

Panorama de la utilización de aguas residuales, aguas grises y lodos en la agricultura, acuicultura, industrias y edificaciones en el Brasil

Antônio Domingues Benetti
Mónica Liliana Salazar Peláez

RESUMEN: Este artículo presenta el panorama del reuso de aguas residuales y lodos en la agricultura, acuicultura, industrias, edificaciones y áreas urbanas en el Brasil. Este tema ha cobrado importancia no sólo por la escasez de agua que se presenta en algunas regiones del país, sino también por los costos crecientes que deben asumir los consumidores. Estos costos inciden en la captación de agua de los cuerpos hídricos y en la disposición de efluentes tratados. El reuso está siendo muy aplicado en varias regiones; aunque la legislación relacionada a este tema se encuentra en un estado incipiente en el país. Con el objetivo de aportar elementos técnicos a las decisiones políticas sobre el reuso, una red de universidades brasileñas viene desarrollando diversas investigaciones en esta área.

PALABRAS CLAVE: Reuso de aguas residuales, aguas grises, lodos, conservación del agua

ABSTRACT: This paper presents an overview on wastewater reuse in agriculture fields, aquaculture, industrial plants, buildings and urban areas. The subject has received increasing attention from Brazilian authorities due to water shortages in some regions and raising costs burdened by water users. These costs apply to water withdrawals and diversions from water bodies and the disposal of treated effluents. Reuse is being practiced in many regions now, although regulation is still incipient. Presently, a network of Brazilian universities is conducting research in order to support decision makers on public policies on reuse.

KEY-WORDS: Wastewater reuse; graywater; sludge; water conservation

INTRODUCCIÓN

El reuso de aguas residuales, aguas grises y lodos ha despertado un gran interés en el Brasil durante los últimos años por dos razones: escasez y costos asociados al agua. Aunque el país presente una de las mejores disponibilidades hídricas anuales *per capita* promedio del mundo ($35732 \text{ m}^3 \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$), el agua está distribuida de manera desigual en el territorio, existiendo abundancia en algunas regiones y escasez en otras. Por ejemplo, mientras que en el Estado de Pará la disponibilidad hídrica es de $204491 \text{ m}^3 \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$, en el Estado de Pernambuco ésta es de apenas $1270 \text{ m}^3 \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ (Tundisi, 2003). Disponibilidades por debajo de 2000 y $1000 \text{ m}^3 \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ indican, respectivamente, insuficiencia y severa escasez de agua (Banco Mundial, 1992).

Inclusive en regiones con disponibilidades de agua consideradas altas, problemas de escasez pueden aparecer debido a las elevadas demandas de agua para un determinado uso. Un ejemplo ocurre en la Cuenca

del Río Santa María en el Estado de Rio Grande do Sul. A pesar de que la región posee una disponibilidad hídrica anual promedio alta ($19792 \text{ m}^3 \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$), se observa en periodos de sequía una interrupción en el flujo de este río debido a la gran cantidad de agua retirada de su cauce para el riego de arroz (Benetti, 2007).

Además de la cuestión cuantitativa, los costos del agua tratada y de la disposición de efluentes en los cuerpos hídricos han motivado a muchos usuarios, especialmente a las industrias, a conservar y reusar efluentes tratados. Este incentivo comenzó con la promulgación de la Ley N° 9433/97, que estableció la Política Nacional de Recursos Hídricos (Brasil, 1997). Para muchos usuarios se volvió ventajoso reusar efluentes tratados, permitiendo ahorros sustanciales en los costos del agua.

El interés del Brasil por el reuso de efluentes se ha visto reflejado en el incentivo a proyectos de investigación sobre el tema. En este sentido, se destacan

las iniciativas del Programa de Investigación en Saneamiento Básico (PROSAB), de la Financiadora de Estudios y Proyectos (FINEP), del Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (CNPq) y de la Caja Económica Federal (CEF). Este programa se encuentra en su quinta edición y sus publicaciones están disponibles en la dirección de internet: www.finep.gov.br/prosab/index.html. El interés por el reuso y conservación del agua ha motivado también a asociaciones de industriales y agencias gubernamentales a publicar manuales de orientación sobre el tema con el fin de divulgar sus potenciales y limitaciones. Por ejemplo, la Federación de Industrias del Estado de São Paulo publicó su “Manual de Conservación y Reuso del Agua en la Industria” (FIESP, 2004). La Universidad de São Paulo creó el CIRRA (Centro Internacional de Referencia en Reuso del Agua) con el objetivo de desarrollar tecnologías, entrenar y divulgar oportunidades en las áreas de conservación y reuso del agua en el Brasil (www.usp.br/cirra/). El reuso de las aguas residuales también ha sido tema de talleres en simposios sobre el uso del agua en la agricultura (Benetti, 2006).

En el Brasil el Consejo Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) constituyó un Grupo Técnico sobre el Reuso del Agua. A partir de las recomendaciones de este grupo, el CNRH aprobó la Resolución N° 54, del 28 de noviembre de 2005, la cual define las siguientes modalidades de reuso directo no potable del agua (Brasil, 2005a):

- Reuso para fines urbanos: irrigación paisajística, lavado de espacios públicos y vehículos, desobstrucción de tuberías, construcción civil, edificaciones y combate de incendios.
- Reuso para fines agrícolas y forestales: aplicación para producción agrícola y cultivo de bosques plantados.
- Reuso para fines ambientales: implantación de proyectos de recuperación del medio ambiente.
- Reuso para fines industriales: reuso en procesos, actividades y operaciones industriales.
- Reuso para acuicultura: crianza de peces o cultivo de vegetales acuáticos.

