

**ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE REUSO Y RECICLO DE AGUAS  
RESIDUALES EN APLICACIONES INDUSTRIALES Y MUNICIPALES**

**LUZ MARELBYS OVIEDO OCHOA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS  
ESCUELA DE QUÍMICA  
ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA AMBIENTAL  
BUCARAMANGA**

**2011**

**ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE REUSO Y RECICLO DE AGUAS  
RESIDUALES EN APLICACIONES INDUSTRIALES Y MUNICIPALES**

**LUZ MARELBYS OVIEDO OCHOA**

Monografía presentada como requisito para optar al título de  
Especialista en Química Ambiental

Directora:  
Luz Yolanda Vargas Fiallo  
Química, M.Sc.  
Especialista en Química Ambiental

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS  
ESCUELA DE QUÍMICA  
ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA AMBIENTAL  
BUCARAMANGA  
2011**

## DEDICATORIA

*A mi mamá, Clara, quien en ningún momento ha dudado para ofrecermé su apoyo incondicional durante toda mi vida.*

*A mi papá, Jorge, quien aunque hoy no está a mi lado siempre estuvo allí para ayudarme, aconsejarme y guiarme para aprender de mis errores y convertirme en la persona que soy, siempre me motivó a expresar lo que siento y luchar por mi ilusión y sé que eternamente estará para protegerme.*

*A los dos mejores regalos que me dio ésta experiencia, mi esposo Luis Fernando y mi Hijo Ángel Santiago. Luis Fernando ha sido mi apoyo y compañía en las largas noches de trabajo y Ángel Santiago me prestó el tiempo que le pertenecía.*

*Recuerden que mis logros son los de ustedes.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A los docentes de la especialización que me permitieron abrir mi mente hacia nuevas ideas y proyectos e incentivaron mi amor por la naturaleza y la lucha por su protección.

A mis compañeros de la especialización que me brindaron su apoyo y amistad durante éste proceso.

A Clariant (Colombia) S:A que me brindó las herramientas e información para el desarrollo de éste trabajo.

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	15
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	17
2 OBJETIVOS.....	21
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	21
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
3 BENEFICIOS AMBIENTALES DEL REUSO Y RECICLO DE AGUAS RESIDUALES.....	22
3.1 DISMINUCIÓN DE LA DESVIACIÓN DE AGUA DULCE DE LOS ECOSISTEMAS SENSIBLES .....	25
3.2 DISMINUCIÓN DE LA DESCARGA EN CUERPOS DE AGUA SENSIBLES.....	26
3.3 CREACIÓN Y/O MEJORAMIENTO DE LOS HUMEDALES Y HÁBITATS RIBEREÑOS .....	26
3.4 REDUCCION Y PREVENCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN .....	26
3.5 AHORRO DE ENERGÍA.....	26
4 APLICACIONES DE REUSO DE LAS AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES Y DOMESTICAS.....	28
4.1 REUSO EN APLICACIONES URBANAS.....	28
4.1.1 Demanda de agua Recuperada.....	30

4.1.2	Fiabilidad y protección de la salud pública.....	30
4.2	REUSO EN APLICACIONES INDUSTRIALES .....	31
4.2.1	Agua de Enfriamiento.. .....	32
4.2.1.1	Sistemas de enfriamiento de un solo paso.. .....	32
4.2.1.2	Sistemas de enfriamiento de recirculación evaporativa.. .....	32
4.2.1.3	Requerimientos de calidad para el agua de enfriamiento. ....	33
4.2.2	Agua de Reposición de calderas. . .....	36
4.2.3	Agua Industrial.....	38
4.2.3.1	Pulpa y papel.....	39
4.2.3.2	Industria química .....	40
4.2.3.3	Industria Textil .....	40
4.2.3.4	Petróleo y carbón .....	40
4.3	REUSO EN APLICACIONES AGRÍCOLAS .....	40
4.3.1	Estimación de la demanda de irrigación agrícola.....	41
4.3.2	Requerimientos de Calidad para uso agrícola.. .....	43
4.3.2.1	Salinidad. ....	44
4.3.2.2	Sodio.....	46
4.3.2.3	Elementos Traza.....	47
4.3.2.4	Cloro Residual.....	50
4.3.2.5	Nutrientes.....	50
4.4	REUSO EN APLICACIONES AMBIENTALES Y RECREACIONALES ....	51
4.4.1	Humedales naturales y artificiales.....	51
4.4.2	Embalses recreacionales y estéticos.. .....	54
4.4.3	Aumento de flujo.....	55
4.5	REUSO EN APLICACIONES DE RECARGA DE AGUAS SUBTERRANEAS .....	55
4.5.1	Destino de los contaminantes en sistemas de recarga. ....	57
4.5.1.1	Material particulado.. .....	58
4.5.1.2	Compuestos orgánicos disueltos. ....	58

4.5.1.3	Microorganismos..	59
4.5.2	Aspectos regulatorios y de salud..	60
4.6	REUSO EN APLICACIONES DE AUMENTO DEL ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE .....	61
4.6.1	Objetivos de Calidad para la reutilización como Agua Potable.I.....	61
4.6.2	Aumento de la superficie del agua para la reutilización potable indirecta. .	63
4.6.3	Utilización Potable Directa. ....	64
5	TECNOLOGÍAS PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DESTINADAS A REUSO .....	66
5.1	TRATAMIENTOS CONVENCIONALES DE LAS AGUAS RESIDUALES	69
5.1.1	Tratamiento Preliminar.....	69
5.1.2	Tratamiento Primario..	69
5.1.3	Tratamiento Secundario.....	70
5.2	AVANCES EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES .....	71
5.2.1	Tipos De Tratamiento Avanzado De Aguas Residuales .....	72
5.2.2	Aparición De La Tecnología De Tratamiento De Membranas..	74
5.2.3	Tecnologías De Desalinización.....	74
5.2.3.1	Ósmosis inversa (RO)..	76
5.2.3.2	Electrodialisis (ED)..	76
5.2.3.3	Intercambio Iónico (IX).....	77
5.2.3.4	Desalinización por Congelación.....	77
6	DEMANDA DEL RECURSO HÍDRICO EN COLOMBIA .....	79
6.1	DEMANDA HÍDRICA EN EL SECTOR AGRÍCOLA .....	80
6.2	DEMANDA HÍDRICA EN EL SECTOR PECUARIO .....	82
6.3	DEMANDA HÍDRICA EN ACTIVIDADES DE ACUICULTURA.....	83
6.4	DEMANDA HÍDRICA PARA USO DOMÉSTICO.....	84

6.5	DEMANDA HÍDRICA EN EL SECTOR INDUSTRIAL .....	84
6.6	USO DEL AGUA EN EL SECTOR DE SERVICIOS .....	85
6.7	DEMANDA HÍDRICA EN EL SECTOR ENERGÍA .....	86
7	AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS E INDUSTRIALES EN COLOMBIA ...	87
7.1	AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS .....	87
7.2	AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES .....	90
8	REGULACIONES Y NORMATIVAS SOBRE EL MANEJO Y REUSO DE AGUAS RESIDUALES .....	92
8.1	LEY 373 DE 1997 .....	97
8.2	DOCUMENTO CONPES 3177 .....	99
8.3	DECRETO 3930 DE 2010 .....	100
9	RIESGOS ESPECÍFICOS A LA SALUD ASOCIADOS CON EL REUSO DE AGUAS RESIDUALES .....	102
9.1	MICROORGANISMOS PATÓGENOS.....	102
9.1.1	Virus.. .....	103
9.1.2	Bacterias.....	103
9.1.3	Protozoos.. .....	104
9.1.4	Helmintos.....	104
9.2	SUSTANCIAS QUÍMICAS DE PREOCUPACIÓN .....	105
9.2.1	Disruptores endocrinos.....	105
9.2.2	Compuestos farmacológicamente activos.....	106
10	CONCLUSIONES .....	108
11	RECOMENDACIONES .....	110
	BIBLIOGRAFÍA.....	112

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Tratamientos de agua reciclada sugeridos y usos.....	23
Tabla 2. Requisitos de Calidad del agua para una variedad de industrias .....	38
Tabla 3. Límites recomendados por la EPA para algunos componentes en el agua de riego .....	48
Tabla 4. Calidad del agua para reúso agrícola.....	49
Tabla 5. Factores que pueden influir en el movimiento de virus en las aguas subterráneas.....	60
Tabla 6. Demanda de los sectores por uso del agua .....	79
Tabla 7. Demanda hídrica agrícola en 2008 .....	80
Tabla 8. Volumen de agua utilizada en la industria por componente. ....	85
Tabla 9. Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.....	88
Tabla 10. Vertimientos de aguas residuales y superficie agrícola regada .....	89
Tabla 11. Vertimientos del sector industrial .....	90
Tabla 12. Vertimientos por Actividad Económica .....	91

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Tecnologías para remoción de sal vs Concentración de sal en el agua .	75
Figura 2. Diagrama de flujo de un sistema de ósmosis inversa .....	76
Figura 3. Volumen de agua insumida en el sector pecuario en el 2008 .....	82

## RESUMEN

**TÍTULO:** ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE REUSO Y RECICLO DE AGUAS RESIDUALES EN APLICACIONES INDUSTRIALES Y MUNICIPALES \*.

**AUTOR:** Luz Marelbys Oviedo Ochoa\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Reúso, Aguas Residuales, Tratamiento, Riesgo a La Salud, Aplicaciones, Patógenos, Normatividad.

### CONTENIDO:

El crecimiento demográfico, la industrialización, las prácticas agrícolas y la urbanización incrementan la demanda de agua y por lo tanto la cantidad de aguas residuales generadas. Tradicionalmente, el tratamiento de aguas residuales se ha centrado en la reducción de la contaminación, protección de la salud pública y la protección del medio ambiente mediante la eliminación de materiales biodegradables, nutrientes y patógenos. Muchas comunidades en todo el mundo se aproximan o ya han alcanzado los límites de sus suministros de agua disponible por lo que el reciclo y reúso del agua se han convertido en prácticas necesarias para la conservación y ampliación de la disponibilidad del recurso agua. El reúso del agua también representa para las comunidades un método de eliminación de aguas residuales alternativo, y proporciona la reducción de la contaminación mediante la desviación de la descarga de efluentes lejos de las aguas superficiales sensibles.

Ésta monografía recopila información existente sobre una amplia gama de aplicaciones de reúso de aguas residuales, consideraciones de salud y tecnologías de tratamiento de apoyo a las operaciones de reutilización de agua, así como las regulaciones y normativas existentes en Colombia y a nivel mundial respecto a la calidad del agua recuperada y reutilizada.

Las temáticas principales se desarrollan a lo largo de nueve capítulos en los que se expone la situación actual a nivel mundial y nacional del reúso de aguas residuales domésticas e industriales en diversas aplicaciones urbanas, industriales, agrícolas, ambientales, recarga de acuíferos y aumento de flujo. Igualmente se describen algunas tecnologías para tratamiento de aguas residuales destinadas a reúso, demanda del recurso hídrico y generación de aguas residuales domésticas e industriales en Colombia, regulaciones y normativas sobre el tema y los riesgos específicos a la salud asociados al reúso de aguas residuales, especialmente microorganismos patógenos y sustancias químicas de preocupación.

---

\* Monografía

\*\* Facultad de Ciencias, Escuela de Química, Especialización en Química Ambiental. Director: Química, M.Sc. Luz Yolanda Vargas Fiallo

## ABSTRACT

**TITLE:** STUDY OF ALTERNATIVES FOR WASTEWATER REUSE AND RECYCLING ON INDUSTRIAL AND MUNICIPAL APPLICATIONS.\*

**AUTHOR:** Luz Marelbys Oviedo Ochoa \*\*

**Keywords:** Reuse, Wastewater, Treatment, Health Risk, Applications, Pathogens, Regulations.

### CONTENT:

Population growth, industrialization, agricultural practices and urbanization increase the demand for water and therefore the amount of wastewater generated. Traditionally, wastewater treatment has focused on reducing pollution, protecting public health and environmental protection by removing biodegradable material, nutrients and pathogens. Many communities around the world are approaching or have reached the limits of available water supplies so that the water recycling and reuse practices have become necessary for the maintenance and expansion of the availability of water resources. The reuse of the water for communities is also a method of wastewater disposal alternative, and provides pollution reduction by diverting effluent discharge away from sensitive surface waters.

This monograph compiles existing information on a wide range of applications of wastewater reuse, health considerations and treatment technologies to support water reuse operations, and existing regulations and policy in Colombia and worldwide for quality recovered and reused water.

The key themes are developed throughout nine chapters that discussed the current global and national reuse of domestic wastewater and industrial applications in various urban, industrial, agricultural, environmental, groundwater recharge and increased flow. Also describes some technologies for wastewater treatment aimed at reuse, demand of water resources and generation of domestic and industrial wastewater in Colombia, regulations and rules on the subject and the specific health risks associated with wastewater reuse, especially pathogens and chemicals of concern.

---

\* Monograph

\*\* Science Faculty, School of Chemistry. Environmental Chemical Specialization. Director: Chemist, M.Sc. Luz Yolanda Vargas Fiallo

## INTRODUCCIÓN

El crecimiento demográfico, la industrialización, las prácticas agrícolas y la urbanización incrementan la demanda de agua y por lo tanto la cantidad de aguas residuales generadas. Tradicionalmente, el tratamiento de aguas residuales se ha centrado en la reducción de la contaminación, protección de la salud pública y la protección del medio ambiente mediante la eliminación de materiales biodegradables, nutrientes y patógenos. Muchas comunidades en todo el mundo se aproximan o ya han alcanzado los límites de sus suministros de agua disponible por lo que el reciclaje y reúso del agua se han convertido en prácticas necesarias para la conservación y ampliación de la disponibilidad del recurso agua. El reúso del agua también representa para las comunidades un método de eliminación de aguas residuales alternativo, y proporciona la reducción de la contaminación mediante la desviación de la descarga de efluentes lejos de las aguas superficiales sensibles.

La recuperación de aguas residuales - incluyendo la recuperación, reutilización y reciclaje - es hoy una de las herramientas alternativas que pueden contribuir a una mejor gestión de los recursos de agua desviada del ciclo natural del agua al ciclo antrópico. Aunque el reúso de las aguas residuales se promueve como una de las principales soluciones para la escasez de agua, hay pocos países donde la práctica realmente ha sido implementada en gran escala. Podemos mencionar a California, Israel, Australia. Japón, Sudáfrica, Túnez y México son algunos de los lugares emergentes donde la reutilización es una realidad más que una teoría.

El agua que se vuelve a utilizar debe estar siempre vinculada a la protección de la salud, la viabilidad técnica, la aceptación pública y la percepción del valor del agua en la comunidad.

Los riesgos de la recuperación y reutilización de aguas residuales suelen ser definidos de acuerdo con las normas emitidas o recomendadas por las autoridades locales u organismos internacionales. En Colombia no existen normas claras que regulan éste tema pero las directrices plasmadas en el CONPES 3177 presentan acciones y lineamientos para la formulación del plan de manejo de aguas residuales.

Debido a su origen específico, el agua recuperada de origen urbano presenta peligros y riesgos relacionados con la presencia de microorganismos y sustancias químicas capaces de causar enfermedades, que pueden ser tóxicas para los seres humanos y animales y pueden causar impactos negativos sobre el medio ambiente. Aunque se sabe que no es posible, hay una tendencia a indicar que el concepto de reutilización debe tener el objetivo de riesgo cero. El nivel aceptable de riesgo se establece de acuerdo a las cuestiones sociales y las limitaciones económicas.

Ésta monografía pretende recopilar la información existente sobre una amplia gama de aplicaciones de reúso de aguas residuales, consideraciones de salud y tecnologías de tratamiento de apoyo a las operaciones de reutilización de agua, así como las regulaciones y normativas existentes en Colombia y a nivel mundial respecto a la calidad del agua recuperada y reutilizada.

## 1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La disponibilidad de agua apta para el consumo humano a nivel mundial enfrenta un conjunto de problemas, los cuales se pueden resumir en la escasez física, debido a la carencia de agua por los bajos niveles de precipitación o por insuficientes cuerpos de agua, relacionados con la distribución del agua en el planeta. En otras zonas geográficas se presenta escasez económica ya que, a pesar de la existencia de agua, no se cuenta con la infraestructura necesaria para aprovecharla, es frecuente observar inundaciones debido a la falta de canalización de los ríos o la pérdida del agua procedente de la lluvia. En otros lugares existe agua, pero su calidad no es adecuada para la vida debido a la contaminación que sufre por el manejo irresponsable de los residuos domésticos e industriales. Adicionalmente a los problemas anteriores se observa el consumo excesivo de agua en actividades domésticas e industriales. Finalmente, se pierde mucha agua por empalmes defectuosos, instalaciones deterioradas o por el daño que sufren los sistemas de distribución por acciones dolosas.

Una de las medidas fundamentales para prevenir la contaminación consiste en evitar el vertimiento de aguas residuales sin tratamiento a los cuerpos de agua que abastecen a las ciudades y a sus industrias. En el caso de las plantas industriales, éstas requieren agua, no sólo como parte de sus procesos, sino también para generar vapor o para labores de mantenimiento. En cada uno de estos casos el agua tiene que cumplir con ciertas especificaciones técnicas para posibilitar su aprovechamiento. Si el agua no se incorpora al producto o forma parte del agua de servicio, se transforma en un efluente industrial conocido como agua residual, que es necesario gestionar en una forma ambientalmente adecuada.

Es conocido que el agua debido a sus propiedades fisicoquímicas, se comporta como un agente que disuelve diversos compuestos químicos, en mayor o menor

proporción, o que arrastra diversas sustancias. Actualmente existen diversos tipos de tratamiento, los cuales se pueden clasificar de acuerdo su naturaleza en físicos (por ejemplo, filtración), químicos (por ejemplo, precipitación química) o biológicos (por ejemplo, digestión anaerobia). Las etapas de un tratamiento de aguas residuales generalmente son el pre-tratamiento (por ejemplo, el desarenado), el tratamiento primario (por ejemplo, la coagulación), el tratamiento secundario (por ejemplo, la digestión aerobia) y el tratamiento terciario o avanzado (por ejemplo, la adsorción), pudiéndose utilizar diversas técnicas y equipos con los principios indicados.

Para la selección de un proceso de tratamiento, es fundamental tener en cuenta el uso futuro del agua tratada; para ello se requiere información básica, como la tecnología usada en el proceso productivo, la caracterización completa del agua residual, los caudales a tratar (caudal máximo, caudal mínimo, caudal promedio) y la disponibilidad de espacio para ubicar la planta de tratamiento, entre las principales. Con esta información, se puede continuar con el proceso de selección, recopilando información sobre tecnologías posibles y la disponibilidad de las mismas, analizando las opciones para el manejo de los residuos del proceso de tratamiento y los costos relacionados con las tecnologías disponibles.

Para el diseño del sistema de tratamiento, también se deben analizar los diversos esquemas tecnológicos. Un primer paso consiste en identificar las etapas principales: pre-tratamiento o tratamiento preliminar, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario, u otras combinaciones. Cada etapa, generalmente, está conformada por un conjunto de subetapas, en las cuales se lleva a cabo una actividad unitaria; por ejemplo, sedimentación que no implica reacción química, aprovechándose sólo el tamaño de la partícula a ser removida y su densidad, la velocidad lineal del fluido y la fuerza de atracción gravitatoria, mientras que en la precipitación química se realiza una reacción entre algún

componente no deseado presente en el agua residual y un agente exógeno, para lo cual es muy importante controlar el rango de pH donde se efectúa la reacción; en otros casos, se deberá usar microorganismos para realizar la transformación adecuada y contribuir a la depuración del agua a tratar.

El diseño se completa con la selección de los equipos en los cuales se van a llevar a cabo cada una de las actividades unitarias presentes en el proceso. El tratamiento de aguas residuales actualmente se apoya en una intensiva investigación científica y tecnológica, pero también se puede observar en países en desarrollo la coexistencia de diversos niveles tecnológicos para obtener los resultados deseados.<sup>1</sup> (Virtual Pro, 2009)

Algunos de las variables que se deben tener en cuenta al pensar en un sistema integral de reúso y reciclaje de aguas residuales domésticas e industriales son: 1. la evaluación de la salud humana asociada con trazas de sustancias orgánicas, 2. la metodología de evaluación del riesgo ambiental, 3. los aspectos sociales tales como la participación pública en la planificación y toma de decisiones, y 4. La evaluación de la calidad general del agua.

El principal objetivo de los proyectos de regeneración y reutilización de aguas residuales es producir agua de calidad suficiente para todos los usos no potables (usos que no requieren estándares de agua potable de calidad). El agua recuperada puede ser apropiada para una gran variedad de aplicaciones. Entre las aplicaciones más comunes son la reutilización para riego, usos residenciales, usos urbanos y recreativos, recarga de aguas subterráneas, acuicultura, agua de enfriamiento y producción de agua potable.

---

<sup>1</sup> VIRTUAL PRO. Aguas Residuales - Tecnologías de Tratamiento. ISSN 1900 - 6241. Volumen 86.

El reúso de las aguas residuales para estas aplicaciones conllevaría a un ahorro de importantes volúmenes de agua dulce que de otro modo se desperdiciaría. El agua recuperada puede sustituir el agua dulce en las prácticas tradicionales tales como el riego agrícola y de jardinería, aplicaciones industriales, aplicaciones ambientales (reposición de las aguas superficiales y la recarga de acuíferos), actividades recreativas, limpieza urbana, control de incendios, construcción.

La generación de aguas residuales está siempre ligada a los patrones de uso del agua de la población residente. En Colombia la demanda hídrica agregada total nacional, conforme a los sectores seleccionados, con inclusión del agua extraída no consumida, alcanzó en 2008 un orden de magnitud de 35.877 Mm<sup>3</sup>.<sup>2</sup>

El agua reciclada se puede utilizar para sustituir el riego y aplicaciones industriales, es decir, alrededor del 58%

---

<sup>2</sup> IDEAM Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Estudio Nacional del Agua. Bogotá, D.C, 2010.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Estudiar las alternativas de reúso y reciclaje de aguas residuales en aplicaciones industriales y municipales

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Presentar las aplicaciones de reúso de las aguas residuales industriales y domésticas más comunes y discutir las ventajas y desventajas de cada una de ellas.

