tecnologías disponibles para la recuperación energética *in situ* trabajan con procesos de tratamiento de lodos/biosólidos integrados a las plantas de tratamiento de aguas residuales. La recuperación de energía *ex situ* comprende la incineración de lodos en plantas centralizadas mediante procesos de tratamiento térmico. Entre las tecnologías emergentes encontramos las celdas de combustible microbianas para la generación de bioelectricidad a partir de lodos utilizando bacterias, tecnología de lodos granulares aerobios, oxidación anaeróbica del amonio (Anammox) y la manipulación de biomasa. La recuperación combinada de nutrientes y energía también presenta un gran potencial.



Si bien las tecnologías se encuentran disponibles, su aplicación se ve obstaculizada por las limitadas oportunidades del mercado y otras barreras relativas a las economías de escala.

La recuperación energética tiene gran potencial comercial para reducir el consumo energético, los costos operativos y la huella de carbono. Al reducir la huella de carbono las plantas de tratamiento de aguas residuales pueden incrementar sus fuentes de ingreso a través de créditos de carbono y programas de comercio de emisiones de carbono (Drechsel *et al.*, 2015a).

Producción de biogás. La finalidad más habitual de la recuperación de energía *in situ* es la producción de biogás a partir de la energía química presente en las sustancias orgánicas de las aguas residuales por medio de la digestión anaeróbica de los biosólidos para la subsiguiente producción de electricidad y calor. Una parte importante de la demanda energética y de calor de las plantas de tratamiento de aguas residuales se puede satisfacer con la recuperación de energía de los biosólidos (Cuadro 16.5).

Recuperación de calor. La energía térmica presente en las aguas residuales puede extraerse para calefaccionar y refrigerar ambientes. Hay distintas aplicaciones para el uso de aguas residuales en sistemas de calefacción/refrigeración de edificios comerciales y de viviendas, lugares públicos y plantas industriales (ver Cuadro 16.6).

Energía hidráulica. Si se colocan turbinas en los flujos de aguas residuales se podría generar energía eléctrica; sin embargo, este proceso se ve limitado debido a que la mayoría de las plantas de tratamiento de aguas residuales se encuentran en ubicaciones de poca altura. La planta de tratamiento de aguas residuales As-Samra en Jordania (ver Sección 10.3.4) es muy conocida por utilizar diferencias de altura entre la ciudad y la planta, así como en las vías ingreso y egreso de la planta, y utiliza también dos turbinas, aguas arriba y aguas abajo de la planta. Estas turbinas (1,7 y 2,5 MW, respectivamente) satisfacen entre un 80 y 95% de las demandas energéticas de la planta, junto al biogás generado a partir de los lodos (9,5 MW) (Otoo y Drechsel, 2015).

Transición hacia la neutralidad energética y la transformación en productores netos de energía. Es muy probable que las instalaciones de tratamiento de aguas residuales pasen a ser grandes usuarios de energía a la neutralidad energética o, incluso, que se conviertan en productores netos de energía (ver Cuadro 16.7). Esto será posible mediante la optimización del consumo energético en los procesos de tratamiento de aguas residuales y la recuperación de energía de las aguas residuales y biosólidos.

#### CUADRO 16.8 LAS AGUAS RESIDUALES COMO FUENTE DE HIDROCARBUROS DE ALTO VALOR MEDIANTE EL USO DE MICROALGAS

- **De aguas residuales a combustible líquido para el transporte.** La idea de producir biocombustibles para el transporte se basa en la conversión de los nutrientes presentes en las aguas residuales en biomasa de microalgas (*i.e.* microalgas alimentadas con base en aguas residuales), las que a su vez se convertirán en biocombustibles. Este método ofrece muchos beneficios y puede utilizarse para limpiar las aguas residuales, capturar dióxido de carbono y producir energías alternativas sostenibles sin tener que competir con el sector agrícola para obtener agua, fertilizantes y tierras. En los Estados Unidos, con el proyecto de Cápsulas de Membranas para el Crecimiento de Algas de la NASA (OMEGA, por sus siglas en inglés), se está explorando la posibilidad de producir combustibles para la aviación a partir del cultivo de microalgas en cápsulas que flotan en zonas costeras y son “alimentadas” con las aguas residuales de las ciudades (Trent, 2012).
- **Obtención de bioaceites a partir de las algas generadas en aguas residuales.** El Instituto Nacional de Investigaciones sobre el Agua y la Atmósfera de Nueva Zelanda (NIWA, por sus siglas en inglés) ha demostrado la viabilidad comercial de la producción de bioaceites a partir de microalgas cultivadas en aguas residuales en la planta de tratamiento de aguas residuales de Christchurch (Craggs *et al.*, 2013). Se agrega dióxido de carbono a «grandes estanques de crecimiento» (HRAP, por sus siglas en inglés) para facilitar la conversión eficiente en cuanto al consumo energético de la biomasa de algas en bioaceites.\*
- **Producción de bioplásticos biodegradables.** Los bioplásticos biodegradables producidos a partir de algas cultivadas en aguas residuales tienen el potencial de reemplazar los plásticos tradicionales fabricados a base de petróleo a un costo menor. Una vez que esto sea viable desde el punto de vista económico, dicho proceso revolucionará el mercado de los polímeros y le brindará a las empresas la oportunidad de generar productos biológicos sostenibles mientras que, al mismo tiempo, podrán seguir generando beneficios como la captura de carbono, una menor huella ecológica, menor dependencia del petróleo y mejores opciones hacia el fin de la vida útil.\*\*
- **Producción de ingredientes cosméticos con aguas residuales mediante el uso de microalgas.** Desde julio de 2015, el Centro de Investigación para el desarrollo de la producción de energía con base en biomasa de algas de la Universidad de Tsukuba en Japón estudia la biomasa de algas y las posibles aplicaciones en la industria para sintetizar los aceites derivados de las algas; se busca crear una nueva «industria de las algas» que comprenda la producción de biocombustibles, el tratamiento de aguas residuales y la producción de aceites derivados de las algas para productos cosméticos y médicos.

\*Para más información, visite [www.niwa.co.nz/freshwater-and-estuaries/research-projects/bio-oil-from-wastewater-algae](http://www.niwa.co.nz/freshwater-and-estuaries/research-projects/bio-oil-from-wastewater-algae)

\*\*Para más información, visite <http://algix.com/sustainability/our-solution/>

### 16.2.3 Recuperación de subproductos de alto valor

Los metales y otros compuestos inorgánicos de las aguas residuales (generalmente los efluentes industriales) se prestan no solo para la recuperación de subproductos de alto valor, sino también para reducir los riesgos sanitarios y la contaminación ambiental asociados con su eliminación. Los efluentes de la minería y la producción de electricidad pueden presentar rastros de metales pesados (p. ej. oro, plata, níquel, paladio, platino, cadmio, cobre, cinc, molibdeno, boro, hierro y magnesio). Se han probado diversos procesos de extracción electroquímica, los cuales generalmente requieren un alto consumo energético y químico. Estas aplicaciones se limitan a usos en industrias específicas de gran escala. Los nuevos avances en tecnología bioelectroquímica permitirán aplicar un nuevo abordaje para la recuperación eficiente de metales (Wang y Ren, 2014).

Se está explorando el uso de microalgas ecológicas para generar productos de alto valor como biocombustibles para el transporte, bioplásticos, bioquímicos, complementos nutricionales para humanos y animales, antioxidantes e ingredientes cosméticos a partir de recursos disueltos en aguas residuales (ver Cuadro 16.8).

## 16.3 Modelos de negocios y abordajes económicos

Cuando el tratamiento de aguas residuales, además de aporta beneficios para la salud y el medio ambiente implica rentabilidad financiera, podemos decir que el uso de aguas residuales ofrece una propuesta de doble valor. El volumen de las fuentes de ingresos dependerá de los tipos de recursos que recuperemos de las aguas residuales. El uso de aguas residuales se torna una opción más competitiva si el precio del agua dulce refleja el costo de oportunidad por su utilización, mientras los recargos por contaminación reflejan los costos de eliminación de los contaminantes de los flujos de aguas residuales, sin mencionar el posible costo de la inacción.

El tratamiento de aguas residuales ha seguido esencialmente un «modelo de negocio social». Su principal argumento económico se centra en la protección de la salud pública y el medio ambiente. Sin embargo, hay una gran variedad de opciones para pasar de un «modelo de ingresos» a un «modelo de negocios» (Drechsel *et al.*, 2015a), donde la recuperación de costos y valor ofrecen una importante ventaja desde el punto de vista económico, no solo con la participación del sector privado sino también del público.

Las transferencias intersectoriales de agua o *swaps* (intercambio comercial de fuentes de abastecimiento de agua) buscan, por ejemplo, brindar a los productores agua tratada para el riego a cambio de agua dulce para usos domésticos e industriales (Winpenny *et al.*, 2010). Este modelo de negocios también puede aplicarse a los *swaps* de agua con otros usuarios que tengan un alto consumo, por ejemplo, las canchas de golf. Los *swaps* de agua no aumentan la disponibilidad total del recurso, pero permiten asignar el suministro de agua dulce a aquellos fines de tengan un valor más alto.

El reabastecimiento de la riqueza natural se basa en el reparto de beneficios. El organismo responsable del suministro de agua potable paga una suma a la entidad responsable del tratamiento parcial y almacenaje a mediano plazo, generalmente mediante la recarga de aguas subterráneas. Este modelo de negocio beneficiará al organismo responsable del suministro de agua potable cuando los beneficios potenciales sean comparativamente mejores que la creación de fuentes alternativas de agua dulce. La recuperación de costos operativos dependerá del precio habitual del agua dulce/potable. Los actores privados que se encuentren en zonas linderas a las de recarga de aguas residuales también se beneficiarán al obtener acceso a niveles más altos de aguas subterráneas (y podrán, en teoría, vender el agua a través de sus propias cisternas) (Rao *et al.*, 2015).

La creación de valor *in situ* está basada en la acuicultura con aguas residuales. Cuando la piscicultura se lleva a cabo mediante un proceso de tratamiento en estanques, la propuesta de valor de reutilización se conformará en tanto la biomasa absorba los nutrientes presentes en las aguas residuales (p. ej. lentejas acuáticas), la cual podrá a su vez alimentar a los peces. El modelo de negocio combina una solución de tratamiento de bajo costo con ganancias potencialmente altas, lo que permitiría ir más allá de la recuperación de costos (Rao *et al.*, 2015).

La comercialización de aguas recuperadas es probablemente el modelo de negocio más simple. Se ponen a disposición del usuario aguas residuales parcialmente tratadas («adecuadas a los fines») a un costo menor que el de las aguas tratadas. Si bien los bajos costos del agua dulce hacen más difícil que se pueda cobrar un precio adecuado por las aguas recuperadas para lograr una recuperación total de costos, se conocen varios ejemplos de prácticas exitosas (Lazarova *et al.*, 2013).

**Tabla 16.1** Ejemplos de reutilización de aguas con potencial comercial

Modelo de negocios	Ubicación del caso de negocios	Concepto de negocio, productos/servicios y beneficiario	Tipo de tratamiento	Incentivos y oportunidades
Swap de agua	Ciudad de Mashhad, Irán	Acuerdo entre la compañía de suministro de agua regional y la asociación de productores agrícolas en materia de intercambio de agua. Transferencia de los derechos de los productores sobre las represas y aguas subterráneas a cambio de aguas residuales tratadas.	Tratamiento secundario	Escasez de agua y la necesidad de reducir la exigencia sobre los recursos de agua dulce
Reabastecimiento de la riqueza natural	Lago Hoskote, Bangalore, India	Departamento de poco riego desvía aguas residuales no tratadas de una parte de la ciudad a otra. La recarga del lago seco y de los pozos de aguas subterráneas beneficia tanto a los productores agrícolas como a las viviendas que se encuentran cerca de la zona de recarga.	Ningún tratamiento excepto los procesos naturales	Necesidad de restablecer el lago y reabastecer las capas freáticas agotadas y los pozos secos
Creación de valor <i>in situ</i> con base en la acuicultura	Mirzapur, Bangladesh	Asociación entre un hospital y una ONG para tratar aguas residuales en la producción de lentejas acuáticas como alimento para peces y para cultivos para el mercado local	Tratamiento terciario, incluida la remoción de nutrientes con lentejas acuáticas	Asociación entre la administración hospitalaria y el promotor de la tecnología y una fuerte demanda de pescado en la región
Comercialización de aguas recuperadas	Ciudad de Gaborone, Botsuana	Tratamiento de aguas residuales provenientes de Gaborone y reutilización para riego en las explotaciones agrícolas de Glen Valley y aumento del caudal del río	Tratamiento secundario	Sequías frecuentes y escasez crónica de agua
Operaciones de cobertura de los mercados de agua para el futuro	Prana Sustainable Water, Suiza	Tratamiento de aguas residuales prefinanciado por ventas de agua futuras por medio de acuerdos contractuales para garantizar participación y fondos	Tratamiento secundario o terciario	Gestión de conocimiento sobre los mercados y comercialización del agua y la fijación de precios de los productos básicos sumado a sólidas asociaciones

Fuente: Adaptado de Drechsel et al. (2015a, Tabla 11.2, pp. 202-203).

**Las operaciones de cobertura de los mercados** de agua en el futuro parten de la premisa de que la industria y la agricultura aumentarán la demanda de aguas residuales recuperadas. Así, se busca hacer coincidir a los futuros «compradores» de agua con los proveedores de aguas residuales tratadas mediante la comercialización de derechos a prestaciones de agua. Con esto se logra garantizar por adelantado parte del capital para invertir en proyectos de tratamiento de aguas residuales (Rao et al., 2015).

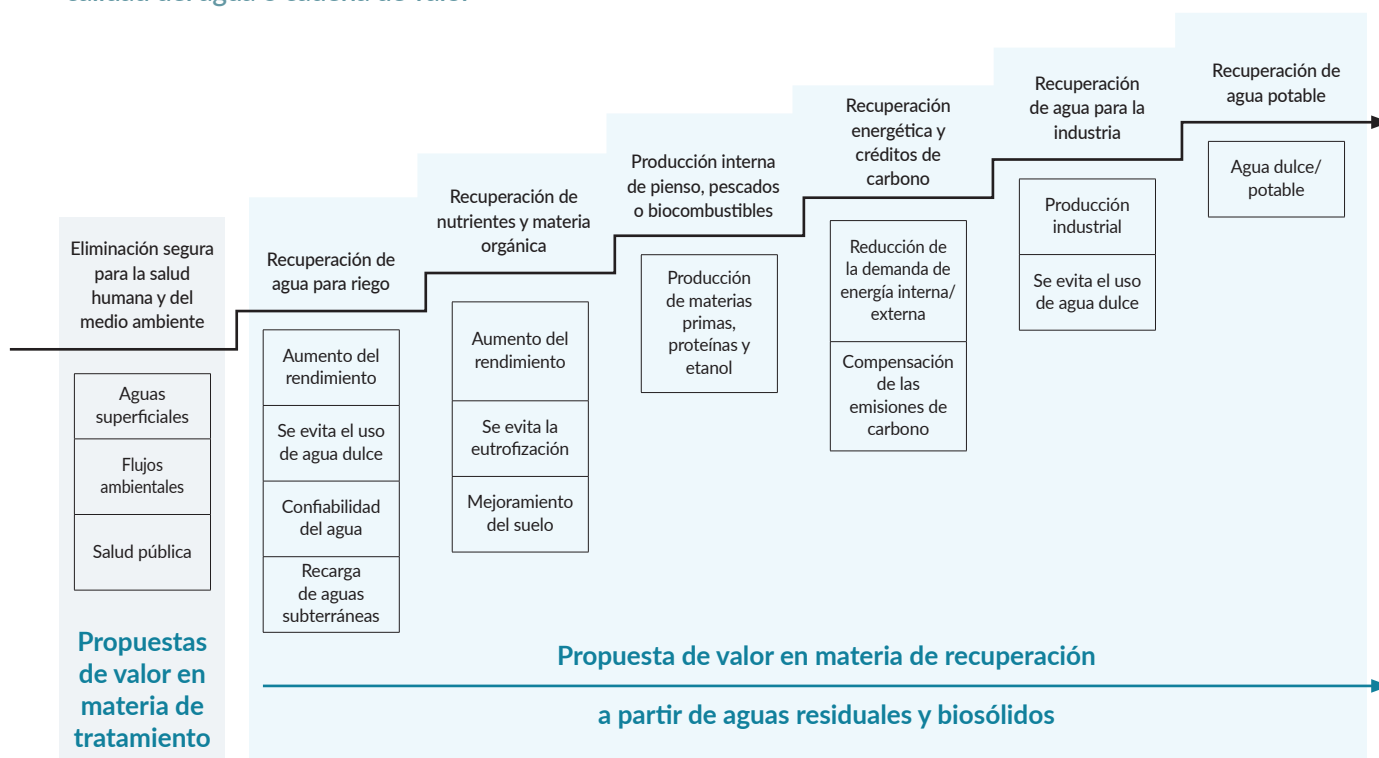
En la tabla 16.1 se presentan ejemplos de reutilización de aguas con potencial comercial.

La posibilidad de recuperar costos con el uso de aguas residuales aumenta cuanto mayor sea el nivel de tratamiento, lo cual equivale a una mejor

calidad de agua y/o la posibilidad de recuperar recursos y materiales adicionales. La posibilidad de recuperar varios productos de las aguas residuales genera nuevas oportunidades, mejora los ingresos y posiciona al negocio en un mejor nivel de la escala de propuestas de valor económico (ver Figura 16.2).

En la actualidad, las oportunidades de recuperación de nutrientes y energía se encuentran entre las más avanzadas en cuanto a la viabilidad técnica y económica, tal como se describe en los ejemplos mencionados en la sección anterior (16.2). No obstante, queda mucho margen para mejorar estos procesos (ver Capítulo 17) y colectivamente estos avances generarán nuevas oportunidades para la recuperación de costos en la gestión y reutilización de aguas residuales.

**Figura 16.2** Escala de propuestas de valor en aumento para la reutilización con mayores inversiones en la calidad del agua o cadena de valor



Fuente: Drechsel et al. (2015a, Fig. 1.2, p. 8).

## 16.4 Minimizar los riesgos para la salud humana y el medio ambiente

La reutilización del agua para consumo humano (*i.e.* agua potable) requiere los métodos más exigentes por los posibles riesgos para la salud que esta conlleva. Entre ellos encontramos regulaciones estrictas y rigurosos programas de vigilancia, evaluación y cumplimiento.

Es necesario prestar especial atención a la exposición de grupos vulnerables a aguas residuales parcialmente tratadas o sin tratar, especialmente debido al riego agrícola (ver Sección 7.2.2). Entre los grupos más vulnerables se encuentran los productores y trabajadores agrícolas y las comunidades cercanas, debido al contacto directo con aguas residuales, y los consumidores por el consumo de alimentos cultivados con el uso de las mismas. La falta de información sobre los riesgos para la salud asociados al uso de aguas residuales, ya sea por falta de educación o por vivir en condiciones de pobreza, contribuye a su existencia, especialmente en los países en desarrollo. Las mujeres son un grupo particularmente vulnerable (Moriarty *et al.*, 2004).

**La reutilización del agua se torna viable y atractiva desde el punto de vista económico cuando permite la recuperación de costos. Esto se logra al tratar las aguas residuales hasta un nivel de calidad aceptable para los usuarios**

Un tratamiento adecuado, sumado a la implementación de normas sobre la calidad del agua para la agricultura con riego de aguas residuales deberían ser suficientes para proteger la salud pública. Sin embargo, en la mayoría de los países de bajos ingresos, donde la mayor cantidad de las aguas residuales generadas no recibe tratamiento alguno, o muy limitado, será necesario diseñar estrategias alternativas para evitar el ingreso de patógenos a las cadenas de producción de alimentos. Las *Guías de la OMS para el Uso Seguro de Aguas Residuales, Aguas Grises y Excretas en la Agricultura* (OMS, 2006a) recomiendan utilizar un abordaje de barreras múltiples para proteger la salud pública, mediante el cual se implementan opciones sin tratamiento (ver Cuadro 7.1).



Todavía no están claros los posibles efectos a largo plazo de los contaminantes emergentes en la salud humana y la de los ecosistemas (ver Sección 4.1) debido al uso de aguas residuales (UNESCO, 2016b). Se necesitan más estudios sobre los riesgos que representan los productos químicos y contaminantes emergentes presentes en las aguas residuales para la salud humana (ver Sección 17.2).

El riesgo ambiental es un factor importante del uso de aguas residuales (ver Sección 6.2.2). Aun así, muchas veces se lo desestima. Se necesitan programas integrales de monitoreo ambiental, no solo para evaluar y analizar los riesgos, sino también para elaborar políticas de protección ambiental adecuadas.

#### **CUADRO 16.9 LA INICIATIVA NEWATER DE SINGAPUR: CAMPAÑA INTEGRAL DE EDUCACIÓN Y SENSIBILIZACIÓN**

La Administración de Servicios Públicos de Singapur (PUB)\* aplicó un abordaje integral que incluyó el programa de sensibilización pública llamado ABC Waters Programme; el programa de capacitación de las 3P (para personas, sector público y privado); y el Centro NEWater para visitantes. El programa 3P incluyó a líderes comunitarios, periodistas, grupos comerciales, oficinas de gobierno y los medios de comunicación. El Centro NEWater para visitantes se construyó para ofrecer programas de educación pública y divulgar información. Atrajo a más de 800.000 visitantes nacionales y extranjeros. Para minimizar la percepción negativa del público y los miedos psicológicos y el estigma, la PUB adaptó la información y terminología técnicas al recurrir a vocabulario sencillo; por ejemplo, el término «aguas residuales» fue remplazado por «aguas usadas», y en lugar de «planta de tratamiento de aguas residuales» se utilizó «planta de recuperación de aguas». También se presentó información mediante diagramas y gráficos simples, y herramientas entretenidas para lograr involucrar a la comunidad, por ejemplo, el videojuego llamado «Save My Water». La aceptación social de las aguas residuales aumentó gracias a estas iniciativas educativas en materia de sensibilización y divulgación.

\*Para mayor información, visite [www.pub.gov.sg/](http://www.pub.gov.sg/)

Fuente: PUB.

**En la actualidad, las oportunidades de recuperación de nutrientes y energía se encuentran entre las más avanzadas en cuanto a la viabilidad técnica y económica**


## **16.5 Regulación en materia de la reutilización del agua**

Las normas más antiguas en materia de uso de aguas residuales se centraban en medidas de tratamiento de aguas residuales, mientras que las más recientes contemplan estándares y criterios de calidad específicos según la finalidad deseada, para proteger así la salud humana y ambiental. Sin embargo, el costo de los tratamientos avanzados de aguas residuales para cumplir con los criterios de más alta calidad continúa siendo prohibitivos para muchos de los países en desarrollo. El abordaje de barreras múltiples (ver Cuadro 7.1) responde a esta dificultad, ya que se centra en la evaluación y gestión de riesgos.

Las guías para el uso de aguas residuales deben ser prácticas de implementar, tanto en términos tecnológicos como económicos; aplicables mediante políticas y programas adecuados; y realistas de acuerdo con las condiciones locales específicas, considerando los factores económicos, socioculturales y ambientales. Las medidas para la protección de la salud humana y ambiental deben ser adaptadas según el equilibrio local entre asequibilidad y riesgo.

Se han diseñado varias guías para el uso de aguas residuales para riego, tanto a nivel nacional como internacional. Los criterios más importantes contemplan parámetros sanitarios basados en el riesgo, entre ellos, estándares microbiológicos para el uso de aguas residuales como la ausencia de bacterias fecales que sirven de indicadores y parámetros físico-químicos para las aguas residuales tratadas, que midan la presencia del total de sólidos en suspensión (TSS), nutrientes y metales pesados. Las guías también pueden incluir restricciones con base en las prácticas de riego según el uso de origen y destino de las aguas residuales, tales como la restricción de cultivos, las técnicas de riego y el control de la exposición humana.

Los países desarrollados han estipulado normas técnicas para microorganismos y químicos. Estos estrictos valores máximos requieren importantes medidas de monitoreo y fiscalización para su cumplimiento.



**Se han diseñado varias guías para el uso de aguas residuales para riego, tanto a nivel nacional como internacional**

Por otra parte, la normativa en los países en desarrollo se centra en las restricciones de uso, como la restricción del riego con aguas residuales para cultivos de verduras para el consumo humano directo y/o la obligación de cumplir con un intervalo mínimo entre riego y cosecha. Estas restricciones no podrán fiscalizarse sin organismos de supervisión. Por lo tanto, en algunos países, como México y Túnez, se adoptaron guías que se centran en restricciones de uso sumadas a valores máximos de fácil medición.

Las *Guías de la OMS para el Uso Seguro de Aguas Residuales, Aguas Grises y Excretas en la Agricultura* (OMS, 2006a) constituyen un documento utilizado a nivel internacional para el uso de aguas residuales. En las guías sobre calidad de las aguas residuales para usos agrícolas elaboradas por la FAO (1985; 1992) se evalúa la idoneidad del agua para riego y se identifican posibles restricciones de uso. A nivel nacional generalmente se aprecia una falta de políticas y normas efectivas en materia de uso de aguas residuales y recuperación de recursos. Estas se aplican en pocos países, entre ellos Israel, Jordania, México, Túnez y Turquía, donde el riego con aguas residuales es una práctica arraigada.

## 16.6 Aprobación social respecto al uso de aguas residuales

El uso de aguas residuales puede generar fuerte oposición de la ciudadanía por falta de información y confianza con respecto a los posibles riesgos para la salud humana. Las distintas percepciones culturales y religiosas con respecto al agua en general y/o la utilización de aguas residuales tratadas también constituyen factores importantes. Si bien las inquietudes respecto de la salud y seguridad públicas han sido tradicionalmente los principales motivos de rechazo al uso de aguas residuales, los aspectos culturales (ver Cuadro 16.10) y el comportamiento de los usuarios parecerían ser los factores determinantes

en la actualidad, incluso cuando las aguas recuperadas mediante procesos de tratamientos avanzados sean perfectamente seguras. Las consideraciones estéticas del agua recuperada, como el color, olor y sabor, también son fundamentales para obtener la aceptación pública.

La sensibilización y la educación son las principales herramientas para superar las barreras sociales, culturales y las impuestas por los usuarios, así como también generar confianza entre los usuarios y modificar la percepción pública sobre el uso de aguas residuales. Estas campañas de sensibilización deben personalizarse según las diferencias culturales y religiosas de los usuarios. Para que los programas de sensibilización y educación sean efectivos también deberán dirigirse a todos los grupos etarios. Por otra parte, deberán personalizarse según las circunstancias y necesidades locales. El desarrollo de la imagen y la divulgación de información también son aspectos importantes, que contribuyen a una percepción pública positiva de las aguas y los recursos recuperados, como los fertilizantes. Por ejemplo, en Singapur el agua recuperada se comercializa con la marca «NEWater» a escala limitada (ver Cuadro 16.9). Para desarrollar la confianza de los usuarios y modificar la percepción pública será fundamental contar con fuertes marcos regulatorios y de supervisión que garanticen la seguridad de la salud humana.

### CUADRO 16.10 IMPLICANCIAS CULTURALES DE LA REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES EN PISCICULTURA EN EL ORIENTE MEDIO

La reutilización de aguas residuales en la piscicultura es una práctica muy difundida, con distintos niveles de intensidad, en diferentes regiones del mundo. Se realizó un gran estudio experimental en Egipto para utilizar aguas residuales tratadas en iniciativas de piscicultura y para riego de cultivos y árboles. Se monitorearon cuidadosamente las aguas residuales tratadas para identificar la presencia de patógenos microbianos, parásitos y químicos tóxicos tanto en el agua como en los peces. Si bien la producción de peces estaba más que apta para el consumo humano, los consumidores de Egipto no los aceptaron.

Fuente: Mancy et al. (2000).



# CAPÍTULO 17

UNESCO-PHI | Sarantuyaa Zandaryaa

UNESCO-IHE | Damir Brdjanovic

**Con los aportes de:** Qadir (UNU-INWEH), Pay Drechsel (IWMI), Xavier Leflaive (OCDE - Dirección de Medio Ambiente), Takahiro Konami (UNESCO-PHI) y el Ministerio de Territorio, Infraestructura, Transporte y Turismo del Japón

## CONOCIMIENTO, INNOVACIÓN, INVESTIGACIÓN Y CREACIÓN DE CAPACIDADES



*En este capítulo se analizan las tendencias en las áreas de conocimiento, investigación, innovación, creación de capacidades y gestión de aguas residuales, en particular los vacíos y obstáculos actuales. Algunas de las soluciones planteadas son la creación de capacidades, la sensibilización pública y una colaboración más eficiente, donde se destaca el potencial de la recuperación de costos y se aplican soluciones tecnológicas en las escalas adecuadas.*

## 17.1 Tendencias en materia de investigación e innovación

Con la rápida evolución de la innovación y el desarrollo tecnológico, existe un impulso cada vez mayor en pos de un cambio de paradigma hacia la gestión de aguas como componente de una economía circular. En lugar de considerar la reutilización de agua como un agregado costoso en las plantas de tratamiento de aguas, suscita cada vez más atención la idea de transformarlas en «fábricas de recuperación de recursos» que utilicen aguas residuales y lodos como materia prima y que recuperen productos valiosos para luego comercializarlos a usuarios finales.

La evolución de la gestión de aguas residuales, especialmente en los países desarrollados, suele asociarse a la lucha contra epidemias y a los avances tecnológicos revolucionarios. A través de las tecnologías básicas de lodos activados del siglo XIX (tratamiento de aguas residuales con microorganismos para eliminar la materia orgánica) fue posible pasar del «oscurantismo sanitario» a la «época de las luces en el saneamiento y de la revolución industrial» (Cooper, 2001). Los avances tecnológicos de fines del siglo XX se centraron en la eliminación de nutrientes (nitrógeno y fósforo) para así poder enfrentar el problema generalizado de la eutrofización y reducir las consecuencias ambientales de las aguas residuales. Justo al comienzo del siglo XXI, con el aumento constante de los requisitos de tratamiento de las aguas residuales y de las capacidades de gestión de las instituciones, el foco de la investigación y la tecnología pasó a estar en los procesos avanzados, para poder cumplir con una reglamentación y normas de efluentes más estrictas. En el futuro, es probable que las tendencias de investigación e innovación en materia de aguas residuales se centren en la recuperación de recursos para, de esa

forma, reformular el aspecto económico del tratamiento y eliminación de aguas residuales y lodos. Existen, a su vez, necesidades de agua y otros recursos naturales que se contraponen, que también impulsan la investigación e innovación en materia de tecnología y gestión de aguas residuales.

El objetivo principal de las grandes innovaciones tecnológicas más recientes en materia de tratamiento de aguas residuales (ver Cuadro 17.1) es mejorar la eficiencia del tratamiento (Brdjanovic, 2015; Qu *et al.*, 2013; Van Loosdrecht y Brdjanovic, 2014).

Si bien en algunas partes del mundo desarrollado las nuevas plantas de tratamiento se construyen con tecnologías de punta, existe un deseo cada vez mayor de utilizar tecnologías adecuadas que respeten las restricciones de recursos institucionales de los países de bajos ingresos. Se trata de tecnologías que pueden funcionar casi sin energía externa y con menores costos de instalación, operación y mantenimiento que los sistemas de lodos activados, pero que de todas formas alcanzan el mismo nivel de rendimiento (Libhaber y Orozco-Jaramillo, 2012) (ver Capítulo 15).

## 17.2 Brechas en materia de conocimiento, investigación, tecnología y creación de capacidades

Para utilizar las tecnologías actuales se necesitan financiamiento, capacidad técnica e infraestructura, condiciones que los países en desarrollo a menudo carecen. Serán necesarios la transferencia de conocimiento, el intercambio de información y la creación de capacidades mediante un proceso de educación y capacitación, así como también fomentar la sostenibilidad de las aplicaciones tecnológicas. Estas brechas en materia de conocimiento,



## Es probable que en el futuro las tendencias de investigación e innovación en el campo de las aguas residuales se centren en la recuperación de recursos

### CUADRO 17.1 INNOVACIONES DE TECNOLOGÍA E INVESTIGACIÓN EN MATERIA DE AGUAS RESIDUALES

**Filtración por membrana.** A través de los avances en la tecnología de membranas se logró no solamente reducir los riesgos que implican las aguas residuales tratadas para la salud humana y el medio ambiente, sino que también se generaron nuevas oportunidades para la utilización de aguas residuales, como la reutilización como agua potable. La utilización de tecnologías de membrana (ósmosis inversa, microfiltración, ultrafiltración, etc.) es cada vez más habitual en el tratamiento terciario o avanzado, especialmente en países desarrollados, ya que la calidad de las membranas es cada vez mejor y los costos operativos disminuyen.