A continuación se describen algunas iniciativas y estudios realizados en el Brasil con relación al reuso de aguas residuales, aguas grises y lodos en la agricultura y acuicultura, en industrias y en edificaciones urbanas.

UTILIZACIÓN DEL AGUA EN LA AGRICULTURA

Demanda de agua en la agricultura brasileña

En el Brasil, la demanda media de agua para la irrigación corresponde al 65% de la demanda total. Sin embargo este valor promedio presenta variaciones acentuadas en las diversas cuencas dependiendo, principalmente, de su grado de industrialización. Por ejemplo, en la Cuenca del Atlántico Este, la más industrializada del país, la demanda para irrigación es de apenas 7% del total, mientras que en la Cuenca de Río Uruguay la irrigación utiliza el 90% del agua captada (Lima *et al.*, 1999).

La figura 1 ilustra el crecimiento de las áreas irrigadas en el Brasil a partir del año de 1950. En 40 años (1950 – 1990), el área irrigada se multiplicó 25 veces. En la década de los noventa, hubo una reducción en dicho crecimiento. El total irrigado en el año 2000, próximo a 3 millones de hectáreas, corresponde a menos del 10% del potencial del área irrigable del Brasil. Considerando las crecientes dificultades en atender las enormes cantidades de agua demandadas por la irrigación, el reuso de aguas residuales domésticas tratadas en la agricultura surge como una alternativa atrayente, aunque el volumen total de aguas residuales sea pequeño en relación a las necesidades de agua para la irrigación. Especialmente en las regiones más carentes de agua, como el semi-árido brasileño, la irrigación es tratada como un instrumento esencial de política pública para el desarrollo económico y social.

Requerimientos de calidad de agua

Los constituyentes presentes en las aguas residuales domésticas que presentan efectos potenciales negativos a la salud pública y a los recursos hídricos son descritos en la tabla 1. De los contaminantes presentados en esta tabla, Meybeck y Helmer (1992) indican que el contenido de sales es el principal limitante para el reuso de agua en la irrigación, seguido por organismos patógenos, sólidos suspendidos, metales en trazas y microcontaminantes orgánicos. Según estos autores, la materia orgánica y los nutrientes pueden ser benéficos para la irrigación.

El grado de tratamiento de las aguas residuales requerido depende de la calidad exigida para el agua de irrigación. Esta, a su vez, depende de la legislación que regula el uso de las aguas residuales en la agricultura. Hasta el momento, el Brasil no dispone de una legislación específica que regule la utilización de aguas residuales en la agricultura. La referida Resolu-

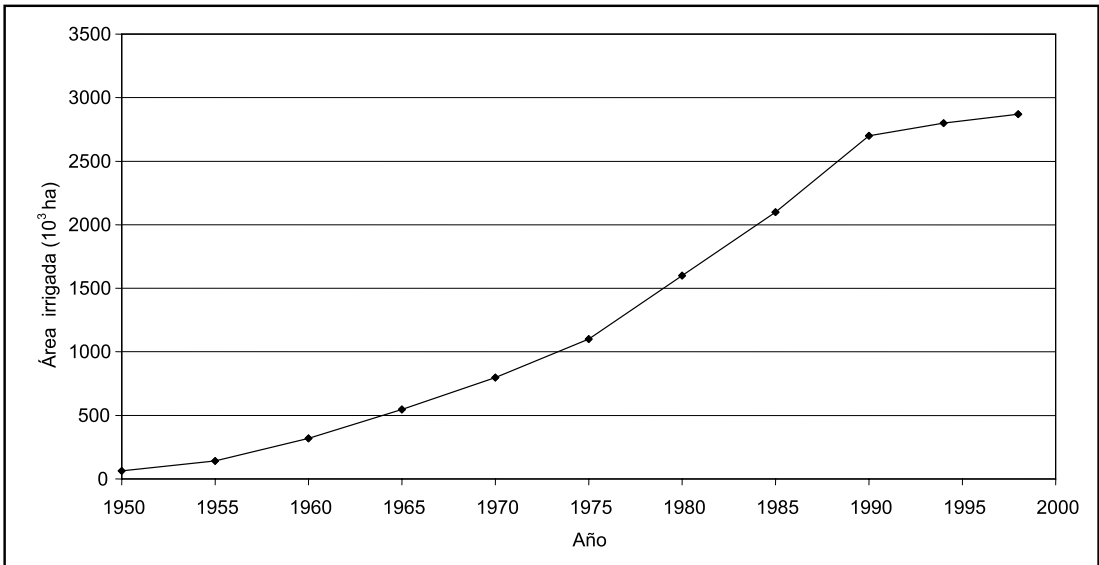


FIGURA 1. Evolución del área irrigada en el Brasil (Lima et al., 1999)

ción N° 54 del CNRH no especifica los estándares de calidad para aguas destinadas a la irrigación. Por otro lado, el Consejo Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) a través de su Resolución N° 357/2005, estableció los niveles de calidad a ser atendidos por aguas de manantiales utilizados para diversos fines (Brasil, 2005b). Estos estándares son vistos más como un objetivo a ser alcanzado que como una realidad encontrada en los manantiales. De esta forma, no

hay una penalización, o inclusive una prohibición, del uso de agua para determinado fin, inclusive si su calidad está fuera de los estándares establecidos por la Resolución N° 357/2005.