Resumir las tecnologías actuales disponibles para tratamiento de aguas residuales destinadas a reúso y considerar las ventajas y desventajas de cada una de ellas.

Analizar el desarrollo de futuras normas que definan los criterios en cuanto a calidad de las aguas residuales utilizadas para reúso que permitan satisfacer las necesidades en descarga, reutilización y reciclaje de las mismas.

Recopilar información sobre los riesgos específicos a la salud asociados con el uso de aguas residuales

### **3 BENEFICIOS AMBIENTALES DEL REUSO Y RECICLO DE AGUAS RESIDUALES**

El término reciclaje generalmente es aplicado a latas de aluminio, botellas de vidrio y papel periódico, pero el agua también puede ser reciclada. El reciclaje del agua es el reuso de aguas residuales tratadas para propósitos benéficos tales como agricultura e irrigación de paisajes, procesos industriales, descarga de inodoros y recarga de aguas subterráneas. El agua es algunas veces ciclada y reciclada en sitio; por ejemplo, en instalaciones industriales se recicla el agua para procesos de enfriamiento. El término reciclaje de agua es generalmente usado sinónimamente con reuso de agua y recuperación de agua.

A través del ciclo natural del agua, la tierra ha reciclado y reusado agua por millones de años. El reciclaje de agua, generalmente se refiere a proyectos que utilizan tecnología para acelerar éstos procesos naturales. El reciclaje de agua es a menudo caracterizado como “planificado” o “No planificado”. Un ejemplo común de agua reciclada ocurre cuando las fuentes de agua de las ciudades son los ríos, tal como los ríos Magdalena y Fonce, que reciben descargas de aguas residuales aguas arriba. El agua de éstos ríos ha sido usada, tratada y bombeada a las fuentes de agua un número de veces antes del último usuario. Los proyectos planificados son aquellos que son desarrollados con el objetivo de reutilizar provechosamente una fuente de agua reciclada.<sup>3</sup>





El agua reciclada puede satisfacer la mayoría de la demanda de agua si es adecuadamente tratada para asegurar la calidad apropiada para su uso. La Tabla 1 muestra los tipos de procesos de tratamiento y los usos sugeridos para cada nivel de tratamiento. En los usos donde hay mayor oportunidad de exposición

---

3 EPA Environmental Protection Agency. Water recycling and reuse: The environmental benefits. Water Division Region IX - EPA 909-F-98-001.

humana al agua se requiere mayor tratamiento. Si la fuente de agua no es apropiadamente tratada, los problemas de salud pueden aumentar si el agua es consumida o si hay exposición a agua reciclada que contenga microorganismos causante de enfermedades u otros contaminantes.

**Tabla 1. Tratamientos de agua reciclada sugeridos y usos**

TRATAMIENTOS DE AGUA RECICLADA SUGERIDOS Y USOS			
			
Incremento de los niveles de tratamiento; Incremento de los niveles aceptables de exposición humana			
			
<p><b>Tratamiento Primario :</b> Sedimentación</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• No se recomienda su uso a éste nivel</li> </ul>	<p><b>Tratamiento Secundario:</b> Oxidación Biológica, Desinfección</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Riego superficial de huertos y viñedos</li> <li>• Irrigación de cultivos no alimenticios</li> <li>• Embalses ornamentales restringidos</li> <li>• Recarga de acuíferos subterráneos no potables</li> <li>• Humedales, hábitat de vida salvaje, aumento de flujo, procesos de Enfriamiento industrial</li> </ul>	<p><b>Tratamiento Terciario / Avanzado:</b> Coagulación Química, Filtración, Desinfección</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Irrigación de paisajes y campos de golf</li> <li>• Descarga de inodoros</li> <li>• Lavado de vehículos</li> <li>• Irrigación de cultivos alimenticios</li> <li>• Embalses recreacionales sin restricción</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reúso potable Indirecto: recarga de aguas subterráneas de acuíferos potables y aumento de la superficie de agua del embalse</li> </ul>
FUENTE: EPA. Water Recycling And Reuse: The Environmental Benefits			

El agua reciclada se usa más comúnmente para agua no potable (no para beber) tales como la agricultura, riego de paisajes, parques públicos, y campos de golf. Otras aplicaciones incluyen agua de enfriamiento para centrales eléctricas y refinerías de petróleo, agua para procesos industriales de fábricas de papel, descarga de inodoros, control del polvo, actividades de la construcción, concreto mezclado, y lagos artificiales.

Aunque la mayoría de los proyectos de reciclaje de agua han sido desarrollados para satisfacer las demandas de agua no potable, una serie de proyectos de uso de agua reciclada indirectamente para fines potable. Estos proyectos incluyen la recarga de acuíferos de agua subterránea y aumentar depósitos de agua superficial con agua reciclada. En los proyectos de recarga de agua del suelo, el agua reciclada se puede propagar o se inyecta en los acuíferos de agua subterránea para aumentar los suministros, y evitar la intrusión de agua salada en las zonas costeras.

Además de proporcionar un suministro confiable de agua local controlada, el reciclaje del agua ofrece grandes beneficios ambientales. Al proporcionar una fuente adicional de agua puede ayudar a encontrar maneras de reducir el desvío del agua de los ecosistemas sensibles. Otros beneficios incluyen la reducción de vertimientos de aguas residuales y la reducción y prevención de la contaminación. El agua reciclada también se puede utilizar para crear o mejorar los humedales y los hábitats ribereños.

El reciclaje de agua ha demostrado ser eficaz y tener éxito en la creación de un nuevo suministro de agua confiable y sin comprometer la salud pública. La reutilización no potable es una práctica ampliamente aceptada de seguirá creciendo. Sin embargo, en muchas partes del mundo, el uso de agua reciclada se está ampliando para dar cabida a las necesidades del medio ambiente y la

creciente demanda de suministro de agua. Los avances en la tecnología de tratamiento de aguas residuales y los estudios de salud de la reutilización potable indirecta han llevado a muchos a predecir que la reutilización potable indirecta prevista se volverá más común. El reciclaje de aguas residuales y grises requiere mucha menos energía que el tratamiento de agua salada con un sistema de desalinización.

El tratamiento de aguas residuales para su reutilización y la instalación de sistemas de distribución en instalaciones centralizadas pueden ser inicialmente caros en comparación con alternativas de suministro de agua como, el agua subterránea, o el uso de las instalaciones de aguas grises de las casas. Las barreras institucionales y percepción errónea del público, puede hacer que sea difícil de implementar proyectos de reciclaje de agua. Finalmente, a principios del proceso de planificación, las instituciones gubernamentales deben llegar a la opinión pública para hacer frente a sus preocupaciones y para mantener al público informado e involucrado en el proceso de planificación.<sup>4</sup>

### **3.1 DISMINUCIÓN DE LA DESVIACIÓN DE AGUA DULCE DE LOS ECOSISTEMAS SENSIBLES**

Las plantas, vida silvestre y peces dependen, para vivir y reproducirse, del flujo de agua adecuado y suficiente para sus hábitats. La falta de un flujo adecuado, como resultado de la desviación para fines agrícolas, urbanos y usos industriales, puede causar el deterioro de la calidad del agua y la salud del ecosistema. Las personas que reutilizan el agua pueden complementar sus demandas mediante el uso de una fuente confiable de agua reciclada, que puede liberar cantidades considerables de agua para el medio ambiente y aumentar las corrientes de los ecosistemas vitales.

---

<sup>4</sup> <http://www.epa.gov/region09/water/recycling/index.html>

### **3.2 DISMINUCIÓN DE LA DESCARGA EN CUERPOS DE AGUA SENSIBLES**

En algunos casos, el impulso para el reciclaje de agua no proviene de la necesidad de abastecimiento de agua, sino de una necesidad de eliminar o disminuir la descarga de aguas residuales al mar, un estuario o un arroyo.

### **3.3 CREACIÓN Y/O MEJORAMIENTO DE LOS HUMEDALES Y HÁBITATS RIBEREÑOS**

Los humedales proporcionan muchos beneficios, que incluyen el hábitat de la fauna y aves de caza, la mejora de la calidad del agua, la disminución de inundaciones, la pesca y la cría. Para las corrientes que se han deteriorado o secado, el caudal de agua se puede aumentar con el agua reciclada para mantener y mejorar el medio ambiente acuático y el hábitat de la fauna silvestre.

### **3.4 REDUCCION Y PREVENCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN**

Cuando las descargas de contaminantes a los océanos, ríos y otros cuerpos de agua se reducen, las cargas de contaminantes de estos cuerpos se reducen. Por otra parte, en algunos casos, las sustancias que pueden ser contaminantes cuando se descargan a un cuerpo de agua pueden ser reutilizadas para el riego de forma beneficiosa. Por ejemplo, el agua reciclada puede contener mayores niveles de nutrientes, como nitrógeno, que el agua potable. La aplicación de agua reciclada para el riego agrícola y el paisaje puede proporcionar una fuente adicional de nutrientes y reducir la necesidad de aplicar fertilizantes sintéticos.

### **3.5 AHORRO DE ENERGÍA**

A medida que la demanda de agua crece, más se extrae agua, se trata y se transporta a veces a grandes distancias que pueden requerir una gran cantidad de energía. Si la fuente local de agua es agua subterránea, el nivel de las aguas subterráneas se hace menor a medida que se elimina el agua y esto aumenta la energía necesaria para bombear el agua a la superficie. El reciclaje de agua en el

lugar o en sus cercanías reduce la energía necesaria para mover el agua a mayores distancias o bombear el agua de las profundidades de un acuífero.

La adaptación de la calidad del agua para un uso específico de agua también reduce la energía necesaria para tratar el agua. La calidad del agua necesaria para limpiar un inodoro es menos estricta que la calidad del agua necesaria para el agua potable y requiere menos energía para lograrlo. El uso de agua reciclada que es de menor calidad para usos que no requieren agua de alta calidad ahorra energía y dinero al reducir los requisitos de tratamiento.

A pesar de que se requiere energía adicional para el tratamiento de aguas residuales para su reciclaje, la cantidad de energía necesaria para tratar y / o transportar de otras fuentes es generalmente mucho mayor.

## **4 APLICACIONES DE REUSO DE LAS AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES Y DOMESTICAS**

### **4.1 REUSO EN APLICACIONES URBANAS**

Los sistemas de reúso en aplicaciones urbanas proveen agua recuperada para diversos propósitos no potables incluyendo:

- Irrigación de parques públicos y centros de recreación, campos deportivos, patios de escuelas y campos de juegos y zonas de jardines alrededor de edificios e instalaciones públicas.
- Riego de zonas de jardines alrededor de residencias unifamiliares y multifamiliares, lavado general y otras actividades de mantenimiento
- Riego de zonas de jardines alrededor de oficinas comerciales y de desarrollo industrial
- Riego de campos de golf
- Usos comerciales tales como instalaciones de lavado de vehículos, servicio de lavandería, lavado de ventanas y como agua de mezcla para pesticidas, herbicidas y fertilizantes líquidos.
- Uso en paisajes ornamentales y elementos decorativos con agua, tales como fuentes, piscinas reflectoras y cascadas.
- Control de polvo y producción de concreto para proyectos de construcción
- Protección contra incendios a través de hidrantes con agua recuperada
- Baños y urinarios en edificios comerciales e industriales

El reúso en aplicaciones urbanas puede incluir sistemas que sirven a los grandes usuarios. Los ejemplos pueden ser parques, parques infantiles, campos de atletismo, campos de golf e instalaciones recreativas. Además, los sistemas de reúso pueden proporcionar importantes cantidades de agua a industrias o

complejos industriales, así como una combinación de propiedades residenciales, industriales y comerciales a través de "sistemas de distribución dual." Una investigación de 2 años sobre su uso en jardines comparó los efectos del riego con agua reciclada frente al agua potable para las plantas del jardín, los suelos, y los componentes de riego. La comparación mostró pocas diferencias significativas, sin embargo, las plantas del jardín crecieron más rápidamente con agua regenerada<sup>5</sup>. Pero esos resultados no son un hecho, Cloruros elevados en el agua regenerada suministrada por la ciudad de San Petersburgo han limitado el follaje de las plantas irrigadas<sup>6</sup>.

En los sistemas de distribución dual, el agua regenerada se entrega a los clientes a través de una red paralela a la red de distribución, independiente del sistema de agua potable. El sistema de distribución de agua regenerada se convierte en una tercera red de agua, además de las aguas residuales y agua potable. Los sistemas de agua reciclada son operados, mantenidos y administrados de una manera similar al sistema de agua potable.

Un sistema de reutilización de agua puede ser rentable si el sistema de agua reciclada evita o previene la necesidad de:

- Obtener suministros adicionales de agua desde distancias considerables
- Tratar una fuente de abastecimiento de agua cruda de baja calidad (por ejemplo, desalinización de agua marina)
- Tratar las aguas residuales a requisitos más estrictos de descarga en aguas superficiales

---

<sup>5</sup> LINDSEY, P., R., et al. "The Design and Construction of a Demonstration / Research Garden Comparing the Impact of Recycled vs. Potable Irrigation Water on Landscape Plants, Soils and Irrigation Components." Water Reuse Conference Proceedings. American Water Works Association. Denver, Colorado, 1996.

<sup>6</sup> JOHNSON, W.D. 1998. "Innovative Augmentation of a Community's Water Supply – The St. Petersburg, Florida Experience." *Proceedings of the Water Environment Federation, 71<sup>st</sup> Annual Conference and Exposition*. Octubre 3-7, Orlando, Florida, 1998.

**4.1.1 Demanda de agua Recuperada.** La demanda diaria de agua reciclada de un sistema urbano en particular puede ser estimada a partir de un inventario de la superficie regable total a ser servida por el sistema de agua reciclada y las tasas estimadas semanales de riego. Estas tarifas son determinadas por factores como las características locales del suelo, condiciones climáticas y el tipo de paisaje. La demanda de agua recuperada también debe tener en cuenta otros usos permitidos en el sistema.

En la evaluación de las necesidades de reutilización de un sistema urbano, también deben ser consideradas las demandas para otros usos de riego. Estas demandas es probable que incluyan usos industriales, comerciales y recreativos. Las demandas de los usuarios industriales, así como los usuarios comerciales, tales como lavado de autos, se pueden estimar a partir del uso del agua o de la facturación. Las demandas de los embalses de recreo se pueden estimar mediante la determinación del volumen de agua necesario para mantener un nivel de agua deseado en el embalse.

Para los sistemas que utilizan agua reciclada para el inodoro como parte de su sistema de reutilización urbana, puede volverse a utilizar los registros de uso del agua para estimar la demanda. El inodoro puede representar hasta el 45 por ciento de la demanda interior de agua residencial<sup>7</sup>.

**4.1.2 Fiabilidad y protección de la salud pública.** En el diseño de un sistema urbano de distribución de agua recuperada, las consideraciones más importantes son la fiabilidad del servicio y la protección de la salud pública. Se deben considerar las siguientes garantías durante el diseño de cualquier sistema de distribución dual:

---

<sup>7</sup> GRISHAM, A., et al. "Long-Term Options for Municipal Water Conservation." Journal AWWA, 81: 34-42. 1989

- La garantía de que el agua recuperada entregada al cliente cumple los requisitos de calidad para los usos previstos
- Prevención de un mal funcionamiento del sistema
- Prevención de las conexiones cruzadas con tuberías de agua potable
- Prevención del uso indebido de agua no potable

Para evitar conexiones cruzadas, todos los accesorios sobre el suelo y el equipo asociado con los sistemas de agua reciclada debe estar claramente marcado. Aún no se han establecido normas relativas al color, pero la mayoría de los fabricantes han adoptado el color morado para las líneas de agua regenerada. Se debe incluir además designaciones adicionales como incluir el uso del símbolo internacional de "no beber" en todos los materiales, tanto superficial como subterránea, para minimizar las posibles conexiones cruzadas.

#### **4.2 REUSO EN APLICACIONES INDUSTRIALES**

El reúso de agua en aplicaciones industriales ha aumentado considerablemente, principalmente por la escasez de agua y aumento de la población, especialmente en zonas de sequía, y la legislación relativa a la conservación del agua y el cumplimiento ambiental. Para satisfacer esta creciente demanda, muchos países han aumentado la disponibilidad de agua regenerada para las industrias. Las plantas de generación de energía son las instalaciones más adecuadas para su reutilización debido a las grandes necesidades de agua para refrigeración, lavado de cenizas, dilución de residuos radioactivos y depuración de gases de combustión. Las refinerías de petróleo combustible y plantas químicas son instalaciones industriales que pueden beneficiarse del agua recuperada, no sólo para refrigeración, sino también para las necesidades del proceso.

**4.2.1 Agua de Enfriamiento.** Para la mayoría de las industrias, la refrigeración por agua representa el mayor uso de agua regenerada, porque los avances en las tecnologías de tratamiento de agua han permitido a las industrias utilizar con éxito agua de menor calidad. Estos avances han permitido un mejor control de los depósitos, corrosión, y los problemas biológicos a menudo asociados al uso de agua regenerada en un sistema de refrigeración.

Hay dos tipos básicos de sistemas de agua de refrigeración que utilizan agua reciclada: 1. Un paso y 2. De recirculación evaporativa. En los sistemas de recirculación evaporativa es más común el uso de agua recuperada debido a su gran consumo de agua y consumo por evaporación.

**4.2.1.1 Sistemas de enfriamiento de un solo paso.** Como su nombre lo indica, los sistemas de enfriamiento de un solo paso implican un simple paso de agua de refrigeración a través de intercambiadores de calor. No hay evaporación, y por lo tanto, no hay consumo o la concentración del agua de refrigeración. Muy pocos sistemas de éste tipo utilizan agua reciclada y, en la mayoría de los casos, se limitan a los lugares donde la reutilización es conveniente, por ejemplo, cuando las industrias se encuentran cerca de un emisario submarino.

**4.2.1.2 Sistemas de enfriamiento de recirculación evaporativa.** Los sistemas de enfriamiento de recirculación evaporativa utilizan el agua para absorber calor del proceso, y luego transferir el calor por evaporación. A medida que el agua de refrigeración es recirculada, es necesaria agua de reposición para reponer el agua perdida por evaporación. También se debe eliminar agua periódicamente del fondo del sistema de enfriamiento para prevenir la acumulación de sólidos disueltos en el agua de refrigeración.

Como todos los sistemas de recirculación por evaporación, las torres de enfriamiento están diseñadas para aprovechar la absorción y la transferencia de calor por evaporación. En los últimos 10 años, las torres de enfriamiento han incrementado la eficiencia de manera que sólo un 1,75 por ciento del agua reciclada se evapora por cada 10 ° F (6 ° C) de disminución en el agua de proceso, disminuyendo así la necesidad de agua de reposición. Dado que el agua se evapora, los sólidos disueltos y los minerales se mantendrán en el agua reciclada. Estos sólidos deben ser eliminados o tratados para evitar la acumulación en los equipos de enfriamiento, así como en la torre de enfriamiento. Esta eliminación se lleva a cabo mediante la descarga de una parte del agua de enfriamiento, conocida como purga de agua. El agua de purga es tratada generalmente por un proceso químico y / o un proceso de filtración / ablandamiento / clarificación antes de su eliminación. La acumulación de sólidos disueltos totales puede ocurrir dentro del sistema de enfriamiento de agua de recuperación industrial, si la corriente de desechos de purga, con un aumento de los sólidos disueltos, se recircula entre la planta de regeneración de agua y el sistema de refrigeración.

**4.2.1.3 Requerimientos de calidad para el agua de enfriamiento.** Los problemas más frecuentes de calidad del agua en los sistemas de enfriamiento por agua son el aumento de la corrosión, biológicos e incrustaciones. Estos problemas surgen de contaminantes en el agua potable, así como en el agua regenerada, pero las concentraciones de algunos contaminantes en el agua regenerada pueden ser mayores que en el agua potable.

## **Problemas de Corrosión**

El uso de cualquier agua, incluyendo agua regenerada, como reposición en los sistemas de recirculación de la torre de enfriamiento tendrá como resultado la concentración de sólidos disueltos en el sistema de intercambio de calor. Esta concentración puede o no puede causar una seria corrosión de los componentes. Deben ser considerados tres requisitos para identificar el potencial de corrosión en el sistema de refrigeración:

- Cálculo de la calidad de la purga de la torre de enfriamiento. A menudo el peor caso puede ser utilizado para diferentes aplicaciones, tales como el agua de lavado, lavado de ceniza, agua de proceso, etc.
- Identificación de las aleaciones de metales en los equipos de proceso que se pondrán en contacto con agua de refrigeración, principalmente intercambiadores de calor, sino también todos los demás metales en el sistema, incluyendo líneas, cajas de agua, tubos, y la torre de enfriamiento.
- Condiciones de funcionamiento (flujo de agua y temperaturas) de la torre de refrigeración - sobre todo en relación con los tubos de los intercambiadores de calor, sino también de los otros metales en el sistema

Dependiendo de su nivel de tratamiento, la calidad del agua regenerada puede variar sustancialmente. La concentración del sistema de refrigeración también puede variar considerablemente, dependiendo de los ciclos de concentración dentro del sistema. Ciertamente, cualquier tipo de contaminación del agua de refrigeración a través del proceso de infiltración, las condiciones atmosféricas, o productos químicos para tratamiento afectarán la calidad del agua.