**Los biorreactores de membrana (MBR)** son una nueva tecnología que nace a partir de ciertas innovaciones que buscaban intensificar la separación de la membrana al incorporarla con el proceso de lodos activados. Cada vez existen más plantas que cuentan con tecnología MBR (Van Loosdrecht y Brdjanovic, 2014). Algunas de las ventajas de esta tecnología son su diseño compacto, flexibilidad y la capacidad de operarla a distancia con seguridad.

**Las células de combustible microbianas,** una innovación tecnológica que se basa en los procesos bioelectromecánicos de las bacterias, comenzaron a aplicarse en el tratamiento de aguas residuales en la última década para captar energía (corriente eléctrica) por medio de la digestión anaeróbica que reproduce las interacciones bacterianas de la naturaleza. Por medio de esta tecnología se puede reducir considerablemente el costo de los procesos de tratamiento y la cantidad de lodos remanentes. Sin embargo, como es difícil poner en práctica el sistema a gran escala, es necesario seguir investigando y lograr mejoras tecnológicas para poder superar la alta demanda de energía.

**Los nuevos avances en los procesos de tratamiento biológico** se han podido aplicar con éxito por el alto nivel de eficiencia y los bajos costos de inversión y operación. Algunos ejemplos son los procesos innovadores para eliminar nitrógeno como SHARON® (sistema de reactor único para la eliminación de amonio de alta densidad sobre el nitrito), ANAMMOX® (oxidación anaerobia del amonio) y BABE® (aumento biológico mejorado por lotes), y también los procesos de cristalización de minerales para la recuperación y reutilización del fósforo. También han surgido procesos de tratamiento con lodo granular que utilizan estructuras microbianas artificiales. El primer proceso de tratamiento con lodo granular se comercializó con la denominación NEREDA®.

**La nanotecnología es un campo incipiente en crecimiento,** con posibles aplicaciones prometedoras en materia de purificación de agua y tratamiento de aguas residuales, así como en el control de la calidad del agua y de las aguas residuales (Qu *et al.*, 2013). En la actualidad, las aplicaciones de la nanotecnología en materia de agua y tratamiento de aguas residuales se centran en la maduración de la tecnología y experimentación a gran escala.

**Cada vez más se pueden aplicar sistemas** de supervisión y control de las aguas residuales a medida que mejoran las tecnologías. Los avances tecnológicos más prometedores incluyen: técnicas innovadoras de control que utilizan nuevos sensores, dispositivos informáticos de telemetría y nuevas herramientas para el análisis de datos. Se registran grandes avances en la investigación sobre sensores y el control de sistemas. Surgen de forma permanente nuevos métodos para controlar el tratamiento de aguas residuales, incluido el uso de aplicaciones móviles para operar el sistema SCADA (Control de Supervisión y Adquisición de Datos) que permite supervisar y controlar los sistemas de aguas residuales en forma remota.

**Los sistemas de tratamiento naturales (sistemas de humedales artificiales)** constituyen opciones naturales e innovadoras cada vez más atractivas, que subsanan las limitaciones tecnológicas actuales y que se enmarcan en una tendencia de la ciencia a centrarse en los procesos naturales.

**Hoy en día,** la modelización constituye un aspecto fundamental de los nuevos avances de investigación en materia de aguas residuales, a medida que aumenta el conocimiento esencial en las áreas de microbiología y bioquímica, y que mejora la capacidad de cómputo. La modelización permite utilizar el conocimiento científico en aplicaciones prácticas, a la vez que facilita la comunicación entre científicos e ingenieros a nivel mundial (Brdjanovic, 2015).

tecnología y capacidad deben evaluarse por medio de un análisis que permita llevar a cabo iniciativas para la transferencia de la tecnología, esfuerzos educativos y creación de las capacidades necesarios.

El bajísimo nivel de tratamiento secundario y avanzado de aguas residuales en los países en desarrollo refleja la necesidad urgente de contar con actualizaciones tecnológicas para el tratamiento de aguas residuales y opciones de uso seguro para así favorecer el logro de la Meta 6.3 de los ODS (ver Capítulo 2). Es necesario transferir las tecnologías adecuadas y asequibles desde los países desarrollados a aquellos en desarrollo y proporcionar, además, apoyo en materia de transferencia de conocimiento y creación de capacidades. Sumado al aporte de la cooperación Norte-Sur, a través de la cooperación Sur-Sur también se puede brindar respaldo a los países en desarrollo para que pueden mejorar su capacidad científica, tecnológica y de innovación. También se debe promover la transferencia de nuevas tecnologías en los casos donde su aplicación sea viable y asequible.

Los contaminantes emergentes (ver Cuadro 4.1) implican un claro vacío en materia de conocimiento e investigación. Es necesario continuar investigando para comprender cabalmente las dinámicas de los contaminantes emergentes en los recursos hídricos y el ambiente, y para mejorar los métodos para eliminarlos de las aguas residuales (UNESCO, 2015). Se necesitan técnicas optimizadas para evaluar, controlar y eliminar los contaminantes emergentes, así como también más estudios sobre el potencial de los agentes patógenos multirresistentes. También existen grandes vacíos en los marcos normativos y de control actuales, como en la disponibilidad de datos sobre el nivel de ocurrencia de los contaminantes emergentes en aguas residuales y masas de agua receptoras (UNESCO, 2015).

Otro elemento necesario para la investigación y la creación de capacidades es la puesta en marcha de una nueva evaluación de los riesgos que implican los patógenos presentes en las aguas residuales para la salud, así como también las medidas de mitigación que se necesitan en los países en desarrollo. Las evaluaciones de los riesgos para la salud suelen basarse en modelos ampliamente estudiados y verificados en países desarrollados. Se necesitan modelos y estudios similares en los países en desarrollo. Si bien generalmente las medidas de mitigación de riesgo para la salud se centran en los patógenos, los riesgos para la salud relativos a los contaminantes químicos también son importantes,

## CUADRO 17.2 APLICACIÓN DE TECNOLOGÍA DE PUNTA EN MATERIA DE AGUAS RESIDUALES EN JAPÓN

El gobierno de Japón fomenta la innovación en materia de tratamiento de aguas residuales y recuperación de recursos a través del proyecto B-DASH (Innovación a través de un enfoque dinámico de tecnologías de avanzada en materia de alcantarillado), que estimula la aplicación de tecnología de punta por medio de subsidios para las innovaciones y la normalización de su aplicación. En este proyecto, empresas privadas asociadas con gobiernos locales pueden solicitar subsidios para hacer pruebas de campo y aplicar nuevas tecnologías, incluida la construcción de instalaciones. Los resultados de dichas pruebas se utilizan para elaborar guías de normalización, publicadas por el Instituto Nacional de Japón para la Gestión del Territorio y la Infraestructura. En total, se adoptaron 31 nuevas tecnologías, las cuales se pusieron en práctica en el marco del proyecto B-DASH desde sus inicios, en 2011. Algunas de ellas podrían aplicarse a nivel mundial a corto plazo.

Por ejemplo, en 2012, dos empresas japonesas trabajaron conjuntamente con el gobierno municipal de Osaka: probaron un nuevo sistema basado en tuberías para la utilización de aguas residuales para la calefacción en la planta de tratamiento de aguas de Ebie. En comparación con las tecnologías convencionales, este nuevo sistema permite reducir entre 15 y 25% las emisiones de CO<sub>2</sub> provenientes de los sistemas de climatización o del suministro de agua caliente. En 2014 se publicó una nueva guía para la introducción de un sistema por tuberías para la recuperación de calor a partir de aguas residuales en función de los resultados de las pruebas de campo. Además, para promover la inversión del sector privado en aguas residuales, en 2015 se modificó la Ley de Aguas Residuales de Japón para que las empresas privadas pudieran instalar intercambiadores de calor de aguas residuales dentro del alcantarillado.

*Aporte del Ministerio de Territorio, Infraestructura, Transporte y Turismo del Japón y de Takahiro Konami (UNESCO-PHI).*

principalmente por la ineficiente gestión de aguas residuales industriales que se realiza en los países en desarrollo y emergentes.

También es fundamental entender qué impacto tienen los factores externos, como el cambio climático, en la gestión de aguas residuales. Recién están surgiendo estudios sobre el impacto del cambio climático en los sistemas de aguas residuales de los procesos de tratamiento (GWP, 2014), por lo que quedan muchos temas para profundizar. Además, es necesario realizar más estudios, recabar datos de forma innovadora y compartir herramientas para poder hacer frente a la enorme carencia de información en materia de aguas residuales.

### **17.2.1 Obstáculos que enfrentan la investigación, la innovación y las aplicaciones de tecnología**

La falta de financiamiento es un impedimento importante para la aplicación de las tecnologías actuales en los países en desarrollo, así como también para la promoción de la investigación y la transición de nuevas tecnologías para su aplicación a gran escala en países desarrollados. El elevado costo de las tecnologías de punta dificulta su aplicación generalizada, especialmente en los países en desarrollo. Además, las nuevas aplicaciones de tecnología tienen un nicho de mercado limitado, lo cual obstaculiza la innovación (Daigger, 2011). La situación se agrava ya que no se sabe a ciencia cierta cuál es el mercado para los productos recuperados a partir de aguas residuales. La falta de datos e información sobre las aguas residuales constituye otro obstáculo importante que afecta la investigación y la innovación, como lo es también el vínculo (muchas veces ausente) entre el mundo académico, la industria y el gobierno local.

Para transformar la innovación en aplicaciones prácticas se necesitan estudios sobre las oportunidades de financiamiento y las formas de crear nichos de mercado para las nuevas tecnologías, a la vez que se crean capacidades técnicas y recursos humanos y se invita a participar a las partes interesadas, incluido el sector privado. Esto es posible si se cuenta con voluntad política y con un sólido respaldo del gobierno (ver Cuadro 17.2).

## **17.3 Tendencias hacia el futuro para la gestión de aguas residuales**

Mientras que en el pasado las innovaciones en el campo de las aguas residuales se centraban sobre todo en las tecnologías de tratamiento avanzado, están surgiendo soluciones innovadoras que conjugan aspectos tecnológicos y de gestión. Las tendencias hacia el futuro en la gestión de aguas residuales apuntan cada vez más a la reutilización del agua y la recuperación de recursos, que presentan los beneficios adicionales de la protección de la salud pública y la reducción de la contaminación ambiental. Por ejemplo, la reutilización del agua, la elaboración de fertilizantes comerciales (fósforo) y, especialmente, la recuperación de energía, pueden reducir de forma considerable los costos de operación y mantenimiento (Wichelns *et al.*, 2015).

Las soluciones innovadoras para la gestión de aguas residuales que incorporan procedimientos interdisciplinarios integrados son también cada vez más habituales y más estudiadas por la ciencia. Una descentralización adecuada, que contemple soluciones centralizadas y descentralizadas, surge también como una alternativa posible. Así se logrará pasar de establecimientos centralizados de aguas y aguas residuales a una infraestructura con una escala de gestión más conveniente (ver Capítulo 15).

### **17.3.1 El pasaje del tratamiento de aguas residuales a la reutilización del agua y la recuperación de recursos**

En las últimas décadas, los avances tecnológicos en materia de tratamiento de aguas residuales plantearon una oportunidad para modificar el objetivo principal de la gestión de aguas residuales: pasar de «tratar y eliminar» a «reutilizar, reciclar y recuperar recursos». Hay diversas opciones tecnológicas en distintas etapas de desarrollo y aplicación para la recuperación de recursos a partir de aguas residuales y lodos. Estas tecnologías están avanzando rápidamente (ver Capítulo 16). Con las oportunidades tecnológicas para la recuperación de recursos a partir de aguas residuales se crea también un nuevo nicho con modelos de negocios redituables, que facilitan la sostenibilidad de las soluciones aplicadas (Strande *et al.*, 2014; Otoo y Drechsel, 2015), si bien se necesitan más estudios sobre los mercados de recuperación de recursos y los modelos de ingresos económicamente viables.

Las tendencias en la recuperación de recursos avanzan hacia la adopción de métodos de gestión más innovadores, en particular la recuperación de recursos integrada, que necesita a su vez normativa que la sustente, la demanda del mercado, inversión, aceptación social y la voluntad de las diferentes partes interesadas de trabajar juntos. También necesitan una mirada integral para así garantizar el trabajo conjunto de profesionales, vendedores y aquellos en cargos de decisión (Holmgren *et al.*, 2015).

Se espera que las plantas de tratamiento de aguas residuales del futuro produzcan recursos recuperados y agua de alta calidad para su reutilización en diferentes sectores, y que presenten también una buena relación costo-beneficio y sean autosuficientes en cuanto al consumo energético.

### 17.3.2 Conjugación de soluciones centralizadas y descentralizadas en la escala adecuada

En el pasaje de sistemas de saneamiento *in situ* a procesos *ex situ*, las innovaciones más recientes han demostrado que la combinación de soluciones que incluyan instalaciones para la gestión tanto de aguas residuales centralizadas como descentralizadas, puede también ser de utilidad en extensas áreas de servicio, mientras que al mismo tiempo se logran mantener los beneficios de la descentralización, tales como una inversión menor, bajos costos de operación y mantenimiento y la posibilidad de adaptar el sistema a las condiciones locales (Cairns-Smith *et al.*, 2014).

El concepto de «sistemas distribuidos de aguas residuales», que implica una metodología altamente interrelacionada y localizada para la producción, distribución y consumo, puede ser una alternativa válida si se conjugan con eficiencia diferentes sistemas centralizados y descentralizados para la gestión de aguas residuales en los sistemas auxiliares interconectados. Esta opción es más eficiente en cuanto a tiempo, energía y costos, y tiene repercusiones positivas para los usuarios finales y el medio ambiente. Sin embargo, pueden presentarse problemas importantes al momento de la aplicación (ver Cuadro 17.3).

Se necesitan más estudios para comprender de forma cabal cuál es la mejor forma de combinar los sistemas dentro de un conjunto de soluciones (con y sin alcantarillado) en una variedad de escalas, en países donde la infraestructura de aguas residuales es apenas incipiente (Cairns-Smith *et al.*,

### CUADRO 17.3 SISTEMAS DISTRIBUIDOS DE AGUAS RESIDUALES: UNA ALTERNATIVA A LOS SISTEMAS DESCENTRALIZADOS

Los sistemas distribuidos constituyen un método flexible, localizado y altamente interrelacionado, donde la infraestructura central desempeña un rol fundamental, mientras que los sistemas adaptados, más pequeños, funcionan e interactúan con los usuarios a un nivel más local (Biggs *et al.*, 2009). Los sistemas distribuidos de agua no son simplemente innovaciones técnicas, sino que requieren una gobernabilidad innovadora y además no son la opción correcta en todos los casos. Aun en contextos específicos donde sí constituyen la solución más adecuada, estos sistemas enfrentan diversos obstáculos que limitan su difusión (OCDE, 2015b):

En primer lugar, los sistemas distribuidos pueden debilitar los sistemas centrales actuales (por ejemplo, en la recolección y tratamiento de aguas residuales) cuando los mayores usuarios se desconectan de la red central, privando así al servicio de determinados ingresos. Esto es un problema, porque los sistemas distribuidos funcionan de forma más eficiente cuando lo hacen con infraestructuras de tuberías centrales. Es posible que los servicios y los gobiernos municipales prefieran no explorar aquellas opciones que puedan afectar de forma negativa la base de ingresos de las redes actuales, a no ser que se identifiquen fuentes de ingresos alternativas.

En segundo lugar, los sistemas distribuidos plantean el tema de la responsabilidad: ¿quién es responsable y debe rendir cuentas por el servicio brindado a nivel del edificio o del distrito? La rendición de cuentas constituye una dificultad, ya que los sistemas distribuidos deben tener la capacidad de supervisar y controlar la calidad de múltiples flujos de agua a diferentes niveles, lo cual también generaría costos adicionales.

En tercer lugar, se debe estudiar la complejidad de las economías de escala en la gestión de aguas residuales urbanas. Con respecto a las economías de escala materiales, suele ser menos costoso operar una gran planta de tratamiento que varias pequeñas. Sin embargo, estas pueden ser equilibradas por las economías de sistemas, ya que se ahorra en costos de inversión en la instalación de infraestructura centralizada en comparación con el tratamiento *in situ* de aguas residuales con tecnología de reutilización.

Fuente: OCDE (2015b).

Aporte de Xavier Leflaive (OCDE - Dirección de Medio Ambiente).



2014). Algunos temas fundamentales a investigar son: relación costo-beneficio, comportamiento, aceptación e incentivos para el consumidor, modelos de negocios y acuerdos institucionales. Asimismo, es necesario tener en cuenta los temas relacionados con la propiedad del sistema, la aceptación de los hogares y el financiamiento de dicho sistema, especialmente en los países en desarrollo.

## 17.4 Creación de capacidades, sensibilización pública y colaboración entre las partes interesadas

En los países menos desarrollados se carece de fácil acceso al conocimiento científico, investigación, nuevas tecnologías, educación y capacitación adecuada en temas de soluciones sostenibles para la gestión de aguas residuales.

La educación y la creación de capacidad son elementos fundamentales que pueden brindarse a través de programas de capacitación que se centran en diferentes aspectos de la gestión de aguas residuales en países en desarrollo, donde se apunta tanto a profesionales del agua como a los programas en la educación formal en diferentes niveles. Esto puede tener consecuencias directas en aspectos de percepción y aceptación social, especialmente en el uso de aguas residuales y en la recuperación de recursos.

No se debe subestimar la dimensión social. La reutilización segura del agua, por ejemplo, requiere la participación de las partes interesadas, que deben comprender los beneficios y los riesgos. A través de las campañas de educación pública se puede sensibilizar a los ciudadanos sobre las formas en que el agua puede y debe ser reutilizada con seguridad, hasta como agua de consumo, mediante la utilización de ejemplos estimulantes, como la reutilización del agua que realizan los astronautas en la Estación Espacial Internacional.

Para que los proyectos de reutilización planificada sean fructíferos, es fundamental dar cabida a la participación de las partes interesadas y a la creación de capacidades lo antes posible en el proceso. Cuando la reutilización se basa en un método de barreras múltiples, el cambio de comportamiento y la aceptación de las mejores prácticas pasan a ser fundamentales para el éxito del emprendimiento. Como quizás las partes interesadas no tengan conciencia del riesgo ni se beneficien de forma directa con la adopción de medidas de seguridad,

es necesario contar con una mejor comprensión de los incentivos específicos por género (positivos y negativos) para promover las prácticas recomendadas, y obtener así el mayor potencial posible para la adopción de las medidas a nivel local (Karg y Drechsel, 2011).

Es fundamental promover la creación de capacidades en las instituciones. Si la entidad que está a cargo de la operación y el mantenimiento de las instalaciones de aguas residuales no cuenta con la capacidad institucional adecuada, el riesgo de fracasar permanece, sin importar si el servicio gestiona plantas pequeñas, descentralizadas o plantas centralizadas de mayor tamaño (Murray y Drechsel, 2011). En este sentido, es necesario capacitar a una nueva generación de científicos, ingenieros y profesionales, abordando diferentes aspectos de la gestión de aguas residuales, para que puedan hacer frente a los problemas que surgen por los temas cada vez más complejos e interconectados que aparecen a diferentes escalas. Quienes gestionen las aguas residuales en el futuro necesitarán habilidades técnicas y de gestión para así elaborar y aplicar un conjunto de soluciones en los diferentes flujos de aguas residuales: desde la reducción de la contaminación en la fuente hasta la recolección y tratamiento de agua para su reutilización y la recuperación de subproductos útiles.

Es necesario tomar medidas concretas para capacitar investigadoras en el campo de las aguas residuales, para así promover una mayor cantidad de mujeres científicas en las más altas esferas de las instituciones científicas y de los ámbitos donde se toman las decisiones, tanto en los países desarrollados como en aquellos en desarrollo (WWAP, 2016). En los países desarrollados, así como en aquellos en desarrollo, existe la necesidad imperiosa de contar con mayor educación sobre los valores de las aguas residuales a todo nivel, desde la educación informal para niños y adultos hasta la elaboración de programas en la educación superior. A su vez, es fundamental prestar atención inmediata a los riesgos que conlleva la mala administración de las aguas residuales para la salud humana y el medio ambiente.

La elaboración y aplicación de métodos educativos y de capacitación innovadores, interdisciplinarios e integrales, sumado a materiales de capacitación actualizados, a distancia, adaptados al estudiante y basados en la resolución de problemas serán fundamentales para que podamos enfrentar los problemas y desafíos desde una visión más profunda, con un conocimiento más avanzado y con mayor decisión.

# CAPÍTULO 18

WWAP | Richard Connor, Angela Renata Cordeiro Ortigara, Engin Koncagül y Stefan Uhlenbrook

Con los aportes de : Marianne Kjellén (PNUD), Sarah Hendry (Centre for Water Law Policy and Science [con el auspicio de la UNESCO], Universidad de Dundee) y Sarantuyaa Zandaryaa (UNESCO-PHI)

## LA CREACIÓN DE UN ENTORNO PROPICIO PARA EL CAMBIO





*En conclusión, en este capítulo se presenta una hoja de ruta de posibles respuestas, soluciones alternativas y medios de implementación que pueden adoptarse para fomentar el avance en la mejora de la gestión de las aguas residuales. Dichas opciones van mucho más allá de las meramente técnicas e incluyen marcos jurídicos e institucionales, oportunidades de financiamiento, desarrollo de conocimientos y capacidades, mitigación del riesgo para la salud humana y ambiental y fomento de la aceptación social. Debido a que los problemas varían de un lugar del mundo a otro, es imperativo que los interesados y aquellos en cargos de decisión en cada región, país, cuenca y comunidad identifiquen la combinación más adecuada de opciones para su situación particular.*

Abordar los problemas relacionados con las aguas residuales a nivel mundial es fundamental para mejorar la salud humana y los medios de subsistencia, promover el crecimiento de las economías locales y nacionales, mejorar la calidad del agua, del aire y de la tierra, y proteger y mejorar los ecosistemas y los servicios que proveen. De hecho, la mejora en la gestión de las aguas residuales es un factor fundamental para alcanzar el desarrollo sostenible para todos. No obstante, como se ha establecido a lo largo de este informe, las aguas residuales no representan únicamente un problema al que hay que encontrar una solución, sino que constituyen un valioso recurso que, si se gestiona de manera adecuada, puede ofrecer enormes oportunidades y beneficios.

La demanda –y la utilización– de agua va en aumento en la mayor parte del mundo como consecuencia del crecimiento de la población, la urbanización y la mejora de las condiciones socioeconómicas. Al mismo tiempo, la disponibilidad de agua se ve cada vez más comprometida por el cambio climático, la captación no sostenible de aguas subterráneas y la contaminación. En varias zonas –desde el oeste de Estados Unidos y el sur de Europa, pasando por el norte de África y Oriente Medio, hasta algunas partes de China e India–, los recursos de agua dulce ya se encuentran muy exigidos y a los proveedores de servicio se les dificulta poder satisfacer la creciente demanda de agua dulce. La reutilización del agua aumenta la disponibilidad de agua dulce para satisfacer necesidades humanas y ambientales y, de hecho, esta práctica ya se está realizando en varios lugares. Dependiendo del nivel de tratamiento, las aguas residuales pueden utilizarse, y efectivamente se utilizan, con distintas finalidades: desde riego y paisajismo hasta usos industriales, e incluso como fuente de agua potable.

Cuanta más agua se usa, más aguas residuales hay. Los efectos sobre la salud humana y el medio ambiente han ido aumentando en forma proporcional a la cantidad de aguas residuales que se vierten sin tratamiento alrededor del mundo.

El tratamiento adecuado de las aguas residuales antes de verterlas reduce las cargas de contaminación al medio ambiente y disminuye los

riesgos para la salud humana. El costo de algunos de los procesos de tratamiento más avanzados puede parecer prohibitivo, sobre todo para las comunidades más pobres. Sin embargo, si se compara con el costo de construcción de una nueva represa, de desalinización o de la importación de agua desde otra cuenca, y cuando se toman en cuenta los beneficios ambientales y para la salud, la mejora en la gestión de las aguas residuales tiene mucho sentido desde el punto de vista económico, especialmente cuando hay escasez de agua. La mejora en la gestión de las aguas residuales también puede generar puestos de trabajo directos e indirectos en sectores dependientes del agua y otros (WWAP, 2016).

Básicamente, hay dos métodos para enfrentar los problemas relacionados con la contaminación causada por las aguas residuales. El primero implica evitar el uso (cantidad) excesivo y la contaminación del agua en el punto de uso inicial, lo que reduce el volumen global de aguas residuales producidas y las cargas de contaminación que contienen. El segundo método implica la recolección de aguas residuales y la aplicación de niveles adecuados de tratamiento (*i. e.* soluciones «en la etapa final») para otros usos o para su descarga en el medio ambiente. Este método incluye establecer normas y niveles de calidad para los flujos de aguas residuales entrantes y las aguas residuales tratadas salientes. En caso de que la prevención y el tratamiento adecuado no sean viables, existen soluciones rentables para reducir los riesgos derivados de la exposición a aguas residuales sin tratar (ver, por ejemplo, OMS, 2006a).

La planificación de la reutilización de agua ha cobrado impulso en el contexto de la gestión sostenible de los recursos hídricos, la creación de economías ecológicas y la planificación urbana (*cf.* Lazarova *et al.*, 2013). El agua, no obstante, no es el único recurso que puede recuperarse de las aguas residuales. De ciertos tipos de aguas residuales también es posible extraer nutrientes, materia orgánica, energía y otros subproductos útiles. La rentabilidad de la recuperación de energía (biogás) a partir de lodos residuales, por ejemplo, se encuentra bien documentada (*cf.* WWAP, 2014; ONU-Agua, 2015a). La recuperación de agua y subproductos útiles es fundamental para equilibrar

el desarrollo económico con la protección ambiental y de recursos en una economía circular. El ciclo de gestión de las aguas residuales se compone de cuatro pasos esenciales:

1. reducir y prevenir la contaminación en la fuente,
2. eliminar los contaminantes de los flujos de aguas residuales (tratamiento),
3. utilizar aguas residuales tratadas para diversas aplicaciones, y
4. recuperar subproductos útiles.

Cada una de estas etapas puede verse como un paso distinto pero interconectado en un proceso lógico, o sistema escalonado, dentro del marco más amplio del Instituto Internacional de Gestión de Recursos Hídricos (IWMI, por sus siglas en inglés). En consecuencia, es necesario adoptar varias consideraciones técnicas, reglamentarias y financieras para mejorar la gestión de aguas residuales y maximizar sus oportunidades y beneficios. La escasez de agua está cada día más presente en la agenda política mundial, incluso en la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Los ODS incluidos en la Agenda también promueven la mejora de la calidad del agua mediante una gestión mejorada de las aguas residuales (AGNU, 2015a). De hecho, la integridad y la diversidad biológica de los ecosistemas se han visto cada vez más afectadas por las aguas residuales, lo que ha comprometido los servicios de los ecosistemas de los que depende el desarrollo sostenible en sus tres dimensiones: económica, social y ambiental.

En virtud del posible papel de las aguas residuales en relación con la escasez de agua, la contaminación y la recuperación de recursos, no resulta sorprendente que la gestión de estas aguas concite cada vez más atención. Además, con tan pocas aguas residuales tratadas e incluso menos utilizadas, las posibles oportunidades derivadas de la adecuada explotación de aguas residuales tratadas como recurso son enormes. En las siguientes secciones se describen algunas respuestas que colectivamente crearían un entorno propicio para mejorar la reutilización del agua y la recuperación de subproductos útiles.

## 18.1 Alternativas técnicas

Pese al creciente número de casos de reutilización del agua con fines agrícolas, industriales, ambientales y recreativos, así como para su empleo como agua potable, aún no se ha explotado todo el potencial de las aguas residuales con un «tratamiento adecuado a los fines», en especial en los países en desarrollo y las economías emergentes. Mientras que en los países de ingresos altos se trata alrededor del 70% de las aguas residuales que se producen, se estima que los países

de ingresos medios-bajos y los países de bajos ingresos solo tratan el 28% y el 8% de las aguas residuales, respectivamente (Sato *et al.*, 2013).

La elección de tecnologías depende mucho del lugar. La gestión de aguas residuales se realiza en una gran diversidad de sistemas climáticos, con distintos grados de disponibilidad de recursos hídricos, niveles de desarrollo económico, tipos de actividad económica y patrones de asentamiento, lo que, a su vez, plantea distintos retos para la gestión de las aguas residuales y de la calidad del agua (PNUMA, 2015a). Pese a las disparidades de conocimientos existentes, se ha desarrollado una amplia gama de soluciones técnicas y, por lo general, se trata de elegir e implementar las tecnologías adecuadas en el lugar correcto, de forma de optimizar la combinación más adecuada de infraestructura gris y ecológica.

Los países en desarrollo pueden acceder a tecnologías adecuadas, eficaces y de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales (ver Capítulo 15). Los tratamientos preliminar, primario y secundario pueden ser procesos simples que producen efluentes de la calidad requerida para diversos usos, con bajos costos de inversión y, sobre todo, bajos costos de operación y mantenimiento (Jiménez-Cisneros, 2011; Libhaber y Orozco-Jaramillo, 2012), en especial cuando se combinan con una infraestructura ecológica bien gestionada (ver Capítulo 8). Debido a que los procesos biológicos dan mejores resultados en entornos con temperaturas más altas, muchos de estos procesos resultan muy adecuados para países con climas cálidos, entre los que se encuentran la mayoría de los países en desarrollo (Qadir *et al.*, 2015b). Su objetivo será ir incrementando los niveles de tratamiento de aguas residuales desde el tratamiento preliminar, primario y secundario hasta los procesos de tratamiento terciario, y así generar efluentes cada vez de mejor calidad.

También es importante elegir el tipo de sistema de tratamiento de aguas residuales más adecuado. Si bien no existe una solución que se adapte a todos los casos, los sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales (DEWATS, por sus siglas en inglés) de bajo costo están cobrando mayor aceptación y utilizándose cada vez más, tanto en países desarrollados como en desarrollo (ver Capítulo 15). En el caso particular de los países en desarrollo, se ha indicado que las plantas centralizadas de tratamiento con tecnología de punta son una inversión riesgosa debido a la insuficiencia de financiamiento y capacidad institucional. Las tecnologías adecuadas que utilizan procesos simples, con costos de capital y de operación y mantenimiento más bajos, suelen ser más sostenibles y pueden producir efluentes con niveles de calidad adecuados para diversos usos, incluida la agricultura (Libhaber y Orozco-Jaramillo, 2012).



Se ha estimado que los costos de inversión de estas instalaciones de tratamiento simples o «adecuadas» solo representan entre un 20% y un 50% de los de las plantas de tratamiento convencionales, y que los costos operativos y de mantenimiento son incluso más bajos (entre un 5% y un 25% respecto a las plantas de tratamiento de lodos activados convencionales) (Wichelns *et al.*, 2015).

Si bien los países desarrollados en general cuentan con sistemas de gestión de aguas residuales avanzados, también enfrentan diversos problemas, como infraestructuras envejecidas, que con frecuencia no resultan apropiadas para las cargas de aguas residuales que se manejan en la actualidad (ver Capítulo 12), la reducción de personal (WWAP, 2016) y la creciente preocupación respecto de los contaminantes emergentes (ver Capítulos 4 y 17).

El concepto de «tratamiento adecuado a los fines» es otra consideración crítica. Debido a que es poco probable que la capacidad para el tratamiento avanzado de aguas residuales registre un aumento sustancial en un futuro cercano en los países en desarrollo, será importante desarrollar y adoptar tecnologías personalizadas con las que se puedan tratar las aguas residuales hasta alcanzar los niveles adecuados para determinados usos finales. La agricultura de regadío históricamente ha sido el uso más común de las aguas residuales parcialmente tratadas y unos 50 países han informado de su uso con esta finalidad, sobre el 10% del total de tierras de regadío (FAO, 2010). Las aguas residuales tratadas también pueden tener otros usos –desde paisajismo urbano hasta agua potable– y cada uno requiere distintos niveles de tratamiento. Es necesario integrar estos posibles usos en los sistemas de gestión de aguas residuales (mediante un tratamiento «adecuado a los fines») para aprovechar el enorme potencial de reutilización del agua (ver Capítulo 16).