La tabla 2 presenta, por grupo de cultivos, la calidad que el agua de una fuente debe tener para ser usada en irrigación, de acuerdo con la Resolución N° 357/2005, además de ejemplos de límites de concentraciones establecidos para algunos contaminantes.

TABLA 1
Constituyentes presentes en aguas residuales domésticas que presentan posibles efectos perjudiciales a la salud pública y a los recursos hídricos (Metcalf & Eddy, 2003)

Constituyente	Importancia
Sólidos suspendidos	Formación de bancos de lodos y condiciones anaerobias en los lechos de los manantiales de agua.
Materia orgánica biodegradable	Compuesta básicamente por proteínas, carbohidratos y aceites y grasas. Su estabilización consume el oxígeno disuelto en el agua, pudiendo llevar al manantial a alcanzar condiciones sépticas.
Microorganismos patógenos	Transmisores de enfermedades contagiosas.
Nutrientes	Las descargas de nitrógeno, fósforo y carbono en ambientes acuáticos ocasionan crecimiento acelerado de algas y cianobacterias.
Compuestos orgánicos refractarios	Compuestos que resisten a los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales, incluyendo fenoles, pesticidas y tensoactivos
Contaminantes prioritarios	Compuestos orgánicos e inorgánicos de toxicidad aguda y sospechosos o comprobadamente cancerígenos o teratogénicos.
Metales pesados	Presentan toxicidad por encima de determinadas concentraciones.
Compuestos inorgánicos disueltos	El uso del agua en las ciudades aumenta el contenido de sales que se encuentran originalmente disueltas en la fuente de agua.

TABLA 2
Clases de calidad para aguas utilizadas en irrigación de diversos cultivos (Brasil, 2005b)

Uso	Clase de Calidad	Ejemplos de límites de concentración establecidos
Irrigación de hortalizas que son consumidas crudas y de frutas que se desarrollan próximas al suelo y que son ingeridas sin remoción de películas	Clase 1	Coliformes fecales $\leq 200/100$ mL Turbiedad ≤ 40 UNT DBO(5 días, 20°C) $\leq 3,0$ mgL ⁻¹ Sólidos Disueltos Totales ≤ 500 mgL ⁻¹ Mercurio $\leq 0,2$ µgL ⁻¹ Hg 2,4-D $\leq 4,0$ µgL ⁻¹
Irrigación de hortalizas, plantas frutales y de parques, jardines, campos de deporte y recreación, con los cuales el público pueda tener contacto	Clase 2	Coliformes fecales $\leq 1000/100$ mL Turbiedad ≤ 100 UNT DBO(5 días, 20°C) $\leq 5,0$ mgL ⁻¹ Sólidos Disueltos Totales ≤ 500 mgL ⁻¹ Mercurio $\leq 0,2$ µgL ⁻¹ Hg 2,4-D $\leq 4,0$ µgL ⁻¹
Irrigación de cultivos de árboles, cereales y forraje	Clase 3	Coliformes fecales $\leq 2500/100$ mL Turbiedad ≤ 100 UNT DBO(5 días, 20°C) $\leq 10,0$ mgL ⁻¹ Sólidos Disueltos Totales ≤ 500 mgL ⁻¹ Mercurio $\leq 0,2$ µgL ⁻¹ Hg 2,4-D $\leq 30,0$ µgL ⁻¹

Experiencias en el reuso de efluentes y lodos

Reuso de efluentes tratados en la irrigación y en la acuicultura

Registros oficiales de proyectos de reuso de aguas residuales en la irrigación son raros en el Brasil. Andrade Neto (1992) presentó ejemplos de utilización de aguas residuales en irrigación de maíz, sandía, calabaza y pastos en la región del nordeste brasileño. El reuso más común es el indirecto, a través de la captación de aguas en manantiales que reciben aguas residuales no tratadas. Por otro lado, en el Brasil todavía existe un importante déficit en la recolección y el tratamiento de aguas residuales. Por ejemplo, en el año 2000, apenas un 33.5% de los domicilios del país eran atendidos por la red de alcantarillado y solamente 14% de los distritos poseían planta de tratamiento de aguas residuales (IBGE, 2002).

A través del apoyo del Programa de Investigación en Saneamiento Básico (PROSAB), un conjunto de universidades, organizadas en una red, desarrollaron investigaciones enfocadas a la utilización de aguas residuales en la irrigación, cultivos hidropónicos y piscicultura. La experiencia fue consolidada con la publicación de un libro (Bastos, 2003). Con respecto a la irrigación, los estudios concluyeron que las lagunas de estabilización bien diseñadas y operadas pueden producir efluentes dentro del estándar recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para irrigación sin restricciones, que es de menos de 10^3 coliformes fecales (CF)/mL como promedio geométrico durante el periodo de irrigación. Hortalizas irrigadas con efluentes tratados con esta calidad fueron aceptables para consumo humano. Los tanques de piscicultura que recibieron efluentes tratados conteniendo hasta 10^3 CF/mL produjeron peces libres de organismos indicadores de contaminación y patógenos. Las investigaciones indicaron que la carne y la leche de bovinos y caprinos alimentados con forrajeras irrigadas con efluentes del tratamiento anaerobio no fueron infectadas o contaminadas (Bastos y Marques, 2003).