## **Problemas biológicos**

Las principales preocupaciones en el área biológica asociadas con el uso de agua regenerada en los sistemas de refrigeración son:

- Organismos microbiológicos que contribuyen a la posibilidad de formación de depósitos y la corrosión inducida microbiológicamente (MIC)
- Los nutrientes que contribuyen al crecimiento microbiológico Organismos microbiológicos (bacterias, hongos o algas) que contribuyen a los depósitos y la corrosión son a menudo aquellos que se adhieren a las superficies y se identifican como "sésiles". Los depósitos suelen ocurrir en zonas de bajo caudal (dos metros por segundo [0,6 m / s] o menos), pero puede pegarse a las superficies, incluso a tasas de flujo mucho mayor (5 a 8 metros por segundo [1,5 a 2 m / s]). Los depósitos pueden crear una variedad de preocupaciones y problemas. Los depósitos pueden interferir con la transferencia de calor y puede causar corrosión directamente debido al carácter ácido o corrosivo de los productos.
- Indirectamente, los depósitos pueden formar un escudo sobre las superficies metálicas y establecer fuerte corrosión bajo depósito. Los depósitos pueden crecer rápidamente y pueden obstruir rápidamente los intercambiadores de calor, el relleno de la torre de enfriamiento y las boquillas aerosoles de distribución de agua de refrigeración.

El agua recuperada en general tiene un nivel muy bajo de organismos microbiológicos, debido a los requisitos de tratamiento antes de su descarga. Los niveles de cloro de 2,0 mg / l (como cloro libre) destruyen los microorganismos sésiles que causan la corrosión o depósitos en los sistemas de refrigeración.

Los nutrientes que contribuyen al crecimiento de microorganismos están presentes en distintas concentraciones en el agua recuperada. Sin embargo, aun cuando el agua dulce es utilizada en las torres de enfriamiento, los productos químicos adicionados durante el proceso de tratamiento pueden contribuir con una considerable concentración de nutrientes. También es importante tener un buen programa de control biológico en el lugar antes que el agua regenerada sea

utilizada. El Amoníaco y los compuestos orgánicos son nutrientes típicos que se encuentran en el agua reciclada que se pueden reducir o eliminar utilizando algunos biocidas de uso común.

### **Problemas de depósitos**

Los componentes principales con potencial para la formación de incrustaciones en el agua regenerada son el calcio, magnesio, sulfato, alcalinidad, fosfato, sílice y flúor. Las combinaciones de estos minerales que pueden producir incrustaciones en el agua de refrigeración concentrada generalmente incluyen fosfato de calcio (más común), sílice (bastante común), sulfato de calcio (muy común), carbonato de calcio, fluoruro de calcio (rara vez se encuentran), y silicato de magnesio (rara vez se encuentran).

Todos los componentes con el potencial para formar incrustaciones deben ser evaluados y controlados por el tratamiento químico y / o mediante el ajuste de los ciclos de concentración. La calidad del agua regenerada se debe evaluar, junto con el potencial incrustante para establecer el uso de inhibidores de incrustación específicos. Actualmente existen directrices para la selección y el uso de inhibidores de incrustaciones.

**4.2.2 Agua de Reposición de calderas.** El uso de agua regenerada como agua de reposición de calderas no difiere mucho de la utilización para abastecimiento público de aguas convencionales, ambas requieren un tratamiento adicional extenso. Los requisitos de calidad para el agua de reposición de las calderas dependen de la presión a la que se opera la caldera. En general, cuanto mayor sea la presión, mayor será la calidad de agua requerida. Las calderas de Muy alta presión (1500 psi [10.340 kPa] o más) requieren agua de reposición de muy alta calidad.

En general, tanto el agua potable como el agua reciclada utilizadas como agua de reposición de las calderas deben ser tratadas para reducir su dureza del agua cercana a cero. Se requiere la eliminación o el control de las incrustaciones insolubles de calcio y magnesio, y el control de sílice y alúmina, ya que estas son las principales causas de la acumulación de sarro en calderas.

Dependiendo de las características del agua regenerada, el tratamiento de floculación, sedimentación, y recarbonatación podría estar seguido por filtración por varios medios, adsorción con carbón y la eliminación de nitrógeno. El agua de alimentación de alta pureza para calderas de alta presión también puede requerir tratamiento por ósmosis inversa o intercambio iónico. La alta alcalinidad puede contribuir a la formación de espuma, lo que resulta en depósitos en el sobrecalentador, recalentador, o las turbinas. La alcalinidad del bicarbonato, bajo la influencia del calor de la caldera, puede conducir a la liberación de dióxido de carbono, que es una fuente de corrosión en los equipos que utilizan vapor. El tratamiento y la considerable cantidad relativamente pequeña de agua de reposición de la caldera la hace un buen candidato para el uso de agua recuperada.

Debido al tratamiento requerido y las cantidades relativamente pequeñas de agua de reposición de la caldera que se requieren normalmente hacen del agua recuperada un mal candidato.

**4.2.3 Agua Industrial.** La idoneidad de las aguas regeneradas para su uso en procesos industriales depende del uso particular. Por ejemplo, la industria electrónica requiere de agua de calidad casi destilada para lavar las placas de circuitos y otros componentes electrónicos. Por otro lado, la industria del curtido puede utilizar relativamente baja calidad del agua. Los requisitos para los productos textiles, celulosa y papel, fabricación de metal y son intermedios. Por lo tanto, en la investigación de la viabilidad de la reutilización industrial de aguas regeneradas, deben ser contactados los usuarios potenciales para determinar los requisitos específicos para su agua de proceso.

La Tabla 2 presenta los requisitos de calidad de agua para una variedad de industrias.

**Tabla 2. Requisitos de Calidad del agua para una variedad de industrias**

Parámetro*	Pulpa y Papel			Química	Petroquímica y Carbón	Textiles		Cemento
	Tubería	química, sin blanquear	Pulpa y papel blanqueado			Tamaño de suspensión	Productos de limpieza, lejía y colorantes	
<b>Cu</b>	-	-	-	-	0.05	0.01	-	-
<b>Fe</b>	0.3	1.0	0.1	0.1	1.0	0.3	0.1	2.5
<b>Mn</b>	0.1	0.5	0.05	0.1	-	0.05	0.01	0.5
<b>Ca</b>	-	20	20	68	75	-	-	-
<b>Mg</b>	-	12	12	19	30	-	-	-
<b>Cl</b>	1	200	200	500	300	-	-	250
<b>HCO3</b>	-	-	-	128	-	-	-	-
<b>NO3</b>	-	-	-	5	-	-	-	-
<b>SO4</b>	-	-	-	100	-	-	-	250
<b>SiO2</b>	-	50	50	50	-	-	-	35
<b>Dureza</b>	-	100	100	250	350	25	25	-
<b>Alcalinidad</b>	-	-	-	125	-	-	-	400
<b>TDS</b>	-	-	-	1	1	100	100	600
<b>TSS</b>	-	10	10	5	10	5	5	500

Parámetro*	Pulpa y Papel			Química	Petroquímica y Carbón	Textiles		Cemento
	Tubería	química, sin blanquear	Pulpa y papel blanqueado			Tamaño de suspensión	Productos de limpieza, lejía y colorantes	
Color	30	30	10	20	-	5	5	-
pH	6 - 10	6 - 10	6 - 10	6.2-8.3	6 - 9	-	-	6.5-8.5
CCE	-	-	-	-	-	-	-	-

Fuente: Water Pollution Control Federation, 1989.

\* Todos los valores en mg / l, excepto el color y pH

#### 4.2.3.1 Pulpa y papel

El enfoque histórico de la industria de la celulosa y el papel ha sido el reciclaje interno del agua en un grado muy elevado. La industria ha reconocido desde hace tiempo los beneficios potenciales asociados a la reutilización del agua. Las fábricas modernas se acercan a una relación de reciclado del 100 por ciento, con sólo 16.000 y 17.000 galones de agua dulce por tonelada (67 a 71 litros por kilogramo) <sup>8</sup>

Algunas de las razones por las que las fábricas optan por no utilizar las aguas residuales municipales tratadas incluyen:

- La preocupación por patógenos
- Requisitos de calidad del producto que específicamente impiden su uso posibles costos de transporte prohibitivos
- preocupación por el posible aumento de la corrosión, incrustaciones y los problemas de contaminación biológica debido al alto grado de reciclaje interno involucrados.

<sup>8</sup> NCASI. 2003. Memo report from Jay Unwin. April 23, 2003.

#### **4.2.3.2 Industria química**

Los requisitos de calidad de agua para la industria química varían mucho de acuerdo a las necesidades de producción. En general, se requieren aguas en el rango de pH neutro (6.2 a 8.3), moderadamente suaves, con baja turbidez, sólidos suspendidos (SS) y sílice; por lo general el contenido de sólidos disueltos y cloruros no es crítico<sup>9</sup>.

#### **4.2.3.3 Industria Textil**

Las aguas utilizadas en la industria textil no deben ser coloreadas, por lo que deben tener baja turbidez, color, hierro y manganeso. La dureza puede depositarse en los tejidos y pueden causar problemas en algunos de los procesos que utilizan jabón. Los nitratos y nitritos pueden causar problemas en el teñido.

#### **4.2.3.4 Petróleo y carbón**

Los procesos para la fabricación de productos derivados del petróleo y el carbón por lo general pueden tolerar agua de calidad relativamente baja. Las aguas en general, debe estar en el rango de pH de 6 a 9 y SS moderados no mayores de 10 mg / l.

### **4.3 REUSO EN APLICACIONES AGRÍCOLAS**

Para la implementación de un programa de reutilización de agua para riego agrícola se deben analizar las siguientes consideraciones específicas:

---

<sup>9</sup> WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION. Water Reuse Manual of Practice, Second Edition. Water Pollution Control Federation, Alexandria, Virginia, 1989.

- Demandas de riego agrícola
- Calidad del agua regenerada
- Otras Consideraciones sobre el sistema

La agricultura de regadío representa un porcentaje significativo de la demanda total de agua dulce. El riego agrícola se estima en un 56 por ciento del total de la demanda de agua en todo el país <sup>10</sup>

A menudo se incluye el reuso agrícola como un componente principal en los programas de reutilización de agua por las siguientes razones:

- Demanda extremadamente alta de agua para riego agrícola
- Importantes beneficios de conservación del agua asociados con la reutilización en la agricultura
- Capacidad de integración de las aplicaciones agrícolas con otras aplicaciones de reuso

**4.3.1 Estimación de la demanda de irrigación agrícola.** Debido a que las necesidades de agua de los cultivos varían según las condiciones climáticas, la necesidad de riego suplementario puede variar mes a mes durante todo el año. Esta variación estacional es una función de la precipitación, temperatura, tipo de cultivo, etapa de crecimiento de las plantas, y otros factores, en función del método de riego utilizado.

El proveedor de agua recuperada debe ser capaz de cuantificar estas demandas estacionales, así como cualquier fluctuación en el suministro de agua regenerada,

---

<sup>10</sup> IDEAM Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Estudio Nacional del Agua. Bogotá, D.C, 2010.

para asegurar que la demanda de agua de riego puede ser satisfecha. Desafortunadamente, muchos usuarios agrícolas no son capaces de proporcionar suficientes detalles acerca de las demandas de riego para fines de diseño.

Esto se debe a que los usuarios que utilizan el agua estacional o anual rara vez miden y registran, incluso en superficies de tierra donde el agua ha sido utilizada para el riego en una serie de años. Sin embargo, la orientación de expertos está generalmente disponible a través de universidades estatales y estudios realizados en entidades ambientales.

Para evaluar la viabilidad de la reutilización, el proveedor de agua recuperada debe ser capaz de estimar razonablemente las demandas de riego y abastecimiento de agua recuperada. Para hacer esta evaluación en ausencia de datos reales sobre el uso del agua a menudo se debe estimar la evapotranspiración, percolación y las pérdidas por escorrentía, y riego neto mediante el uso de ecuaciones de predicción.

La demanda de riego es la cantidad de agua necesaria para satisfacer las necesidades de los cultivos y también para superar las pérdidas del sistema. La ineficiencia de riego se define como el margen o porcentaje que se descuenta del volumen de agua dispuesta como riego (riego bruto), y que explica las pérdidas inevitables, entre otras, la percolación profunda, la escorrentía superficial y las originadas en la aplicación de sistemas de explotación o manejo técnico de los sistemas de riego. El valor que es atribuible a esta condición, en el marco del Estudio Nacional del Agua, es de 35% para la suma de cultivos, sin incluir el arroz, riego cuyo factor es de 83%.

**4.3.2 Requerimientos de Calidad para uso agrícola.** Los componentes químicos en el agua recuperada de preocupación para el riego agrícola son la salinidad, sodio, oligoelementos, exceso de cloro residual, y los nutrientes. La sensibilidad es generalmente una función de la tolerancia de una determinada planta a componentes encontrados en la zona de la raíz o follaje. El agua recuperada tiende a tener mayores concentraciones de estos componentes que las aguas subterráneas o fuentes de aguas superficiales de donde se extrae el agua.

Los tipos y concentraciones de los componentes del agua residual recuperada dependerá del suministro municipal de agua, las corrientes de desechos del afluente (es decir, las contribuciones domésticas e industriales), la cantidad y composición de la infiltración en el sistema de recolección de aguas residuales, los procesos de tratamiento de aguas residuales, y el tipo de instalaciones de almacenamiento. Algunas Condiciones que pueden tener un impacto negativo en la calidad del agua regenerada son:

- Los niveles elevados de TDS
- Descargas industriales de compuestos potencialmente tóxicos en el sistema de alcantarillado municipal
- Infiltración de agua salada (cloruros) en el sistema de alcantarillado en las zonas costeras

**4.3.2.1 Salinidad.** La salinidad es el parámetro más importante en la determinación de la idoneidad del agua que se utiliza para el riego. La salinidad se determina midiendo la conductividad eléctrica (CE) y / o el total de sólidos disueltos (TDS) en el agua. La tolerancia a la salinidad de las plantas varía ampliamente. Los cultivos deben ser elegidos cuidadosamente para asegurarse que puede tolerar la salinidad del agua de riego, e incluso entonces el suelo debe estar bien drenado y adecuadamente lavado para evitar la acumulación de sal. La lixiviación es la aplicación de agua de riego en exceso deliberadamente para establecer un movimiento descendente de agua y sal fuera de la zona radicular.

La acumulación de sales en el suelo depende de la concentración de sales en el agua de riego y la velocidad a la que sales se eliminan por lavado. La acumulación de sal puede ser especialmente perjudicial durante la germinación y para las plantas son jóvenes (plántulas). En esta etapa, el daño puede ocurrir incluso con concentraciones de sal relativamente bajas.

Las preocupaciones relacionadas con la salinidad son principalmente los posibles impactos a lo siguiente: potencial osmótico del suelo, toxicidad de un ion específico, y la degradación de las condiciones físicas del suelo. Estas condiciones pueden llevar a la reducción de las tasas de crecimiento de las plantas, reducción de los rendimientos, y, en casos severos, la pérdida total.

La concentración de iones específicos puede causar que uno o más de estos elementos traza se acumule en el suelo y en la planta. A largo plazo la acumulación puede dar lugar a riesgos para la salud humana y de animales y/o fitotoxicidad en las plantas. Cuando se riega con agua reciclada municipal, los iones de mayor preocupación son el sodio, el cloruro y boro. Los detergentes de uso doméstico suelen ser la fuente de boro y los ablandadores de agua

contribuyen al sodio y cloruro. Las plantas varían mucho en su sensibilidad a la toxicidad de iones específicos.

La toxicidad es especialmente perjudicial cuando los cultivos se riegan con aspersores durante los períodos de altas temperaturas y baja humedad. La aplicación sobre las hojas de agua de alta salinidad conduce a la absorción directa de sodio y/o cloruro y puede causar lesiones a las hojas. La salinidad reduce la absorción de agua en las plantas mediante la reducción del potencial osmótico del suelo. Esto, a su vez, hace que la planta utilice una gran parte de su energía disponible para ajustar la concentración de sal en sus tejidos con el fin de obtener agua suficiente, por lo tanto, la planta cuenta con menos energía disponible para crecer. El problema es más grave en las condiciones climáticas cálidas y secas debido a la creciente demanda del agua por las plantas y es aún más grave cuando el riego es insuficiente.

Otras complicaciones de los problemas de salinidad pueden ocurrir en zonas geográficas donde el nivel freático es alto. Un alto nivel freático puede causar un posible flujo ascendente de agua de alta salinidad en la zona radicular, para esto un drenaje subterráneo puede ser una solución viable.

**4.3.2.2 Sodio.** La influencia que el sodio puede tener en las propiedades del suelo es indicado por la relación de absorción de sodio (SAR), que se basa en el efecto del sodio intercambiable sobre la condición física del suelo. SAR expresa la concentración de sodio en el agua en relación con el calcio y el magnesio. El exceso de sodio en el agua de riego (cuando el sodio excede el calcio en una proporción de más de 3:1) contribuye a la dispersión del suelo y degradación estructural, donde las partículas más finas del suelo llenan muchos de los poros más pequeños, sellan la superficie y reducen las tasas de infiltración de agua<sup>11</sup>. Para el agua regenerada, se recomienda que la concentración de iones de calcio en la ecuación de SAR sea ajustada por alcalinidad para incluir una estimación más correcta de calcio en el suelo después de riego de agua.

Las sales de sodio influyen en la composición de cationes intercambiables del suelo, lo que reduce la permeabilidad y afecta la labranza de la tierra. Esto ocurre generalmente dentro de los primeros centímetros del suelo y se relaciona con el alto contenido de sodio o muy bajo de calcio en el agua del suelo y el riego. El sodio no afecta la absorción de agua por las plantas, pero pone en peligro la infiltración de agua en el suelo. El crecimiento de las plantas se ve afectado por una falta de disponibilidad de agua en el suelo<sup>12</sup>. El calcio y el magnesio actúan como iones estabilizadores en contraste con los iones de sodio de desestabilización en lo que respecta a la estructura del suelo. El agua regenerada, sin embargo, puede ser alta en sodio en relación al calcio y puede causar problemas de permeabilidad del suelo, si no se gestiona adecuadamente.

---

<sup>11</sup> AWWA American Water Works Association, California-Nevada Section. Guidelines for the Onsite Retrofit of Facilities Using Disinfected Tertiary Recycled Water. 1997

<sup>12</sup> TANJI, K.K. (ed.). Agricultural Salinity Assessment and Management. American Society of Civil Engineers. New York, New York, 1990.

**4.3.2.3 Elementos Traza.** Los elementos de mayor preocupación por los elevados niveles son el cadmio, cobre, molibdeno, níquel y zinc. El níquel y el zinc producen efectos nocivos visibles en las plantas en concentraciones más bajas que los niveles perjudiciales para los animales y los seres humanos. La intoxicación por zinc y níquel se reduce a medida que aumenta el pH. El cadmio, cobre y molibdeno, sin embargo, puede ser perjudiciales para los animales en concentraciones demasiado bajas para afectar las plantas.

El cobre no es tóxico para los animales monogástricos, pero pueden ser tóxicos para los rumiantes. Sin embargo, su tolerancia al cobre aumenta a medida que aumenta el molibdeno disponible. El molibdeno también puede ser tóxico cuando esté disponible en ausencia de cobre. El cadmio es de particular preocupación, ya que puede acumularse en la cadena alimentaria, pero no afecta negativamente a los rumiantes, debido a las pequeñas cantidades que ingieren. La mayoría de los productos lácteos y la carne también se ve afectada por la ingestión de cadmio debido a que el cadmio se almacena en el hígado y los riñones de los animales, en vez de la grasa o tejido muscular. Además, se encontró que el ingreso de metales pesados por las impurezas de los fertilizantes químicos comerciales era mucho mayor que la aportada por el agua regenerada<sup>13</sup>.

La Tabla 3 muestra los límites recomendados por la EPA para los componentes en el agua de riego.

---

<sup>13</sup> ENGINEERING SCIENCE. "Monterey Wastewater Reclamation Study for Agriculture." Prepared for Monterey Regional Water Pollution Control Agency, Monterey, California, 1987.

**Tabla 3. Límites recomendados por la EPA para algunos componentes en el agua de riego**

Constituyente	Uso largo periodo (mg/l)	Uso corto periodo (mg/l)	Comentarios
Aluminio	5.0	20	Puede causar improductividad en suelos ácidos, pero en suelos de pH 5,5 a 8,0 se precipita el ion y eliminar la toxicidad.
Arsénico	0.10	2.0	Toxicidad para las plantas varía ampliamente, desde 12 mg / L para el pasto del Sudán a menos de 0,05 mg / l para el arroz.
Berilio	0.10	0.5	Toxicidad para las plantas varía ampliamente, desde 5 mg / L para la col rizada hasta 0,5 mg / L de frijol arbustivo.
Boro	0.75	2.0	Esencial para el crecimiento vegetal, con un rendimiento óptimo para muchas obtenidas en unas pocas décimas mg / l en soluciones nutritivas. Tóxico para muchas plantas sensibles (por ejemplo, los cítricos) a 1 mg / L. Por lo general, una cantidad suficiente de agua regenerada para corregir las deficiencias del suelo. La mayoría de las hierbas son relativamente tolerantes a 2,0 a 10 mg / L.
Cadmio	0.01	0.05	Tóxico para los frijoles, remolacha y nabos en concentraciones tan bajas como 0,1 mg / L en una solución nutritiva. Límite conservador recomendado.
Cromo	0.1	1.0	No se reconocen como un elemento esencial del crecimiento. Se recomiendan límites conservadores debido a la falta de conocimiento sobre la toxicidad para las plantas.
Cobalto	0.05	5.0	Tóxicos para las plantas de tomate a 0,1 mg / L en una solución nutritiva. Tiende a ser inactivado por suelos neutros y alcalinos.
cobre	0.2	5.0	Tóxico para una serie de plantas de 0.1 a 1.0 mg / L en una solución nutritiva.
fluoruro	1.0	15.0	Inactivado por suelos neutros y alcalinos.
Hierro	5.0	20.0	No es tóxico para las plantas en suelos aireados, pero puede contribuir a la acidificación del suelo y la pérdida de fósforo esencial y molibdeno.
Plomo	5.0	10.0	Puede inhibir el crecimiento de células vegetales en concentraciones muy elevadas.
Litio	2.5	2.5	Tolerada por la mayoría de los cultivos en concentraciones de hasta 5 mg / L; móvil en el suelo. Tóxico para los cítricos en dosis bajas - límite recomendado es de 0,075 mg / L.
Manganeso	0.2	10.0	Tóxico para una serie de cultivos en pocas décimas mg / l en suelos ácidos.
Molibdeno	0.01	0.05	No tóxico para las plantas en concentraciones normales en el suelo y el agua. Puede ser tóxica para el ganado si el forraje se cultiva en suelos con altos niveles de molibdeno disponible.
Niquel	0.2	2.0	Tóxico para una serie de plantas de 0,5 a 1,0 mg / L; reducción de la toxicidad a pH neutro o alcalino.
Selenio	0.02	0.02	Tóxicos para las plantas a bajas concentraciones y al ganado si el forraje se cultiva en suelos con niveles bajos de selenio.
Estaño, tungsteno, titanio	-	-	Efectivamente excluidos por las plantas, niveles de tolerancia específica desconocida
Vanadio	0.1	1.0	Tóxico para muchas plantas a concentraciones relativamente bajas.