Por último, las tecnologías para la recuperación de subproductos útiles de las aguas residuales, como energía (calor y biogás) y nutrientes, han evolucionado con rapidez y son cada vez más rentables, especialmente cuando se consideran dentro del ciclo global de gestión de aguas residuales (ver Capítulo 16). Por ejemplo, la energía térmica, química e hidráulica contenidas en las aguas residuales pueden recuperarse en forma de biogás, calefacción/enfriamiento o electricidad a través de procesos *in situ* o *ex situ* (Meda *et al.*, 2012), y existen varias tecnologías para la recuperación de energía *in situ* mediante procesos de tratamiento de lodos/biosólidos integrados en las plantas de tratamiento de aguas residuales. También se dispone de nuevos métodos para la recuperación de fósforo de las aguas residuales y la transformación de lodos fecales en fertilizantes a bajo costo. Las innovaciones tecnológicas en estas áreas serán fundamentales para avanzar en la

reutilización y recuperación de recursos, especialmente en los países en desarrollo y los mercados emergentes (Hanjra *et al.*, 2015a).

## 18.2 Marcos jurídicos e institucionales

Uno de los principales motivos por los que las aguas residuales han sido dejadas de lado durante tanto tiempo es que a menudo carecen de una sede institucional, y muchas empresas públicas de agua reformadas no han considerado la verdadera dimensión del valor de invertir en una infraestructura de aguas residuales (ONU-Agua, 2015a). Mejorar la gestión de las aguas residuales, por lo tanto, requiere la alineación de diversos intereses de forma que las personas y las organizaciones puedan colaborar para satisfacer necesidades básicas comunes, al tiempo que se maximizan los beneficios en las distintas etapas de la gestión de estas aguas (ver Capítulo 3).

Los marcos regulatorios deben ser adecuados al tiempo y al lugar, y reconocer la diversidad de economías y culturas, así como las necesidades muy diferentes que tienen los distintos sectores de la sociedad (PNUMA, 2015b). Si bien prácticamente en todos lados existe la necesidad de elevar el nivel de la calidad del agua, para progresar será necesario implementar un método flexible y progresivo. Una regulación adecuada requiere tiempo y es costosa, pero si se toman en cuenta los costos y beneficios a lo largo de toda la vida útil de la gestión de aguas residuales, los ahorros para la sociedad, el ambiente y la economía pueden ser sustanciales (PNUMA, 2015a). Para lograr un marco regulatorio eficaz es indispensable que la autoridad a cargo posea los conocimientos técnicos y de gestión adecuados, que actúe en forma independiente y que cuente con las facultades necesarias para ejecutar normas y lineamientos. La transparencia y la disponibilidad de acceso a la información fomentan el cumplimiento, ya que generan confianza en los usuarios con respecto a los procesos de aplicación y fiscalización (ONU-Agua, 2015b).

La gestión de aguas residuales es un tema de interés mundial, puesto que los problemas de contaminación no conocen fronteras. La importancia de la colaboración internacional queda demostrada en el caso del Danubio y el Mar Negro (ver Cuadro 3.1). Una coordinación nacional e internacional adecuada puede ayudar a garantizar que los recursos financieros limitados se empleen de la mejor manera.

No obstante, las medidas para enfrentar la contaminación del agua –mediante procesos de producción y consumo más limpios y tratamientos más eficaces e integrales– casi siempre se adoptan a

nivel local. Por lo tanto, la normativa local, la consulta a los interesados y la motivación para el cumplimiento siguen siendo elementos fundamentales para cualquier estrategia de gestión de aguas residuales sostenible.

Las políticas y los instrumentos regulatorios también se adoptan a nivel local y es necesario que puedan adaptarse a circunstancias de todo tipo. Cuando las desigualdades económicas son marcadas, por ejemplo, es poco probable que una estrategia centralizada de suministro de servicios sirva para todos los usuarios. Por lo tanto, es importante que el apoyo político, institucional y financiero se distribuya de manera equitativa, ya que las iniciativas «de abajo arriba» y el suministro local (descentralizado) a pequeña escala de servicios de gestión de aguas residuales también necesitan apoyo y entornos propicios para prosperar.

Asimismo, el modo de tratar y utilizar las aguas residuales debe elegirse de acuerdo con las circunstancias locales, tomando en cuenta las necesidades del ecosistema, los usos superpuestos del agua y las prácticas culturalmente aceptables. Dentro de esos parámetros, el agua puede y debe reutilizarse de la manera más intensiva posible como respuesta a la escasez de este recurso y a la creciente demanda de alimentos y energía. Cuando se requieren efluentes de alta calidad, la aprobación de leyes de reutilización del agua (o los cambios en las que ya existen) ha demostrado ser el principal «factor de empuje» que influyó en el cambio de tecnología en las plantas de tratamiento, básicamente obligándolas a implementar sistemas de tratamiento avanzados (DEMOWARE, 2016).

En muchos países se necesitarán nuevas leyes y arreglos institucionales para adaptar y regular la utilización de aguas residuales para diversos usos, que van desde el riego y el reciclaje de aguas industriales hasta la recarga de acuíferos y la mejora de los servicios del ecosistema. Como fuente adicional de agua, las aguas residuales tratadas pueden integrarse a los sistemas nacionales de suministro de agua (Hanjra *et al.*, 2015b).

También es necesario contar con nuevas disposiciones sobre la recuperación de subproductos de aguas residuales. Aunque los conocimientos técnicos están disponibles (ver Capítulo 16), con frecuencia hay escasa o nula legislación sobre los niveles de calidad de estos productos, lo que crea incertidumbre en el mercado y puede desalentar las inversiones. Se podrían utilizar incentivos económicos o legales para estimular el mercado de estos productos (por ejemplo, la mezcla obligatoria de fosfatos recuperados en fertilizantes artificiales). La aplicación de criterios de calidad al producto final, en lugar de a los insumos, también podría ayudar a promover la aceptación por parte del mercado de materiales de alta calidad procedentes de aguas residuales municipales y estimular más el

reciclaje de nutrientes y otros subproductos de las aguas residuales como componente fundamental de la economía circular.

La gestión de aguas residuales y la consiguiente protección de los recursos hídricos es un área en la que continuamente se desafía la capacidad de las sociedades de actuar en beneficio de aquellos que no tienen voz política: los vulnerables, las próximas generaciones y los ecosistemas. La imparcialidad de las autoridades públicas es fundamental cuando se requieren permisos y cumplir con las normas. La transparencia y la participación pública en la formulación de políticas pueden servir para garantizar soluciones sensatas, aceptables y sostenibles. Una visión común y un acuerdo generalizado respecto de los objetivos de la gestión de aguas residuales constituyen las mejores garantías de una implementación exitosa.

### 18.3 Posibilidades de financiamiento

La gestión de aguas residuales y el saneamiento se consideran generalmente actividades costosas y con un uso intensivo de capital (ver Sección 3.3). Esto es así sobre todo en los grandes sistemas centralizados, que exigen el desembolso de grandes sumas de capital por adelantado. Una vez completados, estos sistemas rara vez generan ingresos importantes y, por lo tanto, no pueden cubrir sus propios costos de operación y mantenimiento a mediano y largo plazo, lo que lleva a un rápido deterioro. En consecuencia, no resulta sorprendente que la inversión en la gestión de aguas residuales y la calidad del agua no se haya considerado como prioridad política en muchas economías desarrolladas y en desarrollo. Además, el problema se agrava por la escasez crónica de fondos, que no permite invertir en el desarrollo de recursos institucionales y humanos (ver Capítulo 17). Es fundamental coordinar las inversiones y el financiamiento para mejorar el desempeño general de los sistemas de gestión de aguas residuales (OMS, 2015). La adopción de un enfoque del financiamiento basado en los resultados también puede ayudar a promover el diseño óptimo y la implementación y operación eficaces de estos sistemas (WWC/OCDE, 2015).

Los sistemas DEWATS pueden utilizarse para compensar algunos de los problemas económicos causados por los sistemas centralizados (ver Sección 15.4). De uso más habitual en las comunidades más pequeñas, estos sistemas se emplean para tratar volúmenes más reducidos de aguas residuales y, con frecuencia, aplicar tecnologías de bajo costo (por ejemplo, estanques de estabilización, filtros anaeróbicos y humedales artificiales). Cuando se diseñan e implementan de forma adecuada, estas tecnologías de bajo costo pueden

brindar resultados satisfactorios en lo que respecta a la calidad del efluente. No obstante, si bien las inversiones iniciales para estas tecnologías son bajas, requieren un nivel apropiado de operación y mantenimiento para evitar una falla del sistema. Por lo tanto, es necesario considerar los recursos financieros y las inversiones en recursos humanos al inicio de la etapa de diseño para garantizar el funcionamiento adecuado de los sistemas descentralizados a largo plazo.

Con el propósito de maximizar los beneficios netos de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, también es importante examinar sus costos y beneficios sociales, ambientales y financieros a nivel local y aguas abajo, y comparar estos resultados con la segunda mejor alternativa, incluidos los costos de la inacción a más largo plazo. De hecho, la gran mayoría de las evidencias disponibles indican que los costos de una inversión inadecuada en gestión de aguas residuales son mucho mayores que en términos del dinero invertido, especialmente si se toman en cuenta los efectos negativos, directos e indirectos, sobre la salud, el desarrollo socioeconómico y el medio ambiente (ver Sección 13.5) (ONU-Agua, 2015a).

La utilización de aguas residuales puede sumar un nuevo flujo de ingresos al tratamiento de estas aguas, especialmente en aquellas situaciones donde la escasez de agua es recurrente o crónica. Se han aplicado distintos modelos de negocios en los cuales la recuperación de costos y valor representan una notoria ventaja desde el punto de vista económico (ver Sección 16.3). Sin embargo, los ingresos derivados de la venta de aguas residuales tratadas por lo general no son suficientes para cubrir los costos operativos y de mantenimiento de la planta de tratamiento. Cuando diferentes entidades son responsables de distintas partes de la cadena de servicio de saneamiento es necesario acordar claramente mecanismos de participación en los costos, riesgos y beneficios (por ejemplo, asociaciones público-privadas u otros sistemas de participación) si el valor creado mediante la reutilización ayudará a mantener dicha cadena de servicio (Wichelns *et al.*, 2015). En el contexto más amplio de la gestión de recursos hídricos, una infraestructura hídrica multipropósito puede ofrecer ventajas adicionales para el tratamiento mejorado de las aguas residuales, pero esto suele ser más difícil de financiar que los proyectos de propósito único (WWC/OCDE, 2015).

El agua potable es todavía un recurso infravalorado, incluso aunque se encuentre disponible desde el grifo, y con precios menores a los que deberían fijarse si se considera el costo real del servicio. Las aguas residuales tratadas deberán tener un precio menor que el del agua potable para que la ciudadanía las acepte. En esos casos, es más importante promover la reutilización del agua que recuperar los gastos.

No obstante, incluso cuando los ingresos derivados de la utilización de aguas residuales no cubren los costos adicionales, las inversiones en reutilización de agua generalmente se comparan con los costos de represas, desalinización y transferencias entre cuencas, entre otras opciones que aumentan la disponibilidad hídrica (Wichelns *et al.*, 2015).

La recuperación de nutrientes (principalmente fósforo y nitrógeno) y energía puede agregar nuevas fuentes de ingreso importantes que permitirían una mejora en materia de recuperación de costos. En los últimos años han surgido varias innovaciones tecnológicas que permiten incrementar la eficacia en la recuperación de nutrientes y energía (ver Sección 16.2). Algunos estudios sobre la recuperación de múltiples recursos muestran que es posible obtener más beneficios económicos cuando la trayectoria de reutilización de recursos se extiende no solo a la energía, sino que también llega a los créditos de carbono (Hanjra *et al.*, 2015b). El biogás recuperado se ha utilizado con éxito como fuente de energía para la propia planta de tratamiento, en la producción combinada (cogeneración) de electricidad y calor, e incluso como combustible para el transporte (WWAP, 2014). La reintroducción del fósforo y el nitrógeno recuperados como fertilizantes reduciría el precio de estos productos y ayudaría a disminuir el costo global de los alimentos (Sengupta *et al.*, 2015). También se dispone de nuevos métodos para la recuperación de fósforo de las aguas residuales y la transformación de lodos fecales en fertilizantes peletizados a bajo costo (Hanjra *et al.*, 2015a). Además, la recuperación controlada de fósforo –un recurso no renovable, indispensable como fertilizante en la agricultura moderna– puede traer más ventajas económicas que el tratamiento químico necesario para eliminar la precipitación no deseada de fósforo en la planta de tratamiento. La recuperación de fósforo probablemente se vuelva incluso más competitiva en función de los costos con el alza del costo de extracción del fosfato mineral, que es limitado (Wichelns *et al.*, 2015). Además de los beneficios económicos tangibles, la recuperación de nitrógeno mejorada también reduciría el nitrógeno liberado a la atmósfera (Sengupta *et al.*, 2015). Si bien aún se encuentran en las primeras etapas de desarrollo, también están surgiendo tecnologías innovadoras para recuperar otros minerales valiosos, como la recuperación de metales mediante procesos bioelectroquímicos (Wang y Ren, 2014).

En suma, el financiamiento de la utilización y el tratamiento de las aguas residuales se vuelve más favorable cuando los costos de tratamiento son bajos y la propuesta de valor va más allá de la recuperación de agua de las aguas residuales e incluye la recuperación de nutrientes, energía y otros subproductos útiles. En vista de estas posibles sinergias en el ciclo de gestión de aguas residuales, se ha demostrado que las asociaciones

público-privadas, basadas en la recuperación de gastos en todo el ciclo de gestión de las aguas residuales, pueden ayudar a incentivar e incluso cofinanciar al sector de saneamiento/aguas residuales, al tiempo que promueven los emprendimientos empresariales a pequeña y mediana escala (Murray *et al.*, 2011). La existencia de usuarios finales que puedan absorber la oferta de productos y estén dispuestos y en condiciones de pagar por ellos (*i. e.* el mercado) es la condición más importante para la implementación de cualquier sistema de reutilización del agua y utilización y recuperación de subproductos (Rao *et al.*, 2015).

## 18.4 Desarrollo de conocimiento y creación de capacidades

La disponibilidad de información y datos en materia de generación, tratamiento y utilización de aguas residuales será fundamental para los formuladores de políticas, investigadores, médicos e instituciones públicas con el fin de elaborar planes de acción nacionales y locales que protejan el medio ambiente y garanticen la utilización segura y productiva de las aguas residuales. Sin embargo, nos encontramos ante una falta constante de información sobre casi todos los aspectos en materia de calidad del agua y gestión de aguas residuales, especialmente en los países en desarrollo (ONU-Agua, 2015a). Cuando se encuentran disponibles, los datos de los países sobre generación, tratamiento y utilización de aguas residuales suelen estar incompletos o desactualizados (Sato *et al.*, 2013), de modo que las comparaciones directas entre países pueden hacerse difíciles o imposibles (ver Sección 4.4). Cabe esperar que la supervisión necesaria para medir el progreso hacia el logro de la meta 6.3 del ODS 6 promueva ciertos avances en la vigilancia y presentación de informes a nivel nacional (ver Capítulo 2).

Conocer los volúmenes y, lo que quizás es más importante, los componentes de las aguas residuales es necesario para proteger la seguridad y la salud humana y ambiental. Aquí también hay mucho por mejorar a nivel de la cuenca y local para supervisar la eficacia de los sistemas regulatorios y respaldar el cumplimiento de las leyes ambientales.

Para mejorar la gestión de aguas residuales también será indispensable poder contar con los recursos humanos adecuados (ver Capítulo 17). Por lo tanto, es necesario contar con un desarrollo profesional continuo a todo nivel para mantenerse al día con las tecnologías y las necesidades de la sociedad que evolucionan día a día.

Siempre se requiere contar con personal adecuadamente capacitado, ya sea que se trate de sistemas centralizados de gestión de aguas residuales a gran escala o de sistemas *in situ* de menor porte.

Por ejemplo, la operación y el mantenimiento de muchos sistemas *in situ* con frecuencia se han dejado en manos de los propietarios o las autoridades locales, lo que ha producido fallas en el sistema debido a la falta de mantenimiento o a un mantenimiento inadecuado (ONU-Agua, 2015a). Según la International Water Association, muchas economías en desarrollo no cuentan con suficientes profesionales especializados en el tema del agua y carecen de los conocimientos, la experiencia y las aptitudes técnicas necesarias para satisfacer la creciente demanda de agua y servicios de saneamiento (IWA, 2014, p. 3). La inversión en una capacitación adecuada también marca la diferencia entre tener buenas políticas regulatorias y realmente controlar los beneficios relacionados con la calidad y el acopio de agua (ONU-Agua, 2015b). Como se establece en el Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2016, “existen relaciones muy importantes y lazos esenciales entre la gestión del agua y las oportunidades de empleo en los países a todos los niveles de desarrollo. [...] El agua desempeña un papel clave en la generación y el mantenimiento de empleos directos en una amplia gama de sectores y liberando el potencial de creación de empleo indirecto a través de su efecto multiplicador” (WWAP, 2016, pp. 7 y 126).

Las capacidades organizativas e institucionales en el sector de la gestión de aguas residuales también resultan inadecuadas, sobre todo en los países en desarrollo. Debido a que la gestión de aguas residuales con frecuencia no tiene una «sede institucional», los desafíos que implica la alineación de diversos intereses y el aumento de la colaboración para alcanzar objetivos básicos comunes exigen la presencia de instituciones sólidas, eficaces y transparentes, capaces de fijar pautas y hacer cumplir las normas.

Por último, la investigación y el desarrollo son necesarios para adaptar las tecnologías innovadoras a los contextos locales, tanto en términos de sistemas mejorados de tratamiento de aguas residuales de bajo costo (incluida la separación de flujos de residuos para adaptar el tratamiento y el siguiente uso previsto) como de aumento de la eficacia en el uso de aguas residuales tratadas y subproductos recuperados (ver Capítulo 17). También es cada vez más importante mejorar los procesos para la recuperación de metales y contaminantes emergentes, que por lo general requieren tecnologías de gran capital y gran capacidad. Es necesario realizar más investigaciones sobre los efectos y la posible eliminación de contaminantes emergentes como las microperlas (ver Cuadro 4.2) y los productos químicos farmacéuticos potencialmente dañinos como los disruptores endocrinos y los compuestos que aumentan la resistencia a los antimicrobianos.



## 18.5 Reducción de los riesgos para la salud humana y el medio ambiente

El vertido de aguas residuales no tratadas puede tener efectos sumamente nocivos para la salud humana y el medio ambiente, incluidos brotes de enfermedades transmitidas por vectores, el agua y los alimentos, así como la contaminación y pérdida de la diversidad biológica y servicios de los ecosistemas. Desafortunadamente, pese a los crecientes esfuerzos por incrementar los niveles de tratamiento y cobertura, gran parte de las aguas residuales generadas en las ciudades y áreas rurales permanecerán sin tratar o solo recibirán un tratamiento parcial durante los próximos años. Como consecuencia, es probable que continúe el uso, en gran parte no intencional e informal, de aguas residuales sin tratar o parcialmente tratadas para riego y otros usos. La gestión de riesgos es, por lo tanto, fundamental para aumentar la seguridad en el uso de aguas residuales.

La opción más apropiada para la gestión de riesgos en relación con el uso de aguas residuales en un determinado contexto variará en virtud del uso final previsto, la aceptación sociocultural y distintos factores económicos, institucionales, biofísicos y tecnológicos (Balkema *et al.*, 2002). En aquellos casos donde se considere que la exposición humana es más factible (como por alimentos o contacto directo), será necesario contar con medidas de gestión más estrictas. Por ejemplo, se aplicarán medidas de gestión menos estrictas en los casos en que las aguas residuales se utilicen para riego de cultivos no alimentarios en comparación con el riego en escuelas o parques públicos, donde es más probable que haya un contacto directo con los contaminantes expuestos. Cuando las aguas residuales se emplean para incrementar el suministro de agua potable, las medidas deben ser aún más estrictas (Keraita *et al.*, 2015). En las *Guías de la OMS para el Uso Seguro de Aguas Residuales, Aguas Grises y Excretas en la Agricultura* (ver Sección 7.2.2) se propone un método de barreras múltiples en el cual el tratamiento de las aguas residuales es solo una de las muchas opciones para proteger la salud pública (OMS, 2006a). Cuando se utilicen aguas residuales sin tratar para regar cultivos comestibles, deben establecerse barreras en las fuentes de aguas residuales, en las granjas, los mercados y a nivel del consumidor a fin de brindar protección en distintos puntos de la cadena de producción.

## 18.6 Promoción de la aprobación social

Aunque los proyectos de utilización de aguas residuales estén bien diseñados desde el punto de vista técnico, parezcan económicamente viables y

tengan incorporadas medidas de protección sanitaria adecuadas, los esquemas de reutilización del agua pueden fallar si los encargados de la planificación no enfrentan de manera adecuada la dinámica de la aceptación social (ver Secciones 3.4 y 16.6). La aceptación general de las aguas residuales (seguras) varía según la etapa de desarrollo en que se encuentra cada sociedad y puede ser un proceso dinámico, lo que hace que los estudios de factibilidad social, la comprometida participación de los grupos de usuarios y el fomento de la confianza sean componentes fundamentales de un programa de utilización de aguas residuales exitoso (Drechsel *et al.*, 2015b). Mientras que la escasez de agua puede alentar una percepción positiva de la utilización de aguas residuales, otros factores incidirán en su aceptación pública, entre ellos, la disponibilidad de fuentes de agua alternativas, los niveles de educación, las percepciones de riesgos sanitarios, las cuestiones religiosas y los medios y mensajes utilizados para compartir conocimientos y comunicarse. Superar las percepciones públicas negativas es algo especialmente importante en el caso del agua potable (*i. e.* reutilización del agua potable). Si bien estos sistemas suelen presentar niveles más elevados de calidad del agua que otras fuentes hídricas, se necesitan grandes campañas informativas y la participación del público para que las personas confíen lo suficiente en el sistema y puedan superar el llamado «factor de asco».

Para obtener la aprobación pública y maximizar los beneficios del uso de aguas residuales y, al mismo tiempo reducir los efectos negativos, será necesario evaluar, gestionar, dar seguimiento e informar en forma constante sobre los riesgos para la salud de la reutilización del agua (ONU-Agua, 2015a). En países de ingresos bajos a medios con una limitada capacidad de tratamiento, donde las aguas residuales sin tratar o parcialmente tratadas se vierten en masas de agua y después se captan y utilizan para riego informal, el desafío cultural y social no es la introducción de la reutilización del agua sino la prevención del uso no intencional/inseguro de aguas residuales sin tratar. En esos casos, se necesita apoyo para efectuar la transición a la reutilización segura de aguas residuales (Drechsel *et al.*, 2015b).

## 18.7 Coda

En un mundo donde la demanda de agua dulce está en constante aumento y los escasos recursos hídricos se ven cada vez más exigidos por la captación excesiva, la contaminación y el cambio climático, sería sencillamente impensable no aprovechar las oportunidades que brinda una mejor gestión de las aguas residuales.

# REFERENCIAS

- Aagaard-Hansen, J. y Chaignat, C. L. 2010. Neglected tropical diseases: Equity and social determinants. E. Blas and A. S. Kurup (eds.). *Equity, Social Determinants and Public Health Programmes*. Ginebra, Suiza, Organización Mundial de la Salud (OMS).
- Abiye, T. A.; Sulieman, H. y Ayalew, M. 2009. Use of treated wastewater for managed aquifer recharge in highly populated urban centers: A case study in Addis Ababa, Ethiopia. *Environmental Geology*, Vol. 58, Nº 1, pp. 55-59. Doi: 10.1007/s00254-008-1490-y
- ACNUR (Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Refugiados). 2016. *Jordan: UNHCR Operational Update - August 2016*. reliefweb.int/report/jordan/jordan-unhcr-operational-update-august-2016
- AEMA (Agencia Europea de Medio Ambiente). 2013. Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas. Sitio web de la AEMA. [www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/urban-waste-water-treatment/urban-waste-water-treatment-assessment-3](http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/urban-waste-water-treatment/urban-waste-water-treatment-assessment-3)
- \_\_\_\_\_. 2016. SOER 2015 - *El medio ambiente en Europa: Estado y perspectivas 2015*. Copenage, AEMA. [www.eea.europa.eu/soer](http://www.eea.europa.eu/soer)
- \_\_\_\_\_. s.f. *Registro europeo de emisiones y transferencia de contaminantes*. [prtr.ec.europa.eu/#/home](http://prtr.ec.europa.eu/#/home)
- AGNU (Asamblea General de las Naciones Unidas). 2010. *Resolución 64/292. El derecho humano al agua y el saneamiento*. Nueva York, AGNU.
- \_\_\_\_\_. 2014. *Informe del Relator Especial sobre el derecho humano al agua potable y al saneamiento, Catarina de Albuquerque*. Vigésimo séptimo período de sesiones del Consejo de Derechos Humanos. AGNU A/HRC/27/55. [documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N13/418/25/PDF/N1341825.pdf?OpenElement](http://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N13/418/25/PDF/N1341825.pdf?OpenElement)
- \_\_\_\_\_. 2015a. *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Resolución aprobada por la Asamblea General el 25 de setiembre de 2015. A/70/L.1. Nueva York, AGNU. [www.un.org/ga/search/view\\_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E](http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E)
- \_\_\_\_\_. 2015b. *Promoción y protección de los derechos humanos: cuestiones de derechos humanos, incluidos otros medios de mejorar el goce efectivo de los derechos humanos y las libertades fundamentales*. Septuagésimo Período de sesiones de la Tercera Comisión. A/C.3/70/L.55/Rev.1 2015. AGNU.
- Ajiboye, A. J.; Olaniyi, A. O. y Adegbite, B. A. 2012. A review of the challenges of sustainable water resources management in Nigeria. *International Journal of Life Sciences Biotechnology and Pharma Research*, Vol. 1, Nº 2, pp. 1-9.
- Akcil, A. y Koldas, S. 2006. Acid Mine Drainage (AMD): Causes, treatment and case studies. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 14, Nº 12-13, pp. 1139-1145. [dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.09.006](http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.09.006)
- AKDN (Red de Desarrollo Aga Khan). s.f. *Aga Khan Award for Architecture, Wadi Hanifa Wetlands*. Sitio web AKDN. [www.akdn.org/architecture/project.asp?id=2258](http://www.akdn.org/architecture/project.asp?id=2258)
- Alcott, B. 2005. Jevon's Paradox. *Ecological Economics*, Volumen 54, Nº 1, pp. 9-21.
- Ammerman, A. J. 1990. On the origins of the Forum Romanum. *American Journal of Archaeology*, Vol. 94, Nº 4, pp. 627-645.
- Amoah, P.; Keraita, B.; Akple, M.; Drechsel, P.; Abaidoo, R. C. y Konradsen, F. 2011. *Low-cost Options for Reducing Consumer Health Risks from Farm to Fork where Crops are Irrigated with Polluted Water in West Africa*. IWMI Research Report Nº 141. Colombo, Instituto Internacional de Gestión de Recursos Hídricos (IWMI). [www.iwmi.cgiar.org/Publications/IWMI\\_Research\\_Reports/PDF/PUB141/RR141.pdf](http://www.iwmi.cgiar.org/Publications/IWMI_Research_Reports/PDF/PUB141/RR141.pdf)
- AMWC (Consejo Ministerial Árabe sobre los recursos hídricos). 2011. *Arab Strategy for Water Security in the Arab Region to Meet the Challenges and Future Needs for Sustainable Development 2010-2030*. Cairo, AMWC. [www.accwam.org/Files/Arab\\_Strategy\\_for\\_Water\\_Security\\_in\\_the\\_Arab\\_Region\\_to\\_meet\\_the\\_Challenges\\_and\\_Future\\_Needs\\_for\\_Sustainable\\_Development\\_-\\_2010-2030.pdf](http://www.accwam.org/Files/Arab_Strategy_for_Water_Security_in_the_Arab_Region_to_meet_the_Challenges_and_Future_Needs_for_Sustainable_Development_-_2010-2030.pdf)
- Andersson, K.; Rosemarin, A.; Lamizana, B.; Kvarnström, E.; McConville, J.; Seidu, R.; Dickin, S. y Trimmer, C. 2016. *Sanitation, Wastewater Management and Sustainability: From Waste Disposal to Resource Recovery*. Nairobi/Estocolmo, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente/Instituto de Medio Ambiente de Estocolmo (PNUMA/SEI). [www.sei-international.org/mediamanager/documents/Publications/NEW/SEI-UNEP-2016-SanWWM&Sustainability.pdf](http://www.sei-international.org/mediamanager/documents/Publications/NEW/SEI-UNEP-2016-SanWWM&Sustainability.pdf)

- AQUASTAT. 2016. *Water Withdrawal by Sector*, circa 2010. Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). [www.fao.org/nr/water/aquastat/tables/WorldData-Withdrawal\\_eng.pdf](http://www.fao.org/nr/water/aquastat/tables/WorldData-Withdrawal_eng.pdf)
- \_\_\_\_\_. 2014. *Area Equipped for Irrigation*. Infographic. Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). [www.fao.org/nr/water/aquastat/infographics/Irrigation\\_eng.pdf](http://www.fao.org/nr/water/aquastat/infographics/Irrigation_eng.pdf)
- \_\_\_\_\_. s.f.a. *Municipal Wastewater*. AQUASTAT database. Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). [www.fao.org/nr/water/aquastat/wastewater/index.stm](http://www.fao.org/nr/water/aquastat/wastewater/index.stm)
- \_\_\_\_\_. s.f.b. AQUASTAT database. Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). [www.fao.org/nr/water/aquastat/main/index.stm](http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/index.stm)
- Armitage, N.; Vice, M.; Fisher-Jeffes, L.; Winter, K.; Spiegel, A. y Dunstan, J. 2013. *Alternative Technology for Stormwater Management: The South African Guidelines for Sustainable Drainage Systems*. WRC Report N° TT 558/13. Pretoria/Ciudad del Cabo, Comisión de investigaciones hídricas (WRC)/ Universidad de Ciudad del Cabo. [www.wrc.org.za/Knowledge%20Hub%20Documents/Research%20Reports/TT%20558-13.pdf](http://www.wrc.org.za/Knowledge%20Hub%20Documents/Research%20Reports/TT%20558-13.pdf)
- Asano, T. y Levine, A. D. 1998. *Wastewater Reclamation, Recycling, and Reuse: An Introduction*. T. Asano (ed.), *Wastewater Reclamation and Reuse*. CRC Press.
- Asano, T.; Maeda, M. y Takaki, M. 1996. Wastewater reclamation and reuse in Japan: Overview and implementation examples. *Water Science and Technology*, Vol. 34, N° 11, pp. 219-226.
- ATSE (Academia Australiana de Ciencias Tecnológicas e Ingeniería). 2013. *Drinking Water through Recycling: The Benefits and Costs of Supplying Direct to the Distribution System*. Melbourne, Australia, ATSE. [www.atse.org.au/Documents/reports/drinking-water-through-recycling-full-report.pdf](http://www.atse.org.au/Documents/reports/drinking-water-through-recycling-full-report.pdf)
- Badr, F. 2016. *Assessment of Wastewater Services and Sludge in Egypt*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). [www.cairoclimatetalks.net/sites/default/files/assessment%20of%20wastewater%20services%20in%20Egypt1%20\(1\).pdf](http://www.cairoclimatetalks.net/sites/default/files/assessment%20of%20wastewater%20services%20in%20Egypt1%20(1).pdf)
- Bahri, A.; Drechsel, P. y Brissaud, F. 2008. *Water Reuse in Africa: Challenges and Opportunities*. Ponencia presentada en la Primera Semana Africana del Agua: Accelerating Water Security for Socio-Economic Development of Africa, Túnez, 26-28 Marzo 2008. [publications.iwmi.org/pdf/H041872.pdf](http://publications.iwmi.org/pdf/H041872.pdf)
- Balkema, J. A.; Preisig, H. A.; Otterpohl, R. y Lambert, F. J. D. 2002. Indicators for the sustainability assessment of wastewater treatment systems. *Urban Water*, Vol. 4, pp. 153-161.
- Ballestero, M.; Arroyo, V. y Mejía, A. 2015. *Documento Temático: Agua Potable y Saneamiento para Todos*. VII Foro Mundial del Agua - Proceso Regional.
- Banco Mundial. 2012. *The Future of Water in African Cities: Why Waste Water?* Washington, DC, Banco Mundial.
- \_\_\_\_\_. s.f. *World Development Indicators*. Sitio web del Banco Mundial: [data.worldbank.org/data-catalog/world-development-indicators](http://data.worldbank.org/data-catalog/world-development-indicators)
- Bartone, C. R.; Bernstein, J.; Leitmann, J. y Eigen, J. 1994. *Toward Environmental Strategies for Cities: Policy Considerations for Urban Environmental Management in Developing Countries*. Urban Management Programme Policy Paper N° 18. Washington, DC, Banco Mundial. [documents.worldbank.org/curated/en/826481468739496129/pdf/multi-page.pdf](http://documents.worldbank.org/curated/en/826481468739496129/pdf/multi-page.pdf)
- BASeD (Banco Asiático de Desarrollo). 2013. *Asian Water Development Outlook 2013: Measuring Water Security in Asia and the Pacific*. Mandaluyong, Filipinas, BASeD. [www.adb.org/publications/asian-water-development-outlook-2013](http://www.adb.org/publications/asian-water-development-outlook-2013)
- Bauer, H. 1993. Cloaca Maxima. E. M. Steinby (ed.), *Lexicon Topographicum Urbis Romae*. Roma, Quasar, pp. 288-290.
- Bernhardt, B. y Massard-Guibaud, G. (eds.). 2002. *Le démon moderne. La pollution dans les sociétés urbaines et industrielles*. Clermont-Ferrand, Francia, Presses universitaires Blaise Pascal. Support Livre broché (en francés).
- BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe). s.f. *TC Lebanon: Protection of Jeita Spring*. Sitio web de BGR. [www.bgr.bund.de/EN/Themen/Wasser/Projekte/abgeschlossen/TZ/Lebanon/jeita\\_fb\\_en.html](http://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Wasser/Projekte/abgeschlossen/TZ/Lebanon/jeita_fb_en.html)
- Bianchi, E. 2014. *La Cloaca Maxima e i Sistemi Fognari di Roma dall'Antichità ad Oggi*. Roma, Palombi Editore (en italiano).
- Biggs, C.; Ryan, C.; Wiseman, J. y Larsen, K. 2009. *Distributed Water Systems: A Networked and Localized Approach for Sustainable Water Services - Business Intelligence and Policy Instruments*. Melbourne, Australia, Victorian Eco-innovation Lab (VEIL), University of Melbourne. [www.ecoinnovationlab.com/wp-content/attachments/234\\_Distributed-Water-Systems.VEIL\\_.pdf](http://www.ecoinnovationlab.com/wp-content/attachments/234_Distributed-Water-Systems.VEIL_.pdf)