Los estudios en esta área han tenido continuidad y están siendo desarrolladas investigaciones sobre el reuso en plantaciones de eucaliptos, rosales, cultivos hidropónicos de forrajeras, maíz, caña de azúcar, pastos, flores tropicales, papaya y piscicultura (PROSAB, 2007a).

Reuso de lodos en la agricultura

Métodos de tratamiento de aguas residuales como lodos activados y filtros biológicos producen lodos, los cuales son suspensiones con contenidos de sólidos variando entre 0,5% y 1%. Estos lodos requieren de una estabilización antes de que puedan ser dispuestos en el ambiente. El método de estabilización más común en las plantas de tratamiento es la digestión anaerobia, la cual convierte carbono orgánico en metano (CH_4) y carbono inorgánico (CO_2). Cuando la digestión anaerobia se realiza en reactores con tiempos de residencia superiores a 15 días y temperaturas entre 35 y 55 °C, promueve una significativa reducción de organismos patógenos, presentando un uso potencial en la agricultura como acondicionador de suelos o como promovedor de nutrientes para plantas.

La planeación del uso del llamado “biosólido” en la agricultura debe considerar los siguientes aspectos: (1) la presencia de metales pesados, (2) el tipo de tratamiento dado al biosólido, (3) las áreas agrícolas donde será aplicado, (4) la tasa de aplicación en el suelo, (5) el transporte, manipulación, almacenamiento y aplicación y (6) el seguimiento del suelo (Tsutiya, 2002). En São Paulo, lodos tratados provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de las ciudades de Franca y Jundiá son vendidos a los agricultores para su aplicación en los cultivos de caña y café. Existe un excelente mercado para los biosólidos, tornándose un bien con valor económico y con potencial para la generación de ganancias (Tavares, 2003).

En el Brasil, la Compañía de Tecnología de Saneamiento Ambiental fue pionera en la regulación para la aplicación de lodos de plantas de tratamiento en suelos (CETESB, 1999). Recientemente el CONAMA aprobó la Resolución N° 375/2006, con aplicación en todo el territorio nacional. Esta resolución define criterios y procedimientos para el uso agrícola de lodos provenientes de plantas de tratamiento (Brasil, 2006).

La Resolución N° 375/2006 establece que los lodos generados en las PTAR, deberán presentar reducción de organismos patógenos y en su atracción a vectores que transmiten enfermedades con el fin de tener uso agrícola. También establece los requisitos mínimos de calidad del lodo relacionados con sustancias inorgánicas y agentes patógenos. De igual manera, esta Resolución determina que cultivos son aptos para recibir los lodos y presenta restricciones en

lugares donde el lodo no puede ser aplicado, como por ejemplo en Áreas de Preservación Permanente (APP) y áreas agrícolas con declive mayor al 10% para el caso de aplicación superficial sin incorporación. La tabla 3 presenta las concentraciones máximas de patógenos para los dos tipos de lodos clasificados, A y B.

Los procesos fijados por la Resolución N° 375 para la reducción significativa de patógenos, reducción adicional de patógenos y atracción de vectores se basaron en lo establecido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S.EPA – 40 CFR PART 503 – Appendix B, Federal Register, del 19 de febrero de 1993). Son los siguientes procesos los establecidos:

I – Procesos de reducción significativa de patógenos

a) Digestión aerobia: con aire u oxígeno con residencias mínimas de 40 días a 20 °C, o 60 días a 15 °C;

b) Secado en lecho de arena o en patios, pavimentados o no, durante un periodo mínimo de tres meses;

c) Digestión anaerobia por un periodo mínimo de 15 días a 33-35 °C o de 60 días a 20 °C;

d) Compostaje por cualquiera de uno de los métodos citados, siempre y cuando la biomasa alcance una temperatura mínima de 40 °C, durante por lo menos 5 días, con la ocurrencia de un pico de 55 °C lo largo de 4 horas consecutivas;

e) Estabilización con cal, mediante la adición de una cantidad suficiente para que el pH sea elevado

a por lo menos 12, por un periodo mínimo de dos horas.

II – Procesos de reducción adicional de patógenos

a) Compostaje confinado o en surcos aireados (3 días a 55 °C como mínimo), o con mezcla de surcos (15 días a 55 °C como mínimo, con mezcla mecánica de los surcos durante por lo menos 5 días a lo largo de los 15 del proceso);

b) Secado térmico directo o indirecto para reducir la humedad del lodo a 10% o menos, debiendo la temperatura de las partículas del lodo superar 80°C;

c) Tratamiento térmico por calentamiento del lodo líquido a 180 °C, como mínimo, durante 30 minutos;

d) Digestión aerobia termofílica, con aire u oxígeno, con tiempos de residencia de 10 días a temperaturas de 55 a 60 °C;

e) Procesos de irradiación con rayos beta y dosis mínimas de 1 megarad a 20 °C, o con rayos gamma a la misma intensidad y temperatura, a partir de isótopos de cobalto 60 o cesio 137;

f) Procesos de pasteurización, por la manutención del lodo a una temperatura mínima de 70 °C, por un periodo de por lo menos 30 minutos;

III – Procesos para reducción de atracción de vectores

En este apartado se indican los criterios a ser cumplidos para la verificación de la aceptabilidad del proceso en lo que se refiere a la atracción de vectores. Son definidos los criterios con relación a