Constituyente	Uso largo periodo (mg/l)	Uso corto periodo (mg/l)	Comentarios
Zinc	2.0	10.0	Tóxico para muchas plantas en concentraciones que varían ampliamente, reducción de la toxicidad a pH elevado (6 o superior) y en suelos de textura fina u orgánicos.
Constituyente	Limite Recomendado		Comentarios
pH	6.0		La mayoría de los efectos del pH en el crecimiento de plantas son indirectos (por ejemplo, efectos del pH sobre la toxicidad de metales pesados ).
TDS	500 - 2,000 mg/l		Por debajo de 500 mg / L, usualmente no se observan efectos perjudiciales. Entre 500 y 1.000 mg / L, TDS en el agua de riego puede afectar a las plantas sensibles. De 1.000 a 2.000 mg / L, los niveles de TDS puede afectar a muchos cultivos y deben ser seguidas prácticas de cuidado. Por encima de 2.000 mg / L, el agua se puede utilizar regularmente sólo para las plantas tolerantes en suelos permeables.
Cloro libre residual	<1 mg/l		Concentraciones superiores a 5 mg / l provoca un daño grave a la mayoría de las plantas. Algunas plantas sensibles pueden sufrir daños a niveles tan bajos como 0,05 mg / l.

Fuente: Adaptado de Rowe and Abdel-Magid, 1995<sup>14</sup>

**Tabla 4. Calidad del agua para reúso agrícola**

TIPOS DE REÚSO AGRÍCOLA	CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL	OPCIÓN DE TRATAMIENTO
Reúso agrícola en cultivos que se consumen y no se procesan comercialmente	pH 6,5-8,4 DBO <10 mg/L-1 <2 UNT <14 NMP coli fecal/100 mL* <1 huevos/L (nematodos intestinales)	Secundario Filtración desinfección
Reúso agrícola en cultivos que se consumen y se procesan comercialmente	pH 6,5-8,4 <30 mg/L-1 DBO <30 mg/L-1 SS <200 NMP coli fecal/100 mL	Secundario desinfección
Reúso agrícola en cultivos que no se consumen	pH 6,5-8,4 <30 mg/L-1 DBO <30 mg/L-1 SS <200 NMP coli fecal/100 mL	Secundario desinfección

Fuente: FAO, 1999

DBO, demanda bioquímica de oxígeno; SS, sólidos suspendidos; UNT, unidades nefelométricas de turbidez; RAS, relación adsorción/sodio; NMP, número más probable

\* Coliformes fecales NMP/100 mL: media geométrica de más de 10 muestras por mes; ninguna muestra debe ser mayor de 200 NMP/100 mL.

<sup>14</sup> ROWE, D.R. Handbook of Wastewater Reclamation and Reuse. CRC Press, Inc. 1995. 550 p.

**4.3.2.4 Cloro Residual.** El Cloro libre residual en concentraciones inferiores a 1 mg / l por lo general no representa un problema para las plantas. Sin embargo, algunos cultivos sensibles pueden sufrir daños a niveles tan bajos como 0,05 mg / l. Algunos cultivos leñosos, sin embargo, pueden acumular cloro en el tejido a niveles tóxicos. El exceso de cloro tiene efectos de quema similares al sodio y cloruro rociados directamente sobre el follaje. Cloro en concentraciones superiores a 5 mg / l provoca un daño grave a la mayoría de las plantas.

**4.3.2.5 Nutrientes.** Los nutrientes más importantes para las necesidades de un cultivo son el nitrógeno, fósforo, potasio, zinc, boro y azufre. El agua recuperada por lo general contiene suficiente de estos nutrientes para suministrar una gran parte de las necesidades del cultivo.

El nutriente más beneficioso es el nitrógeno. Tanto la concentración y la forma de nitrógeno deben ser considerados en el agua de riego. Mientras que las cantidades excesivas de nitrógeno estimulan el crecimiento vegetativo en la mayoría de los cultivos, también puede retrasar la maduración y reducir la calidad de la cosecha y la cantidad. El nitrógeno en el agua regenerada puede estar presente en concentraciones que no son lo suficientemente grandes como para producir rendimientos satisfactorios de los cultivos, y puede ser necesario adicionar un poco de fertilizante. Además, el excesivo nitrato en los forrajes puede causar un desequilibrio de nitrógeno, potasio y magnesio en animales de pastoreo. Esta es una preocupación si el forraje se utiliza como fuente de alimentación principal para el ganado, sin embargo, tales concentraciones son elevadas, las cuales no se esperan con el agua recuperada municipal.

El fósforo contenido en el agua regenerada es por lo general demasiado bajo para satisfacer las necesidades de un cultivo. Sin embargo, con el tiempo, puede

acumularse en el suelo y reducir la necesidad de la suplementación de fósforo. Los niveles excesivos de fósforo no parecen plantear problemas a los cultivos, pero puede ser un problema en el escurrimiento de las aguas superficiales.

#### **4.4 REUSO EN APLICACIONES AMBIENTALES Y RECREACIONALES**

El reúso en aplicaciones ambientales incluye la mejora y restauración de humedales, la creación de humedales para servir como hábitat para la fauna y refugios, y el aumento de la corriente de flujo. Los usos del agua regenerada para la gama de actividades recreativas de embalses paisaje, obstáculos de agua en campos de golf, a gran escala en el desarrollo embalses recreativos acuáticos, contacto incidental (pesca y la navegación) y de contacto con todo el cuerpo (natación y para niños). Al igual que con cualquier forma de reutilización, el desarrollo de proyectos de reutilización de aguas recreativas y ambientales será una función de la demanda de agua, junto con una fuente rentable de la calidad del agua regenerada adecuado.

Los objetivos de estos proyectos de reutilización suelen crear un entorno en el que pueda prosperar la vida silvestre y / o desarrollar un espacio de mayor valor recreativo o estético a la comunidad a través del uso de agua regenerada.

**4.4.1 Humedales naturales y artificiales.** Los humedales han sido destruidos para usos tan diversos como la agricultura, la minería, la silvicultura y la urbanización. Los humedales proporcionan muchas funciones que valen la pena, incluida la atenuación de inundaciones, la vida silvestre y el hábitat de aves acuáticas, para apoyar la productividad de las cadenas alimentarias, recarga de acuíferos, y la mejora de la calidad del agua. Además, el mantenimiento de los humedales es importante para el equilibrio hidrológico regional.

Los humedales, permiten la conservación del agua mediante la regulación de la tasa de evapotranspiración y, en algunos casos, proporcionando la recarga de acuíferos. La aplicación deliberada de agua regenerada a los humedales puede proporcionar un uso beneficioso, y por lo tanto, la reutilización, mediante el cumplimiento de cualquiera de los siguientes objetivos:

- Crear, restaurar y / o mejorar los sistemas de humedales
- Proporcionar un tratamiento adicional de agua recuperada antes de la descarga a un cuerpo de agua receptor
- Proporcionar una alternativa de disposición para un sistema de reúso de agua en climas húmedos

En los humedales que han sido alterados hidrológicamente, la aplicación de agua regenerada sirve para restaurar y mejorarlos. Se pueden crear nuevos humedales mediante la aplicación de agua regenerada, resultando en una ganancia neta de superficie de los humedales y sus funciones. Además, los humedales artificiales y restaurados pueden ser diseñados y manejados para maximizar la diversidad de hábitats en el paisaje.

La aplicación de agua regenerada a los humedales proporciona usos compatibles. Los humedales son a menudo capaces de mejorar la calidad del agua del agua regenerada, sin crear impactos negativos en el sistema de humedales. Esto, a su vez, mejora los sistemas naturales de agua río abajo y ofrece recarga de los acuíferos.

Una gran parte de proyectos de investigación se ha realizado acerca de la capacidad de los humedales, tanto naturales como artificiales, para ofrecer mejor calidad de agua constante y confiable. Con la ejecución adecuada de los elementos de diseño y construcción, los humedales artificiales presentan

características que son similares a los humedales naturales, ya que contienen vegetación y microbios similares para asimilar contaminantes. Además, los humedales son el hábitat de vida silvestre y los beneficios ambientales son similares a los humedales naturales. Los humedales artificiales son eficaces en el tratamiento de la DBO, SST, nitrógeno, fósforo, patógenos, metales, sulfatos, compuestos orgánicos y otras sustancias tóxicas.

El mejoramiento de la calidad del agua es proporcionada por la transformación y / o almacenamiento de componentes específicos dentro del humedal. Si se mantienen las condiciones óptimas, la asimilación de nitrógeno y DBO en los humedales se producirá de forma indefinida, ya que son controladas principalmente por procesos microbianos y generar productos gaseosos finales. Por el contrario, la asimilación de fósforo en los humedales es finita y está relacionada con la capacidad de absorción del suelo y el almacenamiento a largo plazo dentro del sistema. El humedal puede proporcionar pulimento adicional de la calidad del agua de los productos de agua recuperada.

Los humedales no proporcionan el tratamiento de sólidos suspendidos totales. Además, una evaluación de la salinidad puede ser necesario si los efluentes tienen un alto contenido de sal que pueda causar impactos a la vegetación de los humedales. En algunos casos, puede ser apropiada la vegetación tolerante a la sal. También deben ser evaluados los impactos a la calidad del agua subterránea.

Los beneficios de un sistema de tratamiento de humedales incluyen:

- Mejorar la calidad del agua a través del uso de los sistemas naturales
- Proteger las aguas receptoras corriente abajo
- Proporcionar creación de humedales, restauración o mejora
- Proporcionar hábitat para la vida silvestre y aves acuáticas

- Costos de operación y mantenimiento relativamente bajos
- Mantener espacios verdes
- Atenuar picos de flujo
- Puede ser un componente de un "tren de tratamiento", puede ser usado en áreas con alto nivel freático y / o suelos de baja permeabilidad
- Oportunidades estéticas y educativas

Limitaciones potenciales de un sistema de tratamiento de humedales incluyen:

- Importantes requisitos superficie de tierra
- Puede tener una aplicación limitada en las zonas urbanas
- Potencial de un cortocircuito, lo que llevará a un pobre rendimiento
- Potencial de vegetación molesta y algas

**4.4.2 Embalses recreacionales y estéticos.** Los embalses pueden servir para una variedad de funciones estéticas y actividades que no requieren contacto directo con el agua como la navegación y la pesca. Al igual que con otros usos del agua regenerada, el nivel requerido de tratamiento variará con el uso previsto del agua. A medida que aumenta el potencial de contacto humano, son necesarios mayores niveles de tratamiento. También deben ser considerados cuando se utiliza para los embalses, el tratamiento para la eliminación de nutrientes como un medio para controlar las algas. Sin el control de nutrientes, existe un alto potencial de proliferación de algas, lo que resulta en olores, un aspecto feo y condiciones eutróficas.

Los embalses de agua recuperada pueden ser fácilmente incorporados en los desarrollos urbanos. Por ejemplo, campos de golf y desarrollos residenciales

comúnmente integran estanques. Estos cuerpos de agua también pueden servir como instalaciones de almacenamiento de agua de riego.

**4.4.3 Aumento de flujo.** El aumento de flujo se diferencia de una descarga de agua superficial en que el aumento tiene por objeto lograr un fin benéfico, mientras que la descarga es principalmente para su eliminación. El aumento de flujo permite mantener los caudales y mejorar el hábitat acuático y la vida silvestre, así como para mantener el valor estético de los cursos de agua. Esto puede ser necesario en los lugares donde se extrae un volumen significativo de agua para uso potable o de otro tipo, disminuyendo en gran medida el volumen de agua río abajo.

Al igual que con los embalses, los requisitos de calidad del agua para el aumento de flujo se basa en la utilización prevista de la corriente, así como el objetivo de mantener una apariencia aceptable.

#### **4.5 REUSO EN APLICACIONES DE RECARGA DE AGUAS SUBTERRANEAS**

La recarga de aguas subterráneas con agua regenerada busca reponer los mantos freáticos. Aunque prácticas como el riego puede contribuir al aumento de las aguas subterráneas, la recarga es un subproducto accidental de la actividad primaria.

Los propósitos de la recarga de acuíferos con agua regenerada pueden ser:

- Establecer barreras de agua salada en los acuíferos costeros
- Proporcionar un tratamiento adicional para su reutilización futura
- Aumentar los acuíferos potable y no potable

- Proporcionar almacenamiento de agua reciclada para la posterior recuperación y reutilización
- Controlar o prevenir el hundimiento del suelo.

El bombeo de acuíferos en las zonas costeras puede dar lugar a la intrusión de agua salada, que los hace inadecuados como fuentes de abastecimiento de agua potable o para otros usos donde son intolerables los altos niveles de sal. Se pueden utilizar una batería de pozos de inyección para crear una barrera hidráulica y mantener el control. El agua regenerada puede ser inyectada directamente en el acuífero para mantener un gradiente hacia el mar y así evitar intrusión de agua salada hacia el interior del subsuelo.

La Infiltración y percolación de las aguas regeneradas aprovecha los mecanismos de eliminación natural en los suelos, incluyendo la biodegradación y la filtración, proporcionando así tratamiento in situ de las aguas regeneradas y la fiabilidad de un tratamiento adicional para el sistema de gestión de aguas residuales en general. La capacidad de implementar estos sistemas de tratamiento dependerá del método de recarga, las condiciones hidrogeológicas, los requisitos de los usuarios aguas abajo, así como otros factores.

Los acuíferos proporcionan un mecanismo natural para el almacenamiento y la transmisión al subsuelo de las aguas regeneradas. Las demandas de riego de agua regenerada son a menudo estacionales, ya sea que requieran grandes instalaciones de almacenamiento o medios alternativos de eliminación cuando la demanda es baja. Además, los sitios adecuados para las instalaciones de almacenamiento en la superficie pueden no estar disponibles, económicamente viables, o ambientalmente aceptables. La recarga de aguas subterráneas elimina la necesidad de instalaciones de almacenamiento superficiales y los consiguientes problemas asociados a los embalses superficiales no cubiertos, tales como las

pérdidas por evaporación, la proliferación de algas con el consiguiente deterioro de la calidad del agua, y la formación de olores.

Mientras que hay ventajas evidentes asociadas a la recarga de aguas subterráneas, las posibles restricciones incluyen<sup>15</sup>:

- Necesidad de áreas extensas de tierra para la difusión de las cuencas.
- Costos prohibitivos del tratamiento, monitoreo de la calidad del agua y la inyección / infiltración
- La recarga puede aumentar el riesgo de contaminación de los acuíferos debido a un pretratamiento inadecuado.
- No toda el agua recargada puede ser recuperada debido al movimiento de la zona o la mezcla agua subterránea de mala calidad
- El área requerida para la operación y el mantenimiento de un sistema de suministro de agua subterránea (incluyendo el depósito de agua subterránea en sí) es generalmente mayor que la requerida para un sistema de abastecimiento de agua superficial
- Incertidumbres hidrogeológicas, tales como la transmisividad, las fallas, y la geometría de los acuíferos, puede reducir la eficacia del proyecto de recarga.

**4.5.1 Destino de los contaminantes en sistemas de recarga.** El destino de los contaminantes es una consideración importante en los sistemas de recarga de los acuíferos con agua regenerada.

Los contaminantes en el medio subterráneo están sujetos a procesos como la biodegradación por microorganismos, adsorción y biodegradación posterior,

---

<sup>15</sup> OAKSFORD, E.T. Artificial Recharge: Methods, Hydraulics, and Monitoring. In: Artificial Recharge of Groundwater. T. Asano (ed) pp 69-127, Butterworth Publishers, Boston Massachusetts, 1985.

filtración, intercambio iónico, volatilización, dilución, oxidación química y reducción, precipitación química y la formación de complejos, y las reacciones fotoquímicas (en la difusión de las cuencas) <sup>16</sup>

**4.5.1.1 Material particulado.** El material particulado, incluyendo algunas bacterias, se elimina por la sedimentación en los poros del medio durante la filtración. Los virus son principalmente eliminados por adsorción y la interacción con las bacterias anaerobias<sup>17</sup>. Las partículas acumuladas poco a poco forman una capa que restringe la infiltración. El grado de atrapamiento y adsorción de las partículas en suspensión por los suelos es una función de la concentración de sólidos en suspensión, las características del suelo, y la carga hidráulica.

**4.5.1.2 Compuestos orgánicos disueltos.** Los componentes orgánicos disueltos están sujetos a biodegradación y adsorción durante la recarga. La biodegradación se produce principalmente por microorganismos adheridos a la superficie del medio filtrante.

La velocidad y el grado de biodegradación están fuertemente influenciados por la naturaleza de las sustancias orgánicas y por la presencia de receptores de electrones como el oxígeno disuelto y nitratos. Hay indicios de que la biodegradación es mayor si el material del acuífero está finamente dividido y tiene una alta superficie específica, como la arena fina o limo. Sin embargo, estas condiciones pueden conducir a la obstrucción por crecimientos bacterianos. La

---

<sup>16</sup> MEDEMA, G. J., et al. "Removal of Micro-organisms upon Recharge, Deep Well Injection and River Bank Infiltration in the Netherlands." *Management of Aquifer Recharge for Sustainability*: A. A. Balkema Publishers. Lisse, 2002. 125-131.p

<sup>17</sup> GORDON, C., K. "Influence of Conditions on the Survival of Enteric Viruses and Indicator Organisms in Groundwater" *Management of Aquifer Recharge for Sustainability*: A. A. Balkema Publishers. Lisse. 2002. 133-138p.

biodegradación de materia orgánica fácilmente degradable se produce a corta distancia (pocos metros) desde el punto de recarga. Los productos finales de la degradación completa en condiciones aeróbicas incluyen el dióxido de carbono, sulfato, nitrato, fosfato, y el agua. Los productos finales en condiciones anaeróbicas incluyen el dióxido de carbono, nitrógeno, sulfuro y metano.

**4.5.1.3 Microorganismos.** La supervivencia o la retención de microorganismos patógenos en el subsuelo dependen de varios factores como el clima, la composición del suelo, el caudal, y el tipo de microorganismo. A bajas temperaturas (por debajo de 4 ° C o 39 ° F), algunos microorganismos pueden sobrevivir durante meses o años. Las precipitaciones pueden movilizar a las bacterias y los virus que habían sido filtrados o adsorbidos, y por lo tanto, mejorar su transporte.

La naturaleza del suelo afecta a la supervivencia y la retención. Por ejemplo, los sitios de infiltración rápida donde los virus se han detectado en el agua subterránea se encuentran en arena gruesa y tipo grava. Las tasas de infiltración en estos sitios son altas y la capacidad del suelo para absorber el virus es baja. Por lo general, el suelo grueso no inhibe la migración del virus. Otras propiedades del suelo, tales como el pH, la concentración de cationes, la capacidad de retención de humedad y materia orgánica tienen un efecto en la supervivencia de las bacterias y los virus en el suelo. La resistencia de los microorganismos a los factores ambientales depende de las especies y cepas presentes.

Las bacterias sobreviven más tiempo en los suelos alcalinos que en suelos ácidos (pH 3 a 5) y cuando grandes cantidades de materia orgánica están presentes. En general, el aumento de la concentración de cationes y la disminución del pH y los compuestos orgánicos solubles tienden a promover la adsorción del virus. Las

bacterias y los organismos más grandes asociados con las aguas residuales son eliminadas después de la filtración a través de una distancia corta de la capa de suelo.

**Tabla 5. Factores que pueden influir en el movimiento de virus en las aguas subterráneas**

Factor	Comentarios
Tipo de Suelo	Suelos de textura fina retienen los virus más eficazmente que suelos de textura ligera. Los óxidos de hierro aumentan la capacidad de absorción de los suelos. Suelos lodosos son generalmente pobres adsorbentes.
pH	En general, la adsorción aumenta cuando el pH disminuye. Sin embargo, las tendencias reseñadas no son claras.
Cationes	La Adsorción aumenta en presencia de cationes. Cationes ayudan a reducir las fuerzas de repulsión tanto en virus como en partículas del suelo. El agua de lluvia puede desorber los virus del suelo debido a su baja conductividad.
Orgánicos solubles	Compiten con los virus por los sitios de adsorción. No hay competencia significativa en las concentraciones en los efluentes de aguas residuales. Ácidos húmicos y fúlvicos reducen el virus
Tipo de virus	La adsorción de los suelos varía según el tipo de virus y cepa. Los virus pueden tener diferentes puntos isoeléctricos.
Adsorción del suelo	La adsorción de los suelos varía según el tipo de virus y cepa. Los virus pueden tener diferentes puntos isoeléctricos.
Flujo	Cuanto mayor sea la velocidad de flujo, menor será la adsorción del virus a los suelos
Flujo saturado vs insaturado	El movimiento del virus es menor bajo condiciones de flujo no saturado.