- Blue Tech Research. s.f. *Turning Whey from Dairy Wastewater into Alcohol and Revenue*. Cork, Irlanda, Blue Tech Research. [www.bluetechresearch.com/news/turning-whey-from-dairy-wastewater-into-alcohol-and-revenue/](http://www.bluetechresearch.com/news/turning-whey-from-dairy-wastewater-into-alcohol-and-revenue/).
- Bolong, N.; Ismail, A. F.; Salim, M. R. y Matsuura, T. 2009. A review of the effects of emerging contaminants in wastewater and options for their removal. *Desalination*, Vol. 239, N° 1-3, pp. 229-246.
- Boufaroua, M.; Albalawneh, A. y Oweis, T. 2013. Assessing the efficiency of grey-water reuse at household level and its suitability for sustainable rural and human development. *British Journal of Applied Science and Technology*, Vol. 3, N° 4, pp. 962-972.
- Brdjanovic, D. (ed.). 2015. *Innovations for Water and Development*. Delft, Países Bajos, UNESCO-IHE. [www.unesco-ihe.org/sites/default/files/unesco-ihe\\_innovations\\_e\\_vs050315.pdf](http://www.unesco-ihe.org/sites/default/files/unesco-ihe_innovations_e_vs050315.pdf)
- Cairns-Smith, S.; Hill, H. y Nazarenko, E. 2014. *Urban Sanitation: Why a Portfolio of Solutions is Needed*. Documento de trabajo. The Boston Consulting Group. [www.bcg.com/documents/file178928.pdf](http://www.bcg.com/documents/file178928.pdf)
- Cakir, F. Y. y Stenstrom, M. K. 2005. Greenhouse gas production: A comparison between aerobic and anaerobic wastewater treatment technology. *Water Research*, Vol. 39, N° 17, pp. 4197-4203. [dx.doi.org/10.1016/j.watres.2005.07.042](https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.07.042)
- CE (Comisión Europea). 2016a. *CSI Guidance on Integrating Water Reuse in Water Planning Management*. Reunión del Grupo de Coordinación Estratégica, 2-3 mayo 2016. Bruselas, CE.
- \_\_\_\_\_. 2016b. *Octavo informe sobre el estado de ejecución y los programas para la aplicación de la Directiva 91/271/CEE del Consejo, sobre el tratamiento de aguas residuales*. Bruselas, CE. [eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52016DC0105](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52016DC0105)
- CEPE (Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa). 1992. *Convenio sobre la Protección y Utilización de los Cursos de Agua Transfronterizos y de los Lagos Internacionales*. Helsinki, 17 de marzo de 1992. [www.unece.org/fileadmin/DAM/env/water/pdf/watercon.pdf](http://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/water/pdf/watercon.pdf)
- \_\_\_\_\_. 2013. *Guide to Implementing the Water Convention*. Nueva York/Ginebra, Naciones Unidas. [www.unece.org/env/water/publications/ece\\_mp\\_wat\\_39.html](http://www.unece.org/env/water/publications/ece_mp_wat_39.html).
- CEPE/OCDE (Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa/Organización de la Cooperación y Desarrollo Económicos). 2014. *Integrated Water Resources Management in Eastern Europe, the Caucasus and Central Asia. European Union Water Initiative National Policy Dialogues Progress Report 2013*. Nueva York/Ginebra, Naciones Unidas. [www.unece.org/index.php?id=35306](http://www.unece.org/index.php?id=35306)
- CEPE/OMS (Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa/Organización Mundial de la Salud). 1999.
- Protocolo sobre el agua y la salud al Convenio de 1992 sobre la protección y utilización de los cursos de agua transfronterizos y de los lagos internacionales*. Ginebra, CEPE/OMS. [www.unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2000/wat/mp.wat.2000.1.e.pdf](http://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2000/wat/mp.wat.2000.1.e.pdf)
- \_\_\_\_\_. 2013. *The Equitable Access Score-card: Supporting Policy Processes to Achieve the Human Right to Water and Sanitation*. Ginebra, CEPE/OMS.
- \_\_\_\_\_. 2016. *A Healthy Link: The Protocol on Water and Health and the Sustainable Development Goal*. [www.unece.org/index.php?id=44282&L=0](http://www.unece.org/index.php?id=44282&L=0)
- CESPAP (Comisión Económica y Social de las Naciones Unidas para Asia y el Pacífico). 2010. *Statistical Yearbook 2009*. Bangkok, CESPAP.
- \_\_\_\_\_. 2013. *Development Financing for Tangible Results: A Paradigm Shift to Impact Investing and Outcome Models - The Case of Sanitation in Asia*. Documento de debate. Bangkok, CESPAP. [www.unescap.org/resources/development-financing-tangible-results-paradigm-shift-impact-investing-and-outcome-models](http://www.unescap.org/resources/development-financing-tangible-results-paradigm-shift-impact-investing-and-outcome-models)
- \_\_\_\_\_. 2014. *Statistical Yearbook for Asia and the Pacific 2014*. Bangkok, CESPAP. [www.unescap.org/resources/statistical-yearbook-asia-and-pacific-2014](http://www.unescap.org/resources/statistical-yearbook-asia-and-pacific-2014)
- \_\_\_\_\_. 2015a. *Eco-Efficient Infrastructure Development towards Green and Resilient Urban Future*. Folleto. [www.unescap.org/resources/brochure-eco-efficient-infrastructure-development-towards-green-and-resilient-urban-future](http://www.unescap.org/resources/brochure-eco-efficient-infrastructure-development-towards-green-and-resilient-urban-future)
- \_\_\_\_\_. 2015b. *Statistical Yearbook for Asia and the Pacific 2015*. Bangkok, CESPAP. [www.unescap.org/resources/statistical-yearbook-asia-and-pacific-2015](http://www.unescap.org/resources/statistical-yearbook-asia-and-pacific-2015)
- CESPAP/ONU-Hábitat (Comisión Económica y Social de las Naciones Unidas para Asia y el Pacífico/Programa de Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos). 2015. *The State of Asian and Pacific Cities 2015: Urban Transformations, Shifting from Quantity to Quality*. CESPAP/ONU-Hábitat.



- CESPAP/ONU-Hábitat/AIT (Comisión Económica y Social de las Naciones Unidas para Asia y el Pacífico/ Programa de Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos/Asian Institute of Technology). 2015. *Policy Guidance Manual on Wastewater Management with a Special Emphasis on Decentralised Wastewater Treatment Systems (DEWATS)*. Naciones Unidas/AIT. [www.unescap.org/resources/policy-guidance-manual-wastewater-management](http://www.unescap.org/resources/policy-guidance-manual-wastewater-management)
- Cho, R. 2011. *From Wastewater to Drinking Water*. State of the Planet, News of the Earth Institute. Nueva York, Earth Institute, University of Columbia. [blogs.ei.columbia.edu/2011/04/04/from-wastewater-to-drinking-water/](http://blogs.ei.columbia.edu/2011/04/04/from-wastewater-to-drinking-water/)
- CNUMAD (Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo). 1992. *Agenda 21*. Nueva York, Naciones Unidas. [sustainabledevelopment.un.org/content/documents/Agenda21.pdf](http://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/Agenda21.pdf)
- Cooper, P. F. 2001. Historical aspects of wastewater treatment. P. Lens, G. Zeeman y G. Lettinga (eds.), *Decentralised Sanitation and Reuse: Concepts, Systems and Implementation*. Integrated Environmental Technology Series. Londres, IWA Publishing.
- Copeland C. 2015. *Microbeads: An Emerging Water Quality Issue*. CSR Insights. [www.fas.org/sgp/crs/misc/IN10319.pdf](http://www.fas.org/sgp/crs/misc/IN10319.pdf)
- Corcoran, E.; Nellemann, C.; Baker, E.; Bos, R.; Osborn, D. y Savelli, H. (eds.). 2010. *Sick Water? The Central Role of Wastewater Management in Sustainable Development*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente/Programa de Naciones Unidas para los Asentamientos/GRID-Arendal (PNUMA/ONU-Hábitat). [www.unep.org/pdf/SickWater\\_screen.pdf](http://www.unep.org/pdf/SickWater_screen.pdf)
- CPCT (Centro de Producción más Limpia de Tanzania). s.f. *Nyanza Bottling Company Limited. Resource Efficient and Cleaner Production (RECP) - Case Studies*. Mwanza, Tanzania, CPCT. [cpct.or.tz/selected%20photo/Beverage%20Industries.pdf](http://cpct.or.tz/selected%20photo/Beverage%20Industries.pdf)
- Crab, R.; Defoirdt, T.; Bossier, P. y Verstraete, W. 2012. Biofloc technology in aquaculture: Beneficial effects and future challenges. *Aquaculture*, Vol. 356-357, pp. 351-356.
- Craggs, R. J.; Lundquist, T. J. y Benemann, J. R. 2013. Wastewater treatment and algal biofuel production. M. A. Borowitzka y N. R. Moheimani (eds.), *Algae for Biofuels and Energy*, Vol. V de *Developments in Applied Phycology*, pp. 153-163. Springer Netherlands. Doi: 10.1007/978-94-007-5479-9
- CRew (Fondo Regional del Caribe para la Gestión de Aguas Residuales). s.f. Sitio web de CRew: [www.gefcrew.org/](http://www.gefcrew.org/)
- Culp, G. L. y Culp, R. L. 1971. *Advanced Wastewater Treatment*. Nueva York, Van Nostrand Reinhold Environmental Engineering Series.
- Daigger, G. T. 2011. Changing paradigms: From wastewater treatment to resource recovery. *Actas de la Water Environment Federation, Energy and Water 2011*, Vol. 16, pp. 942-957.
- Daniels, M. 2015. *Innovative Wastewater Financing Mechanism - Why CRew is not only about Constructing Wastewater Treatment Plants (Important Considerations for Replication)*. Georgetown, Guyana Wastewater Revolving Fund. [www.aidis.org.br/PDF/cwwa2015/CWWA%202015%20Paper%20Submission%20-%20Marlon%20Daniels%20-%20Innovative%20Financing%20Mechanisms%20-%20Why%20CRew%20is%20not%20only%20about%20Wastewater%20Treatment%20Plants.pdf](http://www.aidis.org.br/PDF/cwwa2015/CWWA%202015%20Paper%20Submission%20-%20Marlon%20Daniels%20-%20Innovative%20Financing%20Mechanisms%20-%20Why%20CRew%20is%20not%20only%20about%20Wastewater%20Treatment%20Plants.pdf)
- DEFRA (Departamento de Asuntos Ambientales, Alimentarios y Rurales). 2016. *Microbead Ban Announced to Protect Sealife*. Gobierno del Reino Unido. [www.gov.uk/government/news/microbead-ban-announced-to-protect-sealife](http://www.gov.uk/government/news/microbead-ban-announced-to-protect-sealife)
- De Groot, R. S.; Stuij, M. A. M.; Finlayson, C. M. y Davidson, N. 2006. *Valuing Wetlands: Guidance for Valuing the Benefits Derived from Wetland Ecosystem Services*. Ramsar Technical Report N° 3/ CBD Technical Series N° 27. Gland, Suiza, Secretaría de la Convención Ramsar y Montreal, PQ, Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica. [www.cbd.int/doc/publications/cbd-ts-27.pdf](http://www.cbd.int/doc/publications/cbd-ts-27.pdf)
- . s.f. *Tarragona*. Sitio web de DEMOWARE. [demoware.eu/en/demo-sites/tarragona](http://demoware.eu/en/demo-sites/tarragona)
- Despommier, D. 2011. *The Vertical Farm: Feeding the World in the 21st Century*. Londres, McMillan.
- Difaf, H. H. 2016. *Cost-effective Treatment of Wastewater in Remote Areas for Potential Reuse to Cope with Climate Change Impacts and Water Scarcity*. Presentación realizada en el taller UNESCWA y ACWUA sobre la Creación de Capacidades del Sector de Asentamientos Humanos para la adaptación al Cambio Climático a través de Herramientas de Gestión de Recursos Hídricos Integradas, Amán, 21-23 mayo 2016. [www.unescwa.org/sites/www.unescwa.org/files/events/files/07-difaf\\_1enanon.pdf](http://www.unescwa.org/sites/www.unescwa.org/files/events/files/07-difaf_1enanon.pdf)
- Departamento de Recursos Hídricos de California. 2013. *Resource Management Strategies*, Vol. III de la *Actualización del Plan Hidrológico de California 2013*. Sacramento, Calif.; Departamento de Recursos Hídricos de California. [demoware.eu/en/demo-sites/tarragona](http://demoware.eu/en/demo-sites/tarragona)

- DEMOWARE (Demostración de innovación para un sector europeo de reutilización del agua competitivo e innovador). 2016. *Market Analysis of Key Water Reuse Technologies*. Report D4.1. demoware.eu/en/results/deliverables/deliverable-d4-1-market-analysis-of-key-water-reuse-technologies.pdf
- Dillon, P. J.; Escalante, F. E. y Tuinhof, A. 2012. *Management of Aquifer Recharge and Discharge Processes and Aquifer Storage Equilibrium*. Documento Temático 4 sobre Gobernabilidad de las Aguas Subterráneas GEF-FAO. Canberra, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO).
- Domenech, T. y Davies, M. 2011. Structure and morphology of industrial symbiosis networks: The case of Kalundborg. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol. 10, pp. 79-89.
- Doorn, M. R. J.; Strait, R.; Barnard, W. y Eklund, B. 1997. *Estimate of Global Greenhouse Gas Emissions from Industrial and Domestic Wastewater Treatment*. Washington, DC, Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA). [cfpub.epa.gov/si/si\\_public\\_record\\_Report.cfm?dirEntryID=115121](http://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_Report.cfm?dirEntryID=115121)
- Doorn, M. R. J.; Towprayoon, S.; Manso Vieira, S. M.; Irving, W.; Palmer, C.; Pipatti, R. y Wang, C. 2006. Wastewater Treatment and Discharge. IPCC. *Directrices del IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. Hayama, Japón, Global Environmental Strategies (IGES). [www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5\\_Volume5/5\\_6\\_Ch6\\_Wastewater.pdf](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5_Volume5/5_6_Ch6_Wastewater.pdf)
- Drechsel, P. y Evans, A. E. V. 2010. Wastewater use in irrigated agriculture. *Irrigated and Drainage Systems*, Vol. 24, Nº 1, pp. 1-3. Doi: 10.1007/s10795-010-9095-5
- Drechsel, P.; Hope, L. y Cofie, O. 2013. Gender mainstreaming: Who wins? Gender and irrigated urban vegetable production in West Africa. *Journal of Gender and Water (wH2O)*, Vol. 2, Nº 1, pp. 15-17.
- Drechsel, P. y Karg, H. 2013. Motivating behaviour change for safe wastewater irrigation in urban and peri-urban Ghana. *Sustainable Sanitation Practice*, Vol. 16, pp. 10-20. [www.ecosan.at/ssp/issue-16-behaviour-change/SSP-16\\_Jul2013\\_10-20.pdf/view](http://www.ecosan.at/ssp/issue-16-behaviour-change/SSP-16_Jul2013_10-20.pdf/view)
- Drechsel, P.; Mahjoub, O. y Keraita, B. 2015b. Social and cultural dimensions in wastewater use. P. Dreschel, M. Qadir y D. Wichelns (eds.), *Wastewater - Economic Asset in an Urbanizing World*. Springer Netherlands.
- Drechsel, P.; Qadir, M. y Wichelns, D. (eds.). 2015a. *Wastewater: Economic Asset in an Urbanizing World*. Springer Netherlands.
- Drechsel, P.; Scott, C. A.; Raschid-Sally, L.; Redwood, M. y Bahri, A. (eds.). 2010. *Wastewater, Irrigation and Health: Assessing and Mitigating Risk in Low-Income Countries*. Colombo, Instituto Internacional de Gestión de Recursos Hídricos (IWMI), Londres, Earthscan y Ottawa, Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (IDRC). [cgispace.cgiar.org/handle/10568/36471](http://cgispace.cgiar.org/handle/10568/36471)
- Ebiare, E. y Zejjao, L. 2010. Water quality monitoring in Nigeria: Case study of Nigeria's industrial cities. *Journal of American Science*, Vol. 6, Nº 4, pp. 22-28.
- Ekane, N.; Kjellén, M.; Noel, S. y Fogde, M. 2012. *Sanitation and Hygiene Policy: Stated Beliefs and Actual Practice - A Case Study in the Burera District, Rwanda*. Documento de trabajo 2012-07. Estocolmo, Instituto de Medio Ambiente de Estocolmo (SEI).
- Ekane, N.; Nykvist, B.; Kjellén, M.; Noel, S. y Weitz, N. 2014. *Multi-level Sanitation Governance: Understanding and Overcoming Challenges in the Sanitation Sector in Sub-Saharan Africa*. Documento de trabajo 2014-04. Estocolmo, Instituto de Medio Ambiente de Estocolmo (SEI). Doi: 10.3362/2046-1887.2014.024
- Environment Agency. 2009. *Discharges of Consented Red List Substances National Dataset User Guide*. Version 2.0.0. 1º enero, 2009. Bristol, Reino Unido, Environment Agency. [www.findmaps.co.uk/assets/pdf/Discharges\\_of\\_Consented\\_Redlist\\_Substances\\_User\\_Guide\\_v2.0.0.pdf](http://www.findmaps.co.uk/assets/pdf/Discharges_of_Consented_Redlist_Substances_User_Guide_v2.0.0.pdf)
- EPA Victoria (Environment Protection Authority Victoria). 2002. *Guidelines for Environmental Management: Disinfection of Treated Wastewater*. Victoria, Australia, EPA Victoria. [www.epa.vic.gov.au/our-work/publications/publication/2002/september/730](http://www.epa.vic.gov.au/our-work/publications/publication/2002/september/730)
- Eurostat. 2014. *Data Collection Manual for the OECD/Eurostat Joint Questionnaire on Inland Waters: Concepts, Definitions, Current Practices, Evaluations and Recommendations*. Versión 3.0. Luxemburgo, Eurostat. [ec.europa.eu/eurostat/documents/1798247/6664269/Data+Collection+Manual+for+the+OECD\\_Eurostat+Joint+Questionnaire+on+Inland+Waters+%28version+3.0%2C+2014%29.pdf/f5f60d49-e88c-4e3c-bc23-c1ec26a01b2a](http://ec.europa.eu/eurostat/documents/1798247/6664269/Data+Collection+Manual+for+the+OECD_Eurostat+Joint+Questionnaire+on+Inland+Waters+%28version+3.0%2C+2014%29.pdf/f5f60d49-e88c-4e3c-bc23-c1ec26a01b2a)
- \_\_\_\_\_. s.f. *Water use in Industry*. Eurostat Statistics Explained. Luxemburgo, Eurostat. [ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Water\\_use\\_in\\_industry](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Water_use_in_industry)

- Falconer, I. R. 2006. Are endocrine disrupting compounds a health risk in drinking water? *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 3, N° 2, pp. 180-4.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 1985. *Water Quality for Agriculture*. FAO Irrigation and Drainage Paper 29 Rev. 1. Roma, FAO.
- \_\_\_\_\_. 1992. *Wastewater Treatment and Use in Agriculture*. FAO Irrigation and Drainage Paper 47. Roma, FAO. [www.fao.org/docrep/t0551e/t0551e00.htm](http://www.fao.org/docrep/t0551e/t0551e00.htm)
- \_\_\_\_\_. 1997. *Quality Control of Wastewater for Irrigated Crop Production*. Eater Reports N° 10. Roma, FAO. [www.fao.org/docrep/w5367e/w5367e00.htm](http://www.fao.org/docrep/w5367e/w5367e00.htm)
- \_\_\_\_\_. 2002. *Agricultura mundial: hacia los años 2015/2030*. Informe resumido. Roma, FAO. [www.fao.org/docrep/004/Y3557E/Y3557E00.HTM](http://www.fao.org/docrep/004/Y3557E/Y3557E00.HTM)
- \_\_\_\_\_. 2005. *Pollution from Industrialized Livestock Production*. Livestock Policy Brief N° 2. Roma, FAO. [www.fao.org/3/a-a0261e.pdf](http://www.fao.org/3/a-a0261e.pdf)
- \_\_\_\_\_. 2006. *La larga sombra del ganado: problemas ambientales y opciones*. Roma, FAO.
- \_\_\_\_\_. 2010. *The Wealth of Waste: The Economics of Wastewater Use in Agriculture*. Informe sobre temas hídricos de la FAO N° 35. Roma, FAO. [www.fao.org/docrep/012/i1629e/i1629e.pdf](http://www.fao.org/docrep/012/i1629e/i1629e.pdf)
- \_\_\_\_\_. 2011. *El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura. La gestión de los sistemas en situación de riesgo*. Roma, FAO.
- \_\_\_\_\_. 2012. *El estado mundial de la pesca y la acuicultura*. Roma, FAO.
- \_\_\_\_\_. 2013a. *Food Wastage Footprints. Sustainable Pathways*. Roma, FAO. [www.fao.org/fileadmin/templates/nr/sustainability\\_pathways/docs/Factsheet\\_FOOD-WASTAGE.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/templates/nr/sustainability_pathways/docs/Factsheet_FOOD-WASTAGE.pdf)
- \_\_\_\_\_. 2013b. *Guidelines to Control Water Pollution from Agriculture in China: Decoupling Water Pollution from Agricultural Production*. Informe sobre temas hídricos de la FAO N° 40. Roma, FAO. [www.fao.org/documents/card/en/c/86c39a7c-b362-567e-b214-ae0df99ca72d/](http://www.fao.org/documents/card/en/c/86c39a7c-b362-567e-b214-ae0df99ca72d/)
- \_\_\_\_\_. 2015. *Global Initiative on Food Loss and Waste Reduction*. Roma, FAO. [www.fao.org/3/a-i4068e.pdf](http://www.fao.org/3/a-i4068e.pdf)
- FAOSTAT. s.f.a. Sitio web de FAOSTAT. [faostat.fao.org/](http://faostat.fao.org/)
- \_\_\_\_\_. s.f.b. *Pesticides Use*. Sitio web de FAOSTAT. [faostat3.fao.org/browse/R/RP/E](http://faostat3.fao.org/browse/R/RP/E)
- FAO/CGIAR WLE (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación/Consultative Group on International Agricultural Research Programme on Water, Land and Ecosystems). Próximo. *Water Pollution from Agriculture: A Global Review*.
- Fernández, D.; Jouravlev, A.; Lentini, E. y Yurquina, A. 2009. *Contabilidad Regulatoria, Sustentabilidad Financiera y Gestión Mancomunada: Temas Relevantes en Servicios de Agua y Saneamiento*. Santiago, División de Recursos Naturales e Infraestructura, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). [www.cepal.org/es/publicaciones/6346-contabilidad-regulatoria-sustentabilidad-financiera-gestion-mancomunada-temas](http://www.cepal.org/es/publicaciones/6346-contabilidad-regulatoria-sustentabilidad-financiera-gestion-mancomunada-temas)
- Ferro, G. y Lentini, L. 2013. *Políticas Tarifarias para el Logro de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM): Situación Actual y Tendencias Regionales Recientes*. Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe de Naciones Unidas (CEPAL). [repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/4045/S2013024\\_es.pdf](http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/4045/S2013024_es.pdf)
- Finger, M. y Allouche, J. 2002. *Water Privatisation: Trans-national Corporations and the Re-regulation of the Water Industry*. Londres/Nueva York, Spon Press.
- Förster, J. 2014. Eurostat Statistics Explained. *Water Use in Industry*. Luxemburgo, Eurostat. [ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Water\\_use\\_in\\_industry](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Water_use_in_industry)
- GEN (Red Mundial de Etiquetado Ecológico). s.f. Sitio web de GEN. [www.globalecolabelling.net/](http://www.globalecolabelling.net/)
- Gerbens-Leenes, P. W.; Mekonnen, M. M. y Hoekstra, A. Y. 2013. The water footprint of poultry, pork and beef: A comparative study in different countries and production systems. *Water Resources and Industry*, Vol. 1-2, pp. 25-36
- GE Reports. 2015. *Ralph Exton: Closing the Gap between Treating Wastewater and Reusing it*. Sitio web de GE Reports: [www.gereports.com/post/120556373453/closing-the-gap-between-treating-wastewater-and-reusing/](http://www.gereports.com/post/120556373453/closing-the-gap-between-treating-wastewater-and-reusing/)
- Godfrey, N.; Hart, J.; Vaughan, W. T. y Wong, W. 2009. Using wastewater energy to heat an Olympic village for the 2010 Winter Olympics and beyond. *Actas de la Federación Ambiental del Agua, WEFTEC 2009*, pp. 6572-6580(9). Alexandria, Va.; Federación Ambiental del Agua (WEF).

- Gerlach, E. y Franceys, R. 2010. Regulating water services for all in developing economies. *World Development*, Vol. 38, N° 9, pp. 1229-1240.
- Goldface-Irokalibe, I. J. 1999. The application of water resources: Decree to the development and management of river basin development authorities. *Canadian Journal of Law and Jurisprudence*, Vol. 5, N° 57.
- \_\_\_\_\_. 2002. *Towards an Effective Legal and Institutional Framework for Integrated Water Resources Management in Nigeria*. A.B.U. Zaria.
- Goldface-Irokalibe, I. J. et al. 2001. *WRMS, Legal and regulatory Framework (GAC)*.
- González, O.; Bayarri, B.; Acena, J.; Pérez, S. y Barceló, D. 2016. Treatment technologies for wastewater reuse: Fate of contaminants of emerging concern. Vol. 45 of D. Fatta-Kassinos, D. D. Dionysiou y K. Kümmerer (eds.), *Advanced Treatment Technologies for Urban Wastewater Reuse: The Handbook of Environmental Chemistry*, pp. 5-37. Doi: 10.1007/698\_2015\_363
- Government of British Columbia. 1992. *Urban runoff quality control guidelines for the province of British Columbia*. Vancouver, BC, Waste Management Group, Environmental Protection Division. [www.env.gov.bc.ca/wat/wq/nps/NPS\\_Pollution/Stormwater\\_Runoff/urban\\_runoff\\_guidelines.pdf](http://www.env.gov.bc.ca/wat/wq/nps/NPS_Pollution/Stormwater_Runoff/urban_runoff_guidelines.pdf)
- Government of Canada. 2016. Order Adding a Toxic Substance to Schedule 1 to the Canadian Environmental Protection Act, 1999. *Canada Gazette*, Vol. 150, N° 13. Gobierno de Canadá. [www.gazette.gc.ca/rp-pr/p2/2016/2016-06-29/html/sor-dors150-eng.php#archived](http://www.gazette.gc.ca/rp-pr/p2/2016/2016-06-29/html/sor-dors150-eng.php#archived)
- \_\_\_\_\_. s.f. *Groundwater Contamination*. Sitio web del Gobierno de Canadá. [www.ec.gc.ca/eau-water/default.asp?lang=En&n=6A7FB7B2-1](http://www.ec.gc.ca/eau-water/default.asp?lang=En&n=6A7FB7B2-1)
- Grigg, N. S.; Rogers, P. D. y Edmiston, S. 2013. *Dual Water Systems: Characterization and Performance for Distribution of Reclaimed Water*. Denver, Colo.; Water Research Foundation.
- Grönwall, J. y Jonsson, A. C. Próximo. The impact of 'zero' coming into fashion: ZLD uptake and socio-technical transitions in Tirupur. *Water Alternatives*.
- Groom, E.; Halpern, J. y Erhardt, D. 2006. *Explanatory Notes on Key Topics in the Regulation of Water and Sanitation Services*. Water Supply And Sanitation Sector Board. Documento de debate Serie N° 6. Washington, DC, Banco Mundial. [hdl.handle.net/10986/17236](http://hdl.handle.net/10986/17236).
- Guest, J. S.; Skerlos, S. J.; Barnard, J. L.; Beck, M. B.; Daigger, G. T.; Hilger, H.; Jackson, S. J.; Karvazy, K.; Kelly, L.; Macpherson, L.; Mihelcic, J. R.; Pramanik, A.; Raskin, L.; Van Loosrecht, M. C. M.; Yeh, D. y Love, N. G. 2009. A new planning and design paradigm to achieve sustainable resource recovery from wastewater. *Environmental Science & Technology*, Vol. 43, N° 16, pp. 126-130. Doi: 10.1021/es9010515
- GWl (Global Water Intelligence). 2015. *Industrial Water Technology Markets 2015: Meeting Industrial Needs in Process Water Treatment and Wastewater Reuse*. Oxford, Reino Unido, GWl. [www.globalwaterintel.com/market-intelligence-reports/industrial-water-technology-markets-2015-meeting-industrial-needs-process-water-treatment-and-wastewater-reuse](http://www.globalwaterintel.com/market-intelligence-reports/industrial-water-technology-markets-2015-meeting-industrial-needs-process-water-treatment-and-wastewater-reuse)
- GWOPA/ONU-Hábitat/ICLEI/WWF7/UCLG/MWC/DGI (Alianza Global de Parteneriados entre Operadores de Agua /Programa de Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos/ Gobiernos Locales para la Sostenibilidad/VII Foro Mundial del Agua / Red Mundial de Ciudades, Gobiernos Locales y Regionales / Consejo Mundial del Agua/Instituto de Desarrollo Daegu Gyeongbuk). 2015. *The Daegu-Gyeongbuk Water Action for Sustainable Cities and Regions. Draft Documento de debate*. [www.uclg.org/sites/default/files/lras\\_dg\\_water\\_action\\_for\\_sustainable\\_cities\\_and\\_regions\\_april2015.pdf](http://www.uclg.org/sites/default/files/lras_dg_water_action_for_sustainable_cities_and_regions_april2015.pdf)
- GWP (Asociación Mundial del Agua). 2014. *Impacts of Climate on Wastewater Management*. Discussion Brief N° 5. Asociación Mundial del Agua. Estocolmo, GWP. [www.gwp.org/Global/GWP-C%20Files/TOPI%20C%20Impacts%20of%20Climate%20on%20Wastewater%20Management.pdf](http://www.gwp.org/Global/GWP-C%20Files/TOPI%20C%20Impacts%20of%20Climate%20on%20Wastewater%20Management.pdf)
- \_\_\_\_\_. 2013. *Integrated Urban Water Management (IUWM): Toward Diversification and Sustainability*. Policy Brief. Estocolmo, GWP. [www.gwp.org/Global/GWP-C%20Files/TOPI%20C%20Impacts%20of%20Climate%20on%20Wastewater%20Management.pdf](http://www.gwp.org/Global/GWP-C%20Files/TOPI%20C%20Impacts%20of%20Climate%20on%20Wastewater%20Management.pdf)
- Hanjra, M. A.; Blackwell, J.; Carr, G.; Zhang, F. y Jackson, T. M. 2012. Wastewater irrigation and environmental health: Implications for water governance and public policy. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, Vol. 215, No.3, pp. 255-269. Doi: 10.1016/j.ijheh.2011.10.003
- Hanjra, M. A.; Drechsel, P.; Wichelns, D. y Qadir, M. 2015a. Transforming urban wastewater into an economic asset: Opportunities and challenges. P. Dreschel, M. Qadir y D. Wichelns (eds.), *Wastewater - Economic Asset in an Urbanizing World*. Springer Netherlands.
- Hanjra, M. A.; Drechsel, P.; Mateo-Sagasta, J.; Otoo, M. y Hernández-Sancho, F. 2015b. Assessing the finance and economics of resource recovery and reuse solutions across scales. P. Dreschel, M. Qadir y D. Wichelns (eds.), *Wastewater - Economic Asset in an Urbanizing World*. Springer Netherlands.