TABLA 3
Concentración de organismos patógenos para las clases de lodos de aguas residuales domésticas (Brasil, 2006)

Tipo de lodo de aguas residuales o producto derivado	Concentración de patógenos
A	Coliformes termotolerantes < 10 ³ NMP / g de ST Huevos viables de helmintos < 0,25 huevos / g de ST <i>Salmonella</i> : ausencia en 10 g de ST Virus < 0,25 UFP o UFC / g de ST
B	Coliformes termotolerantes < 10 ⁶ NMP / g de ST Huevos viables de helmintos < 10 huevos / g de ST

NMP = Número Más Probable; ST = Sólidos Totales; UFC = Unidad Formadora de Colonia; UFP = Unidad Formadora de Placa

la digestión anaerobia, aerobia, compostaje, estabilización química, secado, aplicación subsuperficial e incorporación al suelo. Por ejemplo, en el caso de la digestión anaerobia, el criterio a ser cumplido es la reducción de sólidos volátiles (SV) en un 38% o más con relación a la concentración de SV en el afluente del proceso.

REUSO EN LA INDUSTRIA

La Política Nacional de Recursos Hídricos, instaurada por la Ley N° 9433 del 8 de enero de 1997, establece el cobro por el uso de los recursos hídricos como uno de sus instrumentos (Brasil, 1997). El cobro es realizado en las derivaciones, captaciones y extracciones de agua y en las descargas de aguas residuales y demás residuos líquidos a los cuerpos de agua. Al mismo tiempo que deben pagar por la captación de agua y la disposición de efluentes, las industrias tienen la obligación de tratar sus efluentes para remover contaminantes que puedan causar daños a la salud pública y a los ecosistemas, debiendo atender los estándares de emisión establecidos en la legislación federal y estatal. Estos requerimientos dieron un gran incentivo a la conservación del agua y al reuso de las aguas residuales tratadas dentro de las industrias. Por ejemplo, Feres et al. (2007) concluyeron que el cobro por el uso del agua incentivó a las industrias a adoptar prácticas de reuso y reducción de la demanda del agua, según informaciones recolectadas en 447 industrias localizadas en la Cuenca del Río Paraíba do Sul.

En el Estado de São Paulo, la Ley N° 12183 del 29 de diciembre de 2005, estableció los procedimientos para la fijación de los límites de cobro por el uso del agua (São Paulo, 2005). El Decreto N° 50667 del 30 de marzo de 2006, define la ecuación para el cálculo del valor a ser cobrado (São Paulo, 2006). El precio final es calculado a través de la ecuación (1).

$$C = C_{\text{capt}} + C_{\text{cons}} + C_{\text{eff}} \quad (1)$$

donde: C = costo total [R\$]

C_{capt} = costo debido a la captación del agua [R\$]

C_{cons} = costo debido al consumo del agua [R\$]

C_{eff} = costo debido a la disposición de los efluentes en los cuerpos hídricos [R\$]

Los costos de captación, consumo y disposición de los efluentes son calculados por las ecuaciones (2) a (4).

$$C_{\text{capt}} = \text{PUF}_{\text{capt}} \cdot Q_{\text{capt}} \quad (2)$$

$$C_{\text{cons}} = \text{PUF}_{\text{cons}} \cdot Q_{\text{cons}} \quad (3)$$

$$C_{\text{eff}} = \sum \text{PUF}_{\text{par}(x)} \cdot Q_{\text{par}(x)} \quad (4)$$

donde: PUF_{capt} , PUF_{cons} = precios unitarios finales para captación y consumo de agua [R\$/m³]

$\text{PUF}_{\text{par}(x)}$ = precios unitarios finales debidos a DBO, DQO, sólidos sedimentables y carga inorgánica en el efluente [R\$/kg];

Q_{capt} y Q_{cons} = caudales de captación y consumo, respectivamente [m³/día]; y

$Q_{\text{par}(x)}$ = Q_{DBO} , Q_{DQO} , Q_{SS} , Q_{CI} = cargas de DBO, DQO, sólidos sedimentables y carga inorgánica, dadas por el producto entre caudal y concentración [kg/día].

El caudal de consumo corresponde a la diferencia entre el volumen captado y el volumen de efluente lanzado al cuerpo receptor, siendo calculado por la ecuación (5).

$$Q_{\text{cons}} = \text{FC} \cdot Q_{\text{capt}} \quad (5)$$

$$\text{FC} = \frac{Q_{\text{capt}} - Q_{\text{eff}}}{Q_{\text{capt}}} \quad (6)$$

Los precios unitarios finales de las ecuaciones (2) a (4), a vez, son calculados por las ecuaciones (7) a (9).

$$\text{PUF}_{\text{capt}} = \text{PUB}_{\text{capt}} \cdot (X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot \dots \cdot X_{13}) \quad (7)$$

$$\text{PUF}_{\text{cons}} = \text{PUB}_{\text{cons}} \cdot (X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot \dots \cdot X_{13}) \quad (8)$$

$$\text{PUF}_{\text{par}(x)} = \text{PUB}_{\text{par}(x)} \cdot (Y_1 \cdot Y_2 \cdot Y_3 \cdot \dots \cdot Y_9) \quad (9)$$

donde: X_i = coeficientes ponderadores para captación, extracción, derivación y consumo de agua; Y_i = coeficientes ponderadores para los parámetros de carga lanzada.