Fuente: Gerba and Goyal, 1985<sup>18</sup>

**4.5.2 Aspectos regulatorios y de salud.** La recarga de aguas subterráneas están condicionadas por el uso del agua extraída e incluyen problemas de salud, la viabilidad económica, limitaciones físicas, restricciones legales, restricciones de la calidad del agua, y la disponibilidad de agua regenerada.

De estas limitaciones, los problemas de salud son los más importantes y son una constante de casi todos los proyectos de recarga. En los sitios donde se ingiere el

18 GERBA, C.P. "Pathogen Removal from Wastewater During Groundwater Recharge." Artificial Recharge of Groundwater. T. Asano (ed.), pp. 283-317. Butterworth Publishers. Boston, Massachusetts. 1985.

agua regenerada se deben considerar efectos en la salud por la exposición prolongada a bajos niveles de contaminantes, así como los efectos agudos para la salud de los agentes patógenos o sustancias tóxicas. Uno de los problemas con la recarga es que los límites entre los acuíferos potable y no potable son raramente bien definidos.

#### **4.6 REUSO EN APLICACIONES DE AUMENTO DEL ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE**

Otra aplicación de las aguas recuperadas es la reutilización indirecta a través del aumento superficie del agua potable, recarga de aguas subterráneas y la reutilización potable directa. La reutilización potable indirecta se define como el aumento de la oferta de agua cruda de una comunidad con agua residual tratada seguido de un amortiguador ambiental. El agua tratada se mezcla con agua superficial y / o subterránea, y la mezcla por lo general recibe un tratamiento adicional antes de entrar en el sistema de distribución de agua. La reutilización potable directa se define como la introducción de las aguas residuales tratadas directamente en un sistema de distribución de agua, sin almacenamiento (tubo a tubo). Ambas fuentes de agua potable son menos deseables que el uso de una fuente de mayor calidad para el consumo.

**4.6.1 Objetivos de Calidad para la reutilización como Agua Potable.** El desarrollo de requisitos de calidad del agua potable, ya sea para su reutilización directa o indirecta, es difícil.

La tarea implica un proceso de gestión de los riesgos que conlleva a la evaluación, enumerar y definir los riesgos y los posibles efectos adversos sobre la salud que se pueden evitar con la práctica de la separación física de disposición de aguas

residuales y el suministro de agua para uso doméstico. Por la separación física de disposición de aguas residuales y el abastecimiento doméstico de agua por el almacenamiento del medio ambiente, el ciclo de vida de las enfermedades transmitidas por el agua se puede romper.

Son consideradas niveles máximos de contaminantes como normas para sustancias químicas específicas. Sin embargo, los contaminantes pueden ser regulados por los procesos de tratamiento específicos y los estándares de desempeño sin medición directa de la contaminación. Debido a la enorme cantidad de productos químicos potenciales, los procesos tradicionales de tratamiento de aguas residuales no son la panacea para todos los problemas de calidad de agua potable, sobre todo porque los métodos analíticos actuales no son suficientes para identificar todos los posibles contaminantes en concentraciones de importancia para la salud. Si el método analítico no tiene la sensibilidad suficiente, entonces la presencia de contaminantes puede pasar inadvertido. Las agencias de la reutilización del agua en California observaron problemas con determinados productos químicos y rastros orgánicos que se descargan en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Estos elementos se han detectado en los efluentes finales, sólo después de que se redujeron los límites analíticos de detección.

Existen preocupaciones adicionales planteadas en relación con el destino y transporte de compuestos orgánicos traza<sup>19</sup>. Estos incluyen los disruptores endocrinos, farmacéuticos, hormonas, antibióticos, antiinflamatorios, y productos de cuidado personal (jabones antibacterianos, protector solar, geles de baño, etc.) que están presentes en aguas residuales municipales. Ninguno de estos

---

<sup>19</sup> DAUGHTON, C.G., et al. "Pharmaceuticals and Personal Care Products in the Environment: Agents of Subtle Change?" *Environmental Health Perspectives*, 107, supplement. December, 1999.

compuestos individuales son regulados o supervisados por niveles máximos de contaminantes.

Algunos proyectos de reutilización de agua indirectos (San Diego y Denver) han empezado a utilizar los ensayos toxicológicos para comparar la fuente de agua potable con las aguas regeneradas. Aunque estos estudios han demostrado que los resultados del análisis no muestran diferencia entre el agua regenerada y la fuente de agua utilizada para el abastecimiento interno, existe la preocupación de que los actuales métodos toxicológicos no sean lo suficientemente sensibles para caracterizar el impacto de las aguas regeneradas en la salud humana

La reutilización para uso potable, ya sea directa o indirecta, no es una práctica libre de riesgos. Ningún esfuerzo de la ingeniería está libre de riesgos, pero con barreras de tratamiento adecuado (y el control de procesos), se pueden definir los objetivos de calidad del agua para un riesgo aceptable. Teniendo en cuenta las incógnitas, las limitaciones y la incertidumbre sobre el estado actual de la ciencia y la tecnología, no es posible establecer el umbral en el que no se observó que se produciría efecto, al igual que no es razonable esperar que las actuales técnicas científicas demuestren la ausencia de un impacto en la salud humana.

**4.6.2 Aumento de la superficie del agua para la reutilización potable indirecta.** La principal preocupación en los sistemas de reutilización potable indirecta para la calidad del agua potable es la prevención de las enfermedades infecciosas intestinales y las relativas a contaminantes químicos específicos que reciben menor atención.

Sin embargo, la mayoría de las ciudades no ofrecen agua de calidad aceptable que cumpla con las normas actuales de agua potable.

La mayoría de las descargas que contribuyen a la reutilización indirecta de agua potable, especialmente a través de los ríos, se manejan como disposición de aguas residuales de conformidad con las prácticas comunes a todos los esfuerzos de control de la contaminación del agua. La abstracción y el uso del agua regenerada debe ser responsabilidad de una agencia de suministro de agua que no está relacionada con política, administrativa, o incluso geográficamente a la agencia de disposición de aguas residuales (a excepción de que aguas abajo).

El aumento de la población y la escasez cada vez mayor de nuevas fuentes de agua han provocado que un número pequeño pero creciente de las comunidades consideren el uso de las aguas residuales municipales altamente tratadas para aumentar el suministro de agua cruda. Esta tendencia hacia la reutilización planificada indirecta potable está motivada por la necesidad, pero es posible gracias a los avances en las tecnologías de tratamiento. Estos avances permiten la producción de agua regenerada para casi cualquier calidad deseada.

**4.6.3 Utilización Potable Directa.** La reutilización potable directa se practica actualmente en una sola ciudad en el mundo, Windhoek, Namibia.

La ciudad utiliza la reutilización potable directa en forma intermitente solamente. Análisis microbiológicos realizados durante un período de 2,5 años, mostraron que la calidad de aguas residuales con tratamiento avanzado fue baja en cuanto a agentes infecciosos. En concreto, la investigación mostró que:

- Se obtiene una tasa de eliminación de virus en general a través de las plantas de tratamiento primario, secundario y avanzado de aguas residuales de entre 99.999 y 99.9999 por ciento.
- Patógenos entéricos bacterianos (es decir, Salmonella, Shigella, Campylobacter) no se detectaron en 51 muestras de tratamiento avanzado de aguas

- Los protozoos y metazoos de varios tipos estaban ausentes.
- No se presenta Giardia lamblia, y con base en las tasas de recuperación de los quistes, la tasa de extracción se estima en 99,9 por ciento.

La aplicación directa, tubo a tubo, presenta algunas dificultades para su aplicación en países que no presentan escasez de agua para uso potable:

Las encuestas muestran que el público acepta y apoya muchos tipos de reutilización de agua no potable, mientras que se resiste a aceptar la reutilización potable. Existe renuencia general del público para apoyar la reutilización en aplicaciones que impliquen contacto humano con el agua recuperada. Además, se han planteado los efectos potenciales para la salud que pueden estar presentes en el agua recuperada.

La reutilización potable indirecta es más aceptable para el público que la reutilización potable directa, porque el agua se percibe como "lavada" que se mueve a través de un río, lago o acuífero. La reutilización indirecta, en virtud del tiempo de residencia en el curso de agua, embalse o acuífero, a menudo proporciona un tratamiento adicional. En algunos casos, sin embargo, la calidad del agua en realidad puede ser degradada a su paso por el medio ambiente.

Rara vez será necesario la reutilización potable directa. Sólo una pequeña parte del agua utilizada en una comunidad tiene que ser de calidad potable.

## **5 TECNOLOGÍAS PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DESTINADAS A REUSO**

Las aguas residuales pueden ser definidas como una combinación de líquido o agua que conduce los residuos retirados de residencias, instituciones y establecimientos comerciales e industriales, junto con el agua subterránea, agua superficial y el agua de lluvia. Por lo general, contiene una alta carga de residuos que demandan oxígeno, patógenos o causantes de enfermedades, materiales orgánicos, los nutrientes que estimulan el crecimiento de las plantas, productos químicos inorgánicos y minerales y sedimentos. También pueden contener compuestos tóxicos.

Las aguas residuales se pueden clasificar en cuatro categorías:

- Domésticas: aguas residuales vertidas desde las residencias e instituciones comerciales e instalaciones similares
- Industrial: aguas residuales en las que predominan los desechos industriales
- Infiltración / afluencia: agua procedente del exterior que entra en el sistema de alcantarillado a través de medios directos e indirectos, tales como fugas a través de juntas, grietas o paredes porosas. Afluencia es el agua lluvia que entra en el sistema de alcantarillado de las conexiones de drenaje de aguas lluvias, las cabeceras del techo, cimientos y sótanos a través de alcantarillas o tapas de las alcantarillas
- Agua Lluvia: escorrentía resultante de las inundaciones debido a las lluvias.

Durante muchos años el objetivo principal del tratamiento de aguas residuales municipales era simplemente reducir su contenido de sólidos en suspensión, materiales con demanda de oxígeno, compuestos inorgánicos disueltos y

bacterias dañinas. En los últimos años, sin embargo, se ha hecho hincapié en la mejora de métodos de eliminación de los residuos sólidos de los procesos de tratamiento municipal.

Los métodos básicos de tratamiento de las aguas residuales municipales se basan en tres etapas: tratamiento primario, incluyendo la remoción de arena, el cribado, molienda, y la sedimentación; tratamiento secundario, lo que implica la oxidación de materia orgánica disuelta por medio de la utilización de lodos biológicamente activo; y el tratamiento terciario, en el que los métodos biológicos avanzados de eliminación de nitrógeno y productos químicos y métodos físicos como la filtración granular y la absorción de carbón activado.

Las características de las aguas residuales industriales pueden diferir mucho tanto dentro como entre las industrias. El impacto de los vertidos industriales depende no sólo de sus características colectivas tales como la demanda bioquímica de oxígeno y la cantidad de sólidos en suspensión, sino también de su contenido de materiales inorgánicos específicos y sustancias orgánicas.

Hay tres opciones disponibles en el control de las aguas residuales industriales. El control puede tener lugar en el punto de generación en la planta, pueden ser tratados previamente para la descarga a las fuentes de tratamiento municipal, o pueden ser tratadas por completo en la planta y reutilizadas o se vierten directamente en las aguas receptoras.

Las aguas residuales industriales son descargas de las plantas industriales y procesos de fabricación.

Las aguas residuales industriales pueden representar, en conjunto, una parte importante de las aguas residuales de una comunidad y deben ser consideradas

para la operación exitosa de plantas de tratamiento de aguas. En algunos lugares las descargas de aguas residuales industriales se acopian, junto con las aguas residuales de la comunidad y los residuos mezclados se tratan conjuntamente. En otros casos, las industrias pueden ofrecer algún tratamiento previo o un tratamiento parcial de aguas residuales antes de su descarga al alcantarillado municipal. En otras situaciones, el volumen y el carácter de los residuos industriales son tales que son necesarios la recolección selectiva y la eliminación.

Las aguas residuales industriales varían ampliamente en su composición, la carga, el flujo y el volumen, dependiendo de la industria. La composición específica y el volumen de los residuos industriales, por supuesto, dependen del uso al que se ha sometido el agua. Industrias típicas que producen grandes volúmenes de aguas residuales incluyen las plantas de papel y fibra, fábricas de acero, refinación y operaciones petroquímicas, plantas de productos químicos y fertilizantes, empacadores y procesadores de carne de aves de corral y las operaciones de embalaje de verduras y frutas.

Las descargas industriales puede consistir de aguas residuales con carga orgánica muy fuerte, con un alta demanda de oxígeno o contener sustancias químicas indeseables que pueden dañar las alcantarillas y otras estructuras, pueden contener compuestos, que resisten la degradación biológica, o componentes tóxicos, que interfieren en el funcionamiento satisfactorio de la planta de tratamiento de aguas residuales. Una fuente menos obvia, que debe ser considerado como desecho industrial, es el calor, ya que disminuye los valores de oxígeno disuelto.

Muchas industrias utilizan grandes cantidades de agua de enfriamiento, tal es el caso de la industria de la energía eléctrica. Sin embargo, las industrias primarias

de metales y productos químicos también utilizan grandes cantidades de aguas de enfriamiento.

## **5.1 TRATAMIENTOS CONVENCIONALES DE LAS AGUAS RESIDUALES**

Los Procesos de tratamiento de aguas residuales convencionales consisten en una combinación de procesos físicos, químicos y biológicos y de operaciones para remover sólidos, materias orgánicas y, a veces, nutrientes de las aguas residuales.

Los términos generales utilizados para describir los diferentes grados de tratamiento, con el fin de aumentar el nivel de tratamiento, son preliminar, primario, secundario y terciario y / o tratamiento avanzado de aguas residuales.

**5.1.1 Tratamiento Preliminar.** El objetivo del tratamiento preliminar es la eliminación de sólidos gruesos y otros materiales de gran tamaño que a menudo se encuentran en las aguas residuales crudas. El Tratamiento preliminar ayuda a eliminar o reducir el tamaño de sólidos en suspensión, disueltos o flotantes.

Estos sólidos consisten en piezas de madera, tela, papel, plásticos, basura, etc., junto con algo de materia fecal. Se eliminan los sólidos pesados inorgánicos, tales como arena y grava, así como el metal o el vidrio.

**5.1.2 Tratamiento Primario.** El tratamiento primario está diseñado para eliminar los sólidos orgánicos e inorgánicos por medio de los procesos físicos de sedimentación y flotación.

Aproximadamente el 25-50% de la demanda de oxígeno bioquímico entrante (DBO), el 50-70% del total de sólidos suspendidos (SS), y el 65% del aceite y la grasa se extraen durante el tratamiento primario.

Algo de nitrógeno orgánico, fósforo orgánico, y metales pesados asociados con los sólidos también se eliminan durante la sedimentación primaria, pero los componentes coloidales y disueltos no se ven afectados.

El efluente de las unidades de sedimentación primaria se conoce como efluente primario.

**5.1.3 Tratamiento Secundario.** El objetivo del tratamiento secundario es el tratamiento posterior de los efluentes de tratamiento primario para remover la materia orgánica residual y sólidos en suspensión.

En cuanto al tamaño de los sólidos, la distribución es de aproximadamente 30% en suspensión, el 6% coloidal y cerca del 65% de sólidos disueltos. La función del tratamiento primario es eliminar la mayor cantidad de sólidos en suspensión como sea posible.

El tratamiento primario utiliza clarificadores o decantadores, que eliminan los compuestos orgánicos sedimentables y sólidos inorgánicos sedimentables de las aguas residuales. El efluente del tratamiento primario, por lo tanto, contiene sólidos orgánicos e inorgánicos, principalmente coloidales y disueltos. Los estándares de efluentes y calidad del agua requieren un mayor grado de remoción de materia orgánica de las aguas residuales del que solo se puede lograr mediante el tratamiento primario. Se puede lograr mediante el tratamiento secundario eliminación suplementaria de materia orgánica.

El proceso de tratamiento secundario consiste en el tratamiento biológico de aguas residuales mediante la utilización de diferentes tipos de microorganismos en un ambiente controlado. Varios procesos biológicos aeróbicos se utilizan para el tratamiento secundario que difieren principalmente en la forma en que se suministra oxígeno a los microorganismos y en la velocidad a la cual los organismos metabolizan la materia orgánica.

## **5.2 AVANCES EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

Los métodos de tratamiento primario y secundario eliminan la mayoría de DBO y sólidos suspendidos en las aguas residuales. Sin embargo, en un número creciente de casos, éste nivel de tratamiento ha demostrado ser insuficiente para proteger las aguas receptoras o para proveer de agua reutilizable para uso industrial y / o el reciclaje doméstico. Por lo tanto, se han añadido a las plantas de tratamiento de aguas residuales medidas adicionales de tratamiento para lograr mayor remoción de materia orgánica y sólidos, o para establecer la eliminación de nutrientes y / o materiales tóxicos.

Por lo tanto, el tratamiento avanzado de aguas residuales se define como cualquier proceso diseñado para producir un efluente de mayor calidad que normalmente no se logra mediante procesos de tratamiento. La definición anterior es intencionalmente muy amplia y abarca casi todas las operaciones de las unidades que no se encuentran comúnmente en el tratamiento de aguas residuales en la actualidad.

### 5.2.1 Tipos De Tratamiento Avanzado De Aguas Residuales

Los tratamientos avanzados de aguas residuales se pueden dividir en tres grandes categorías según el tipo de esquema de flujo de proceso utilizado:

- Tratamiento terciario
- Tratamiento fisicoquímico
- Tratamiento combinado biológico-fisicoquímico

El tratamiento terciario se puede definir como cualquier proceso de tratamiento en el que las unidades operativas se añaden al diagrama de flujo después de un tratamiento secundario convencional. El esquema adicional al tratamiento secundario convencional podría ser tan simple como la adición de un filtro para la eliminación de sólidos en suspensión o tan complejo como la adición de muchas unidades de proceso para eliminación de productos orgánicos, sólidos suspendidos, nitrógeno y fósforo.

El tratamiento físico-químico se define como un proceso de tratamiento en el que los procesos biológicos y físico-químicos se mezclan para lograr el efluente deseado

Tratamiento combinado biológico-fisicoquímico se diferencia del tratamiento terciario en que en el tratamiento terciario todos los procesos de unidad se añaden después de un tratamiento biológico convencional, mientras que en el tratamiento combinado, los tratamientos biológicos y físico-químicos se mezclan.

Otra forma de clasificar el tratamiento avanzado de aguas residuales es diferenciar en función de los objetivos de tratamiento deseado.

Los tratamientos avanzados de aguas residuales se utilizan para:

- Eliminación adicional de materia orgánica y de sólidos en suspensión
- Eliminación de Nitrógeno Orgánico Disuelto (NOD)
- Eliminación de nutrientes
- Eliminación de materiales tóxicos

En muchos, si no en la mayoría de los casos hoy en día, el tratamiento secundario convencional ofrece una remoción de DBO y de sólidos suspendidos adecuada. Pero el tratamiento de aguas residuales avanzado es necesario porque los efluentes pueden ser reciclados directamente o indirectamente e incrementar la oferta disponible de agua doméstica.

Los efluentes de un tratamiento avanzado pueden ser utilizados para procesos industriales o suministro de agua de refrigeración. El tratamiento secundario no elimina la mayor cantidad de contaminación orgánica en aguas residuales como se puede suponer.

El rendimiento de las plantas de tratamiento secundario casi siempre se mide en términos de DBO y la eliminación de las SS. En una planta bien diseñada y operada se eliminarán del 85% al 95% del afluente de DBO y SS. Sin embargo, la prueba de DBO no mide toda la materia orgánica presente en las aguas residuales. Un efluente secundario promedio puede tener una DBO de 20 mg / L y una DQO de 60 a 100 mg / L. El tratamiento secundario promedio elimina aproximadamente el 65% de la DQO del afluente. Así, cuando se requiere efluentes de alta calidad, debe llevarse a cabo eliminación orgánica adicional.

Además de los materiales orgánicos residuales, hay una demanda adicional de oxígeno resultante del nitrógeno presente en las aguas residuales.

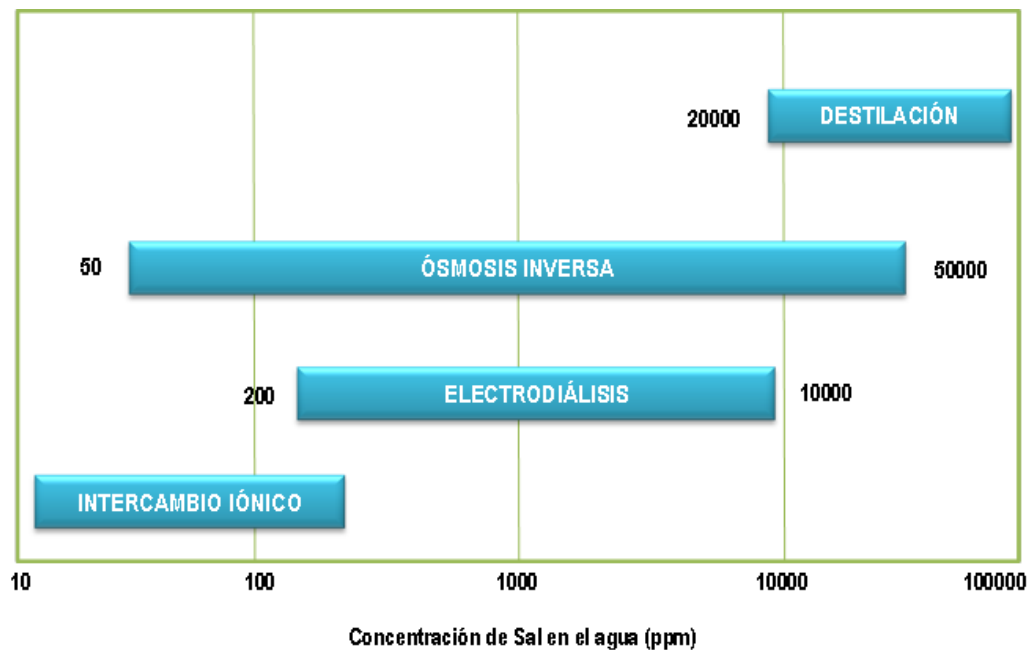
**5.2.2 Aparición De La Tecnología De Tratamiento De Membranas.** Se han desarrollado metodologías de tratamiento biológico y químico para manejar los diferentes escenarios de tratamiento, sin embargo, estas aplicaciones son a menudo limitadas por el alto costo, la adición continua de productos químicos tóxicos, el amplio espacio requerido para la instalación y los efectos secundarios de la contaminación secundaria, etc.