- Harris, S.; Morris, C.; Morris, D.; Cormican, M. y Cummins, E. 2013. The effect of hospital effluent on antimicrobial resistant *E. coli* within a municipal wastewater system. *Environment Science: Process Impacts*, Vol. 15, Nº 3, pp. 617-622.
- Hasan, A. 1988. Orangi Pilot Project: A low-cost sewer system by low-income Pakistanis. B. Turner (ed.), *Building Community: A Third World Case Book*. Londres, Building Community Books.
- Helmer, R. y Hespanhol, I. (eds.). 1997. *Water Pollution Control - A Guide to the Use of Water Quality Management Principles*. Londres, F & F Spon, en nombre del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente/Consejo de Colaboración para el Abastecimiento de Agua y Saneamiento/Organización Mundial de la Salud (PNUMA/WSSCC/OMS).
- Herbert, E. R.; Boon, P.; Burgin, A. J.; Neubauer, S. C.; Franklin, R. B.; Ardón, M.; Hopfensperger, K. N.; Lamers, L. P. M. y Gell, P. 2015. A global perspective on wetland salinization: Ecological consequences of a growing threat to freshwater wetlands. *Ecosphere*, Vol. 6, Nº 10, pp. 1-43.
- Heymann, E.; Lizio, D. y Siehlow, M. 2010. *World Water Markets: High Investment Requirements Mixed with Institutional Risks*. Frankfurt am Main, Alemania, Deutsche Bank Research. [www.dbresearch.de/PROD/DBR\\_INTERNET\\_EN-PROD/PROD000000000258353.PDF](http://www.dbresearch.de/PROD/DBR_INTERNET_EN-PROD/PROD000000000258353.PDF)
- Hirabayashi, Y.; Mahendran, R.; Koirala, S.; Konoshima, L.; Yamazaki, D.; Watanabe, S.; Kim, H. y Kanae, S. 2013. Global flood risk under climate change. *Nature Climate Change*, Vol. 3, pp. 816-821. Doi: 10.1038/nclimate1911
- Hoekstra, A. Y. 2008. *Water Neutral: Reducing and Offsetting the Impacts of Water Footprints*. Value of Water Research Report Series Nº 28. Delft, Países Bajos, UNESCO-IHE. [waterfootprint.org/en/resources/publications/value-water-research-report-series-unesco-ihe/](http://waterfootprint.org/en/resources/publications/value-water-research-report-series-unesco-ihe/)
- Hoekstra, A. Y.; Chapagain, A. K.; Aldaya, M. M. y Mekonnen, M. M. 2011. *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*. Londres/Washington, DC, Earthscan. [waterfootprint.org/media/downloads/TheWaterFootprintAssessmentManual\\_2.pdf](http://waterfootprint.org/media/downloads/TheWaterFootprintAssessmentManual_2.pdf)
- Holmgren, K. E.; Li, H.; Verstraete, W. y Cornel, P. 2015. *State of the Art Compendium Report on Resource Recovery from Water*. IWA Resource Recovery Cluster. Londres, International Water Association (IWA). [www.iwa-network.org/downloads/1440858039-web%20State%20of%20the%20Art%20Compendium%20Report%20on%20Resource%20Recovery%20from%20Water%202105%20.pdf](http://www.iwa-network.org/downloads/1440858039-web%20State%20of%20the%20Art%20Compendium%20Report%20on%20Resource%20Recovery%20from%20Water%202105%20.pdf)
- Hophmayer-Tokich, S. 2006. *Wastewater Management Strategy: Centralized v. Decentralized Technologies for Small Communities*. Enschede, Países Bajos, The Center for Clean Technology and Environmental Policy, University of Twente. [purl.utwente.nl/publications/95384](http://purl.utwente.nl/publications/95384)
- HUBER. s.f. *Three HUBER projects for wastewater heat recovery in Switzerland*. HUBER website. Berching, Alemania. [www.huber.de/huber-report/ablage-berichte/energy-from-wastewater/three-huber-projects-for-wastewater-heat-recovery-in-switzerland.html](http://www.huber.de/huber-report/ablage-berichte/energy-from-wastewater/three-huber-projects-for-wastewater-heat-recovery-in-switzerland.html)
- Hudson, A. (ed.). 2012. *Catalysing Ocean Finance: Volume II. Methodologies and Case Studies*. New York, Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). [www.undp.org/content/undp/en/home/librarypage/environment-energy/water\\_governance/ocean\\_and\\_coastalareagovernance/catalysing-ocean-finance.html](http://www.undp.org/content/undp/en/home/librarypage/environment-energy/water_governance/ocean_and_coastalareagovernance/catalysing-ocean-finance.html)
- Hutton, G. y Haller, L. 2004. *Evaluation of the Costs and Benefits of Water and Sanitation Improvements at the Global Level*. Ginebra, Suiza, Organización Mundial de la Salud (OMS). [www.who.int/water\\_sanitation\\_health/wsh0404.pdf](http://www.who.int/water_sanitation_health/wsh0404.pdf)
- Hutton, G. y Varughese, M. 2016. *The Cost of Meeting the 2030 Sustainable Development Goal Targets on Drinking Water, Sanitation, and Hygiene*. Technical paper. Washington, DC, Banco Mundial/Programa de Agua y Saneamiento (WSP). [elibrary.worldbank.org/doi/pdf/10.1596/K8543](http://elibrary.worldbank.org/doi/pdf/10.1596/K8543)
- Iannelli, R.; Bianchi, V.; Salvato, M. y Borin, M. 2011. Modelling assessment of carbon supply by different macrophytes for nitrogen removal in pilot vegetated mesocosms. *International Journal of Environmental and Analytical Chemistry*, Vol. 91, Nº 7-8, pp. 708-726.
- IEA (Agencia Internacional de la Energía). 2014. *World Energy Outlook 2014*. París, IEA. [dx.doi.org/10.1787/weo-2014-enllic](http://dx.doi.org/10.1787/weo-2014-enllic), S.; Drechsel, P.; Amoah, P. y Lejeune, J. T. 2010. Applying the multiple-barrier approach for microbial risk reduction in the post-harvest sector of wastewater irrigated vegetables. P. Drechsel, C. A. Scott, L. Raschid-Sally, M. Redwood y A. Bahri (eds.), *Wastewater Irrigation and Health: Assessing and Mitigation Risks in Low-income Countries*. Londres/Sterling, Va.; Earthscan, pp. 239-259. [www.iwmi.cgiar.org/Publications/Books/PDF/Wastewater\\_Irrigation\\_and\\_Health\\_book.pdf](http://www.iwmi.cgiar.org/Publications/Books/PDF/Wastewater_Irrigation_and_Health_book.pdf)

- Idelevitch, E. y Ringskog, K. 1997. *Wastewater Treatment in Latin America: Old and New Options*. Washington, DC, Banco Mundial. [www-wds.worldbank.org/external/default/WDSContentServer/WDSP/IB/2011/08/11/000356161\\_20110811002849/Rendered/PDF/170370REPLACEM00as0previous0record0.pdf](http://www-wds.worldbank.org/external/default/WDSContentServer/WDSP/IB/2011/08/11/000356161_20110811002849/Rendered/PDF/170370REPLACEM00as0previous0record0.pdf)
- Industrial Ecology. s.f. *Kalundborg*. <http://www.tudelft.nl/en/study/master-of-science/master-programmes/industrial-ecology/>
- Industrial Symbiosis Institute. 2008. *New Technologies and Innovation through Industrial Symbiosis*.
- Kalundborg, Dinamarca, Industrial Symbiosis Institute. [www.ewp.rpi.edu/hartford/~stephc/ET/Other/Miscellaneous/Kalundborg-Industrial%20Symbiosis%20Institute.pdf](http://www.ewp.rpi.edu/hartford/~stephc/ET/Other/Miscellaneous/Kalundborg-Industrial%20Symbiosis%20Institute.pdf)
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2013. *Cambio Climático 2013: Bases físicas*. Contribución del grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge, Reino Unido, Cambridge University Press. Doi: 10.1017/CBO9781107415324
- IWA (International Water Association). 2014. *An Avoidable Crisis: WASH Human Resources Capacity Gaps in 15 Developing Economies*. Londres. IWA Publishing. [www.iwa-network.org/downloads/1422745887-an-avoidable-crisis-wash-gaps.pdf](http://www.iwa-network.org/downloads/1422745887-an-avoidable-crisis-wash-gaps.pdf)
- IWA (International Water Association) Publishing. s.f. *Industrial Wastewater Treatment*. IWA Publishing website. [www.iwapublishing.com/news/industrial-wastewater-treatment](http://www.iwapublishing.com/news/industrial-wastewater-treatment)
- IWMI (Instituto Internacional de Gestión de Recursos Hídricos). 2012. *Resource Recovery and Reuse (RRR) Project: Baseline Survey Report - Kampala*. Colombo, IWMI. [ifadrrr.iwmi.org/Data/Sites/34/media/pdf/rrr-baseline-survey-report---kampala.pdf](http://ifadrrr.iwmi.org/Data/Sites/34/media/pdf/rrr-baseline-survey-report---kampala.pdf)
- Jackson, H. B. 1996. Global needs and developments in urban sanitation. D. Mara (ed.), *Low-cost Sewerage*. Chichester, UK, John Wiley & Sons.
- Jiménez-Cisneros, B. 2011. Safe sanitation in low economic development areas. P. Wilderer (ed.), *Treatise on Water Science*, Vol. 4, pp. 147-201. Ámsterdam, Elsevier Science.
- \_\_\_\_\_. 2008. Unplanned reuse of wastewater for human consumption: The Tula Valley, Mexico. B. Jiménez-Cisneros y T. Asano (eds.), *Water Reuse: An International Survey of Current Practice, Issues and Needs*. Scientific and Technical Report N° 20. Londres, IWA Publishing.
- JPEC (Japan Petroleum Energy Center). 1999. *Treatment and Utilization of Oil-containing Produced-water in Oman*. Tokyo, JPEC. [www.pecj.or.jp/japanese/report/research/report-pdf/H11\\_1999/99surv9-e.pdf](http://www.pecj.or.jp/japanese/report/research/report-pdf/H11_1999/99surv9-e.pdf)
- Jouravlev, A. 2004. *Drinking Water Supply and Sanitation Services on the Threshold of the XXI Century*. Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe de las Naciones Unidas (CEPAL). [repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/6454/S047591\\_en.pdf](http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/6454/S047591_en.pdf)
- Kalundborg Symbiosis. s.f. *Kalundborg Symbiosis Diagram*. [www.symbiosis.dk/diagram](http://www.symbiosis.dk/diagram)
- Karg H. y Drechsel, P. 2011. Motivating behaviour change to reduce pathogenic risk where unsafe water is used for irrigation. *Water International*, Vol. 36, N° 4, pp. 476-490. [dx.doi.org/10.1080/02508060.2011.594684](https://doi.org/10.1080/02508060.2011.594684)
- Karnib, A. 2016. Assessing population coverage of safely managed wastewater systems: A case study of Lebanon. Research Paper N° 313. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, Vol. 6, N° 2. Doi: 10.2166/washdev.2016.009
- Kelley, C. P.; Mohtadi, S.; Cane, M.; Seager, R. y Kushnir, Y. 2015. Climate change in the Fertile Crescent and implications of the recent Syrian drought. *Actas de la Academia Nacional de Ciencias (PNAS)*, Vol. 112, N° 11, pp. 3241-3246. Doi: 10.1073/pnas.1421533112
- Keraita, B. y Drechsel, P. 2004. Agricultural use of untreated urban wastewater in Ghana. C.A. Scott, N. I. Faruqui, y L. Raschid-Sally (eds.), *Wastewater Use in Irrigated Agriculture: Confronting the Livelihood and Environmental Realities*. Wallingford, Reino Unido, CABI Publishing; Colombo/Ottawa, Instituto Internacional de Gestión de Recursos Hídricos/Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (IWM/IDRC).
- Keraita, B.; Drechsel, P.; Mateo-Sagasta, J. y Medlicott, K. 2015. Health risks and cost-effective health risk management in wastewater use systems. P. Dreschel, M. Qadir y D. Wichelns (eds.), *Wastewater - Economic Asset in an Urbanizing World*. Springer Netherlands.
- Kjellén, M. 2006. *From Public Pipes to Private Hands: Water Access and Distribution in Dar es Salaam, Tanzania*. Estocolmo, Departamento de Geografía Humana, Universidad de Estocolmo.

- Kjellén, M.; Pensulo, C.; Nordqvist, P. y Fogde, M. 2012. *Global Review of Sanitation System Trends and Interactions with Menstrual Management Practices*. Report for the Menstrual Management and Sanitation Systems Project. Estocolmo, Instituto de Medio Ambiente de Estocolmo (SEI). [www.sei-international.org/mediamanager/documents/Publications/SEI-ProjectReport-Kjellen-GlobalReviewOfSanitationSystemTrendsAndInteractionsWithMenstrualManagementPractices.pdf](http://www.sei-international.org/mediamanager/documents/Publications/SEI-ProjectReport-Kjellen-GlobalReviewOfSanitationSystemTrendsAndInteractionsWithMenstrualManagementPractices.pdf)
- Knudsen, L. G.; Phuc, P. D.; Hiep, N. T.; Samuelsen, H.; Jensen, P. K.; Dalsgaard, A.; Raschid-Sally, L. y Konradsen, F. 2008. The fear of awful smell: Risk perceptions among farmers in Vietnam using wastewater and human excreta in agriculture. *Southeast Asian Journal of Tropical Medicine and Public Health*, Vol. 39, Nº 2, pp. 341-352.
- Kvarnström, E.; Emilsson, K.; Richert Stintzing, A.; Johansson, M.; Jönsson, H.; Af Petersens, E.; Schönning, C.; Christensen, J.; Hellström, D.; Qvarnström, L.; Ridderstolpe, P. y Drangert, J.-A. 2014. *Urine Diversion: One Step Towards Sustainable Sanitation*. Estocolmo, Instituto de Medio Ambiente de Estocolmo (SEI). [www.gwp.org/Global/GWP-CACENA\\_Files/en/pdf/esr3.pdf](http://www.gwp.org/Global/GWP-CACENA_Files/en/pdf/esr3.pdf)
- Lahnsteiner, J.; Du Pisani, P.; Menge, J. y Esterhuizen, J. 2013. More than 40 years of direct potable reuse experience in Windhoek. V. Lazarova, T. Asano, A. Bahri y J. Anderson (eds.). *Milestones in Water Reuse: The Best Success Stories*. Londres, IWA Publishing.
- Lanciani, R. 1890. La Cloaca Maxima. *Bullettino della Commissione Archeologica Comunale di Rome*, Vol. 18, Nº 3, pp. 95-102 (en italiano.)
- Lautze, J.; Stander, E.; Drechsel, P.; Da Silva, A. K. y Keraita, B. 2014. *Global Experiences in Water Reuse. Resource Recovery and Reuse Series 4*. Colombo, Instituto Internacional de Gestión de Recursos Hídricos (IWMI)/ CGIAR Research Program on Water, Land and Ecosystems. [www.iwmi.cgiar.org/Publications/wle/rrr/resource\\_recovery\\_and\\_reuse-series\\_4.pdf](http://www.iwmi.cgiar.org/Publications/wle/rrr/resource_recovery_and_reuse-series_4.pdf)
- Lazarova, V.; Asano, T.; Bahri, A. y Anderson, J. 2013. *Milestones in Water Reuse: The Best Success Stories*. Londres, IWA Publishing.
- LEA/UNESCWA/ACWUA (Liga de los Estados Árabes /Comisión Económica y Social de las Naciones Unidas para Asia Occidental/ Asociación de Servicios Públicos de Agua de los Países Árabes). 2016. MDG+ Initiative Report 2016.
- \_\_\_\_\_. 2015. *Supporting the Move from the MDGs to the SDGs in the Arab Region*. Regional Initiative for Establishing a Regional Mechanism for Improved Monitoring and Reporting on Access to Water Supply and Sanitation Services in the Arab Region (MDG+ Initiative). Beirut, UNESCWA. [www.unescwa.org/files/page\\_attachments/brochure-mdgs\\_to\\_sdgs-nov2015.pdf](http://www.unescwa.org/files/page_attachments/brochure-mdgs_to_sdgs-nov2015.pdf)
- Lentini, E. 2015. *El Futuro de los Servicios de Agua y Saneamiento en América Latina: Desafíos de los Operadores de Áreas Urbanas de más de 300.000 Habitantes*. Washington, DC, Banco Interamericano de Desarrollo (BID). [publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/7176/El\\_futuro\\_de\\_los\\_servicios\\_de\\_agua\\_y\\_saneamiento\\_en\\_America\\_Latina.pdf](http://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/7176/El_futuro_de_los_servicios_de_agua_y_saneamiento_en_America_Latina.pdf)
- Li, F. T.; Wang, H. T. y Mafuta, C. 2011. Current status and technology demands for water resources and water environment in Africa. L. F. Ting (ed.), *Research on Water Resources of African Typical Areas*. Beijing, Science Press.
- Libhaber, M. y Orozco-Jaramillo, Á. 2012. *Sustainable Treatment and Reuse of Municipal Wastewater. For Decision Makers and Practicing Engineers*. Londres, IWA Publishing.
- Lipinski, B.; Hanson, C.; Lomax, J.; Kitinoya, L.; Waite, R. y Searchinger, T. 2013. *Reducing Food Loss and Waste: Installment 2 of Creating a Sustainable Food Future*. Documento de trabajo. Washington, DC, Instituto de Recursos Mundiales (WRI). [www.wri.org/sites/default/files/reducing\\_food\\_loss\\_and\\_waste.pdf](http://www.wri.org/sites/default/files/reducing_food_loss_and_waste.pdf)
- Liu, Z.; Kanjo, Y. y Mizutani, S. 2009. Removal mechanisms for endocrine disrupting compounds (EDCs) in wastewater treatment - Physical means, biodegradation, and chemical advanced oxidation: A review. *Science of The Total Environment*, Vol. 407, Nº 2, pp. 731-748. doi: 10.1016/j.scitotenv.2008.08.039
- Lorenz, J. J. 2014. A review of the effects of altered hydrology and salinity on vertebrate fauna and their habitats in northeastern Florida Bay. *Wetlands*, Vol. 34, Suplemento 1, pp. 189-200.
- Lowrance, R.; Altier, L. S.; Newbold, J. D.; Schnabel, R. R.; Groffman, P. M.; Denver, J. M.; Correll, D. L.; Gilliam, J. W.; Robinson, J. L.; Brinsfield, R. B.; Staver, K. W.; Lucas, W. y Todd, A. H. 1995. *Water Quality Functions of Riparian Forest Buffer Systems in the Chesapeake Bay Watershed*. Washington, DC, Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA).
- Major, D. C.; Omojola, A.; Dettinger, M.; Hanson, R. T. y Sánchez-Rodríguez, R. 2011. Climate change, water, and wastewater in cities. C. Rosenzweig, W. D. Solecki, S. A. Hammer y S. Mehrotra (eds.), *Climate Change and Cities: First Assessment Report of the Urban Climate Change Research Network*. Cambridge, Reino Unido, Cambridge University Press, pp. 113-143. [uccrn.org/files/2014/02/ARC3-Chapter-5.pdf](http://uccrn.org/files/2014/02/ARC3-Chapter-5.pdf)

- Mahjoub, O. 2013. Ateliers de sensibilisation au profit des agriculteurs et des femmes rurales aux risques liés à la réutilisation des eaux usées en agriculture: Application à la région de Oued Souhil, Nabeul, Tunisie. ONU-Agua. *Actas del evento internacional sobre el Uso Seguro de las aguas Residuales en Agricultura*. 26-28 Junio 2013, Teherán (en francés). [www.ais.unwater.org/ais/pluginfile.php/550/mod\\_page/content/84/Tunisia\\_Ateliers%20de%20sensibilisation%20au%20profit%20des%20agriculteurs%20et%20des%20femmes%20rurales\\_Mahjoub.pdf](http://www.ais.unwater.org/ais/pluginfile.php/550/mod_page/content/84/Tunisia_Ateliers%20de%20sensibilisation%20au%20profit%20des%20agriculteurs%20et%20des%20femmes%20rurales_Mahjoub.pdf)
- Maksimovic, C. y Tejada-Guibert, J. (eds.). 2001. *Frontiers in Urban Water Management: Deadlock or Hope*. Londres, IWA Publishing.
- Mancy, K. H.; Fattal, B. y Kelada, S. 2000. Cultural implications of wastewater reuse in fish farming in the Middle East. *Water Science & Technology*, Vol. 42, N° 1-2, pp. 235-239.
- Mara, D. (ed.). 1996. *Low-cost Sewerage*. Nueva York, John Wiley.
- Mara, D. y Alabaster, G. 2008. A new paradigm for low-cost urban water supplies and sanitation in developing countries. *Water Policy*, Vol. 10, pp. 119-129.
- Mara, D. y Carincross, S. 1989. *Guidelines for the Safe Use of Wastewater and Excreta in Agriculture and Aquaculture: Measures for Public Health Protection*. Ginebra, Suiza, Organización Mundial de la Salud (OMS).
- Markandya, A.; Perelet, R.; Mason, P. y Taylor, T. 2001. *Dictionary of Environmental Economics*. Londres, Earthscan.
- Massoud, M. A.; Tarhini, A. y Nasr, J. A. 2009. Decentralized approaches to wastewater treatment and management: Applicability in developing countries. *Journal of Environmental Management*, Vol. 90, N° 1, pp. 652-659. doi: 10.1016/j.jenvman.2008.07.001
- Matassa, S.; Batstone, D. J.; Hülsen, T.; Schnoor, J. y Verstraete, W. 2015. Can direct conversion of used nitrogen to new feed and protein help feed the world? *Environmental Science and Technology*, Vol. 49, N° 9, pp. 5247-5254. Doi: 10.1021/es505432w
- Mateo-Sagasta, J. y Burke, J. 2010. *Agriculture and Water Quality Interactions: A Global Overview*. SOLAW Background Thematic Report-TR08. Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO).
- Mateo-Sagasta, J.; Raschid-Sally, L. y Thebo, A. 2015. Global wastewater and sludge production, treatment and use. P. Drechsel, M. Qadir y D. Wichelns, *Wastewater: Economic Asset in Urbanizing World*. Springer Netherlands.
- Meda, A.; Lensch, D.; Schaum, C. y Cornel, P. 2012. Energy and water: Relations and recovery potential. V. Lazarova, K. Choo y P. Cornel (eds.), *Water-Energy Interactions in Water Reuse*. Londres, IWA Publishing.
- Mejía, A.; Requena, B.; Rivera D.; Pardón, M. y Rais, J. 2012. *Agua Potable y Saneamiento en América Latina y el Caribe: Metas Realistas y Soluciones Sostenibles*. Caracas, Banco de Desarrollo de América Latina (CAF). [publicaciones.caf.com/media/17238/libro\\_agua\\_esp.pdf](http://publicaciones.caf.com/media/17238/libro_agua_esp.pdf)
- Mekonnen, M. M.; Hoekstra, A. Y. 2011. *National Water Footprint Accounts: The Green, Blue and Grey Water Footprint of Production and Consumption*. Delft, Países Bajos, Instituto UNESCO-IHE para la Educación relativa al Agua. [waterfootprint.org/media/downloads/Report50-NationalWaterFootprints-Vol1.pdf](http://waterfootprint.org/media/downloads/Report50-NationalWaterFootprints-Vol1.pdf)
- \_\_\_\_\_. 2016. Four billion people facing severe water scarcity. *Science Advanced*, Vol. 2, N° 2. Doi:10.1126/sciadv.1500323
- Melo, J. C. 2005. *The Experience of Condominial Water and Sewerage Systems in Brazil: Case Studies from Brasília, Salvador and Parauapebas*. Water and Sanitation Program (WSP). Washington, DC, Banco Mundial. [documents.worldbank.org/curated/en/505601468226737476/The-experience-of-condominial-water-and-sewerage-systems-in-Brazil-case-studies-from-Brasilia-Salvador-and-Parauebas](http://documents.worldbank.org/curated/en/505601468226737476/The-experience-of-condominial-water-and-sewerage-systems-in-Brazil-case-studies-from-Brasilia-Salvador-and-Parauebas)
- Mensah, A.; Cofie, O. y Montangero, A. 2003. *Lessons from a Pilot Co-composting Plant in Kumasi, Ghana*. 29th WEDC International Conference, Towards the Millennium Development Goals, Abuja. [wedc.lboro.ac.uk/resources/conference/29/Mensah.pdf](http://wedc.lboro.ac.uk/resources/conference/29/Mensah.pdf)
- MEW (Ministerio de Energía y Recursos Hídricos, Gobierno de Líbano). 2012. *National Strategy for the Wastewater Sector*. Resolución N° 35 del 17 de octubre de 2012. Beirut, Gobierno del Líbano.
- Michaud, D.; Gabric, S.; Hommann, K. y Shegay, A. 2015. *Water and Wastewater Services in the Danube Region: A State of the Sector*. Viena, Grupo del Banco Mundial. [documents.worldbank.org/curated/en/327761467999140967/Water-and-wastewater-services-in-the-Danube-region-a-state-of-the-sector](http://documents.worldbank.org/curated/en/327761467999140967/Water-and-wastewater-services-in-the-Danube-region-a-state-of-the-sector)



- MIE/PWA (Ministerio de Infraestructura y Medio Ambiente de Países Bajos /Agencia de Desechos Públicos de Public Waste Agency of Flandes, Bélgica). 2016. *Inventory of Awareness, Approaches and Policy: Insight in Emerging Contaminants in Europe*. Deventer, Países Bajos, Witteveen+Bos and TTE Consultants.
- Mihelcic, J. R.; Fry, L. M. y Shaw, R. 2011. Global potential of phosphorus recovery from human urine and feces. *Chemosphere*, Vol. 84, N° 6, pp. 832-839. doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.02.046
- Milieu. 2016. *Assessment of Impact of Storm Water Overflows from Combined Waste Water Collecting Systems on Water Bodies (including the Marine Environment) in the 28 EU Member States, Final Report*. Bruselas, Milieu Ltd. Law and Policy Consulting.
- Molinos-Senante, M.; Hernández-Sancho, F. y Sala-Garrido, R. 2011. Cost-benefit analysis of water-reuse projects for environmental purposes: A case study for Spanish wastewater treatment plants. *Journal of Environmental Management*, Vol. 92, N° 12, pp. 3091-3097.
- MOPIC (Ministerio de Planificación y Cooperación Internacional del Reino Hachemita de Jordania) 2016. *Jordan Response Plan for the Syrian Crisis 2016-2018 Annexes*. Amán, MOPIC. www.jrpsc.org/
- Moriarty, P.; Butterworth, J. A. y Van Koppen, B.; 2004. *Beyond Domestic: Case Studies on Poverty and Productive Uses of Water at the Household Level*. Documento Técnico, Serie N° 41. Delft, Países Bajos, IRC Centro Internacional de Agua y Saneamiento.
- Moussa, M. S. 2008. *Process Analysis of Textile Manufacturing: Environmental Impacts of Textile Industries*. E-textile toolbox. yeumoitruong.vn/attachments/u2s3-4-environmental-impact-of-textile-industries-pdf.355/
- MRC (Comisión del Río Mekong). 1995. *Agreement on the Cooperation for the Sustainable Development of the Mekong River Basin*. Phnom Penh, Comisión del Río Mekong. www.mrcmekong.org/assets/Publications/policies/agreement-Apr95.pdf
- Muñoz, I.; Gómez-Ramos, M. J.; Agüera, A.; Fernández-Alba, A. R.; García-Reyes, J. F. y Molina-Díaz, A. 2009. Chemical evaluation of contaminants in wastewater effluents and the environmental risk of reusing effluents in agriculture. *Trends in Analytical Chemistry*, Vol. 28, N° 6, pp. 676-694. doi:10.1016/j.trac.2009.03.007
- Murray, A.; Cofie, O. y Drechsel, P. 2011. Efficiency indicators for waste-based business models: Fostering private-sector participation in wastewater and faecal-sludge management. *Water International*, Vol. 36, N° 4, pp. 505-521. dx.doi.org/10.1080/02508060.2011.594983
- Murray, A. y Drechsel, P. 2011. Why do some wastewater treatment facilities work when the majority fail? Case study from the sanitation sector in Ghana. *Waterlines*, Vol. 30, N° 2, pp. 135-149. dx.doi.org/10.3362/1756-3488.2011.015
- Mustapha, M. K. 2008. Assessment of the water quality of Oyun Reservoir, Offa, Nigeria, using selected physico-chemical parameters. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol. 8, N° 2, pp. 309-319. www.trjfas.org/abstract.php?lang=en&id=626
- MWI (Ministerio de Recursos Hídricos y Riego del Reino Hachemita de Jordania). 2016a. *Water Substitution and Reuse Policy*. Amán, MWI. www.mwi.gov.jo/sites/en-us/Hot%20Issues/Strategic%20Documents%20of%20The%20Water%20Sector/Water%20Substitution%20and%20Reuse%20Policy%2025.2.2016.pdf
- \_\_\_\_\_. 2016b. *Decentralized Wastewater Management Policy*. www.mwi.gov.jo/sites/en-us/Hot%20Issues/Strategic%20Documents%20of%20The%20Water%20Sector/Decentralized%20Wastewater%20Management%20Policy%2025.2.2016.pdf
- Nandeeshha, M. C. 2002. Sewage Fed Aquaculture System of Kolkata - A Century-old Innovation of Farmers. *Aquaculture Asia*, Vol. 7, pp. 28-32. library.enaca.org/AquacultureAsia/Articles/April- June-2002/SewerageFedAquacultureSystemsOfKolkata.pdf
- Narayan, D.; Patel, R.; Schafft, K.; Rademacher, A. y Koch-Schulte, S. 2000. *Can Anyone Hear us? Voices from 47 Countries*. Vol. I of *Voices of the Poor*. Washington, DC, Banco Mundial.
- Narducci, P. 1889. *Sulla fognatura della città di Roma*. Descripción técnica. Roma, Forzani e C. (en italiano).
- National Academies of Science, Engineering and Medicine. 2015. *Using Graywater and Stormwater to enhance Local Water Supplies: An Assessment of Risks, Costs and Benefits*. Washington, DC, National Academies Press.
- Nikiema, J. Cofie, O. y Impraim, R. 2014. Technological options for safe resource recovery from fecal sludge. Colombo, Instituto Internacional de Gestión de Recursos Hídricos (IWMI) CGIAR Research Program on Water, Land and Ecosystems (WLE). www.iwmi.cgiar.org/Publications/wle/rrr/resource\_recovery\_and\_reuse-series\_2.pdf