Los coeficientes ponderadores son definidos en el Decreto N° 50667/2006. Por ejemplo X_1 depende de la naturaleza del cuerpo de agua (superficial o subterráneo), X_2 de la clase de uso que se le da al recurso hídrico y Y_4 de la naturaleza de la actividad.

La gestión del agua en las industrias es hecha a través de la gestión de la demanda y la oferta. El control de pérdidas de agua y la modificación a procesos industriales que usen menos agua son ejemplos de la gestión de la demanda. Por otro lado, la gestión de la oferta engloba el reuso de los efluentes tratados y el uso de las aguas pluviales captadas dentro del área de la industria. Como ya fue mencionado, el costo del agua y la disposición de efluentes hicieron que muchas industrias pasaran a hacer reuso, aunque parcial, de sus efluentes.

Un estudio realizado para simular el cobro por el uso del agua en 2311 industrias del Estado de São Paulo estimó una demanda de $112,75\text{m}^3\text{s}^{-1}$, con un retorno de $83,47\text{m}^3\text{s}^{-1}$ como efluente y consumo de $29,28\text{m}^3\text{s}^{-1}$. Sin reuso, el costo total simulado para la captación, consumo y retorno de efluentes fue de R\$ 4.340.000 por día (el equivalente a US\$2.170.000). Para el caso en que 50% del efluente tratado es reusado, el costo diario se reduce a R\$1.780.000 (el equivalente a US\$890.000). Por tanto un ahorro del 60% en el costo del agua puede ser obtenido de acuerdo con la simulación (Hespanhol, 2007). Un aspecto muy importante en este análisis es que el costo unitario del agua cobrado por la compañía de saneamiento de las empresas es mayor que el costo del gasto para tratar el efluente. Por ejemplo, Hespanhol (2007) presenta los siguientes datos de costo:

- ☒ Costo del agua potable del acueducto público: R\$ 2,24/m³ a R\$ 8,75/m³
- ☒ Costo del agua de reuso (efluente tratado) de la compañía de saneamiento: R\$ 1,39/m³ a R\$ 1,89/m³
- ☒ Costo de reuso con efluentes tratados de la industria: R\$ 0,80/m³ a R\$ 1.20/m³

Se observa que los costos de reuso con efluentes tratados por las empresas son menores que las otras opciones. Considerando estos aspectos, muchas industrias en el Brasil ya presentan programas para reuso, al menos parcial, de sus efluentes. La tabla 4 muestra la demanda de agua en sectores industriales del Estado de São Paulo en los años 1990 y 2000. Se observa que hubo una reducción de consumo del orden del 15%, tendencia que se acentuó en los años siguientes.

Las aguas de enfriamiento son la principal aplicación de reuso de muchas industrias. En este proceso, el agua caliente es recirculada y enfriada en un intercambiador de calor. Efluentes tratados son usados para reponer el agua que fue evaporada o descartada. Se debe tener cuidado de que el efluente usado no cause corrosión, precipitación de compuestos, taponamientos y crecimiento de bio-películas en las superficies de los intercambiadores. Otras aplicaciones importantes en la industria son la irrigación de jardines y el lavado de superficies.

Muchas oportunidades de reuso del agua en plantas industriales pueden ser identificadas con las técnicas de “Tecnología Más Limpia”. Este enfoque tiene por objetivo prevenir la contaminación a través de la reducción del consumo de agua, energía y materiales, además de la generación de residuos en el proceso industrial, resultando en una disminución de costos e impactos sobre el ambiente (UNEP, 2004). El concepto de producción y consumo sustentables considera el ciclo entero del producto (diseño, materiales, producción, uso, reciclado) para reducir su impacto ambiental.

Los Programas de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (UNIDO) y Medio Ambiente

TABLA 4
Demanda de agua en sectores industriales del Estado de São Paulo (Hespanhol, 2007)

Sector Industrial	Captación de agua (m ³ /s)	
	1990	2000
Azúcar y Alcohol	46,24	42,30
Química y Petroquímica	17,97	15,90
Papel y Celulosa	13,20	11,60
Metalúrgica	10,64	7,00
Alimentos y Bebidas	10,55	6,70
Textil	4,19	4,00
Total	102,79	87,50

(UNEP) han establecido 24 centros en todo el mundo para el desarrollo de tecnologías de producción más limpia. El objetivo de estos centros es desarrollar capacidades locales de implementación de dichas técnicas en países en vías de desarrollo y en economías de transición. En el Brasil, el Centro Nacional de Tecnologías Limpias (CNTL) está asociado al Servicio Nacional de Aprendizaje Industrial (SENAI), localizado en la ciudad de Porto Alegre, Estado de Rio Grande do Sul (www.senairs.org.br/cntl).

REUSO EN EDIFICACIONES Y ÁREAS URBANAS

En áreas urbanas el reuso de efluentes tratados ocurre principalmente en usos no potables. Ejemplos de actividades con potencial para reuso son el lavado de vehículos de transporte público, de pistas de aeropuertos y de calles, irrigación de parques, tanques de reserva para incendios y control de polvo.