Por lo tanto la tecnología basada en membranas de separación de líquidos y sólidos ha gozado de aumento de popularidad recientemente. Es un medio de purificación y / o concentración de una gran variedad de fluidos de agua y aguas residuales. También es un proceso impulsado por la presión que se basa en el tamaño de los poros de la membrana (por lo general las películas delgadas o láminas de plástico con una estructura microporosa con precisión de tamaño parecido al de una esponja) para separar los componentes de la corriente de alimentación de acuerdo al tamaño de los poros.

**5.2.3 Tecnologías De Desalinización.** La desalinización es un proceso que elimina los minerales disueltos (incluyendo, pero no limitado a la sal) del agua de mar, agua salobre o aguas residuales tratadas.

Hay cinco técnicas básicas que se pueden utilizar para eliminar la sal y otros sólidos disueltos en el agua: destilación, ósmosis inversa (RO), electrodiálisis (ED), intercambio iónico (IX), y la desalación por congelación. La destilación y congelación incluyen la eliminación de agua pura, en forma de vapor de agua o de hielo, de la salmuera. RO y las membranas ED se utilizan para separar las sales disueltas y los minerales del agua. IX implica un intercambio de iones minerales disueltos en el agua con otros iones disueltos más deseables, que pasan a través de resinas químicas.

**Figura 1. Tecnologías para remoción de sal vs Concentración de sal en el agua**



Fuente: SONUNE Amit. Developments in wastewater treatment methods. Desalination 167 (2004) 55-63<sup>20</sup>

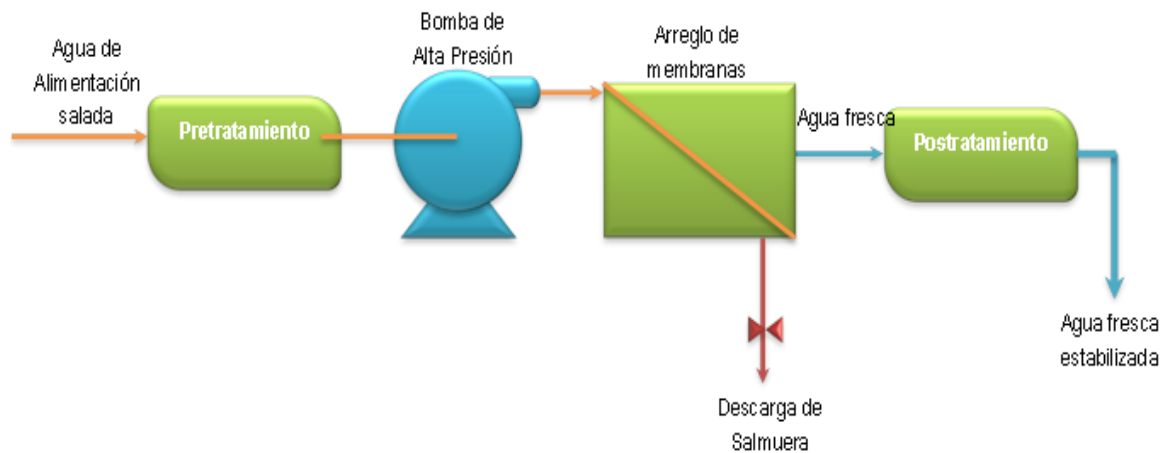
En los últimos décadas las tecnologías de desalinización se han utilizado cada vez más en todo el mundo para producir agua potable de las aguas subterráneas salobres y agua de mar, para mejorar la calidad de los suministros existentes de agua potable para beber y para usos industriales, y para el tratamiento de aguas residuales industriales y municipales antes de la descarga o la reutilización.

De las más de 7.500 plantas desaladoras en funcionamiento a nivel mundial, el 60% se encuentran en el Medio Oriente.

<sup>20</sup> SONUNE Amit. Developments in wastewater treatment methods. Desalination 167 (2004) 55-63

**5.2.3.1 Ósmosis inversa (RO).** En RO, el agua de alimentación es bombeada a alta presión a través de membranas permeables, separando las sales del agua (Figura. 2). El agua de alimentación requiere un tratamiento previo para eliminar las partículas que obstruyen las membranas. La calidad del agua producida depende de la presión, la concentración de sales en el agua de alimentación, y la constante de penetración de las membranas. La Osmosis depende sólo de la concentración de solutos y no de su tipo.

**Figura 2. Diagrama de flujo de un sistema de ósmosis inversa**



Fuente: SONUNE Amit. Developments in wastewater treatment methods. Desalination 167 (2004) 55-63<sup>21</sup>

**5.2.3.2 Electrodiálisis (ED).** Con esta técnica, el agua salobre es bombeada a bajas presiones, entre varios cientos de membranas permeables a los iones planas, paralelos, que se ensamblan en una pila.

Las membranas que permiten a los cationes pasar a través de ellas se alternan con membranas permeables a los aniones. Una corriente eléctrica directa se

<sup>21</sup> SONUNE Amit. Developments in wastewater treatment methods. Desalination 167 (2004) 55-63

establece a través de la pila por medio de electrodos colocados en ambos extremos.

Esta corriente eléctrica "hala" los iones a través de las membranas y los concentra entre cada par de membranas alternante. El agua desalada se deja parcialmente entre cada conjunto de pares adyacentes de la membrana. El scale o ensuciamiento de las membranas se evita en la mayoría de las unidades ED por operando en dirección contraria la corriente eléctrica a través de las pilas a intervalos de 15 a 30 min.

**5.2.3.3 Intercambio Iónico (IX).** En este proceso, los iones indeseables en el agua de alimentación son intercambiados por iones deseables, el agua pasa a través de los productos químicos granulados, llamado resinas de intercambio iónico.

Por ejemplo, las resinas de intercambio iónico se utilizan normalmente en las plantas municipales de tratamiento de agua para eliminar los iones calcio y magnesio en el agua "dura" y por las industrias en la producción de agua ultra pura. Cuanto mayor sea la concentración de sólidos disueltos en el agua de alimentación, con mayor frecuencia las resinas tendrán que ser reemplazadas o regeneradas.

**5.2.3.4 Desalinización por Congelación.** Al agua salada se congela, el hielo se cristaliza a partir de agua pura, dejando la sal disuelta y otros minerales en la salmuera de mayor salinidad.

De hecho, la desalinización por congelación tiene el potencial de concentrar una gran variedad de residuos a concentraciones más altas con menos energía que cualquier otro proceso de destilación. Los procesos tradicionales de congelación implican cinco pasos:

- Precocción del agua de alimentación
- Cristalización del hielo en aguanieve
- Separación de hielo de la salmuera
- Lavado del hielo
- fusión del hielo

## 6 DEMANDA DEL RECURSO HÍDRICO EN COLOMBIA

La demanda hídrica agregada total nacional con inclusión del agua extraída no consumida, alcanzó en 2008 un orden de magnitud de 35877 Mm3. En la Tabla 6, se presentan los estimativos por sectores de la demanda por uso y su participación porcentual con respecto al total nacional.

**Tabla 6. Demanda de los sectores por uso del agua**

Usos del agua	Total (Mm3)	Participación (%)
Servicios	528	1,5
Industria	1577	4,4
Pecuario	2220	6,2
Acuícola	2584	7,2
Domestico	2606	7,3
Energía	6976	19,4
Agrícola	19386	54,0
Total	35877	100

Fuente: IDEAM Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Estudio Nacional del Agua. Bogotá, D.C, 2010.<sup>22</sup>

El componente de demanda extraída y no utilizada, resultado de la agregación de uso para los sectores, alcanza el 26% de la demanda total de agua.

<sup>22</sup> IDEAM Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Estudio Nacional del Agua. Bogotá, D.C, 2010.

## 6.1 DEMANDA HÍDRICA EN EL SECTOR AGRÍCOLA

El volumen de agua utilizado en el sector agrícola en 2008 alcanza un orden de magnitud de 19386 Mm<sup>3</sup>, de los cuales 10920 Mm<sup>3</sup> son el consumo efectivo, con una participación de 56,33% con respecto al total, en tanto que el volumen de agua extraída no consumida por los cultivos es de 8.466 Mm<sup>3</sup>, con una participación de 43,67%. Un volumen de 37 Mm<sup>3</sup> corresponde a usos del agua en labores y actividades de poscosecha, con una participación del 0,19% frente al total de agua utilizada en el sector (Tabla 7)

**Tabla 7. Demanda hídrica agrícola en 2008**

Cobertura ENA agrícola	Demanda hídrica agregada anual	Consumo efectivo en cultivo	Agua extraída no consumida	Participación consumo efectivo en cultivo con respecto a la demanda hídrica anual	Participación agua extraída no consumida con respecto a la demanda hídrica anual
<b>Pastos manejados</b>	7.938	5.159	2.778	26,61%	14,33%
<b>Bosques plantados</b>	617	401	216	2,07%	1,11%
<b>Cultivos permanentes</b>	3.826	2.487	1.339	12,83%	6,91%
<b>Cultivos transitorios</b>	6.784	2.652	4.132	13,68%	21,32%
<b>Cultivo de flores permanentes</b>	183	183	0	0,94%	0,00%
<b>Poscosecha de café</b>	6	6	0	0,03%	0,00%
<b>Poscosecha de banano</b>	13	13	0	0,07%	0,00%
<b>Cultivos ilícitos</b>	18	18	0	0,09%	0,00%
<b>Total agrícola con beneficio</b>	19.386	10.920	8.466	56,33%	43,67%

Fuente: IDEAM Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Estudio Nacional del Agua. Bogotá, D.C, 2010

Los pastos manejados y los cultivos transitorios son los de mayor demanda por uso de agua en el sector agrícola, con un porcentaje alto de agua extraída no consumida con respecto a la demanda hídrica anual, con 14% y 21%, respectivamente. La estimación de la demanda hídrica en el sector agrícola, forestal y en pastos permite zonificar y categorizar la intensidad de uso y consumo del agua, para los diferentes arreglos productivos, en función del área ocupada, las prácticas culturales, la eficiencia del riego y las características fenológicas de los cultivos, lo que lleva a reconocer situaciones de déficit o de estrés hídrico -en zonas o en unidades geográficas de menor escala- o condiciones de presión no siempre determinadas por una restricción biofísica y explicadas, en la mayor de las veces, por un manejo no eficiente o irracional del recurso hídrico que es incorporado en forma sectorial.

De acuerdo con el método de estimación, el uso del recurso hídrico y su crecimiento esperado en el sector agrícola están determinados, esencialmente, por tres factores complementarios:

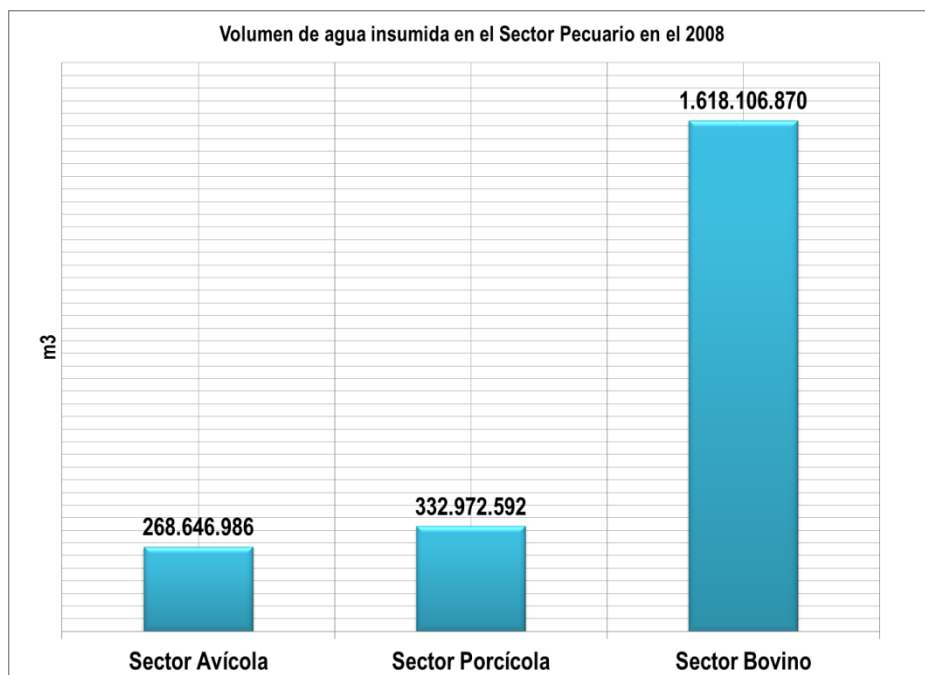
- El crecimiento económico sectorial, reflejo del área ocupada y los niveles de producción alcanzados.
- La productividad agrícola, que determina los requerimientos de agua por unidad de área
- La especialización productiva, que determina el carácter de uso extensivo o intensivo del agua y que explica la presión sobre el recurso hídrico.

Los resultados de la estimación de la demanda hídrica 2010, vista integralmente desde las variables de utilización del recurso hídrico, participación del producto agrícola y concentración geográfica son consecuentes con la tendencia registrada en el periodo 2000-2004, que muestra como los principales cultivos usuarios de agua: café, con un 34%; plátano y banano exportación, 13,3%; arroz, 13%; caña de azúcar, 10%; maíz, 7%; y palma, 5% de toda la huella hídrica nacional.

## 6.2 DEMANDA HÍDRICA EN EL SECTOR PECUARIO

La demanda agregada de agua insumida en el sector pecuario en 2008 es del orden de 2220 Mm<sup>3</sup>, con una participación del consumo en bovinos equivalente al 73%; seguido del consumo en porcinos del 15%; y en aves, del 12%.

**Figura 3. Volumen de agua insumida en el sector pecuario en el 2008**



Fuente: IDEAM Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Estudio Nacional del Agua. Bogotá, D.C, 2010

La cadena de consumo de agua en el subsector de aves da cuenta de una extracción del orden de 268 Mm<sup>3</sup>/ año, con las siguientes participaciones: a) 12% en sacrificio; b) 10% en cría y levante de aves de traspatio; c) 78% en unidades de alojamiento animal (La cadena de consumo de agua en el subsector de porcinos

da cuenta de una extracción del orden de 332,97 Mm<sup>3</sup>/año, con las siguientes participaciones: a) 92,92% en fase sacrificio; b) 2,9% en fase de cría y terminación; y c) 4,17% en lugares de mantenimiento y beneficio animal.

La cadena de consumo de agua agregada en el sector de bovinos da cuenta de una extracción del orden de 1.618 Mm<sup>3</sup>/año, con las siguientes participaciones:

a) El consumo vital en la fase de cría y terminación, 45%; b) el consumo en la fase de sacrificio, 31%; y c) el consumo en los lugares de manejo y beneficio en unidades de alojamiento animal, 24%.

### **6.3 DEMANDA HÍDRICA EN ACTIVIDADES DE ACUICULTURA**

La piscicultura es definida como la actividad dedicada al cultivo de peces mediante el manejo e implementación de buenas prácticas de desarrollo genético, incubación, alimentación, reproducción y sanidad de las especies. En Colombia, está orientada hacia la producción de a) camarón de cultivo en las costas Caribe y Pacífica; y b) piscicultura continental en estanques y en sistemas de tierra, con fuerte desarrollo en la zona Andina, en departamentos como el Huila, Antioquia, Valle del Cauca y el Tolima; y en la Orinoquia, en el departamento del Meta principalmente.

La demanda hídrica en la actividad de acuicultura en 2008 se estimó en un orden de 2.584 Mm<sup>3</sup>, está compuesta por el uso consuntivo asociado en forma directa con los volúmenes de producción observados objetivamente mediante la encuesta de producción piscícola y el registro de concesiones de agua, en aquellas áreas en las que la encuesta no presenta ninguna observación o que la representatividad con respecto a la desagregación departamental no es significativa.

#### **6.4 DEMANDA HÍDRICA PARA USO DOMÉSTICO**

La cantidad total de agua demandada para uso doméstico en 2008 se estimó en 2.606 Mm<sup>3</sup> (incluidas pérdidas en el sistema), de los cuales el 82% (2143 Mm<sup>3</sup>) corresponde a cabeceras municipales y el 18% (463 Mm<sup>3</sup>), al resto.

Del total de la demanda de agua para uso doméstico, el 30,7% (806,1 Mm<sup>3</sup>) corresponde al Distrito Capital de Bogotá (357,1 Mm<sup>3</sup>, equivalentes al 13,6%) y a los municipios de Cali (168,8 Mm<sup>3</sup>, el 6,4%), Medellín (155,5 Mm<sup>3</sup>, el 5,9%), Barranquilla (72,6 Mm<sup>3</sup>, el 2,8%) y Cartagena (52,2 Mm<sup>3</sup>, el 2,0%). Los restantes 1820,1 Mm<sup>3</sup> (69,3%) son demandados por el resto de los municipios del país.

#### **6.5 DEMANDA HÍDRICA EN EL SECTOR INDUSTRIAL**

El agua utilizada en las actividades industriales o de transformación está incluida como una entrada más para el consumo intermedio asociado a las actividades de extracción, conservación o transformación de materias primas o minerales, al acabado de productos y a las actividades de construcción. Igualmente, como elemento de transferencia de calor en procesos tanto de calentamiento como de enfriamiento; y el agua que, aun en estado de vapor, es aprovechada en cualquier otro proceso de transformación. De manera general, los principales consumos del agua en la industria están relacionados con a) transferencia de calor y/o enfriamiento; b) aplicación a procesos; c) recirculación; d) reutilización; y e) otros servicios industriales conexos o auxiliares, por lo general, prestados a terceros.

De acuerdo con el método de cálculo utilizado para la estimación de la demanda de agua (suma de las extracciones) en los procesos propios de la actividad industrial, esta consumió en 2008 cerca de 1.577 Mm<sup>3</sup>/año de agua con inclusión el agua extraída no contabilizada (35 Mm<sup>3</sup>) y de 1.543 Mm<sup>3</sup>/año sin inclusión de este último.

Las estimaciones por componente se presentan en la Tabla 8.

**Tabla 8. Volumen de agua utilizada en la industria por componente.**

	Industrial ESP (m3/año)	Pequeña Industria (m3/año)	Gran industria (m3/año)	Ajustes Cobertura (m3/año)	Total (Mm3)
<b>Volumen de agua insumida</b>	86.479.450	111.508.078	80.297.820	1.264.236.594	1.543
<b>Volumen de agua extraída no consumida</b>	34.591.780	Nd	Nd	Nd	35
<b>Volumen de agua utilizada</b>	121.071.230	111.508.088	80.297.820	1.264.236.594	1.577

Fuente: IDEAM Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Estudio Nacional del Agua. Bogotá, D.C, 2010

El cálculo realizado cobija la estimación puntual de Los siguientes elementos: a) demanda suplida por las Empresas de servicios públicos; b) demanda de agua en unidades de vivienda con establecimientos industriales; c) demanda de agua en establecimientos de gran industria; d) volumen de agua captado reportado por las CAR y por la Encuesta Ambiental Industrial (EAI); e) corrección a los valores alcanzados por agua Extraída no insumida.

## **6.6 USO DEL AGUA EN EL SECTOR DE SERVICIOS**

Se define la actividad de servicios como el conjunto de actividades desarrolladas por las unidades económicas, encaminadas a generar y poner a disposición de las personas, los hogares o las empresas una amplia gama de servicios, cada vez que estos sean demandados y sobre los cuales no recaen derechos de propiedad por parte del usuario.

Es importante tener en cuenta que los servicios no son susceptibles de ser almacenados ni transportados y, en consecuencia, no pueden ser transados en forma independiente de su producción. Por otra parte, no existe un traslado de la propiedad del producto; se vende por parte del productor y se compra por parte del consumidor un derecho al uso del servicio, cada vez que este sea requerido. Con base en el registro del SUI, se realiza la estimación del consumo de agua reportado por los suscriptores clasificados como comerciales y oficiales, el consumo de agua en espectáculos y actividades recreativas temporales y el agua extraída no consumida. La agregación de estos tres componentes dio como resultado en 2008 del orden de 354382556 m<sup>3</sup>/año.

## **6.7 DEMANDA HÍDRICA EN EL SECTOR ENERGÍA**

La utilización del agua en generación de energía se registra como un componente más de la demanda, teniendo en cuenta tres premisas que determinan la condición de uso en un momento dado: a) la tipificación del uso del agua en actividades de generación de energía como uso industrial (Decreto 3930 de 2010, Cap. IV, Art. 16); b) el almacenamiento más o menos prolongado en embalses y otros reservorios no naturales, requerido para mantener los estándares de generación que implican una oferta de agua no disponible, durante cierta temporalidad, siendo por tanto el uso excluyente y rival frente a otras demandas in situ; y c) si bien se reconocen tasas de retorno cercanas al 100%, la calidad del agua y la variación en el régimen hidrológico que retorna introduce restricciones de uso frente a otras demandas en competencia.

El volumen total de agua utilizada en generación hidráulica y térmica en 2008 es del orden de 6.976 Mm<sup>3</sup>.