- Nikiema, J.; Figoli, A.; Weissenbacher, N.; Langergraber, G.; Marrot, B.; Moulin, P. 2013. Wastewater treatment practices in Africa - Experiences from seven countries. *Sustainable Sanitation Practice*, Vol. 14, pp. 26-34. [cgspace.cgiar.org/handle/10568/40210](http://cgspace.cgiar.org/handle/10568/40210)
- NLÉ. 2012. *Makoko Floating School: Adapting African Coastal Cities to the Impacts of Climate Change*. Research Report. Amsterdam, NLÉ. [www.nleworks.com/publication/makoko-prototype-book/](http://www.nleworks.com/publication/makoko-prototype-book/)
- Noyola, A.; Padilla-Rivera, A.; Morgan-Sagastume, J. M.; Güereca, L. P. y Hernández-Padilla, F. 2012. Typology of municipal wastewater treatment technologies in Latin America. *Clean - Soil, Air, Water*, Vol. 40, N° 9, pp. 926-932. [onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/clen.201100707/full](http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/clen.201100707/full)
- NRMMC/EPHC/NHMRC (Consejo Ministerial de Australia para el Manejo de Recursos Naturales/Consejo para la Protección del Ambiente y el Patrimonio/ Consejo Nacional de Salud e Investigación Médica). 2009. *National Water Quality Management Strategy - Australian Guidelines for Water Recycling: Managing Health and Environmental Risks (Phase 2) - Stormwater Harvesting and Reuse*. Documento N° 23. Canberra, NRMMC/EPHC/NHMRC. [www.environment.gov.au/system/files/resources/4c13655f-eb04-4c24-ac6e-bd01fd4af74a/files/water-recycling-guidelines-stormwater-23.pdf](http://www.environment.gov.au/system/files/resources/4c13655f-eb04-4c24-ac6e-bd01fd4af74a/files/water-recycling-guidelines-stormwater-23.pdf)
- OCDE (Organización de la Cooperación y Desarrollo Económicos). 2010. *Pricing Water Resources and Water and Sanitation Services*. París, OECD Publishing.
- \_\_\_\_\_. 2011a. *Ten Years of Water Sector Reform in Eastern Europe, Caucasus and Central Asia*. París, OECD Publishing. [dx.doi.org/10.1787/9789264118430-en](https://dx.doi.org/10.1787/9789264118430-en)
- \_\_\_\_\_. 2011b. *Environmental Performance Review: Israel*. París, OECD Publishing.
- \_\_\_\_\_. 2012. *Meeting the Challenge of Financing Water and Sanitation: Tools and Approaches*. París, OECD Publishing. [dx.doi.org/10.1787/9789264120525-en](https://dx.doi.org/10.1787/9789264120525-en)
- \_\_\_\_\_. 2013a. *Business Models for Rural Sanitation in Moldova*. París, OCDE.
- \_\_\_\_\_. 2013b. *New Modes of Water Supply and Sanitation Management and Emerging Business Models*. París, OCDE. [www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV/EPOC/WPBWE/RD\(2013\)7&docLanguage=En](http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV/EPOC/WPBWE/RD(2013)7&docLanguage=En)
- \_\_\_\_\_. 2015a. *The Economic Consequences of Climate Change*. París, OECD Publishing.
- \_\_\_\_\_. 2015b. *Water and Cities. Ensuring Sustainable Futures*. París, OECD Publishing. [www.oecd.org/fr/regional/water-and-cities-9789264230149-en.htm](http://www.oecd.org/fr/regional/water-and-cities-9789264230149-en.htm)
- \_\_\_\_\_. 2016. *Sustainable Business Models for Water Supply and Sanitation in Small Towns and Rural Settlements in Kazakhstan*. París, OECD Publishing. [dx.doi.org/10.1787/9789264249400-en](https://dx.doi.org/10.1787/9789264249400-en)
- \_\_\_\_\_. s.f. Pollutant Release and Transfer Register. OECD website. [www.oecd.org/chemicalsafety/pollutant-release-transfer-register/](http://www.oecd.org/chemicalsafety/pollutant-release-transfer-register/)
- OCHA (Oficina de la ONU para la Coordinación de Asuntos Humanitarios). 2016. *Humanitarian Bulletin Lebanon*, N° 22, 1-31 de Agosto de 2016. [reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/OCHA-HumanitarianBulletin-Issue22-August2016.pdf](http://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/OCHA-HumanitarianBulletin-Issue22-August2016.pdf)
- Olmstead, S. M. 2010. The Economics of Water Quality. *Review of Environmental Economics and Policy*, Vol. 4, N° 1, pp. 44-62.
- OMS (Organización Mundial de la Salud). 2006a. *Guías sobre el uso seguro de aguas residuales, excretas y aguas grises - Vol. 2: El uso de aguas residuales en la agricultura*. Ginebra, Suiza, OMS. [www.who.int/water\\_sanitation\\_health/wastewater/wwuvol2intro.pdf](http://www.who.int/water_sanitation_health/wastewater/wwuvol2intro.pdf)
- \_\_\_\_\_. 2006b. *A Compendium of Standards for Wastewater Reuse in the Eastern Mediterranean Region*. Cairo, OMS. [apps.who.int/iris/handle/10665/116515](http://apps.who.int/iris/handle/10665/116515)
- \_\_\_\_\_. 2008. Acute pesticide poisoning: a proposed classification tool. *Boletín de la Organización Mundial de la Salud*, Vol. 86, pp. 205-209. [who.int/bulletin/volumes/86/3/07-041814/en/](http://who.int/bulletin/volumes/86/3/07-041814/en/)
- \_\_\_\_\_. 2010. *Tercera Edición de las Guías OMS para el uso seguro de aguas residuales, excretas y aguas grises en la agricultura y acuicultura: Nota Explicativa para los Administradores de los Programas Nacionales- Objetivos sanitarios*. Ginebra, Suiza, OMS. [www.who.int/water\\_sanitation\\_health/wastewater/FLASH\\_OMS\\_WSHH\\_Guidance\\_note3\\_20100901\\_17092010.pdf?ua=1](http://www.who.int/water_sanitation_health/wastewater/FLASH_OMS_WSHH_Guidance_note3_20100901_17092010.pdf?ua=1)
- \_\_\_\_\_. 2014a. *Invertir en agua y saneamiento: Incrementar el acceso, reducir las desigualdades. Informe de la Evaluación anual mundial sobre saneamiento y agua potable (GLAAS)*. Ginebra, Suiza, OMS. [apps.who.int/iris/bitstream/10665/139735/1/9789241508087\\_eng.pdf?ua=1](http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/139735/1/9789241508087_eng.pdf?ua=1)
- \_\_\_\_\_. 2014b. *Preventing Diarrhoea through Better Water, Sanitation and Hygiene: Exposures and Impacts in Low- and Middle-income Countries*. Ginebra, Suiza, OMS. [apps.who.int/iris/bitstream/10665/150112/1/9789241564823\\_eng.pdf](http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/150112/1/9789241564823_eng.pdf)

- \_\_\_\_\_. 2015. *UN-Water GLAAS TrackFin Initiative: Tracking Financing to Sanitation, Hygiene and Drinking-water at the National Level*. Guidance document summary for decision-makers. Ginebra, Suiza, OMS. [www.who.int/water\\_sanitation\\_health/monitoring/investments/trackfin-summary.pdf](http://www.who.int/water_sanitation_health/monitoring/investments/trackfin-summary.pdf)
- \_\_\_\_\_. 2016a. *Preventing disease through healthy environments: A global assessment of the burden of disease from environmental risks*. Ginebra, Suiza, OMS. [www.who.int/quantifying\\_ehimpacts/publications/preventing-disease/en/](http://www.who.int/quantifying_ehimpacts/publications/preventing-disease/en/)
- \_\_\_\_\_. 2016b. *Planificación de la Seguridad del Saneamiento: Manual para el uso y la Disposición Seguros de Aguas Residuales, Aguas Grises Y Excretas*. Ginebra, Suiza, OMS. [www.who.int/water\\_sanitation\\_health/publications/ssp-manual/en/](http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/ssp-manual/en/)
- O'Neill, M. 2015. *Ecological Sanitation - A Logical Choice? The Development of the Sanitation Institution in a World Society*. Tampere, Finlandia, Universidad Tecnológica de Tampere.
- ONU (Naciones Unidas). 1997. *Convención de las Naciones Unidas sobre el derecho de los usos de los cursos de agua internacionales para fines distintos de la navegación*. Nueva York, Naciones Unidas. [legal.un.org/ilc/texts/instruments/english/conventions/8\\_3\\_1997.pdf](http://legal.un.org/ilc/texts/instruments/english/conventions/8_3_1997.pdf)
- \_\_\_\_\_. s.f.a. *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. [www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/](http://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/)
- \_\_\_\_\_. s.f.b. *Wastewater Treatment*. Plataforma de conocimiento para el desarrollo sostenible, Naciones Unidas. [www.un.org/esa/sustdev/natlinfo/indicators/methodology\\_sheets/freshwater/waste\\_water\\_treatment.pdf](http://www.un.org/esa/sustdev/natlinfo/indicators/methodology_sheets/freshwater/waste_water_treatment.pdf)
- ONU-Agua. 2015a. *Wastewater Management: A UN-Water Analytical Brief*. ONU-Agua. [www.unwater.org/fileadmin/user\\_upload/unwater\\_new/docs/UN-Water\\_Analytical\\_Brief\\_Wastewater\\_Management.pdf](http://www.unwater.org/fileadmin/user_upload/unwater_new/docs/UN-Water_Analytical_Brief_Wastewater_Management.pdf)
- \_\_\_\_\_. 2015b. *Compendium of Water Quality Regulatory Frameworks: Which Water for Which Use?* ONU-Agua.
- \_\_\_\_\_. 2016a. *Metadata on Suggested Indicators for Global Monitoring of the Sustainable Development Goal 6 on Water and Sanitation*. ONU-Agua. [www.unwater.org/fileadmin/user\\_upload/unwater\\_new/docs/Goal%206\\_Metadata%20Compilation%20for%20Suggested%20Indicators\\_UN-Water\\_v2016-04-01\\_2.pdf](http://www.unwater.org/fileadmin/user_upload/unwater_new/docs/Goal%206_Metadata%20Compilation%20for%20Suggested%20Indicators_UN-Water_v2016-04-01_2.pdf)
- \_\_\_\_\_. 2016b. *Water and Sanitation Interlinkages across the 2030 Agenda for Sustainable Development*.
- ONU DAES (Departamento de Asuntos Económicos y Sociales (DAES) de las Naciones Unidas). 2004. *Catalyzing Change: A Handbook for Developing Integrated Water Resources Management (IWRM) and Water Efficiency Strategies*. 13º período de sesiones de la Comisión de Desarrollo Sostenible. Documento Informativo N° 5. Presentado por la Comisión Técnica de la Asociación Mundial del Agua (GWP). DESA/DSD/2005/5.
- \_\_\_\_\_. 2014. *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision*. Nueva York, Naciones Unidas. [www.un.org/en/development/desa/publications/2014-revision-world-urbanization-prospects.html](http://www.un.org/en/development/desa/publications/2014-revision-world-urbanization-prospects.html)
- ONUDI (Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial). 2010. *A Greener Footprint for Industry: Opportunities and Challenges of Sustainable Industrial Development*. Viena, ONUDI. [www.unido.org/what-we-do/environment/resource-efficient-and-low-carbon-industrial-production/greenindustry/green-industry-platform.html](http://www.unido.org/what-we-do/environment/resource-efficient-and-low-carbon-industrial-production/greenindustry/green-industry-platform.html)
- \_\_\_\_\_. 2011. *UNIDO Green Industry Policies for Supporting Green Industry*. Viena, ONUDI. [www.unido.org/fileadmin/user\\_media/Services/Green\\_Industry/web\\_policies\\_green\\_industry.pdf](http://www.unido.org/fileadmin/user_media/Services/Green_Industry/web_policies_green_industry.pdf)
- ONU-Hábitat (Programa de Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos). 2012. *Informe 2006 del Estado de las ciudades del mundo 2012/2013: Prosperidad de las ciudades*. Edición del Foro Urbano Mundial. Nairobi, ONU-Hábitat. [sustainabledevelopment.un.org/content/documents/745habitat.pdf](http://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/745habitat.pdf)
- \_\_\_\_\_. 2016. *Informe Mundial de las Ciudades 2016, "Urbanización y Desarrollo: Futuros Emergentes"*. Nairobi, ONU-Hábitat. [wcr.unhabitat.org/main-report/](http://wcr.unhabitat.org/main-report/)
- \_\_\_\_\_. s.f. *Lake Victoria Region Water and Sanitation (LWATSAN)*. Initiative Reports. [mirror.unhabitat.org/content.asp?cid=2289&catid=462&typeid=24&subMenuId=0](http://mirror.unhabitat.org/content.asp?cid=2289&catid=462&typeid=24&subMenuId=0)
- OPS (Organización Panamericana de la Salud). 1990. *The Situation of Drinking Water Supply and Sanitation in the American Region at the End of the Decade 1981-1990, and Prospects for the Future*. Volumen 1. Washington, DC, PAHO. [www.ircwash.org/sites/default/files/827-AAL90-8870-0.pdf](http://www.ircwash.org/sites/default/files/827-AAL90-8870-0.pdf)
- Osibanjo, O. y Majolagbe, A. O. 2012. Physicochemical quality assessment of groundwater based on land use in Lagos city, Southwest, Nigeria. *Chemistry Journal*, Vol. 2, N° 2, pp. 79-86.

- Otoo, M. y P. Drechsel. 2015. *Resource Recovery from Waste: Business Models for Energy, Nutrient and Water Reuse*. Londres, Earthscan.
- Otoo, M.; Mateo-Sagasta, J. y Madurangji, G. 2015. Economics of water reuse for industrial, environmental, recreational and potable purposes. P. Drechsel, M. Qadir y D. Wichelns (eds.), *Wastewater: Economic Asset in an Urbanizing World*. Springer Netherlands.
- Outotec GmbH & Co. s.f. *Outotec Sewage Sludge Incineration Plants*. Sitio web de Outotec. [www.outotec.com/en/Products--services/Energy/Sewage-Sludge-Incineration-Plants/](http://www.outotec.com/en/Products--services/Energy/Sewage-Sludge-Incineration-Plants/)
- Palmer, N.; Lightbody, P.; Fallowfield, H. y Harvey, B. 1999. *Australia's Most Successful Alternative to Sewerage: South Australia's Septic Tank Effluent Disposal Schemes*. [www.efm.leeds.ac.uk/CIVE/Sewerage/articles/australia.pdf](http://www.efm.leeds.ac.uk/CIVE/Sewerage/articles/australia.pdf)
- Peal, A.; Blackett, I.; Hawkins, P. M. y Heymans, C. 2014. Fecal sludge management: A comparative analysis of 12 cities. *Journal of Water Sanitation and Hygiene for Development*, Vol. 4, N° 4, pp. 563-575. doi:10.2166/washdev.2014.026
- Pillay, A. E.; Salih, F. M. y Maleek, M. I. 2010. Radioactivity in oily sludge and produced waste water from oil: Environmental concerns and potential remedial measures. *Sustainability*, Vol. 2, pp. 890-901. [www.mdpi.com/2071-1050/2/4/890/pdf](http://www.mdpi.com/2071-1050/2/4/890/pdf)
- PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). 2006. *Informe sobre Desarrollo Humano 2006, Más allá de la escasez: poder, pobreza y la crisis mundial del agua*. Nueva York, PNUD. [www.undp.org/content/undp/en/home/librarypage/hdr/human-development-report-2006.html](http://www.undp.org/content/undp/en/home/librarypage/hdr/human-development-report-2006.html)
- \_\_\_\_\_. 2010. *Informe sobre Desarrollo Humano 2010, La verdadera riqueza de las naciones*. Caminos al desarrollo humano. Nueva York, PNUD. [hdr.undp.org/sites/default/files/reports/270/hdr\\_2010\\_en\\_complete\\_reprint.pdf](http://hdr.undp.org/sites/default/files/reports/270/hdr_2010_en_complete_reprint.pdf)
- PNUD WGF en SIWI/Cap-Net/Water-Net/WIN. 2009. *Training Manual on Water Integrity*. Estocolmo, Instituto Hídrico Internacional de Estocolmo (SIWI).
- PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). 2002. *International Source Book on Environmentally Sound Technologies for Wastewater and Stormwater Management*. Londres, IWA Publishing on behalf of UNEP. [www.unep.or.jp/ietc/Publications/TechPublications/TechPub-15/main\\_index.asp](http://www.unep.or.jp/ietc/Publications/TechPublications/TechPub-15/main_index.asp)
- \_\_\_\_\_. 2010. *Clearing the Waters: A Focus on Water Quality Solutions*. Nairobi, PNUMA. [www.unep.org/publications/contents/pub\\_details\\_search.asp?ID=4123](http://www.unep.org/publications/contents/pub_details_search.asp?ID=4123)
- \_\_\_\_\_. 2012a. *Greening the Economy through Life Cycle Thinking - Ten Years of the UNEP/SETAC Life Cycle Initiative*. Nairobi, PNUMA. [www.unep.fr/shared/publications/pdf/DTIx1536xPA-GreeningEconomythroughLifeCycleThinking.pdf](http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/DTIx1536xPA-GreeningEconomythroughLifeCycleThinking.pdf)
- \_\_\_\_\_. 2012b. *Measuring Water Use in a Green Economy. A Report of the Working Group on Water Efficiency to the International Resource Panel*. Nairobi, PNUMA. [www.unep.org/resourcepanel-old/Portals/24102/Measuring\\_Water.pdf](http://www.unep.org/resourcepanel-old/Portals/24102/Measuring_Water.pdf)
- \_\_\_\_\_. 2015a. *Good Practices for Regulating Wastewater Treatment: Legislation, Policies and Standards*. Nairobi, PNUMA. [unep.org/gpa/documents/publications/GoodPracticesforRegulatingWastewater.pdf](http://unep.org/gpa/documents/publications/GoodPracticesforRegulatingWastewater.pdf)
- \_\_\_\_\_. 2015b. *Economic Valuation of Wastewater - The Cost of Action and the Cost of No Action*. Nairobi, PNUMA. [unep.org/gpa/Documents/GWI/Wastewater%20Evaluation%20Report%20Mail.pdf](http://unep.org/gpa/Documents/GWI/Wastewater%20Evaluation%20Report%20Mail.pdf)
- \_\_\_\_\_. 2015c. *Options for Decoupling Economic Growth from Water Use and Water Pollution*. Report of the International Resource Panel Working Group on Sustainable Water Management. Nairobi, PNUMA. [www.unep.org/resourcepanel/KnowledgeResources/AssessmentAreasReports/Water/tabid/133332/Default.aspx](http://www.unep.org/resourcepanel/KnowledgeResources/AssessmentAreasReports/Water/tabid/133332/Default.aspx)
- \_\_\_\_\_. 2016. *A Snapshot of the World's Water Quality: Towards a Global Assessment*. Nairobi, PNUMA. [en.unesco.org/emergingpollutants](http://en.unesco.org/emergingpollutants)
- \_\_\_\_\_. s.f. *Cleaner & Safer Production*. Sitio web de PNUMA. [www.unep.org/resourceefficiency/Business/CleanerSaferProduction/tabid/55543/Default.aspx](http://www.unep.org/resourceefficiency/Business/CleanerSaferProduction/tabid/55543/Default.aspx)
- PNUMA-DHI/IUCN/TNC/WRI (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente-DHI/ Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza /The Nature Conservancy/Instituto de Recursos Mundiales). 2014. *Green Infrastructure Guide for Water Management: Ecosystem-based Management Approaches for Water-related Infrastructure Projects*. Nairobi, PNUMA. [www.unepdhi.org/-/media/microsite\\_unepdhi/publications/documents/unep/web-unep-dhigroup-green-infrastructure-guide-en-20140814.pdf](http://www.unepdhi.org/-/media/microsite_unepdhi/publications/documents/unep/web-unep-dhigroup-green-infrastructure-guide-en-20140814.pdf)



- PNUMA IF (Iniciativa Financiera del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). 2007. *Half Full or Half Empty? A Set of Indicative Guidelines for Water-Related Risks and an Overview of Emerging Opportunities for Financial Institutions*. Ginebra, Suiza, PNUMA IF. [www.unepfi.org/publications/water/](http://www.unepfi.org/publications/water/)
- Poongothai, S.; Ravikrishnan, R. y Murthy, P. 2007. Endocrine disruption and perspective human health implications: A review. *The Internet Journal of Toxicology*, Vol. 4, N° 2. [ispub.com/IJTO/4/2/3638](http://ispub.com/IJTO/4/2/3638)
- Postel, S. 2012. "Sewer Mining" - Efficient Water Recycling Coming to a Community near You. National Geographic website. [voices.nationalgeographic.com/2012/01/16/sewer-mining-coming-to-a-community-near-you/](http://voices.nationalgeographic.com/2012/01/16/sewer-mining-coming-to-a-community-near-you/)
- PR Newswire. 2013. *Constructed Wetland System Wins National Honor, Saves \$26 Million*. [www.prnewswire.com/news-releases/constructed-wetland-system-wins-national-honor-saves-26-million-203799381.html](http://www.prnewswire.com/news-releases/constructed-wetland-system-wins-national-honor-saves-26-million-203799381.html)
- Prüss-Üstün, A.; Bartram, J.; Clasen, T.; Colford Jr.; J. M.; Cumming, O.; Curtis, V.; Bonjour, S.; Dangour, A. D.; De France, J.; Fewtrell, L.; Freeman, M. C.; Gordon, B.; Hunter, P. R.; Johnston, B. R.; Mathers, C.; Mäusezahl, D.; Medlicott, K.; Neira, M.; Stocks, M.; Wolf, J. y Cairncross, S. 2014. Burden of disease from inadequate water, sanitation and hygiene in low- and middle-income settings: A retrospective analysis of data from 145 countries. *Tropical Medicine and International Health*, Vol. 19, N° 8, pp. 894-905. Doi: 10.1111/tmi.12329
- Qadir, M.; Bahri, A.; Sato, T. y Al-Karadsheh, E. 2010. Wastewater production, treatment, and irrigation in Middle East and North Africa. *Irrigation and Drainage Systems*, Vol. 24, N° 1, pp. 37-51. Doi: 0.1007/s10795-009-9081-y
- Qadir, M.; Boelee, E.; Amerasinghe, P. y Danso, G. 2015a. Costs and benefits of using wastewater for aquifer recharge. P. Drechsel, M. Qadir y D. Wichelns (eds.), *Wastewater - Economic asset in an urbanizing world*. Springer Netherlands.
- Qadir, M.; Mateo-Sagasta, J.; Jiménez, B.; Siebe, C.; Siemens J. y Hanjra, M. A. 2015b. Environmental risks and cost-effective risk management in wastewater use systems. P. Drechsel, M. Qadir y D. Wichelns (eds.), *Wastewater - Economic asset in an urbanizing world*. Springer Netherlands.
- Qu, X.; Alvarez, P. J. J. y Li, Q. 2013. Applications of nanotechnology in water and wastewater treatment. *Water Research*, Vol. 47, N° 12, pp. 3931-3946. [dx.doi.org/10.1016/j.watres.2012.09.058](http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2012.09.058)
- Raghav, M.; Eden, S.; Mitchell, K. y Witte, B. 2013. Contaminants of emerging concern in water.
- Arroyo 2013. Tucson, Ariz.; Water Resources Research Center, College of Agriculture and Life Sciences, University of Arizona.
- Rao, K.; Hanjra, M. A.; Drechsel, P. y Danso, G. 2015. Business models and economic approaches supporting water reuse. P. Drechsel, M. Qadir y D. Wichelns (eds.), *Wastewater - Economic Asset in an Urbanizing World*. Springer Netherlands.
- Raschid-Sally, L. y Jayakody, P. 2008. *Drivers and Characteristics of Wastewater Agriculture in Developing Countries: Results from a Global Assessment*. IWMI Informe de Investigación N° 127. Colombo, Instituto Internacional de Gestión de Recursos Hídricos (IWMI).
- RECPnet (Red Global en Eficiencia en el Uso de los Recursos y Producción más Limpia). s.f.a. *Capturing and Promoting Knowledge on Resource Efficient and Cleaner Production*. Factsheet. Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial/Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (ONU/PI/PNUMA). [recpnet.org/wp-content/uploads/2016/05/KMS\\_Capturing-and-Promoting-Knowledge-on-RECP.pdf](http://recpnet.org/wp-content/uploads/2016/05/KMS_Capturing-and-Promoting-Knowledge-on-RECP.pdf)
- \_\_\_\_\_. s.f.b. *RECP Experiences at Musoma Textile Mills Tanzania Limited (MUTEX) - Tanzania*. RECP Experiences. Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial/ Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA/ONU/PI). [africa.recnet.org/uploads/resource/3dd4f3974e38a68ecb59b16ff6cc158d.pdf](http://africa.recnet.org/uploads/resource/3dd4f3974e38a68ecb59b16ff6cc158d.pdf)
- Rockström, J.; Steffen, W.; Noone, K.; Persson, A.; Chapin III, F. S.; Lambin, E.; Lenton, T. M.; Scheffer, M.; Folke, C.; Schellnhuber, H. J.; Nykvist, B.; De Wit, C. A.; Hughes, T.; Van der Leeuw, S.; Rodhe, H.; Sörlin, S.; Snyder, P. K.; Costanza, R.; Svedin, U.; Falkenmark, M.; Karlberg, L.; Corell, R. W.; Fabry, F. J.; Hansen, J.; Walker, B.; Liverman, D.; Richardson, K.; Crutzen, P. y Foley, J. 2009. Planetary boundaries: Exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Society*, Vol. 14, N° 2, art. 32. [www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/](http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/)
- Rodríguez, D. J.; Delgado, A.; DeLaquil, P. y Sohns, A. 2013. *Thirsty Energy*. Water Papers. Washington, DC, Banco Mundial. [documents.worldbank.org/curated/en/2013/01/17932041/thirsty-energy](http://documents.worldbank.org/curated/en/2013/01/17932041/thirsty-energy)

- Rojas Ortuste, F. 2014. *Políticas e Institucionalidad en Materia de Agua Potable y Saneamiento en América Latina y el Caribe*. Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe de las Naciones Unidas (CEPAL). [repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/36776/S2014277\\_es.pdf](http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/36776/S2014277_es.pdf)
- Rosenwinkel, K. H.; Borchmann, A.; Engelhart, M.; Eppers, R.; Jung, H.; Marzinkowki, J. y Kipp, S. 2013. Closing loops - Industrial water management in Germany. V. Lazarova, T. Asano, A. Bahri, y J. Anderson (eds.), *Milestones in Water Reuse: The Best Success Stories*. Londres, IWA Publishing.
- Rossi, A. 2009. Matanza Riachuelo River Basin Authority. *Circular of the Network for Cooperation in Integrated Water Resource Management for Sustainable Development in Latin America and the Caribbean*, N° 29. Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe de las Naciones Unidas (CEPAL). [repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/39403/Carta29\\_en.pdf](http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/39403/Carta29_en.pdf)
- Rothstein, B.; y Tannenber, M. 2015. *Making Development Work: The Quality of Government Approach*. Estocolmo, Expertgruppen för Biståndsanalys (EBA). [eba.se/wp-content/uploads/2015/12/Making\\_development\\_work\\_07.pdf](http://eba.se/wp-content/uploads/2015/12/Making_development_work_07.pdf)
- SADC (Southern African Development Community). 2000. *Revised Protocol on Shared Watercourses in the Southern African Development Community*. Gaborone, Comunidad de Desarrollo de África Austral. [www.sadc.int/documents-publications/show/1975](http://www.sadc.int/documents-publications/show/1975)
- Saldias Zambrana, C. 2016. *Analyzing the Institutional Challenges for the Agricultural (Re)use of Wastewater in Developing Countries*. Tesis de Doctorado. Ghent, Bélgica, University of Ghent.
- Salgot, M.; Huertas, E.; Weber, S.; Dott, W. y Hollender, J. 2006. Wastewater reuse and risk: Definition of key objectives. *Desalination*, Vol. 187, N° 1-3, pp. 29-40.
- Sato, T.; Qadir, M.; Yamamoto, S.; Endo, T. y Zahoor, A. 2013. Global, regional, and country level need for data on wastewater generation, treatment, and use. *Agricultural Water Management*, Vol. 130, pp. 1-13. [dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2013.08.007](http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2013.08.007)
- Schoumans, O. F.; Bouraoui, F.; Kabbe, C.; Oenema, O. y Van Dijk, K. C. 2015. Phosphorus management in Europe in a changing world. *Ambio*, Vol. 44, N° 2, pp. 180-192. [doi.org/10.1007/s13280-014-0613-9](http://doi.org/10.1007/s13280-014-0613-9).
- Schreinemachers, P. y Tipraqsa, P. 2012. Agricultural pesticides and land use intensification in high, middle and low income countries. *Food Policy*, Vol. 37, N° 6, pp. 616-626.
- Schuster-Wallace, C. J.; Wild, C. y Metcalfe, C. 2015. *Valuing Human Waste as an Energy Resource: A Research Brief Assessing the Global Wealth in Waste*. Hamilton, Ont.; Instituto de Medio Ambiente y Seguridad Humana de la Universidad de las Naciones Unidas (UNU-INWEH). [inweh.unu.edu/vast-energy-value-human-waste](http://inweh.unu.edu/vast-energy-value-human-waste)
- Schutte, F. 2008. Water reuse in central and southern regions of Africa. B. Jiménez y T. Asano (eds.), *Water Reuse: An International Survey of Current Practice, Issues and Needs*. Londres, IWA Publishing.
- Scott, C.; Drechsel, P.; Raschid-Sally, L.; Bahri, A.; Mara, D.; Redwood, M. y Jiménez, B. 2010. Wastewater irrigation and health: Challenges and outlook for mitigating risks in low-income countries. P. Drechsel, C. A. Scott, L. Raschid-Sally, M. Redwood y A. Bahri (eds.), *Wastewater Irrigation and Health: Assessing and Mitigating Risks in Low-income Countries*. Londres/Sterling, Va.; Earthscan. [www.iwmi.cgiar.org/Publications/Books/PDF/Wastewater\\_Irrigation\\_and\\_Health\\_book.pdf](http://www.iwmi.cgiar.org/Publications/Books/PDF/Wastewater_Irrigation_and_Health_book.pdf)
- SEI (Instituto de Medio Ambiente de Estocolmo). *Piloting Enclosed Long-term Composting in an Indian village*. Estocolmo, SEI. [www.sei-international.org/mediamanager/documents/Publications/sei-fs-2014-biharecosan-mohaddipur.pdf](http://www.sei-international.org/mediamanager/documents/Publications/sei-fs-2014-biharecosan-mohaddipur.pdf)
- Sengupta, S.; Nawaz, T. y Beaudry, J. 2015. Nitrogen and phosphorus recovery from wastewater. *Current Pollution Reports*, Vol. 1, N° 3, pp. 155-166. [link.springer.com/article/10.1007/s40726-015-0013-1](http://link.springer.com/article/10.1007/s40726-015-0013-1)
- Sheikh, S. 2008. *Public Toilets in Delhi: An Emphasis on the Facilities for Women in Slum/Resettlement Areas*. CCS Documento de trabajo N° 192. Summer Research Internship Programme 2008, Centre for Civil Society. [ccs.in/internship\\_papers/2008/Public-toilets-in-Delh-192.pdf](http://ccs.in/internship_papers/2008/Public-toilets-in-Delh-192.pdf)
- Shiklomanov, I. A. 1999. World water resources and their use a joint SHI/UNESCO product. Database. <http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/shiklomanov/>
- SISS (Superintendencia de Servicios Sanitarios). 2003. El tratamiento de aguas servidas en Chile. *Aguas Claras*, N° 2. Santiago. SISS, Gobierno de Chile. [www.siss.gob.cl/577/articles-4482\\_recurso\\_1.pdf](http://www.siss.gob.cl/577/articles-4482_recurso_1.pdf)
- \_\_\_\_\_. 2015. *Informe de Gestión del Sector Sanitario 2014*. Santiago, SISS, Gobierno de Chile.

- SSWM (Gestión de Agua y Saneamiento Sostenible). s.f. Reuse Water between Businesses. Sitio web de SSWM. [www.sswm.info/category/implementation-tools/water-use/hardware/optimisation-water-use-industry/reuse-water-between](http://www.sswm.info/category/implementation-tools/water-use/hardware/optimisation-water-use-industry/reuse-water-between)
- State of Green. 2015. *Sustainable Urban Drainage System: Using Rainwater as a Resource to Create Resilient and Liveable Cities*. Think Denmark: White paper for a green transition. Copenhagen, State of Green. [stateofgreen.com/files/download/8247](http://stateofgreen.com/files/download/8247)
- Statistics Canada. 2014. *Industrial Water Use 2011*. Ottawa, Statistics Canada. [publications.gc.ca/collections/collection\\_2014/statcan/16-401-x/16-401-x2014001-eng.pdf](http://publications.gc.ca/collections/collection_2014/statcan/16-401-x/16-401-x2014001-eng.pdf)
- \_\_\_\_\_. s.f. Industrial Water Survey (IWS). Statistics Canada website. [www23.statcan.gc.ca/imdb/p2SV.pl?Function=getSurvey&Id=253674](http://www23.statcan.gc.ca/imdb/p2SV.pl?Function=getSurvey&Id=253674)
- Steen, I. 1998. Management of a non-renewable resource. *Phosphorus and Potassium*, Vol. 217, pp. 25-31.
- Steffen, W.; Richardson, K.; Rockström, J.; Cornell, S. E.; Fetzer, I.; Bennett, E. M.; Biggs, R.; Carpenter, S. R.; De Vries, W.; De Wit, C. A.; Folke, C.; Gerten, D.; Heinke, J.; Mace, G. M.; Persson, L. M.; Ramanathan, V.; Reyers, B. y Sorlin, S. 2015. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, Vol. 347, N° 6223. Doi: 10.1126/science.1259855
- Stern T. 2003. *Policy Instruments for Environmental and Natural Resource Management*. Washington, DC, Resource for the Future.
- Strande, L.; Ronteltap, M. y Brdjanovic, D. (eds.). 2014. *Faecal Sludge Management: Systems Approach for Implementation and Operation*. Londres, IWA Publishing.
- Taiwo, A. M. 2011. Composting as a sustainable waste management technique in developing countries. *Journal of Environmental Science and Technology*, Vol. 4, pp. 93-102. Doi: 10.3923/jest.2011.93.102
- Taiwo, A. M.; Olujimi, O. O.; Bamgbose, O. y Arowolo, T. A. 2012. Surface water quality monitoring in Nigeria: Situational analysis and future management strategy. K. Voudoris (eds.), *Water Quality Monitoring and Assessment*. InTech. [www.intechopen.com/books/water-quality-monitoring-and-assessment/surface-water-quality-monitoring-in-nigeria-situational-analysis-and-future-management-strategy](http://www.intechopen.com/books/water-quality-monitoring-and-assessment/surface-water-quality-monitoring-in-nigeria-situational-analysis-and-future-management-strategy)
- Tchobanoglous, G.; Burton, F. L. y David Stensel, H. 2003. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. 4ª edición. Nueva York, Metcalf & Eddy Inc.
- Thomson et al. 1998. *Report on the Environmental Benefits and Costs of Green Roof Technology for the City of Toronto*. Toronto, Ont.; Departamento de Ciencias Arquitectónicas, Ryerson University.
- Trachsel, M. 2008. *Consensus Platform "Endocrine Disruptors in Waste Water and in the Aquatic Environment": Final Document*. Berna, Fundación Nacional Suiza para la Ciencia (SNSF).
- Transparency International. 2008. *Global Corruption Report 2008: Corruption in the Water Sector*. Cambridge, Reino Unido, Cambridge University Press. [www.transparency.org/whatwedo/publication/global\\_corruption\\_report\\_2008\\_corruption\\_in\\_the\\_water\\_sector](http://www.transparency.org/whatwedo/publication/global_corruption_report_2008_corruption_in_the_water_sector)
- Tréhu, É. 1905. *Des pouvoirs de la municipalité parisienne en matière d'assainissement, l'application de la loi du 10 juillet 1894 sur l'assainissement de Paris et de la Seine*. Tesis de Doctorado. Facultad de Derecho, Universidad de París (en francés).
- Trent, J. 2012. *Offshore Membrane Enclosures for Growing Algae (OMEGA) - A Feasibility Study for Wastewater to Biofuels*. NASA Ames Research Center project report for the California Energy Commission. [www.energy.ca.gov/2013publications/CEC-500-2013-143/CEC-500-2013-143.pdf](http://www.energy.ca.gov/2013publications/CEC-500-2013-143/CEC-500-2013-143.pdf)
- TSG (TechKNOWLEDGEy Strategic Group). 2014. *2014 Water Market Review*. Boulder, Colo.; TSG. [www.tech-strategy.com/index.htm](http://www.tech-strategy.com/index.htm)
- Umweltbundesamt GmbH. 2015. *Technical Assessment of the Implementation of Council Directive concerning Urban Waste Water Treatment (91/271/EEC)*. Bruselas, Umweltbundesamt GmbH. [ec.europa.eu/environment/water/water-urbanwaste/implementation/pdf/Technical%20assessment%20UWWTD.pdf](http://ec.europa.eu/environment/water/water-urbanwaste/implementation/pdf/Technical%20assessment%20UWWTD.pdf)
- UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura). 2011. A World of Science. *Natural Sciences Quarterly Newsletter*, Vol. 9, N° 4, pp. 1-24. [unesdoc.unesco.org/images/0021/002122/212222e.pdf](http://unesdoc.unesco.org/images/0021/002122/212222e.pdf)
- \_\_\_\_\_. 2015. *UNESCO Project on Emerging Pollutants in Wastewater Reuse in Developing Countries*. Brochure. París, UNESCO. [unesdoc.unesco.org/images/0023/002352/235241E.pdf](http://unesdoc.unesco.org/images/0023/002352/235241E.pdf)

- \_\_\_\_\_. 2016a. *Harnessing Scientific Research Based Outcomes for Effective Monitoring and Regulation of Emerging Pollutants: A Case Study of Emerging Pollutants in Water and Wastewater in Nigeria*. Series of Technical and Policy Case Studies. UNESCO-PHI International Initiative on Water Quality (IIWQ). [en.unesco.org/emergingpollutants/strengthening-scientific-research-and-policy/case-studies](http://en.unesco.org/emergingpollutants/strengthening-scientific-research-and-policy/case-studies)
- \_\_\_\_\_. 2016b. *Emerging Pollutants in Water and Wastewater: Technical and Policy Case Studies*.
- UNESCO Project on Emerging Pollutants in Wastewater Reuse in Developing Countries. [en.unesco.org/emergingpollutants](http://en.unesco.org/emergingpollutants)
- UNESCO-PHI/GTZ (Programa Hidrológico Internacional de la Organización de las Naciones para la Educación, la Ciencia y la Cultura /Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit). 2006. *Capacity Building for Ecological Sanitation- Concepts for Ecologically Sustainable Sanitation in Formal and Continuing Education*. París/ Eschborn, Alemania, UNESCO-PHI/GTZ. [unesdoc.unesco.org/images/0014/001463/146337e.pdf](http://unesdoc.unesco.org/images/0014/001463/146337e.pdf)
- UNESCWA (Comisión Económica y Social de las Naciones Unidas para Asia Occidental). 2013. *ESCWA Water Development Report 5: Issues in Sustainable Water Resources Management and Water Services in the Arab Region*. Nueva York, Naciones Unidas. [www.unescwa.org/publications/escwa-water-development-report-5-issues-sustainable-water-resources-management-and](http://www.unescwa.org/publications/escwa-water-development-report-5-issues-sustainable-water-resources-management-and)
- \_\_\_\_\_. 2015. *ESCWA Water Development Report 6: The Water, Energy, Food Security Nexus in the Arab Region*. Beirut, Naciones Unidas. [www.unescwa.org/publications/escwa-water-development-report-6-water-energy-and-food-security-nexus-arab-region](http://www.unescwa.org/publications/escwa-water-development-report-6-water-energy-and-food-security-nexus-arab-region)
- UNICEF/OMS (Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia/Organización Mundial de la Salud). 2000. *Evaluación Mundial del Abastecimiento de Agua y el Saneamiento en 2000*. Nueva York/Ginebra, UNICEF/OMS. [www.who.int/water\\_sanitation\\_health/monitoring/jmp2000.pdf](http://www.who.int/water_sanitation_health/monitoring/jmp2000.pdf)
- \_\_\_\_\_. 2009. *Diarrea: Por qué siguen muriendo los niños y qué se puede hacer*. Nueva York/Ginebra, UNICEF/OMS. [www.unicef.org/media/files/Final\\_Diarrhoea\\_Report\\_October\\_2009\\_final.pdf](http://www.unicef.org/media/files/Final_Diarrhoea_Report_October_2009_final.pdf)
- \_\_\_\_\_. 2011. *Agua Potable: equidad, seguridad y sostenibilidad*. Nueva York/Ginebra, Programa Conjunto OMS/UNICEF de Monitoreo del Abastecimiento de Agua y del Saneamiento. [www.wssinfo.org/fileadmin/user\\_upload/resources/report\\_wash\\_low.pdf](http://www.wssinfo.org/fileadmin/user_upload/resources/report_wash_low.pdf)
- \_\_\_\_\_. 2012. *Progresos en materia de saneamiento y agua potable: informe de actualización 2012*. Nueva York/Ginebra, Programa Conjunto OMS/UNICEF de Monitoreo del Abastecimiento de Agua y del Saneamiento.
- \_\_\_\_\_. 2014. *Progresos en materia de saneamiento y agua potable: informe de actualización 2014*. Nueva York/Ginebra, Programa Conjunto OMS/UNICEF de Monitoreo del Abastecimiento de Agua y del Saneamiento.
- \_\_\_\_\_. 2015. *Progresos en materia de saneamiento y agua potable: informe de actualización 2015 y Evaluación de los ODM*. Nueva York/ Ginebra, Programa Conjunto OMS/UNICEF de Monitoreo del Abastecimiento de Agua y del Saneamiento. [www.wssinfo.org/fileadmin/user\\_upload/resources/JMP-Update-report-2015\\_English.pdf](http://www.wssinfo.org/fileadmin/user_upload/resources/JMP-Update-report-2015_English.pdf)
- UE (Unión Europea). 1991. Directiva 91/271/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. *Diario Oficial de la Unión Europea*, L 135/40.
- \_\_\_\_\_. 2000. Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, L 327/1.
- \_\_\_\_\_. 2008. DIRECTIVA 2008/98/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, L312/3.
- UNSD (División de Estadística de las Naciones Unidas). 2012. *SEEA-Water: System of Environmental-Economic Accounting for Water*. Nueva York, UNSD. [unstats.un.org/unsd/envaccounting/seeaw/seewaterwebversion.pdf](http://unstats.un.org/unsd/envaccounting/seeaw/seewaterwebversion.pdf)
- \_\_\_\_\_. s.f. *Questionnaire 2013 on Environment Statistics*. Sitio web de UNSD. UNSD/PNUMA. [unstats.un.org/unsd/environment/questionnaire2013.htm](http://unstats.un.org/unsd/environment/questionnaire2013.htm)
- Urbis Limited. 2007. *A Study on Green Roof Application in Hong Kong*. Hong Kong, Urbis Limited. [www.archsd.gov.hk/media/11630/green\\_roof\\_study\\_final\\_report.pdf](http://www.archsd.gov.hk/media/11630/green_roof_study_final_report.pdf)
- US EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos). 2003. *National Management Measures to Control Nonpoint Source Pollution from Agriculture*. Washington, DC, US EPA. [www.epa.gov/nps/national-management-measures-control-nonpoint-source-pollution-agriculture](http://www.epa.gov/nps/national-management-measures-control-nonpoint-source-pollution-agriculture)



- \_\_\_\_\_. 2004. *Guidelines for Water Reuse*. Washington, DC, US EPA. [nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/30006MKD.PDF?Dockey=30006MKD.PDF](http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/30006MKD.PDF?Dockey=30006MKD.PDF)
- \_\_\_\_\_. 2012. *2012 Guidelines for Water Reuse*. Washington, DC, US EPA. [nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P100FS7K.pdf](http://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P100FS7K.pdf)
- \_\_\_\_\_. 2015. *Steam Electric Power Generating Effluent Guidelines - 2015 Final Rule*. US EPA website. [www.epa.gov/eg/steam-electric-power-generating-effluent-guidelines-2015-final-rule](http://www.epa.gov/eg/steam-electric-power-generating-effluent-guidelines-2015-final-rule)
- \_\_\_\_\_. 2016. *Clean Watershed Needs Survey 2012 - Report to Congress*. Washington, DC, US EPA. [www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/cwns\\_2012\\_report\\_to\\_congress-508-opt.pdf](http://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/cwns_2012_report_to_congress-508-opt.pdf)
- \_\_\_\_\_. s.f.a. *Glossary of Climate Change Terms*. US EPA website. [www3.epa.gov/climatechange/glossary.html#W](http://www3.epa.gov/climatechange/glossary.html#W)
- \_\_\_\_\_. s.f.b. *Terminology Service (TS): Vocabulary Catalogue*. US EPA website. [ofmpub.epa.gov/sor\\_internet/registry/termreg/searchandretrieve/glossariesandkeywordlists/search.do?details=&glossaryName=Septic%20Systems%20Glossary](http://ofmpub.epa.gov/sor_internet/registry/termreg/searchandretrieve/glossariesandkeywordlists/search.do?details=&glossaryName=Septic%20Systems%20Glossary)
- \_\_\_\_\_. s.f.c. *Clean Water State Revolving Fund (CWSRF)*. US EPA website. [www.epa.gov/sites/production/files/2016-03/documents/cwsrfinfographic-030116.pdf](http://www.epa.gov/sites/production/files/2016-03/documents/cwsrfinfographic-030116.pdf) [www.epa.gov/cwsrf](http://www.epa.gov/cwsrf)
- USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos). s.f. *Contaminants of Emerging Concern in the Environment*. Sitio web del USGS: [toxics.usgs.gov/investigations/cec/index.php](http://toxics.usgs.gov/investigations/cec/index.php)
- Van de Helm, A. W. C.; Bhai, A.; Coloni F.; Koning, W. J. G. y De Bakker, P. T. 2015. *Developing Water and Sanitation Services in Refugee Settings from Emergency to Sustainability - The Case of Zaatari Camp in Jordan*. Actas del Congreso y Exhibición del Agua del IWA 2015, Jordania, 18-22 octubre de 2015. Londres, International Water Association (IWA). [repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:7953d49d-194a-4ecb-81d8-63afcb3f6f60?collection=research](http://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:7953d49d-194a-4ecb-81d8-63afcb3f6f60?collection=research)
- Van Dien, F. y Boone, P. 2015. *Constructed Wetlands Pilot at Sher Ethiopia PLC*. Informe de evaluación. ECOFYT. [www.hoarec.org/images/Evaluation%20Report%20Constructed%20Wetland%20Pilot%20at%20Sher%20Ethiopia%20PLC.pdf](http://www.hoarec.org/images/Evaluation%20Report%20Constructed%20Wetland%20Pilot%20at%20Sher%20Ethiopia%20PLC.pdf)
- Van Houtte, E. y Verbauwheide, J. 2013. Long-time membrane experience at Torreele's water re-use facility in Belgium. *Desalination and Water Treatment*, Vol. 51, N° 22-24, pp. 4253-4262. [www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/19443994.2013.769487](http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/19443994.2013.769487)
- Van Loosdrecht, M. C. M. y Brdjanovic, D. 2014. Anticipating the next century of wastewater treatment. *Science*, Vol. 344, N° 6191, pp. 1452-1453. Doi: 10.1126/science.1255183
- Van Vuuren, D. P.; Bouwman, A. F.; Beusen, A. H. W. 2010. Phosphorus demand for the 1970-2100 period: A scenario analysis of resource depletion. *Global Environmental Change*, Vol. 20, N° 3, pp. 428-439. doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.04.004
- Van Weert, F.; Van der Gun, J.; Reckman, J. 2009. *Global Overview of Saline Groundwater Occurrence and Genesis*. Utrecht, Países Bajos, Centro Internacional de Evaluación de los Recursos de Aguas Subterráneas (IGRAC).
- Veolia/IFPRI (Instituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias). 2015. *The Murky Future of Global Water Quality: New Global Study Projects Rapid Deterioration in Water Quality*. White Paper. Veolia / IFPRI. [www.ifpri.org/publication/murky-future-global-water-quality-new-global-study-projects-rapid-deterioration-water](http://www.ifpri.org/publication/murky-future-global-water-quality-new-global-study-projects-rapid-deterioration-water)
- Vinnerås, B. 2001. *Faecal Separation and Urine Diversion for Nutrient Management of Household Biodegradable Waste and Wastewater*. Uppsala, Swedish University of Agricultural Sciences. [pub.epsilon.slu.se/3817/1/vinneras\\_b\\_091216.pdf](http://pub.epsilon.slu.se/3817/1/vinneras_b_091216.pdf)
- Visvanathan C.; Ben Aim, R. y Parameshwaran, K. 2000. Membrane separation bioreactors for wastewater treatment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, Vol. 30, N° 1, pp. 1-48. Doi: 10.1080/10643380091184165
- Von Muench, E. 2009. *Compilation of 24 SuSanA case studies: Pre-Print for the 10th SuSanA meeting*. Eschborn, Alemania, Sustainable Sanitation Alliance. [www.susana.org/en/resources/library/details/1937](http://www.susana.org/en/resources/library/details/1937)
- Von Sperling, M. 2007. *Wastewater Characteristic, Treatment and Disposal*. Vol. I of Biological Wastewater Treatment Series. Londres, IWA Publishing. [www.sswm.info/sites/default/files/reference\\_attachments/SPERLING%202007%20Wastewater%20Characteristics,%20Treatment%20and%20Disposal.pdf](http://www.sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/SPERLING%202007%20Wastewater%20Characteristics,%20Treatment%20and%20Disposal.pdf)
- Walters, J.; Oelker, G. y Lazarova, V. 2013. Producing designer recycled water tailored to customer needs. V. Lazarova, T. Asano, A. Bahri y J. Anderson (eds.). *Milestones in Water Reuse: The Best Success Stories*. Londres, IWA: Publishing.

- Wang, H. y Ren, Z. J. 2014. Bioelectrochemical metal recovery from wastewater: A review. *Water Research*, Vol. 66, pp. 219-232.
- Wang, H.; Wang, T.; Zhang, B.; Li, F.; Toure, B.; Omosa, I. B.; Chiramba, T.; Abdel-Monem, M. y Pradhan, M. 2014. Water and wastewater treatment in Africa - Current practices and challenges. *Clean - Soil, Air, Water*, Vol. 42, N° 8, pp. 1029-1035. [onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/clen.201470073/pdf](http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/clen.201470073/pdf)
- Water Online. 2014. Texas Leads the Way with First Direct Potable Reuse Facilities in U.S. Water Online, 16 de setiembre de 2014. [www.wateronline.com/doc/texas-leads-the-way-with-first-direct-potable-reuse-facilities-in-u-s-0001](http://www.wateronline.com/doc/texas-leads-the-way-with-first-direct-potable-reuse-facilities-in-u-s-0001)
- WBCSD (Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible). s.f. *Scaling up Industrial Water Reuse*. Sitio web del WBCSD. [www.wbcd.org/work-program/sector-projects/water/waterreuse.aspx](http://www.wbcd.org/work-program/sector-projects/water/waterreuse.aspx)
- WBCSD/IWA (Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible /International Water Association). s.f. *Anglo American plc eMalaheni Water Reclamation Project*. Case Study. WBCSD/IWA.
- WEF (Foro Económico Mundial). 2016. *The Global Risks Report 2016*. Ginebra, Suiza, WEF. [wef.ch/risks2016](http://wef.ch/risks2016)
- West Basin Municipal Water District. s.f. *Recycled Water*. Sitio web de West Basin Municipal Water District. [www.westbasin.org/water-reliability-2020/recycled-water/about-recycled-water.html](http://www.westbasin.org/water-reliability-2020/recycled-water/about-recycled-water.html)
- Wichelns, D.; Drechsel, P. y Qadir, M. 2015. Wastewater: Economic asset in an urbanizing world. P. Dreschel, M. Qadir y D. Wichelns (eds.), *Wastewater - Economic Asset in an Urbanizing World*. Springer Netherlands.
- WIN (Red de Integridad del Agua). 2016. *Water Integrity Global Outlook 2016*. Berlín, WIN.
- Winblad, U. y Simpson-Hébert, M. (eds.). 2004. *Ecological Sanitation: Revised and Enlarged Edition*. Estocolmo, Instituto de Medio Ambiente de Estocolmo (SEI).
- Winpenny, J.; Heinz, I.; Koo-Oshima, S.; Salgot, M.; Collado, J.; Hernandez, F. y Torricelli, R. 2010. *The Wealth of Waste: The Economics of Wastewater Use in Agriculture*. Informe sobre temas hídricos de la FAO N° 35. Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). [www.fao.org/docrep/012/i1629e/i1629e00.htm](http://www.fao.org/docrep/012/i1629e/i1629e00.htm)
- Winsemius, H. C.; Aerts, J. C. J. H.; Van Beek, L. P. H.; Bierkens, M. F. P.; Bouwman, A.; Jongman, B.; Kwadijk, J. C. J.; Ligtoet, W.; Lucas, P. L.; Van Vuuren, D. P. y Ward, P. J. 2016. Global drivers of future river flood risk. *Nature Climate Change*, Vol. 6, pp. 381-385. Doi: 10.1038/nclimate2893
- Winsemius, H. C. y Ward, P. J. 2015. *Projections of future urban damages from floods. Personal communication to OECD*.
- Woodall, A. 2015. *Innovative Water Use in Texas*. Presentación en el Foro Annual de 2015 del Groundwater Protection Council, 27-30 setiembre de 2015, Oklahoma City, OK, EE. UU. [www.gwpc.org/sites/default/files/event-sessions/Woodall\\_Allison.pdf](http://www.gwpc.org/sites/default/files/event-sessions/Woodall_Allison.pdf)
- World Water. 2013. *Fresh Thinking to Improve Business and Sustainability*. [msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh\\_08d9/0901b803808d92c4.pdf?filepath=liquidseps/pdfs/noreg/609-50111.pdf&fromPage=GetDoc](http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh_08d9/0901b803808d92c4.pdf?filepath=liquidseps/pdfs/noreg/609-50111.pdf&fromPage=GetDoc)
- WssTP (Water Supply and Sanitation Technology Platform). 2013. *Water Reuse Report: Water Supply and Sanitation Technology Platform, Brussels. An Executive Summary*. [wssstp.eu/wp-content/uploads/sites/102/2013/11/ExS-Water-Reuse.pdf](http://wssstp.eu/wp-content/uploads/sites/102/2013/11/ExS-Water-Reuse.pdf)
- WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos). 2006. *The United Nations World Water Development Report 2: Water: A Shared Responsibility*. París, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la (UNESCO).
- \_\_\_\_\_. 2012. *The United Nations World Water Development Report 2012: Managing Water under Uncertainty and Risk*. París, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).

- \_\_\_\_\_. 2014. *The United Nations World Water Development Report 2014: Water and Energy*. París, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).
- \_\_\_\_\_. 2015. *The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World*. París, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). [unesdoc.unesco.org/images/0023/002318/231823E.pdf](https://unesdoc.unesco.org/images/0023/002318/231823E.pdf).
- \_\_\_\_\_. 2016. *The United Nations World Water Development Report 2016: Water and Jobs*. París, París, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).
- \_\_\_\_\_. s.f. *Facts and Figures. Fact 36: Industrial wastewater*. UNESCO website. [www.unesco.org/new/en/natural-sciences/environment/water/wwap/facts-and-figures/all-facts-wwdr3/fact-36-industrial-wastewater/](http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/environment/water/wwap/facts-and-figures/all-facts-wwdr3/fact-36-industrial-wastewater/)

WWC/OCDE (Consejo Mundial del Agua/ Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos). 2015. *Water: Fit to Finance? Catalyzing national growth through investment in water security*.

Report of the High-Level Panel on Financing Infrastructure for a Water-Secure World. Marseille/ París, Francia, WWC/OCDE.

WWF (Fondo Mundial para la Naturaleza). 2015. *Das Grosse Wegschmeissen: Vom Acker bis zum Verbraucher: Ausmaß und Umwelteffekte der Lebensmittelverschwendung in Deutschland*, WWF Alemania. (en alemán) [www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF\\_Studie\\_Das\\_grosse\\_Wegschmeissen.pdf](http://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF_Studie_Das_grosse_Wegschmeissen.pdf)

Zarate, E.; Aldaya, M.; Chico, D.; Pahlow, M.; Flachsbath, I.; Franco, G.; Zhang, G.; Garrido, A.; Kuroiwa, J.; Cesar, J.; Palhares, P. y Arévalo Uribe, D. 2014. Water and agriculture. B. Willaarts, A. Garrido y R. Llamas (eds.), *Water for Food Security and Well-being in Latin America and the Caribbean. Social and Environmental Implications for a Globalized Economy*. Oxon, Reino Unido /Nueva York, Routledge. [www.fundacionbotin.org/paginas-interiores-de-una-publicacion-de-la-fundacion-botin/water-for-food-security-and-well-being-in-latin-america-and-the-caribbean.html](http://www.fundacionbotin.org/paginas-interiores-de-una-publicacion-de-la-fundacion-botin/water-for-food-security-and-well-being-in-latin-america-and-the-caribbean.html)

# ANEXO 1 LÉXICO

*Puede haber definiciones diferentes, incluso incongruentes, para términos relacionados con las aguas residuales. Las siguientes definiciones han sido adaptadas de una serie de trabajos publicados con el fin de proporcionar un entendimiento común y asegurar la coherencia en la terminología utilizada en el WWDR 2017.*

**Agua reciclada:** Aguas residuales tratadas («adecuadas a los fines») que pueden utilizarse en condiciones controladas para fines beneficiosos dentro del mismo establecimiento o industria.

**Agua regenerada:** Aguas residuales tratadas («adecuadas a los fines») que pueden utilizarse en condiciones controladas para fines beneficiosos tales como el riego.

**Aguas grises:** Las aguas residuales generadas por una lavadora, bañera, ducha o lavabo del baño, que se recogen por separado de un flujo de aguas residuales. No incluye las aguas residuales de un inodoro.

**Aguas negras:** Aguas residuales generadas por el inodoro, recolectadas por separado de un flujo de aguas residuales. Contienen orina, heces, agua de descarga y/o papel higiénico.

**Aguas residuales domésticas:** Compuestas de aguas negras, aguas grises y potencialmente otros tipos de aguas residuales derivadas de actividades domésticas en asentamientos residenciales.

**Aguas residuales industriales:** Agua que se vierte después de ser utilizada o producida en procesos industriales o de producción de energía.

**Aguas residuales municipales:** Las aguas residuales procedentes de fuentes domésticas, industriales, comerciales e institucionales en un asentamiento o comunidad de humanos. La composición de las aguas residuales municipales puede variar considerablemente ya que refleja la variedad de contaminantes liberados por las diferentes combinaciones de fuentes.

**Aguas residuales:** Aguas residuales y excrementos (aguas negras) transportados en alcantarillas.

**Aguas residuales urbanas:** Incluye tanto las aguas residuales municipales como las escorrentías urbanas, lo que potencialmente contiene una amplia gama de contaminantes.

**Aguas residuales o efluentes:** Una combinación de uno o más de los siguientes: efluentes domésticos que consisten en aguas negras y aguas grises; agua de establecimientos

e instituciones comerciales, incluidos hospitales; efluentes industriales, aguas pluviales y otras escorrentías urbanas; y escorrentía agrícola, hortícola y acuícola.<sup>13</sup>

**Alcantarillado:** Tuberías, bombas y otros accesorios o infraestructura para la recolección y el transporte de aguas residuales desde sus puntos de generación hasta los puntos finales deseados (planta de tratamiento).

**Biosólidos:** Lodos residuales adecuadamente tratados, procesados y aplicados como fertilizantes para mejorar y mantener suelos productivos y estimular el crecimiento de las plantas.

**Compuestos perturbadores endocrinos (EDC, por sus siglas en inglés):** Compuestos naturales o sintéticos que interfieren con la síntesis, la secreción, el transporte, la unión, la acción o la eliminación de las hormonas naturales de organismos vivos responsables del mantenimiento de la homeostasis, la reproducción, el desarrollo y/o el comportamiento.

**Contaminación de fuentes no puntuales o contaminación difusa:** Contaminación que resulta de la escorrentía, la precipitación, la deposición atmosférica o el drenaje de la tierra.

**Contaminación de fuentes puntuales:** Contaminación de fuentes puntuales: cualquier medio de transporte distinguible y limitado, incluidos, pero sin limitarse a cualquier tubería, cuneta, canal, túnel, conducto, pozo, fisura, contenedor, explotación ganadera intensiva, buque u otra embarcación flotante desde los cuales se vierten contaminantes. Este término no incluye las descargas difusas de aguas pluviales urbanas y los flujos de retorno de la agricultura.

**Contaminación por calor:** El agua más caliente que el ambiente que se vierte de los sistemas industriales (es decir, el enfriamiento en plantas de energía térmica) altera la temperatura de la masa de agua receptora de tal manera que afecta al medio ambiente local.

<sup>13</sup> A pesar de que las escorrentías urbana y agrícola puedan no considerarse aguas residuales según ciertas definiciones (por ejemplo, cuando las aguas residuales se entienden como «agua después de haber pasado por cualquier uso»), se considera como una forma de aguas residuales para los fines de este informe, en parte debido a su relación directa con el logro del ODS 6.3 que establece «mejorar la calidad del agua mediante la reducción de la contaminación, la eliminación del vertimiento y la reducción al mínimo de la descarga de materiales y productos químicos peligrosos [...]».



**Contaminación por metales pesados:** Contaminación por metales con una elevada masa atómica proveniente de una serie de fuentes, tales como efluentes industriales.

**Contaminación por sedimentos:** Minerales, arena y limo erosionados de la tierra y arrastrados hacia el agua, que pueden crear problemas para los organismos acuáticos.

**Contaminación:** El resultado de sustancias/contaminantes que ingresan en las masas de agua y de este modo degradan la calidad del agua. La contaminación del agua puede tener causas naturales debido a causas ambientales (por ejemplo, arsénico) o por actividades antropogénicas.

**Contaminante:** Sustancia biológica, física, química o radiológica que tiene un efecto adverso sobre el agua, el suelo o el aire. La presencia de contaminantes no significa necesariamente que el agua presente riesgos para la salud.

**Contaminantes emergentes:** Cualquier sustancia química sintética o de origen natural o cualquier microorganismo que no se monitorea comúnmente en el medio ambiente pero que tiene el potencial de entrar en el medio ambiente y causar efectos adversos conocidos o sospechosos para la salud humana y/o ecológica.

**Contaminantes orgánicos persistentes (COP):** Productos químicos tóxicos que afectan negativamente la salud humana y el medio ambiente, incluidos PCB, DDT y dioxinas. Los COP permanecen intactos en el medio ambiente durante períodos excepcionalmente largos y potencialmente se bioacumulan en los tejidos grasos de los organismos vivos.

**Economía circular:** Una economía que equilibra el desarrollo económico con la protección del medio ambiente y los recursos. Hace hincapié en el uso más eficiente y el reciclado de los recursos, y la protección del medio ambiente. Una economía circular presenta bajo consumo de energía y otros recursos, baja emisión de contaminantes, producción mínima de residuos y alta eficiencia. Implica la aplicación de una producción más limpia en las empresas, así como el desarrollo de parques eco-industriales y la planificación integrada basada en recursos para el desarrollo en la industria, la agricultura y las zonas urbanas.

**Escorrentía agrícola:** Agua de las tierras agrícolas que no se infiltra en el suelo y corre como flujo de superficie.

**Escorrentía urbana:** Escorrentía superficial del agua de lluvia y otras formas de precipitación (deshielo) en áreas urbanas, donde gran parte de la superficie terrestre está cubierta por pavimentos, edificios y paisajes compactados que no permiten que el agua se infiltre en el suelo, aumentando así el volumen de escorrentía. Esta escorrentía es una fuente importante de inundaciones urbanas y contaminación del agua en las comunidades urbanas.

**Eutrofización:** Proceso por el cual una masa de agua se enriquece con nutrientes disueltos (por ejemplo, nitrógeno y fósforo) que estimulan el crecimiento de plantas acuáticas, lo que generalmente da como resultado el agotamiento del oxígeno disuelto.

**Gestión de aguas residuales:** Incluye la prevención o reducción de la contaminación en la fuente (en términos de la carga de contaminación y el volumen de aguas residuales producidas), la recolección y remoción de contaminantes de las corrientes de aguas residuales (esto es tratamiento) y el uso beneficioso y/o la eliminación de aguas residuales tratadas y sus subproductos.<sup>14</sup>

**Lodos fecales:** El subproducto rico en nutrientes de las aguas residuales domésticas después del tratamiento previo que se acumula en una fosa séptica o (menos comúnmente) en una letrina de pozo.

**Lodos:** Materiales orgánicos ricos en nutrientes que resultan del tratamiento de aguas residuales domésticas en una instalación de tratamiento de aguas residuales.

**Microcontaminantes:** Contaminantes presentes en el agua en concentraciones bajas (por ejemplo, microgramos/litro o menos), tales como productos farmacéuticos, ingredientes de productos químicos domésticos, productos químicos utilizados en pequeñas empresas o industrias, contaminantes farmacéuticos ambientales persistentes (EPPP, por sus siglas en inglés), pesticidas u hormonas.