## **7 AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS E INDUSTRIALES EN COLOMBIA**

### **7.1 AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS**

Son las provenientes de las actividades domésticas de la vida diaria como lavado de ropa, baño, preparación de alimentos, limpieza. Estos desechos presentan un alto contenido de materia orgánica, detergentes y grasas. Su composición varía según los hábitos de la población que los genera.<sup>23</sup>

Las descargas de las aguas residuales municipales se han convertido en una de los problemas ambientales más críticos y más crecientes, si consideramos que el incremento poblacional de la mayoría de los centros urbanos medianos y grandes es notable debido a la situación socioeconómica y de orden público del país. Esta situación se refleja en el aumento de las descargas de tipo doméstico y productivo, deteriorando cada vez más el estado de la calidad del recurso.

La situación se hace más crítica cuando la corriente tiene un uso definido aguas abajo, pues se alteran las condiciones de calidad del agua requeridas para el abastecimiento de actividades específicas (doméstica, industrial, agrícola, pecuaria, etc.) y la vida acuática.<sup>24</sup>

Las evaluaciones reportan que los centros urbanos en Colombia captan alrededor de los 170 m<sup>3</sup>/seg, de agua de los cuales se pierden entre 40% y 50 %, regresando al ambiente en forma de aguas residuales entre un 70% a 80% de las aguas consumidas. Se estima que en Colombia se descargan diariamente cerca de 700 toneladas de carga orgánica del sector doméstico urbano a los cuerpos de agua.

---

<sup>23</sup> [http://www.minambiente.gov.co/documentos/Aguas\\_Municipales.pdf](http://www.minambiente.gov.co/documentos/Aguas_Municipales.pdf)

<sup>24</sup> [www.pnuma.org/gpa/aguas\\_residuales/ProyectosPiloto/GWP1.doc](http://www.pnuma.org/gpa/aguas_residuales/ProyectosPiloto/GWP1.doc)

De acuerdo con la información reportada por el SINA, en el país existen construidos aproximadamente 410 sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales, de los cuales casi el 30% se encuentra fuera de operación o registran bajos niveles de eficiencia por múltiples razones de orden técnico, administrativo, financiero o socioeconómico.<sup>25</sup>

El inventario de sistemas de tratamiento de aguas residuales del Ministerio del Medio Ambiente, reporta que sólo 22% de las cabeceras municipales del país hacen tratamiento de las aguas residuales y muchas están funcionando eficientemente, o lo que es más crítico sin ser operadas. Se reporta que los departamentos con mayor cobertura de plantas de tratamiento de aguas residuales, PTAR (operando y/o en diseño) son Cundinamarca (38 PTAR), Antioquia (26 PTAR), Cesar (14 PTAR), Valle del Cauca (14 PTAR) y Tolima (13 PTAR).

**Tabla 9. Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales**

Año	Plantas de tratamiento
<b>2007</b>	352,0
<b>2008</b>	369,0
Fuente: Superintendencia de Servicios Públicos (SSPD), Sistema Único de Información (SUI). 2009.	
Nota: los valores reportados hacen referencia a la cantidad de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas municipales, que existen en el país para un año determinado; es decir, contabiliza la infraestructura para tratar y/o depurar parcial o totalmente las aguas residuales domésticas generadas en el caso urbano.	

El caso crítico en el país se presenta en la cuenca del Magdalena-Cauca (25 % del área territorial), con un 70% de la población y sólo 11 % de la oferta hídrica del país; estas condiciones han contribuido a la desregulación del régimen hídrico y al

<sup>25</sup> [www.unicef.org/colombia/pdf/Agua3.pdf](http://www.unicef.org/colombia/pdf/Agua3.pdf)

deterioro de la calidad de la cuenca. La presión sobre las demás áreas hidrográficas

Los vertimientos de aguas residuales de los centros urbanos se estiman en 67 m<sup>3</sup>/s donde Bogotá representa el 15%, Antioquia 13%, Valle del Cauca 10% y los demás departamentos están por debajo del 5%. El impacto que generan estos vertimientos varía a lo largo del país, dependiendo del volumen de los vertimientos puntuales frente a la capacidad de asimilación de los cuerpos de agua donde se vierten. Entre los casos de impacto más conocidos se encuentran las descargas domésticas de Bogotá al humedal Juan Amarillo y el río Fucha. Sin embargo, en la actualidad no existe un diagnóstico confiable sobre contaminación doméstica a escala nacional, ni información suficiente sobre el estado del recurso hídrico que considere elementos como la capacidad de asimilación del cuerpo receptor y el efecto nocivo real de los vertimientos.<sup>26</sup>

**Tabla 10. Vertimientos de aguas residuales y superficie agrícola regada**

Población total (miles de habitantes)		42999						
Categorías de ciudades	Tamaño de Población (miles de habitantes)	Número de Ciudades	Población urbana (miles de habitantes)	Dotación de agua potable (l/hab/día)	Población servida con red de alcantarillado	Agua residual con tratamiento (%)	Superficie agrícola regada (Ha) con agua residual	
							Tratada	Sin tratar
<b>Muy pequeña</b>	de 2 a 10	501	2440	110	74	16	106044	464565
<b>Pequeña</b>	de 10 a 100	255	7223	130	81	31	157763	348615
<b>Intermedia</b>	de 100 a 1000	33	9350	165	85	29	61699	89499
<b>Grande</b>	Mayor de 1000	4	12166	193	93	36	2007	
<b>TOTAL</b>		793	31179	163	86	31	327513	902679

Fuente: [http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsaar/e/proyecto/inventario/col\\_in.pdf](http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsaar/e/proyecto/inventario/col_in.pdf)

<sup>26</sup> CONPES (Consejo Nacional de Política Económica y Social) 3177. Acciones prioritarias y lineamientos para la Formulación del plan nacional de manejo de aguas Residuales. 2002

## 7.2 AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES

Son los provenientes de los diferentes procesos industriales. Su composición varía según el tipo de proceso industrial y aún para un mismo proceso industrial, se presentan características diferentes en industrias diferentes.

Los principales centros industriales del país (Bogotá-Soacha, Medellín-Valle de Aburrá, Cali-Yumbo, Barranquilla, Manizales-Villa María y la Bahía de Cartagena), también generan altos impactos puntuales en los cuerpos receptores por su gran contenido de metales pesados y sustancias peligrosas.

En general todos estos vertimientos ponen en riesgo la salud de los habitantes, dificultan la recuperación de las fuentes, disminuyen la productividad, aumentan los costos de tratamiento del recurso hídrico y, cuando los desechos industriales se vierten a un sistema de alcantarillado municipal, aumentan los costos de operación y mantenimiento de las redes, de los sistemas de tratamiento y disminuye el periodo de vida útil de estas inversiones.

**Tabla 11. Vertimientos del sector industrial**

Vertimientos del sector industrial				
Año	Volumen de desechos (miles m <sup>3</sup> /año)	DBO (miles ton/año)	DQO (miles ton/año)	SST (miles ton/año)
2000	107.540	29.925	18.424	44.195
2001	127.350	32.307	17.859	48.701
2002	154.086	42.500	21.497	65.100
2003	178.243	46.072	21.408	69.470
2004	200.941	51.560	22.403	77.951
2005	212.424	54.960	23.858	80.709
2006	233.106	73.205	22.253	95.549
2007	227.527	75.305	22.376	96.276

Nota: DBO: Demanda bioquímica de oxígeno; DQO: Demanda química de oxígeno; SST: Sólidos suspendidos totales.  
Fuente: DANE - Encuesta Anual Manufacturera

**Tabla 12. Vertimientos por Actividad Económica**

Actividad económica*	(miles m <sup>3</sup> /año)							
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
1511	2.173	2.529	3.157	3.424	4.327	4.495	4.826	6.559
1530	137	160	198	220	265	264	3.790	3.803
1589	455	543	647	766	823	1.787	1.530	1.665
1512	736	876	1.051	1.229	1.352	1.436	1.305	1.378
1522	20.402	24.467	28.925	34.753	36.262	41.131	35.824	37.228
1541	932	1.101	1.339	1.527	1.761	1.839	1.984	1.932
1571	62.323	73.685	89.417	102.355	117.176	122.668	114.834	104.291
1592	32	39	46	55	58	58	58	64
1593	12.598	15.094	17.877	21.406	22.483	24.842	30.248	31.054
1594	75	59	138	15	325	18	20.110	22.110
2101	5.261	6.044	7.724	8.005	10.958	8.896	12.303	11.999
2102	838	993	1.201	1.383	1.565	1.241	2.187	1.916
2411	85	102	122	143	156	152	142	162
2430	229	167	434	884	1.064	1.088	1.142	643
2424	813	965	1.161	1.350	1.501	1.625	1.838	1.915
2610	0	0	0	0	0	0	0	0
2710	449	528	648	726	865	883	988	807
<b>Total</b>	<b>107.540</b>	<b>127.350</b>	<b>154.086</b>	<b>178.243</b>	<b>200.941</b>	<b>212.424</b>	<b>233.106</b>	<b>227.527</b>

\*Código CIIU rev 3 A.C.  
 Nota: Incluye los establecimientos seleccionados en los Corredores Industriales  
 Fuente: DANE - Encuesta Anual Manufacturera

## **8 REGULACIONES Y NORMATIVAS SOBRE EL MANEJO Y REUSO DE AGUAS RESIDUALES**

El principal impulso para la reutilización de aguas residuales en los últimos años ha venido por la creciente presión sobre los recursos hídricos naturales, como lo demuestran los efectos del cambio climático global y los patrones cambiantes del clima. La reutilización de aguas residuales puede ayudar a conservar el suministro de agua dulce, y esto presenta claras ventajas con respecto a la protección del medio ambiente. En los países donde la reutilización de aguas residuales industriales es importante, no es sólo debido a la falta de agua sino también porque los gobiernos hacen cumplir la legislación. Principalmente en los países en desarrollo, la reutilización del agua que se practica para otros fines, principalmente la agricultura, mientras que la industria se centra más en la reducción del consumo de agua. Además de la intervención del gobierno, la reutilización de aguas residuales también tiende a surgir debido a las fuerzas del mercado - de los ahorros potenciales que se pueden lograr en el suministro y costos de vertimiento.

En el desarrollo de un marco de políticas nacionales para facilitar el reúso de agua en diversas aplicaciones, es importante definir los objetivos de las políticas, evaluar el entorno político actual, formular nuevas políticas o ajustar las existentes, y desarrollar una estrategia nacional.

El reúso del agua puede tener uno o más de objetivos. La definición de estos objetivos es el primer paso en el desarrollo de un marco de política nacional. Evaluar la magnitud real o potencial de reúso de aguas residuales tratadas, tanto en términos absolutos y relativos de los diferentes tipos de uso, proporciona una clave para el tipo de formulación de políticas o de ajuste que puede ser necesario.

La protección del medio ambiente es un objetivo político en la mayoría de países, desde el punto de vista tanto de la conservación de los recursos naturales y ecosistemas y la protección de la salud pública.

El reúso de aguas puede considerarse costoso ya que requiere importantes inversiones en plantas de tratamiento y mecanismos de eliminación. Sin embargo, se debe tener en cuenta su valor como fuente de agua y / o nutrientes para la producción vegetal y el cultivo de peces, además de otras aplicaciones.

Para los gobiernos de muchos países en desarrollo, alcanzar y mantener la seguridad alimentaria para toda la población son los objetivos claves de política. Para alcanzar estos objetivos, algunos países ofrecen incentivos para el aumento del uso de los recursos naturales disponibles (incluidos los recursos de agua) hacia la producción local de alimentos, mientras que otros pueden ofrecer subsidios a los agricultores para mantener una base crítica de recursos humanos para la producción agrícola local.

Cuando los recursos nacionales para la producción de alimentos se encuentran bajo presión y los alimentos esenciales tienen que ser importados desde el extranjero, los gobiernos suelen ofrecer subsidios para asegurar que los pobres puedan satisfacer sus necesidades básicas en términos de nutrición. En este contexto, el uso de las aguas residuales es de particular relevancia. En situaciones de estrés hídrico, las aguas residuales deben ser consideradas un recurso hídrico valioso. Donde los alimentos básicos tienen que ser importados, los residuos utilizados para mejorar la producción agrícola local se traducirán en la sustitución de importaciones importantes.

A la luz de lo anterior, es de crucial importancia trazar el panorama de las políticas existentes como una base para juzgar si las opciones y oportunidades de reúso de las aguas residuales se están considerando en todo su potencial.

Dependiendo de las condiciones locales, las políticas para el reúso de aguas residuales, pueden ser enfatizadas en la seguridad alimentaria o en el marco de la política de protección del medio ambiente.

En Colombia, según el artículo 5 de la ley 373 de 1997, las aguas utilizadas, sean éstas de origen superficial, subterráneo o lluvias, en cualquier actividad que genere afluentes líquidos, deberán ser reutilizadas en actividades primarias y secundarias cuando el *proceso técnico y económico así lo ameriten y aconsejen según el análisis socio-económico y las normas de calidad ambiental*. El término “*ameriten y aconsejen*” aún no está legalmente definido para el caso de reúso de aguas residuales tratadas. Pueden referirse a los costos relacionados y beneficios de la aplicación de reúso. Teniendo en cuenta que hasta la fecha no existe ninguna normativa sobre la reutilización del agua, surge la pregunta, si la legislación de aguas vigente ya ofrece condiciones suficientes para asegurar las condiciones de frontera en las que es conveniente y meritorio el reúso de aguas residuales.

Las implicaciones para la salud son las preocupaciones más importantes en la mayoría de las aplicaciones de reúso de agua. El decreto 3930 de 2010 hace referencia a los usos del agua y los criterios de calidad para la destinación del recurso.

La mayoría de países europeos que practican la recuperación y reutilización del agua han emitido normas específicas nacionales o regionales para guiar la autorización oficial de los sistemas de reúso. La comparación de estas pautas de

reutilización de agua mostró que la mayoría de ellos adoptaron valores límite ya establecidos en la legislación vigente. Esto es particularmente cierto para los parámetros químicos, como metales pesados, residuos de pesticidas y otros componentes orgánicos. La actitud hacia la restricción de los parámetros microbianos es mucho más diversa y muchas veces más estricta que el límite vigente.

Sin embargo, la interacción de la reutilización del agua con la legislación vigente no se restringe solamente a los aspectos técnicos, sino también a los conflictos sociales sobre la reutilización del agua.

El reúso tiene el potencial de funcionar como una herramienta en el programa de medidas que se deben establecer para mejorar la calidad de las cuencas hidrográficas del país.

Para el uso de aguas residuales debe considerarse aspectos de calidad con el fin de evitar riesgos a la salud pública, principalmente en lo que se refiere a sus características microbiológicas. Esta es considerada la principal razón para el establecimiento de guías y regulaciones para el reúso seguro de estas aguas en diferentes aplicaciones (Metcalf y Eddy, 2003).

Las principales guías que regulan el reúso son las directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS), sobre calidad microbiológica de aguas residuales para irrigación, clasificadas en tres categorías, según sus niveles de parásitos y coliformes fecales, indicadores de la presencia de patógenos (virus, bacterias, protozoos y helmintos) en las aguas residuales domésticas (OMS, 1989), y las fisicoquímicas para calidad de las aguas de riego de la FAO (1999).

En 2006, la OMS publico nuevas guías de uso de aguas residuales, excretas y aguas grises (WHO, 2006), que son una herramienta de manejo preventivo de aguas residuales en agricultura y acuicultura para maximizar la seguridad para la salud pública. La guía incluye el análisis microbiano, esencial para el análisis del riesgo, que comprende la recolección de información relativa a patógenos presentes en aguas residuales, campos y cosechas regados. Estos factores varían según la región, clima, estación, etc. y deben ser medidos siempre que sea posible, sobre un sitio específico. La guía no da valores sugeridos para patógenos virales, bacteriales o protozoarios, únicamente valores para huevos de helmintos ( $\leq 1/L$ ) tanto para riego con, cómo sin restricción; para el riego por goteo en cultivos de alto crecimiento, no da recomendación alguna. A través de un análisis cuantitativo del riesgo microbiano se puede lograr la remoción de patógenos requerida para no superar el riesgo aceptable por infección. Adicionalmente, se incluyen las medidas de control para la protección de la salud.<sup>27</sup>

La FAO público en 1999 la guía sugerida para aguas tratadas en el reuso agrícola y sus requerimientos de tratamiento.

La Agencia estadounidense de Protección Ambiental (EPA) clasifico el reuso en ocho categorías, de acuerdo con la calidad del agua: urbano, áreas de acceso restringido, agrícola para cultivos consumidos crudos y para cultivos no consumidos crudos, recreacional, industrial, recarga de acuíferos y reuso indirecto potable.

Adicionalmente, figuran las directrices fisicoquímicas de la FAO para interpretar la calidad de las aguas de riego. En ellas se clasifica el grado de restricción de uso en tres niveles, de acuerdo con el problema potencial definido por características

---

<sup>27</sup> SILVA, Jorge, et al. Reuso de aguas residuales domésticas en agricultura. Una revisión Agronomía Colombiana, vol. 26, núm. 2, 2008,347-359p.

fisicoquímicas del agua, como la conductividad y el RAS (relación adsorción/sodio).

En general, los países que tienen una normatividad sobre el reúso de las aguas residuales han tomado como referencia lo establecido por la EPA, en términos de la clasificación por tipos del reúso, y las directrices de la OMS y de la FAO en lo relacionado con límites máximos permisibles de algunas sustancias. En América Latina, algunos países, como Costa Rica (Secretaría de recursos naturales y ambiente, 1997), México (Secretaría de medio ambiente, recursos naturales y pesca, 1997) y Salvador (Ministerio de medio ambiente y recursos naturales, 2000) tienen reglamentado el reúso.

En Colombia no existen leyes que establezcan parámetros para la reutilización del agua residual y reglamenten su uso. A continuación se relaciona la normatividad vigente que de un modo u otro pueden brindar una guía para la aplicación de actividades de reúso.

### **8.1 LEY 373 DE 1997**

La Ley 373 del 06 de Junio 1997 "Por la cual se establece el Programa Para Uso Eficiente y Ahorro del Agua" se expidió con un claro objetivo ambiental mediante el propósito de realizar un uso racional del recurso hídrico y promocionar una serie de actividades por parte de los usuarios del agua, entre ellos las personas prestadoras del servicio público de acueducto. Esta ley posibilita la actividad humana en condiciones que permita tomar las cantidades de agua requeridas.

Adicionalmente tiene un claro sentido social, pensando en disminuir la presión en la utilización para el abastecimiento de la población, como para los usos ambientales, para lo cual, las entidades municipales y regionales encargada del

manejo del recurso hídrico deben elaborar un conjunto de proyectos y acciones que se deben adoptar para optimizar el manejo del agua.

La gran mayoría de los acueductos municipales tienen problemas con el suministro, calidad y manejo del agua. En promedio, las pérdidas en los sistemas de tratamiento, conducción y distribución son del orden del 50% del agua captada. Las poblaciones son sometidas a continuos racionamientos, a pesar de que en muchos casos están rodeadas de muchas fuentes de agua. Las aguas servidas son vertidas sin control ni tratamiento en corrientes de agua que podrían ser utilizadas como fuentes para agua potable u otros usos. No hay arraigo de una cultura del agua, por lo cual se hace mal uso de ella, contaminándola y desperdiciándola.

Reglamentando esta ley, fueron expedidos los siguientes decretos: el Decreto 3102 del 30 de Diciembre de 1997 "Por el cual se reglamenta el artículo 15 de la Ley 373 de 1997" en relación a la instalación de equipos, sistemas e implementos de bajo consumo de agua y el Decreto 1311 de Julio 13 de 1998 "Por el cual se reglamenta el literal g) del artículo 11 de la Ley 373 de 1997".

En materia de reúso de aguas residuales, generadas por cualquier tipo de actividad que produzca efluentes líquidos, la misma Ley 373 de 1997 indica que éstas deberán ser reutilizadas, cuando haya viabilidad técnica, ambiental y económica, y se cumplan las normas de calidad ambiental.

En su artículo 5 la ley 373 enuncia:

“ARTICULO 5o. REUSO OBLIGATORIO DEL AGUA. Las aguas utilizadas, sean éstas de origen superficial, subterráneo o lluvias, en cualquier actividad que genere afluentes líquidos, deberán ser reutilizadas en actividades primarias y

secundarias cuando el proceso técnico y económico así lo ameriten y aconsejen según el análisis socio-económico y las normas de calidad ambiental. El Ministerio del Medio Ambiente y el Ministerio de Desarrollo Económico reglamentarán en un plazo máximo de (6) seis meses, contados a partir de la vigencia de la presente ley, los casos y los tipos de proyectos en los que se deberá reutilizar el agua.”

Sin embargo, aún no existe una reglamentación clara respecto a éste artículo que promueva el reúso obligatorio del agua.

## **8.2 DOCUMENTO CONPES 3177**

A raíz de los crecientes niveles de degradación de la calidad del recurso hídrico en el país, generados por vertimientos municipales sin tratamiento previo, el Gobierno Nacional con base en estudios detallados de diagnóstico de la problemática y las principales corrientes hídricas afectadas, formuló el Plan Nacional de Manejo de Aguas Residuales Municipales. Lo anterior se hizo en desarrollo del CONPES 3177 de 2002 "Directrices y Lineamientos para la Formulación de un Plan Nacional de Manejo de Aguas Residuales".

Este Plan priorizó los municipios del país, de acuerdo al impacto ambiental generado por los vertimientos sobre las fuentes hídricas receptoras, y generó estrategias de corto, mediano y largo plazo para resolver esta problemática.

El plan promueve la generación de proyectos que en su formulación contemplen la reutilización o reúso de las aguas residuales. Entre las estrategias de gestión formuladas se encuentra que el MMA y el MDE incluirán en el PMAR estrategias para el Fomento de nuevas alternativas de manejo y tratamiento de aguas residuales, definiendo metas, responsables y cronograma de ejecución. El MMA y el MDE apoyarán el desarrollo de nuevas alternativas de manejo y tratamiento de

aguas residuales (reúso) con el fin de reducir el potencial contaminante de las descargas. Lo anterior, teniendo en cuenta criterios ambientales y sanitarios.

También dispone que El MMA, el MDE y el Ministerio de Salud deban proponer un proyecto reglamentario de la Ley 99 de 1993 sobre el reúso de aguas residuales para los casos en los cuales el usuario considere este tipo de alternativa de manejo.

### **8.3 DECRETO 3930 DE 2010**

El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, a través del Decreto 3930 de 2010, actualizó la normatividad relacionada con el Ordenamiento del Recurso Hídrico y expidió nuevas normas para el manejo de vertimientos a aguas superficiales, suelos asociados con acuíferos, aguas marinas y alcantarillados del país.

La norma desarrolla aspectos fundamentales para el control de vertimientos como permisos, planes de cumplimiento, saneamiento y manejo de vertimientos y reconversión industrial.

El ordenamiento de los cuerpos de agua como: aguas superficiales, subterráneas y marinas, sus diferentes usos y posibilidades de aprovechamiento, le corresponde hacerlo a las Corporaciones Autónomas Regionales, las Corporaciones de Desarrollo Sostenible y las Autoridades Ambientales Urbanas.

Los Planes de Cumplimiento se originan cuando no es posible cumplir con la norma de vertimiento. Los actuales generadores de vertimientos que no tengan permiso, tendrán un plazo hasta seis (6) meses contados a partir de la fecha de

expedición del decreto, para legalizar sus vertimientos y optar por un Plan de Cumplimiento.

Los Planes de Reversión Industrial a Tecnologías Limpias en Gestión de Vertimientos, promueven la reversión tecnológica de los procesos productivos generadores de vertimientos y facilitan un tiempo adicional para el cumplimiento de la norma. Para optar por este periodo adicional, el Plan de Reversión deberá presentarse dentro del año siguiente a la expedición de la norma de vertimiento.

En cuanto al control de los vertimientos, el decreto establece que los permisos sólo aplican a los que se hacen en aguas superficiales, al suelo asociado a un acuífero y/o al medio marino y se podrán otorgar cuando se cumplan con las normas de vertimientos que expedirá, más adelante, el Ministerio.

Los vertimientos a los sistemas de alcantarillado, no requieren permiso de vertimiento pero deben cumplir con la norma de alcantarillado público vigente. En consecuencia las Empresas Prestadoras de Servicios Públicos deberán informar o reportar a las autoridades ambientales respectivas, los usuarios de su sistema que viertan sustancias o líquidos no autorizados al alcantarillado público o cuando no cumplan la norma de vertimiento.

## **9 RIESGOS ESPECÍFICOS A LA SALUD ASOCIADOS CON EL REUSO DE AGUAS RESIDUALES**

El agua para reúso debe ser tratada antes de su uso con el grado de tratamiento requerido en función del uso previsto, el grado potencial de contacto humano o animal y las fuentes de agua. El tratamiento se realiza principalmente para eliminar los contaminantes que podrían causar un mayor riesgo para la salud o el impacto ambiental. Los contaminantes que causan los problemas de salud más grandes son los microorganismos patógenos y las sustancias químicas de preocupación. El nivel de tratamiento requerido depende del nivel de riesgo, ya sea real o percibido, de la posible presencia de contaminantes químicos y microbianos.<sup>28</sup>

### **9.1 MICROORGANISMOS PATÓGENOS**

Los microorganismos patógenos humanos más comunes que se encuentran en el agua son de origen entérico. Los patógenos entéricos se incorporan al ambiente en las heces de huéspedes infectados y pueden entrar al agua, ya sea directamente a través de la defecación al aire en el agua, la contaminación con aguas residuales o agua de escorrentía de los suelos y otras superficies de la tierra.. Los tipos de patógenos entéricos que pueden encontrarse en el agua incluyen virus, bacterias, protozoos y helmintos. El riesgo de infección transmitida por el agua de cualquiera de estos patógenos puede depender de una serie de factores como el número de patógenos y la dispersión en el agua, la dosis infecciosa requerida y la susceptibilidad de una población expuesta, la posibilidad

---

<sup>28</sup> TOZE S. Water reuse and health risks — real vs. perceived. *Desalination* 187, 2006. 41–51p

de la contaminación fecal del agua y la cantidad de tratamiento realizado antes de la exposición potencial al agua

**9.1.1 Virus.** Los virus entéricos son los más pequeños de los patógenos en el agua.

Todos ellos son parásitos intracelulares que sólo son capaces de reproducirse obligando a una célula huésped a producir múltiples copias del virus. La mayoría de los virus entéricos humanos tienen un rango de hospedadores, lo que significa que sólo la contaminación humana fecal del agua tiene que ser considerada como un riesgo para la infección viral de los seres humanos. Los virus entéricos son altamente infecciosos y por lo general requieren la ingesta de sólo unas pocas partículas virales para causar la infección. Esta dosis infecciosa (ID<sub>50</sub>) puede ser de tan sólo 10 partículas virales o menos. Además, se espera que estos virus tengan un mayor potencial para causar una infección en los sectores susceptibles de la población como los ancianos, los niños y los inmunocomprometidos.

**9.1.2 Bacterias.** Las bacterias son las más comunes y numerosas de los microorganismos patógenos en las aguas recicladas.

Hay una gran variedad de patógenos bacterianos y patógenos oportunistas que pueden ser detectados en las aguas residuales. Muchos de los patógenos bacterianos son de origen entérico, sin embargo, también se han detectado en las aguas residuales patógenos bacterianos que causan enfermedades no entéricas (Por ejemplo, *Legionella* spp, *Mycobacterium* spp y *Leptospira*). Las bacterias entéricas patógenas a menudo pueden infectar a los seres humanos y animales, por ejemplo, *Salmonella*, y por lo tanto los animales pueden formar otra fuente de

contaminación para el agua reciclada, así como en riesgo de contacto con el agua mal tratada reciclada. La mayoría de las bacterias patógenas entéricas requieren la ingestión de una dosis alta de células ingeridas para causar infección (generalmente > 10<sup>6</sup> células).

**9.1.3 Protozoos.** Los protozoos patógenos entéricos son eucariotas unicelulares.

Fuera del huésped infectado persisten en etapas latentes conocidos como quistes u ooquistes. Hay varios protozoos patógenos que han sido aislados de las aguas residuales y de las fuentes de agua reciclada. Los más comunes detectados son *Entamoeba histolytica*, *Giardia intestinalis* y *Cryptosporidium parvum*. La infección de por estos protozoos patógenos puede ocurrir después del consumo de alimentos o agua contaminados con los quistes (oo) o por contacto de persona a persona. El principal reservorio de *C. parvum* y *G. intestinalis* es el hombre, pero varios animales domésticos y salvajes han demostrado ser potenciales reservorios de estos parásitos (por ejemplo, el ganado puede infectarse con *C. parvum* y causar una infección en los seres humanos por el contacto con heces bovinas infectadas). Al igual que los virus entéricos, todos los protozoos patógenos humanos son mucho más infecciosos que la mayoría de los patógenos bacterianos entéricos.

**9.1.4 Helmintos.** Entre los Helmintos (nemátodos y gusanos de cinta) son comunes los parásitos intestinales que pueden ser transmitidos por vía fecal-oral.

Los Helmintos que son un riesgo significativo para la salud en las aguas regeneradas incluyen el gusano redondo (*Ascaris lumbricoides*), el gusano de

gancho (*Ancylostoma duodenale* o *Necator americanus*), y el gusano látigo (*Trichuris trichiura*). Estos helmintos tienen un ciclo de vida simple sin huéspedes intermediarios y son capaces de causar la infección a través de la vía fecal-oral.

La Organización Mundial de la Salud lista los nematodos intestinales como el mayor riesgo para la salud relacionada con la agricultura y la acuicultura, en el reúso de excretas y aguas residuales sin tratamiento. Los niveles de infección son particularmente endémicos donde la materia fecal humana se utiliza como fertilizante para el cultivo de hortalizas.

## **9.2 SUSTANCIAS QUÍMICAS DE PREOCUPACIÓN**

La mayor parte de la reciente preocupación sobre trazas de contaminantes orgánicos giran en torno a los compuestos farmacológicamente activos (PhACs) y los compuestos disruptores endocrinos (EDC). PhACs y EDC son originarios de fuentes industriales o domésticas y por lo tanto pueden ser detectados en una amplia gama de aguas recicladas. Estos productos químicos tienden a estar presentes en muy bajas concentraciones en el agua tratada reciclada (por lo general en el rango de ng / L), y requieren la ingestión de grandes dosis durante largos periodos de tiempo para producir un efecto clínico. A pesar de la escasez de información sobre la persistencia ambiental y concentraciones de riesgo potenciales en el agua reciclada en la actualidad sigue siendo una preocupación para los reguladores de la salud y el público.

**9.2.1 Disruptores endocrinos.** EDC son compuestos que pueden tener un impacto en la estructura y función del sistema endocrino de un organismo que causa efectos en el organismo o su progenie.

Hay un gran número de compuestos que se sabe o se sospecha son disruptores endocrinos. EDC se pueden encontrar en las aguas residuales y el medio ambiente, entre éstos tenemos los compuestos de estradiol que se encuentran comúnmente en las píldoras anticonceptivas, los fitoestrógenos, pesticidas, productos químicos industriales como bisfenol A y nonilfenol y metales pesados. Los efluentes de aguas residuales sin tratar pueden ser una fuente de todos estos compuestos y pueden contener concentraciones más altas que la mayoría de otras fuentes de agua reciclada. Esto ha creado preocupación ya que los EDC conocidos pueden crear riesgos para la salud por el contacto potencial de miembros de la comunidad con aguas recicladas. Su riesgo varía en función de la potencia estrogénica de cada organismo.

**9.2.2 Compuestos farmacológicamente activos.** PhACs son un área emergente de interés para el tratamiento de aguas residuales y potenciales esquemas de reutilización del agua.

La mayoría de los PhACs detectados en el agua son fármacos utilizados para una variedad de fines terapéuticos para humanos y animales. Ejemplo, los analgésicos, cafeína, antiepilépticos, fármacos para el colesterol, éstos y otros productos químicos pueden entrar al ambiente a partir de una variedad de fuentes, pero una de las rutas más comunes es a través de aguas residuales tratadas y sin tratar. PhACs pueden ser fácilmente detectados en las aguas residuales, sin embargo, algunos de estos compuestos también pueden ser eliminados por el tratamiento de aguas residuales o por medio de los procesos ambientales.

Al igual que los EDC, las concentraciones de PhACs encontradas en las aguas residuales tratadas son significativamente inferiores a la concentración que se encuentra en la medicación utilizada con fines terapéuticos. Por lo tanto, el riesgo

para la salud de estos compuestos en el agua recuperada (en particular cuando se produce un contacto mínimo humano o animal) queda por determinar, pero puede ser considerado como mínimo.

## 10 CONCLUSIONES

- Debido a que las fuentes de abastecimiento de agua se han limitado, se ha producido un mayor uso y aceptación de los efluentes de aguas residuales regeneradas como alternativa de agua para una amplia variedad de aplicaciones, incluyendo el riego de jardines y agrícolas, aseo y urinarios, industrial, refrigeración, humedales, restauración y recarga de aguas subterráneas.
- El uso de agua regenerada para fines no potable ofrece el potencial para la explotación de un "nuevo" recurso que puede sustituir las fuentes de agua potable.
- El objetivo principal del tratamiento de aguas residuales es generalmente permitir que los efluentes industriales y domésticos sean dispuestos sin poner en peligro la salud humana o causar daños inaceptables al medio ambiente natural. El tratamiento avanzado de aguas residuales se puede utilizar para alcanzar cualquier nivel de tratamiento deseado y es necesario para eliminar los nutrientes de las aguas residuales, microorganismos patógenos y sustancias químicas de preocupación. Las plantas de tratamiento de aguas residuales avanzadas utilizan procesos y equipos sofisticados que son relativamente caros de mantener y con altos costos de operación.
- Los procesos de tratamiento de aguas residuales requieren un manejo cuidadoso para asegurar la protección de la masa de agua que recibe la descarga. El objetivo final del tratamiento de aguas residuales debe ser la gestión de las aguas residuales de manera efectiva, económica y ecológica.

- A raíz de los crecientes niveles de degradación de la calidad del recurso hídrico en el país, generados por vertimientos municipales sin tratamiento previo, el Gobierno Nacional con base en estudios detallados de diagnóstico de la problemática y las principales corrientes hídricas afectadas, formuló el Plan Nacional de Manejo de Aguas Residuales Municipales, definido en el documento CONPES 3177. Sin embargo no existe información clara sobre los proyectos que pueden generarse en pequeños municipios relacionados con el tratamiento de aguas residuales y su reúso.
- A pesar que la ley 373 de 1997 contempla el Reúso Obligatorio del agua, aún no se ha reglamentado los casos y los tipos de proyectos en los que se deberá reutilizar el agua.
- Los contaminantes que causan los problemas de salud más grandes son los microorganismos patógenos y las sustancias químicas de preocupación. El nivel de tratamiento requerido depende del nivel de riesgo, ya sea real o percibido, de la posible presencia de contaminantes químicos y microbianos
- El agua es tanto un derecho como una responsabilidad, y tiene valor económico, social y ambiental. Cada ciudadano, cada empresa, debe tomar conciencia de que el agua dulce de calidad es un recurso natural, cada vez más escaso tanto a nivel superficial como subterráneo, necesario no sólo para el desarrollo económico, sino imprescindible como soporte de cualquier forma de vida en la naturaleza. La industria es motor de crecimiento económico y, por lo tanto, clave del progreso social. Sin embargo, demasiado a menudo la necesidad de maximizar el proceso productivo excluye de la planificación la protección del Medio Ambiente.

## 11 RECOMENDACIONES

- El principal problema cuando se trata del reúso del agua es la aceptación del recurso por los usuarios finales. Aparte del concepto de riesgo, es necesario una voluntad del usuario final y / o cliente que va a comprar el agua y el producto final (por ejemplo, regadío de cultivos). Como hoy en día estamos viviendo en una sociedad de evaluación, es necesario dar a conocer los proyectos y presentar los resultados a la opinión pública. Una buena política de comunicación proporciona a los interesados la resolución de dudas, participación activa con base en su conocimiento de la situación y certeza de la calidad del proyecto y de que el dinero gastado en el proyecto se gasta correctamente.
- Existe una controversia del nivel que las normas deben exigir para el agua reciclada. Por lo general, el nivel de calidad está en relación con los usos finales de los fijos del agua regenerada. Si el énfasis se hace en una reducción del riesgo máximo, independiente de los costos asociados a los tratamientos las normas suelen ser restrictivas. Por el contrario, si el énfasis se pone en un nivel aceptable de riesgo, las normas no son tan importantes, sino que se combinan con otras herramientas. En Colombia es necesaria la generación de estas normas, lideradas por el gobierno y apoyado en las instituciones educativas que deben realizar estudios sobre la factibilidad tanto económica, social y de salud de la generación de aplicaciones de reúso en diferentes sectores.
- Como la regeneración y reutilización no son gratis, las instituciones gubernamentales y privadas deben decidir quién va a financiar los gastos relacionados con la regeneración y la reutilización y control. En cualquier caso, el costo final está relacionado con la calidad final del recurso, el grado de

aseguramiento de la calidad implementado y la voluntad de eliminar por completo el impacto ambiental y asegurar la minimización de los riesgos a la salud.

## BIBLIOGRAFÍA

AWWA American Water Works Association, California-Nevada Section. Guidelines for the Onsite Retrofit of Facilities Using Disinfected Tertiary Recycled Water. 1997

BDOURA, A. Perspectives on sustainable wastewater treatment technologies and reuse options in the urban areas of the Mediterranean región. En: *Desalination* 237 (2009), p 162–174.

BOUWER, H. Integrated water management: emerging issues and challenges. *Agricultural Water Management* 45 (2000), p 217±228.

CAMPOS, C. New perspectives on microbiological water control for wastewater reuse. En: *Desalination* 218 (2008), p 34–42.

CONPES (Consejo Nacional de Política Económica y Social) 3177. Acciones prioritarias y lineamientos para la Formulación del plan nacional de manejo de aguas Residuales. 2002

CONPES 3177. Acciones prioritarias y lineamientos para la formulación del plan de manejo de aguas residuales. 2002.

DAUGHTON, C.G., et al. “Pharmaceuticals and Personal Care Products in the Environment: Agents of Subtle Change?” *Environmental Health Perspectives*, 107, supplement. December, 1999.

DOMÍNGUEZ, E. Relaciones demanda- oferta de agua y el índice de escasez de agua como herramientas de evaluación del recurso hídrico colombiano. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 32(123): 195-212, 2008. ISSN 0370-3908.

DURHAM, B. Integrated Water Resource Management aquifer recharge. En: Desalination 152 (2002), p 333-338.

ENGINEERING SCIENCE. "Monterey Wastewater Reclamation Study for Agriculture." Prepared for Monterey Regional Water Pollution Control Agency, Monterey, California, 1987.

EPA Environmental Protection Agency. Water recycling and reuse: The environmental benefits. Water Division Region IX - EPA 909-F-98-001.

EPA. Guidelines for Water Reuse. September 2004

FILTRATION+SEPARATION. Legislation and market forces: Regulators and wastewater reuse. September/October 2009, p 16 – 21.

FILTRATION+SEPARATION. Water reuse: Making use of Wastewater. September 2007, p 24 – 27.

GERBA, C.P. "Pathogen Removal from Wastewater During Groundwater Recharge." Artificial Recharge of Groundwater. T. Asano (ed.), pp. 283-317. Butterworth Publishers. Boston, Massachusetts. 1985.

GORDON, C., K. "Influence of Conditions on the Survival of Enteric Viruses and Indicator Organisms in Groundwater" *Management of Aquifer Recharge for Sustainability*. A. A. Balkema Publishers. Lisse. 2002. 133-138p.

GRISHAM, A., et al. "Long-Term Options for Municipal Water Conservation." Journal AWWA, 81: 34-42. 1989

HOCHSTRAT, R. Development of integrated water reuse strategies. En: Desalination 218 (2008), p 208–217.

<http://www.epa.gov/region09/water/recycling/index.html>

[http://www.minambiente.gov.co/documentos/Aguas\\_Municipales.pdf](http://www.minambiente.gov.co/documentos/Aguas_Municipales.pdf)

HUERTAS, E. Key objectives for water reuse concepts. En: Desalination 218 (2008), p 120–131

IDEAM Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Estudio Nacional del Agua. Bogotá, D.C, 2010.

IGLESIAS, R. Present and future of wastewater reuse in Spain. En: Desalination 218 (2008), p 105–119

JOHNSON, W.D. 1998. “Innovative Augmentation of a Community’s Water Supply – The St. Petersburg, Florida Experience.” Proceedings of the Water Environment Federation, 71<sup>st</sup> Annual Conference and Exposition. Octubre 3-7, Orlando, Florida, 1998.

JOKSIMOVIC, D. Development and validation of system design principles for water reuse systems. En: Desalination 218 (2008), p 142–153.

KONING, J. Characterisation and assessment of water treatment technologies for reuse. En: Desalination 218 (2008), p 92–104.

LAWRENCE, P. Ensuring water re-use projects succeed institutional and technical issues for treated wastewater re-use. En: Desalination 152 (2002), p 291-298.

LINDSEY, P., R., et al. "The Design and Construction of a Demonstration / Research Garden Comparing the Impact of Recycled vs. Potable Irrigation Water on Landscape Plants, Soils and Irrigation Components." Water Reuse Conference Proceedings. American Water Works Association. Denver, Colorado, 1996.

MEDEMA, G. J., et al. "Removal of Micro-organisms upon Recharge, Deep Well Injection and River Bank Infiltration in the Netherlands." Management of Aquifer Recharge for Sustainability: A. A. Belkema Publishers. Lisse, 2002. 125-131.p

MENESES, Montse. Environmental assessment of urban wastewater reuse: Treatment alternatives and applications. En: Chemosphere 81 (2010), p 266–272

MILLER, W. Integrated concepts in water reuse: managing global water needs. En: Desalination 187 (2006), p 65–75.

MOHSEN, Mousa. Potential of industrial wastewater reuse. En: Desalination. 152 (2002), p 281-289.

NCASI. 2003. Memo report from Jay Unwin. April 23, 2003.

OAKSFORD, E.T. Artificial Recharge: Methods, Hydraulics, and Monitoring. In: Artificial Recharge of Groundwater. T. Asano (ed) pp 69-127, Butterworth Publishers, Boston Massachusetts, 1985.

ROWE, D.R. Handbook of Wastewater Reclamation and Reuse. CRC Press, Inc. 1995. 550 p.

SALGOT, M. Water reclamation, recycling and reuse: implementation issues. En: Desalination 218 (2008), p 190–197.

SILVA, Jorge, et al. Reúso de aguas residuales domésticas en agricultura. Una revisión Agronomía Colombiana, vol. 26, núm. 2, 2008,347-359p

SONUNE Amit. Developments in wastewater treatment methods. Desalination 167 (2004) 55-63

TANJI, K.K. (ed.). Agricultural Salinity Assessment and Management. American Society of Civil Engineers. New York, New York, 1990.

TOZE S. Water reuse and health risks — real vs. perceived. Desalination 187, 2006. 41–51p

VIRTUAL PRO. Aguas Residuales - Tecnologías de Tratamiento. ISSN 1900 - 6241. Volumen 86.

WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION. Water Reuse Manual of Practice, Second Edition. Water Pollution Control Federation, Alexandria, Virginia, 1989.

WHO. Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. 2006

[www.pnuma.org/gpa/aguas\\_residuales/ProyectosPiloto/GWP1.doc](http://www.pnuma.org/gpa/aguas_residuales/ProyectosPiloto/GWP1.doc)

[www.unicef.org/colombia/pdf/Agua3.pdf](http://www.unicef.org/colombia/pdf/Agua3.pdf)