**Nutrientes de aguas residuales:** Esta expresión se refiere principalmente a la presencia de nitrógeno y fósforo en aguas residuales domésticas, escorrentías agrícolas (incluidos la ganadería y el procesamiento de alimentos) y algunos efluentes industriales. Los nutrientes pueden causar un crecimiento excesivo de algas (eutrofización) en las masas de agua, pero también son un subproducto de aguas residuales recuperable para la agricultura y la acuicultura.

**Patógenos o microorganismos patógenos (por ejemplo, bacterias, virus, parásitos u hongos):** Microorganismos que pueden causar enfermedades en los seres humanos.

**Reutilización del agua/uso de aguas residuales:** Uso de aguas residuales no tratadas, parcialmente tratadas o tratadas.

**Sistema centralizado de tratamiento de aguas residuales:** Sistema gestionado que consta de alcantarillas de recolección y una única planta de tratamiento utilizada para recolectar y tratar aguas residuales de un área de servicio específica.

<sup>14</sup> En términos gramaticales, el agua se «reutiliza» y las aguas residuales se «utilizan», pero las aguas residuales no se «reutilizan».

**Sistema de alcantarillado combinado:** Sistemas de alcantarillado diseñados para recolectar tanto las aguas residuales municipales (procedentes de fuentes domésticas, industriales y otras) como la escorrentía urbana, y transportarlas a la planta de tratamiento de aguas residuales (o medios alternativos de eliminación).

**Sistema descentralizado de tratamiento de aguas residuales:** Sistema utilizado para recolectar, tratar y dispersar o recuperar aguas residuales de una pequeña comunidad o área de servicio.

**Sistema endocrino:** El conjunto de glándulas humanas que producen hormonas que regulan el metabolismo, el crecimiento y el desarrollo, la función tisular, la reproducción, el estado de ánimo, el sueño y/u otras funciones fisiológicas.

**Sistema *in situ* de tratamiento de aguas residuales:** Sistema basado en procesos naturales y/o componentes mecánicos para recolectar, tratar y dispersar o recuperar aguas residuales desde un lugar específico.

**Subproductos de aguas residuales:** Materiales (por ejemplo, nutrientes, metales) y energía que pueden recuperarse de las aguas residuales y utilizarse.

**Tratamiento cuaternario:** Técnicas para la eliminación de microcontaminantes que pueden no haber sido eliminados por procesos de tratamiento convencionales (tratamiento primario, secundario y terciario).

**Tratamiento de aguas residuales:** Un proceso o secuencia de procesos que elimina contaminantes de las aguas residuales para que puedan volver a usarse de forma segura (tratamiento adecuado a los fines) o devolverse al ciclo del agua con mínimos impactos ambientales. Existen varios niveles de tratamiento del agua, su elección depende del tipo de contaminantes, de la carga de contaminación y del uso final anticipado del efluente.

**Tratamiento preliminar:** Eliminación de componentes de aguas residuales tales como trapos, palos, flotadores, arenilla y grasa que pueden causar problemas de mantenimiento o funcionamiento durante las operaciones y los procesos de tratamiento.

**Tratamiento primario:** Eliminación de una parte de los sólidos y la materia orgánica en suspensión de las aguas residuales, que puede o no incluir una etapa química o filtración.

**Tratamiento secundario:** Eliminación de materia orgánica biodegradable (en solución o suspensión), sólidos en suspensión y nutrientes (nitrógeno, fósforo o ambos).

**Tratamiento terciario:** Eliminación de sólidos residuales en suspensión (después del tratamiento secundario), eliminación y desinfección de nutrientes adicionales.

## Bibliografía (Léxico):

Corcoran, E.; Nellesmann, C.; Baker, E.; Bos, R.; Osborn, D. y Savelli, H. (eds.). 2010. *Sick Water? The Central Role of Wastewater Management in Sustainable Development. A Rapid Response Assessment*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente/Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos/GRID-Arendal (PNUMA/ONU-Hábitat).

EPA Victoria (Environment Protection Authority Victoria - Dirección de Protección Ambiental). s.f. *Reusing and Recycling Water*. Sitio web de EPA Victoria, Australia, EPA. [www.epa.vic.gov.au/your-environment/water/reusing-and-recycling-water](http://www.epa.vic.gov.au/your-environment/water/reusing-and-recycling-water)

OMS (Organización Mundial de la Salud). 2016. *Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater in Agriculture and Aquaculture*. Ginebra, Suiza, OMS.

ONU (Naciones Unidas). s.f. Wastewater Treatment. Plataforma de conocimiento para el desarrollo sostenible, Naciones Unidas. [www.un.org/esa/sustdev/natlinfo/indicators/methodology\\_sheets/freshwater/waste\\_water\\_treatment.pdf](http://www.un.org/esa/sustdev/natlinfo/indicators/methodology_sheets/freshwater/waste_water_treatment.pdf)

PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). 2006. *Circular Economy: An Alternative Model for Economic Development*. París, PNUMA.

Raschid-Sally, L. y Jayakody, P. 2008. *Drivers and Characteristics of Wastewater Agriculture in Developing Countries: Results from a Global Assessment*. Informe de investigación N° 127 del IWMI. Colombo, Instituto Internacional de Gestión de Recursos Hídricos (IWMI).

Tchobanoglous, G.; Burton, F. L. y David Stensel, H. 2003. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. Cuarta edición. Nueva York, Metcalf & Eddy Inc.

US EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos). s.f. *Terminology service: Vocabulary Catalogue*. Sitio web de US EPA. [ofmpub.epa.gov/sor\\_internet/registry/termreg/searchandretrieve/glossariesandkeywordlists/search.do?details=&glossaryName=Septic%20Systems%20Glosario](http://ofmpub.epa.gov/sor_internet/registry/termreg/searchandretrieve/glossariesandkeywordlists/search.do?details=&glossaryName=Septic%20Systems%20Glosario)

\_\_\_\_\_. s.f. International Cooperation, Persistent Organic Pollutants: A Global Issue, A Global Response. Sitio web de US EPA. [www.epa.gov/international-cooperation/persistent-organic-pollutants-global-issue-global-response](http://www.epa.gov/international-cooperation/persistent-organic-pollutants-global-issue-global-response)

\_\_\_\_\_. s.f. Polluted Runoff: Nonpoint Source Pollution. Sitio web de US EPA. Disponible en: [www.epa.gov/polluted-runoff-nonpoint-source-pollution/what-nonpoint-source](http://www.epa.gov/polluted-runoff-nonpoint-source-pollution/what-nonpoint-source)

WaterReuse Research Foundation/American Water Works Association/Water Environment Federation/National Water Research Institute. 2015. *Framework for Direct Potable Reuse*. Alexandria, Va.

# ABREVIATURAS y SIGLAS

<b>ACV</b>	Análisis del Ciclo de Vida
<b>AGNU</b>	Asamblea General de las Naciones Unidas
<b>B-DASH</b>	Innovación a través de un enfoque dinámico de tecnologías de avanzada en materia de alcantarillado
<b>CEF</b>	Mejora crediticia
<b>CEPE</b>	Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa
<b>CF</b>	Bacterias coliformes fecales
<b>CHP</b>	Producción combinada de electricidad y calor
<b>CIP</b>	Limpieza in situ
<b>COP</b>	Contaminantes orgánicos persistentes
<b>CRew</b>	Fondo regional del Caribe para la gestión de aguas residuales
<b>CSO</b>	Desbordamientos de alcantarillado combinado
<b>CWSRF</b>	Fondo Rotatorio Estatal para el Agua Limpia
<b>DBO</b>	Demanda bioquímica de oxígeno
<b>DCC</b>	Distrito comercial central
<b>DEWATS</b>	Sistema descentralizado de tratamiento de aguas residuales
<b>DQO</b>	Demanda química de oxígeno
<b>EcoSan</b>	Saneamiento ecológico
<b>EDC</b>	Compuestos perturbadores endocrinos
<b>FAO</b>	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
<b>FMAM</b>	Fondo para el Medio Ambiente Mundial
<b>GEI</b>	Gas de efecto invernadero
<b>GIRH</b>	Gestión integrada de los recursos hídricos
<b>h.e.</b>	Habitante equivalente
<b>IE</b>	Infraestructura ecológica
<b>MBR</b>	Biorreactores de membrana
<b>MENA</b>	Oriente Medio y África del Norte
<b>MLF</b>	Manejo de lodos fecales
<b>MW</b>	Megawatt
<b>OCDE</b>	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos

<b>ODM</b>	Objetivos de Desarrollo del Milenio
<b>ODS</b>	Objetivos de Desarrollo Sostenible
<b>OMS</b>	Organización Mundial de la Salud
<b>ONG</b>	Organización no gubernamental
<b>ONUUDI</b>	Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial
<b>ONU-Hábitat</b>	Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos
<b>PCB</b>	Bifenilopoliclorados
<b>PNUMA</b>	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
<b>PRTR</b>	Registros de Emisiones y Transferencias de Contaminantes
<b>PUB</b>	Junta de Servicios Públicos de Singapur
<b>PYMES</b>	Pequeñas y medianas empresas
<b>RECP</b>	Producción más limpia y eficiente en materia de recursos
<b>RPD</b>	Reutilización potable directa
<b>RPI</b>	Reutilización potable indirecta
<b>SADC</b>	Comunidad de África Meridional para el Desarrollo
<b>SCAEA</b>	Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica para el Agua
<b>SFPUC</b>	Comisión de Servicios Públicos de San Francisco
<b>SS</b>	Sólidos en suspensión
<b>SUDS</b>	Sistemas urbanos de drenajesostenible
<b>TER</b>	Tecnologías ecológicamente racionales
<b>TN</b>	Nitrógeno total
<b>TP</b>	Fósforo total
<b>TrackFin</b>	Seguimiento del financiamiento al saneamiento, la higiene y el agua potable.
<b>TSS</b>	Total de sólidos en suspensión
<b>UE</b>	Unión Europea
<b>UNICEF</b>	Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia
<b>UNSD</b>	División de Estadística de las Naciones Unidas
<b>US EPA</b>	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos
<b>WEF</b>	Foro Económico Mundial
<b>ZLD</b>	Vertido cero



# CUADROS, FIGURAS y TABLAS

## CUADROS

---

<b>Cuadro 1.1</b>	Sistemas arqueológicos de aguas residuales: El caso de la Antigua Roma	18
<b>Cuadro 2.1</b>	Pobreza, gestión de aguas residuales y desarrollo sostenible - múltiples conexiones	27
<b>Cuadro 2.2</b>	Funciones asignadas a cada género y la introducción del uso seguro de aguas residuales	27
<b>Cuadro 2.3</b>	«Pérdida» de agua por desperdicios alimentarios	28
<b>Cuadro 3.1</b>	Marco institucional internacional para la protección conjunta de la calidad del agua en el Danubio y en el Mar Negro	34
<b>Cuadro 4.1</b>	Contaminantes emergentes	38
<b>Cuadro 4.2</b>	Prohibir contaminantes de aguas residuales: el ejemplo de las microperlas	39
<b>Cuadro 4.3</b>	Evaluación de riesgos en la gestión de sistemas de aguas residuales	45
<b>Cuadro 5.1</b>	Alcantarillado y eliminación de desechos en lagos, Nigeria	50
<b>Cuadro 5.2</b>	Reutilización potable indirecta en funcionamiento, San Diego, California	55
<b>Cuadro 5.3</b>	Uso de aguas residuales en sistemas de acuicultura en Calcuta: Una innovación centenaria de los agricultores	56
<b>Cuadro 5.4</b>	Tratamiento de escorrentía de aguas pluviales en zona industrial, Kolding, Dinamarca	57
<b>Cuadro 6.1</b>	Encuestas sobre agua industrial en Canadá	61
<b>Cuadro 6.2</b>	Proyecto de Anglo American de recuperación de agua en Emalahleni, Mpumalanga, Sudáfrica	64
<b>Cuadro 6.3</b>	Uso creativo de aguas residuales en Carbery Milk Products, en Cork, Irlanda	65
<b>Cuadro 6.4</b>	Simbiosis de Kalundborg en Kalundborg, Dinamarca	66
<b>Cuadro 6.5</b>	Uso industrial y energético de aguas residuales municipales	67
<b>Cuadro 7.1</b>	Un método de barreras múltiples para reducir los riesgos para la salud que implica el riego con aguas residuales	77
<b>Cuadro 8.1</b>	El humedal de Nakivubo: Receptor de gran parte de las aguas residuales domésticas e industriales de Kampala (Uganda)	80
<b>Cuadro 8.2</b>	Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales, Indiana, Estados Unidos	81
<b>Cuadro 8.3</b>	Oasis recreativo creado con aguas residuales tratadas en Lima, Perú	81
<b>Cuadro 8.4</b>	Valor añadido de las normas sobre calidad del agua ambiental en comparación con las normas sobre emisiones	82
<b>Cuadro 9.1</b>	Uso de aguas residuales en Kumasi y Accra, Ghana	88
<b>Cuadro 9.2</b>	El reciclaje de aguas residuales en la generación de energía térmica, Sudáfrica	90
<b>Cuadro 10.1</b>	Estrategia nacional para el sector de aguas residuales en el Líbano	94
<b>Cuadro 10.2</b>	Reutilización del agua en Túnez	95
<b>Cuadro 12.1</b>	Gestión de aguas residuales municipales – desarrollo y restauración de infraestructura: Tendencias recientes en países de Europa Oriental, el Cáucaso y Asia Central	103
<b>Cuadro 12.2</b>	Optimización del potencial de reutilización: Control de calidad de las aguas residuales tratadas y análisis del saneamiento ecológico en Europa y América del Norte	104
<b>Cuadro 12.3</b>	Directiva sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas de la Unión Europea	105
<b>Cuadro 12.4</b>	Establecimiento de metas a nivel nacional en virtud del Protocolo sobre el Agua y la Salud de la CEPE-OMS/Europa: Abordaje del problema de las aguas residuales	105
<b>Cuadro 13.1</b>	Consecuencias del vertido de aguas residuales urbanas no tratadas: La epidemia de cólera de 1991	108
<b>Cuadro 14.1</b>	Principios rectores para la prevención y reducción de la generación de aguas residuales	114
<b>Cuadro 14.2</b>	Vertido cero (ZLD) en la industria textil de Tirupur, India	115
<b>Cuadro 14.3</b>	Ejemplos de producción más limpia y eficiente en materia de recursos en Tanzania	116

<b>Cuadro 14.4</b>	El fondo regional del Caribe para la gestión de aguas residuales (CREW)	117
<b>Cuadro 14.5</b>	Fondo rotatorio estatal (SRF) para el financiamiento de la infraestructura de aguas residuales	118
<b>Cuadro 15.1</b>	Recolección y reciclaje de aguas residuales de invernaderos en Etiopía	122
<b>Cuadro 15.2</b>	Captación descentralizada de agua de lluvia en la ciudad de Suwon, República de Corea	122
<b>Cuadro 15.3</b>	El aprovechamiento de los vertidos en Sydney, Australia	123
<b>Cuadro 16.1</b>	La singular experiencia de la reutilización potable directa (RPD) en Windhoek, Namibia	126
<b>Cuadro 16.2</b>	El mayor caso de reutilización no planificada del agua para el consumo humano, México	126
<b>Cuadro 16.3</b>	Gestión de aguas descentralizada y utilización de aguas residuales: La experiencia en San Francisco, California	127
<b>Cuadro 16.4</b>	La recuperación de fósforo (P) cobra popularidad	128
<b>Cuadro 16.5</b>	Recuperación de energía y nutrientes a partir de biosólidos: El abordaje integral (legislativo y económico) del Japón	129
<b>Cuadro 16.6</b>	Ejemplos de edificaciones climatizadas y refrigeradas con aguas residuales	129
<b>Cuadro 16.7</b>	Potencial total de recuperación energética de lodos residuales mediante digestión anaeróbica y conversión térmica en Zúrich, Suiza	130
<b>Cuadro 16.8</b>	Las aguas residuales como fuente de hidrocarburos de alto valor mediante el uso de microalgas	131
<b>Cuadro 16.9</b>	La iniciativa NEWater de Singapur: Campaña integral de educación y sensibilización	135
<b>Cuadro 16.10</b>	Implicancias culturales de la reutilización de aguas residuales en piscicultura en el Oriente Medio	136
<b>Cuadro 17.1</b>	Innovaciones de tecnología e investigación en materia de aguas residuales	139
<b>Cuadro 17.2</b>	Aplicación de tecnología de punta en materia de aguas residuales en Japón	140
<b>Cuadro 17.3</b>	Sistemas distribuidos de aguas residuales: una alternativa a los sistemas descentralizados	141

## FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Destino de las extracciones de agua dulce: Consumo y generación de aguas residuales a nivel mundial por sector principal de uso de agua (circa 2010)	1
<b>Figura 2</b>	Cantidad de meses por año en que el volumen de agua superficial y subterránea que se extrae y no se devuelve excede 1,0 a 30 x 30 arco de resolución mínima (1996-2005)	10
<b>Figura 3</b>	Cambios pronosticados en la frecuencia de inundaciones	11
<b>Figura 4</b>	Estimación de las concentraciones de bacterias coliformes fecales (CF) en los cursos de agua en África, Asia y América Latina (febrero de 2008-2010)	12
<b>Figura 5</b>	Estimación de las concentraciones de demanda bioquímica de oxígenos (DBO) en los cursos de agua en África, Asia y América Latina (febrero de 2008-2010)	13
<b>Figura 6</b>	Tendencia de las concentraciones de DBO en los ríos entre 1990-1992 y 2008-2010	14
<b>Figura 1.1</b>	Las aguas residuales en el ciclo del agua	19
<b>Figura 1.2</b>	Flujos de aguas residuales	20
<b>Figura 1.3</b>	Marco de gestión de aguas residuales desde una perspectiva de recursos	22
<b>Figura 2.1</b>	Los Objetivos de Desarrollo Sostenible	24
<b>Figura 2.2</b>	Porcentaje de aguas residuales no tratadas en 2015 en países con niveles de ingresos y aspiraciones diferentes para 2030 (50% de reducción respecto al punto de referencia de 2015)	26
<b>Figura 3.1</b>	Niveles institucionales de formulación y ejecución de políticas	31
<b>Figura 3.2</b>	Modelo de flujo financiero para el manejo de lodos fecales	36
<b>Figura 4.1</b>	Componentes de aguas residuales y sus efectos	40
<b>Figura 4.2</b>	Marco de residuos fecales para estimar la proporción de saneamiento y aguas residuales gestionada de forma segura	40
<b>Figura 4.3</b>	Transiciones de saneamiento y reducciones asociadas de las enfermedades diarreicas	41
<b>Figura 4.4</b>	Sistema de gestión de agua en Kampala (Uganda)	43
<b>Figura 4.5</b>	Sistema de gestión de agua en Dhaka (Bangladesh)	43
<b>Figura 5.1</b>	Porcentaje de la población que cuenta con diferentes sistemas de saneamiento	49

<b>Figura 5.2</b>	Proporción de población urbana en barrios marginales 2000-2012	51
<b>Figura 7.1</b>	Agro-acuicultura integrada	73
<b>Figura 7.1a</b>	Método de barreras múltiples para reducir los riesgos relacionados con el consumo en la cadena alimentaria, aplicado al riego con aguas residuales	77
<b>Figura 9.1</b>	Población urbana y rural (% de crecimiento anual), 2013	86
<b>Figura 9.2</b>	Problemas en la gestión de aguas urbanas frente a capacidades institucionales y económicas	87
<b>Figura 11.1</b>	Esquema técnico general de NEWater en Singapur	98
<b>Figura 12.1</b>	Cambios en el tratamiento de aguas residuales en las regiones de Europa entre 1990 y 2012	102
<b>Figura 14.1</b>	Separación de residuos y alternativas posibles para su uso	116
<b>Figura 16.1</b>	Reutilización de agua luego del tratamiento avanzado (terciario) a nivel mundial: Cuota de mercado por finalidad de uso	126
<b>Figura 16.2</b>	Escalera de propuestas de valor en aumento para la reutilización con mayores inversiones en la calidad del agua o cadena de valor	134

## TABLAS

<b>Tabla 1.1</b>	Ejemplos de impactos negativos de las aguas residuales no tratadas en la salud humana, el medio ambiente y las actividades productivas	19
<b>Tabla 2.1</b>	ODS 6 metas e indicadores	25
<b>Tabla 3.1</b>	Actores, papeles y funciones para gestionar las aguas residuales	32
<b>Tabla 4.1</b>	Fuentes de aguas residuales y componentes típicos	39
<b>Tabla 4.2</b>	Ventajas y desventajas de determinados sistemas de tratamiento de aguas residuales	46
<b>Tabla 5.1</b>	Tipologías urbanas y aguas residuales, y drenaje urbano sostenible	53
<b>Tabla 5.2</b>	Composición de aguas residuales sin tratar en determinados países	53
<b>Tabla 5.3</b>	Principales contaminantes de las aguas residuales, su fuente y efectos	53
<b>Tabla 5.4</b>	Lista Roja de sustancias	52
<b>Tabla 5.5</b>	Ejemplos de datos de aguas residuales industriales	54
<b>Tabla 6.1</b>	Generación de aguas residuales por tipo de industria, 2011 (millones de m <sup>3</sup> )	60
<b>Tabla 6.2</b>	Descarga de efluentes residuales industriales después del tratamiento (como % del total de descargas), 2007-2011	61
<b>Tabla 6.3</b>	Entrada de agua, descarga y recirculación en la industria canadiense, 2011	62
<b>Tabla 6.4</b>	Contenido de aguas residuales típicas en algunas industrias importantes	63
<b>Tabla 7.1</b>	Categorización de los principales contaminantes del agua provenientes de la agricultura y la contribución relativa de los sistemas de producción agrícola	71
<b>Tabla 8.1</b>	Efectos de las zonas de amortiguación ribereña de diversos tamaños sobre la reducción de los sedimentos y nutrientes de la escorrentía superficial del campo	79
<b>Tabla 8.2</b>	Ejemplos del uso de aguas residuales tratadas para contribuir a los servicios de los ecosistemas	81
<b>Tabla 10.1</b>	Volumen de aguas residuales recolectadas, tratamiento y uso de aguas residuales (millones de m <sup>3</sup> por año), 2013	93
<b>Tabla 11.1</b>	Países con el nivel más bajo de tratamiento de aguas residuales en la región de Asia y el Pacífico	98
<b>Tabla 12.1</b>	Problemas y respuestas de gestión seleccionados en subregiones de la región de la CEPE (lista no exhaustiva)	102
<b>Tabla 16.1</b>	Ejemplos de reutilización de aguas con potencial comercial	133

# FOTOGRAFÍAS

## Resumen Ejecutivo

p. 1 © Toa55/Shutterstock.com

## Prólogo

p. 8 © Punghi/Shutterstock.com

## Capítulo 1

p. 16 © gameanna/Shutterstock.com

## Capítulo 2

p. 23 © RossHelen/Shutterstock.com

## Capítulo 3

p. 29 © FAO/Matthias Mugisha flickr.com CC BY-NC 2.0

## Capítulo 4

p. 37 © Kletr/Shutterstock.com

## Capítulo 5

p. 48 © AfriramPOE/Shutterstock.com

## Capítulo 6

p. 58 © John Kasawa/Shutterstock.com

## Capítulo 7

p. 69 © Kosin Sukhum/Shutterstock.com

## Capítulo 8

p. 78 © Lochmueller Group

## Capítulo 9

p. 84 © Nestlé flickr.com CC BY-NC-ND 2.0

## Capítulo 10

p. 91 © ACWUA

## Capítulo 11

p. 96 © Viengsompasong Inthavong/Banco Mundial flickr.com CC BY-NC-ND 2.0

## Capítulo 12

p. 100 © Riccardo Auci/Indissoluble.com flickr.com CC BY-SA 2.0

## Capítulo 13

p. 106 © Caroline Bennett/Rainforest Action Network flickr.com CC BY-NC 2.0

## Capítulo 14

p. 112 © Minnesota Pollution Control Agency (MPCA) flickr.com CC BY-NC 2.0

## Capítulo 15

p. 119 © Hans Engbers/Shutterstock.com

## Capítulo 16

p. 124 © CTR Photos/Shutterstock.com

## Capítulo 17

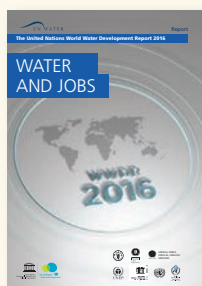
p. 137 © Minnesota Pollution Control Agency (MPCA) flickr.com CC BY-NC 2.0

## Capítulo 18

p. 143 © Boris Stroujko/Shutterstock.com



# INFORME MUNDIAL DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL DESARROLLO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS



ISBN 978-92-3-100146-8  
© UNESCO 2016  
166 páginas

**WWDR 2016** A todo color, con cuadros, figuras, mapas, tablas, notas, referencias y lista de abreviaturas y siglas, así como Prólogos del Secretario General de las Naciones Unidas Ban Ki-moon, la Directora General de la UNESCO Irina Bokova y el Presidente de ONU-Agua y Director General de la OIT Guy Ryder



ISBN 978-92-3-300058-2  
© UNESCO 2017  
200 páginas

**WWDR 2017** A todo color, con Léxico, cuadros, figuras, mapas, tablas, notas, referencias y lista de abreviaturas y siglas, así como Prólogos de la Directora General de la UNESCO Irina Bokova y el Presidente de ONU-Agua y Director General de la OIT Guy Ryder

**Para comprar una copia impresa del libro, por favor, visite:** [publishing.unesco.org](http://publishing.unesco.org)

**Para solicitar un CD-ROM con el informe y publicaciones afines, por favor escriba a:** [wwap@unesco.org](mailto:wwap@unesco.org)

**Para descargar la versión PDF del informe y publicaciones afines, ediciones anteriores del WWDR y material de divulgación, visite:** [www.unesco.org/water/wwap](http://www.unesco.org/water/wwap)

**Contenido de la memoria USB:** El WWDR 2017, el Resumen Ejecutivo del WWDR 2017 en 10 idiomas, los Datos y Cifras en cinco idiomas y ediciones anteriores del WWDR

## PUBLICACIONES AFINES



Resumen Ejecutivo del WWDR 2016

12 páginas  
Disponible alemán, árabe, chino, coreano, español, francés, inglés, italiano, portugués y ruso



Datos y Cifras del WWDR 2016

12 páginas  
Disponibles en español, francés, inglés e italiano



Resumen Ejecutivo del WWDR 2017

12 páginas  
Disponible en alemán, árabe, chino, español, francés, hindi, inglés, italiano, portugués y ruso



Datos y Cifras del WWDR 2017

12 páginas  
Disponibles en español, francés, inglés, italiano y portugués

**Para descargar estos documentos visite :** [www.unesco.org/water/wwap](http://www.unesco.org/water/wwap)



Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura

Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos



WWDR 2017

ONU-Agua es el mecanismo de coordinación interinstitucional de las Naciones Unidas para todas las cuestiones relacionadas con el agua dulce, incluyendo el saneamiento. Se estableció formalmente en 2003, para consolidar una larga trayectoria de colaboración dentro de la familia de las Naciones Unidas. ONU-Agua se compone de entidades de la ONU especializadas o interesadas en temas relacionados con el agua, consideradas como miembros, a las que se suman otras organizaciones internacionales ajenas a la ONU, consideradas como colaboradores.

El objetivo principal de ONU-Agua es complementar y agregar valor a los programas y proyectos existentes, propiciando concordancias y esfuerzos conjuntos, con el fin de maximizar la acción coordinada y la coherencia de todo el sistema. Al actuar de esta forma, ONU-Agua tiene por objeto aumentar la eficacia del apoyo que brinda a los Estados Miembros en sus esfuerzos por lograr acuerdos internacionales en materia de agua.

## INFORMES PERIÓDICOS

### Informe Mundial sobre el desarrollo de los recursos hídricos (WWDR)

Es la publicación de referencia del sistema de las Naciones Unidas sobre la situación de los recursos de agua dulce. El informe es el resultado de la estrecha colaboración entre los miembros y colaboradores de ONU-Agua y representa la respuesta coherente e integrada del sistema de la ONU a los problemas relacionados con el agua dulce y a los nuevos desafíos. La elaboración del informe es coordinada por el Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas, y el tema está en armonía con el tema del Día Mundial del Agua (22 de marzo). De 2003 a 2012, el WWDR se publicó cada tres años. Desde 2014, se publica anualmente para proporcionar la información más actualizada y real sobre cómo se abordan los retos relacionados con el agua en el mundo.

### El Análisis y Evaluación Mundial del Agua Potable y el Saneamiento de ONU-Agua (GLAAS, por sus siglas en inglés)

Es elaborado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en nombre de ONU-Agua. Proporciona una actualización mundial de los marcos normativos, los acuerdos institucionales, la base de recursos humanos y los flujos de financiamiento internacionales y nacionales en apoyo a los servicios de saneamiento y agua potable. Es una contribución considerable a las actividades de Saneamiento y Agua para Todos (SWA, por sus siglas en inglés).

### El informe de situación del Programa Conjunto OMS/UNICEF de Monitoreo del Abastecimiento de Agua y del Saneamiento (JMP, por sus siglas en inglés)

Está afiliado a ONU-Agua y presenta los resultados del monitoreo mundial de los avances logrados en el acceso al agua potable y a un saneamiento e higiene adecuados. El monitoreo se basa en los resultados de encuestas de hogares y censos con el apoyo de las direcciones nacionales de estadística en conformidad con criterios internacionales. También se basa cada vez más en conjuntos de datos administrativos y regulatorios nacionales.

- ✓ Visión estratégica
- ✓ Situación, usos y gestión de los recursos hídricos
- ✓ Mundial
- ✓ Evaluaciones regionales
- ✓ Trienal (2003-2012)
- ✓ Anual (desde 2014)
- ✓ Enlaces a la temática del Día Mundial del Agua (22 de marzo)

- ✓ Visión estratégica
- ✓ Abastecimiento de agua y saneamiento
- ✓ Mundial
- ✓ Evaluaciones regionales
- ✓ Bienal (desde 2008)

- ✓ Situación y tendencias
- ✓ Abastecimiento de agua y saneamiento
- ✓ Mundial
- ✓ Evaluaciones regionales y nacionales
- ✓ Bienal (1990-2012)
- ✓ Actualizaciones anuales (desde 2013)

## PUBLICACIONES PREVISTAS POR ONU-AGUA PARA 2018

- Actualización del Resumen de Políticas de ONU-Agua sobre agua y cambio climático
- Resumen de Políticas de ONU-Agua sobre Convenios en materia de aguas
- Resumen Analítico de ONU-Agua sobre el aprovechamiento eficiente de los recursos hídricos
- Informe de síntesis 2018 sobre el ODS 6 en materia de agua y saneamiento

La UNESCO organiza y dirige el Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas (WWAP). El WWAP reúne el trabajo de 31 miembros de ONU-Agua, así como de 38 colaboradores, para publicar la serie del Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos (WWDR).

Los Informes Mundiales Anuales sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos se centran en cuestiones estratégicas relacionadas con el agua. Los miembros y colaboradores de ONU-Agua, todos ellos expertos en sus campos, contribuyen con los últimos hallazgos sobre un tema específico.

La edición 2017 del Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos se centra en “Aguas Residuales” y busca brindar información a aquellos en cargos de decisión, tanto dentro como fuera de la comunidad del agua, sobre la importancia de la gestión del agua residual como fuente sostenible y poco valorada de energía, nutrientes y otros subproductos recuperables, en lugar de algo a ser descartado o una molestia a ser ignorada.

El título del informe: «Aguas residuales: El Recurso desaprovechado», refleja el papel fundamental que pueden cumplir las aguas residuales en el marco de una economía circular, donde el desarrollo económico se equilibra con la protección de los recursos y la sostenibilidad ambiental, y donde una economía más limpia y más sostenible tiene un efecto positivo en la calidad del agua. Una mejor gestión de las aguas residuales será fundamental, no solo para alcanzar el Objetivo de Desarrollo Sostenible sobre agua y saneamiento (ODS 6), pero también para alcanzar otros objetivos de la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible.

En un mundo donde la demanda de agua dulce está en constante aumento y los escasos recursos hídricos se ven cada vez más exigidos por la captación excesiva, la contaminación y el cambio climático, sería sencillamente impensable no aprovechar las oportunidades que brinda una mejor gestión de las aguas residuales.

Esta publicación fue financiada por el Gobierno de Italia y la Región de Umbría.



Regione Umbria

ISBN 978-92-3-300058-2



9 789233 000582