Actualmente existe mucho interés en el Brasil por la utilización de las aguas grises, que son los efluentes líquidos que fueron segregados de las descargas sanitarias. Una separación más completa es posible si, además de los efluentes de los sanitarios, los efluentes de las cocinas fueran también separados. En este caso, las aguas se llaman aguas grises claras. Son clasificadas también las aguas amarillas (solamente orina) y marrones (solamente heces, sin orina).

El Brasil todavía no dispone de una legislación que regule la calidad de las aguas grises con miras a su reaprovechamiento. Sin embargo, algunas ciudades ya prevén su reutilización. En Curitiba, por ejemplo, la Ley N° 19785 del 18 de septiembre de 2003, que crea el “Programa de Conservación y Uso Racional del Agua en las Edificaciones” establece que las aguas grises deben ser conducidas a través de una tubería separada, a un tanque destinado a suplir las descargas de los sanitarios. Solamente después de dicha utilización, las aguas residuales pueden ser descargadas a la red pública (Curitiba, 2003). En la ciudad de São Paulo, la Ley N° 13309 del 1 de febrero de 2002, prevé el uso del agua de reuso, no potable, proveniente de las plantas de tratamiento de aguas residuales, en el lavado de calles, paseos y plazas públicas, así como en la irrigación de jardines y campos deportivos. No obstante, la calidad del agua no fue definida por la ley.

Investigaciones han sido realizadas con el fin de conocer la composición física, química y microbiológica de las aguas grises. La tabla 5 muestra la composición de efluentes de lavadoras (1°, 2° y 3° ciclo), duchas con lavabo y efluente combinado de una instalación sanitaria experimental construida en el Campus de la Universidad de São Paulo (USP).

Bazzarrela y Gonçalves (2006), en una investigación desarrollada en la Universidad Federal de Espiritu Santo (UFES), midieron las concentraciones

TABLA 5
Composición física, química y bacteriológica de aguas grises en la instalación experimental de la USP (May e Hespanhol, 2006)

Parámetro	ML 1° ciclo	ML 2° ciclo	ML 3° ciclo	Ducha Lavabo	Combinado
Color (uH)	527	94	59	642	303
pH	9,2	7,9	7,1	6,4	8,5
Turbiedad (UNT)	40	13	7	85	27
SDT (mgL ⁻¹)	962	177	99	207	363
DBO ₅ (mgL ⁻¹)	203	48	24	176	114
DQO (mgL ⁻¹)	609	117	61	376	276
Col. Totales (NMP/100mL)	1,0 · 10 ⁴	3,2 · 10 ³	390	6,8 · 10 ³	5,7 · 10 ³
Col. Fecales (NMP/100mL)	4,4 · 10 ³	8	6	3,3 · 10 ³	3,9 · 10 ³

ML= máquina lavadora

TABLA 6

Composición física, química y bacteriológica de aguas grises en la instalación experimental de la UFES (Bazzarella e Gonçalves, 2006)

Parámetro	Lavabo	Ducha	Tanque	Máquina Lavadora	Cocina	Mezcla
pH	8,0	7,3	8,8	9,1	5,1	7,1
Turbiedad (NTU)	158	109	299	58	250	166
Conductividad ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	116	124	938	524	528	430
Dureza ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	44	30	56	39	12	21
DBO_5 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	265	165	570	184	633	571
DQO ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	653	582	1672	521	1.712	857
SST ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	146	103	221	53	336	134
O & G ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	82	95	188	24	176	101
P_T ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0,6	0,2	17,7	14,4	9,1	9
N-NH_3 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0,5	0,8	3,8	1,5	2,5	1,9
NTK ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	5,6	3,4	10,3	3,6	13,7	6,6
Sulfuro ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0,11	0,09	0,09	0,11	0,14	0,11
Sulfato ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	112	162	555	355	130	305
E. coli (NMP/100 mL)	10	$2,6\cdot 10^4$	29	27	650	$3,2\cdot 10^4$

medias de las aguas grises mostradas en la tabla 6. Se observa que la mezcla de todos los contribuyentes resulta en concentraciones altas de casi todos los parámetros analizados, indicando la necesidad de un tratamiento antes del reuso. Los resultados encontrados están por encima de los medidos en la instalación experimental de la USP.

El sindicato de la Industria de la Construcción Civil del Estado de São Paulo define clases de agua para el reuso, conforme se describe a continuación (ANA et al., 2005):

a) Agua de Reuso Clase 1

- ☒ Descarga de sanitarios, lavado de pisos y fines ornamentales (fuentes, espejos de agua, etc.)
- ☒ Lavado de ropas y vehículos

b) Agua de Reuso Clase 2

Los usos preponderantes están asociados a la construcción de edificaciones

- ☒ Lavado de agregados
- ☒ Preparación del concreto
- ☒ Compactación del suelo
- ☒ Control de polvo

c) Agua de Reuso Clase 3




- ☒ Irrigación de áreas verdes
- ☒ Riego de jardines

d) Agua de Reuso Clase 4

- ☒ Enfriamiento de equipos de aire acondicionado – torres de enfriamiento

Para cada clase son hechas recomendaciones de las concentraciones máximas de los parámetros físicos, químicos y bacteriológicos. Además de esto, se describen exigencias cualitativas mínimas que el agua de reuso debe presentar para el uso no potable en edificios. Estas exigencias varían de acuerdo a la destinación que es dada al agua de reuso, que puede ser: irrigación, riego de jardines, lavado de pisos, descarga de sanitarios, refrigeración y sistemas de aire acondicionado, lavado de vehículos, lavado de ropa, uso ornamental, preparación de argamasa, concreto, control de polvo y compactación del suelo. Por ejemplo, el agua de reuso utilizada para los sanitarios debe presentar las siguientes propiedades:

- ☒ No debe tener mal olor
- ☒ No debe ser abrasiva

-  No debe manchar las superficies
-  No debe deteriorar los metales sanitarios
-  No debe propiciar infecciones o contaminación por microorganismos perjudiciales a la salud humana

Dentro del ámbito del Programa de Investigación en Saneamiento Básico, estudios sobre el tema de reuso de efluentes en edificaciones continúan teniendo apoyo financiero de las agencias gubernamentales. Están en desarrollo investigaciones sobre el manejo de aguas amarillas, de aguas negras y de aguas grises en edificaciones urbanas y los tratamientos requeridos para su utilización segura (PROSAB, 2007b).

CONCLUSIONES

El reuso de aguas residuales, aguas grises y lodos ha despertado un creciente interés en el Brasil debido a la escasez de agua que se constata en algunas regiones del país y al aumento en los costos del agua y en la disposición final de efluentes en cuerpos hídricos.

La legislación que regula la práctica de reuso todavía es incipiente en el país. No obstante, en los últimos años, incentivos gubernamentales han permitido a una red de universidades brasileñas desarrollar investigaciones que permitirán dar soporte técnico a las políticas públicas sobre el reuso.

Independientemente de la legislación, en muchos casos el reuso está siendo practicado de manera directa o indirecta en la agricultura, industrias, edificaciones y áreas urbanas. Manuales de orientación han sido publicados con el fin de establecer parámetros para la elaboración de proyectos que permitan la adopción de prácticas seguras de reuso.

Las prácticas de conservación del agua y reuso de agua servidas ya son consideradas como uno de los instrumentos para la gestión del agua en cuencas hidrográficas en el Brasil. Esta tendencia continuará creciendo en los próximos años en la medida en que se intensifiquen las presiones sobre el uso de los recursos hídricos debidos a los crecimientos de la población, de las áreas irrigadas y de la producción industrial.

Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA; FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – FIESP; SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL DO ESTADO DE SÃO PAULO – SINDUSCON. **Conservação e reuso da água em edificações**. São Paulo, 2005.
- ANDRADE NETO, C. O. de. O uso de esgotos sanitários e efluentes tratados na irrigação. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM – CONIRD-ABID, 9., 1991, Natal. **Anais...** Fortaleza: Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem, 1992. v. 2, p. 1961-2006.
- BANCO MUNDIAL. **World development report 1992: development and the environment**. New York: Oxford University Press, 1992.
- BASTOS, R. K. X. (coord.) **Utilização de esgotos tratados em fertirrigação, hidroponia e piscicultura**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2003. (Programa de Pesquisa em Saneamento Básico 3 – Esgoto)
- BASTOS, R. K. X.; MARQUES, M. O. Utilização de esgoto tratado em fertirrigação, hidroponia e piscicultura – uma análise crítica. In: BASTOS, R. K. X. (coord.). **Utilização de esgotos tratados em fertirrigação, hidroponia e piscicultura**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2003. cap. 8.
- BAZZARELLA, B. B.; GONÇALVES, R. F. Produção de água de reuso predial através de tratamento anaeróbio-aeróbio de água cinza. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL, 30, 2006, Punta del Este, Uruguay. **Anais...** Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental - AIDIS. 2006. 1 CD.
- BENETTI, A. D. Reuso de águas residuárias na agricultura: cenário atual e desafios a serem enfrentados. In: SIMPÓSIO NACIONAL SOBRE O USO DA ÁGUA NA AGRICULTURA, 2, 2006. Passo Fundo, RS. **Anais...** Universidade de Passo Fundo. 2006. 1 CD.
- BENETTI, A. D. Análise da demanda e disponibilidade de água em bacia hidrográfica considerando vazões naturais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17, 2007, São Paulo. **Anais...** Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2007. 1 CD.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Lei nº 9.433, de 8 de Janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília, DF, 1997. (Disponível em: www.mma.gov.br/port/srh/politica/legislacao/corpo.html).
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução Nº54, de 28 de novembro de 2005. Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reuso direto não potável da água. Brasília, DF, 2005a.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução Nº357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília, DF, 2005b. (Disponível em: www.mma.gov.br/conama/)

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução N°375, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Brasília, DF, 2006. (Disponível em: www.mma.gov.br/conama/)

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB. **Aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas – critérios para projeto e operação.** Manual Técnico. São Paulo, 1999.

CURITIBA. Câmara Municipal. Lei N° 10.785 de 18 de setembro de 2003. Cria no Município de Curitiba o Programa de Conservação e Uso Racional da Água nas Edificações - PURAE. Curitiba, 2003. (Disponível em: www.recicloteca.org.br)

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – FIESP. **Conservação e reúso da água.** Manual de orientações para o setor industrial. São Paulo, 2004.

FÉRES, J. G.; THOMAS, A.; REYNAUD, A. Reúso de água nas indústrias da bacia do rio Paraíba do Sul. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17, 2007, São Paulo. **Anais...** Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2007. 1 CD.

HESPANHOL, I. **Notas do curso sobre redução e consumo de água.** Porto Alegre: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, Seção RS, 25 e 26 out. 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Pesquisa nacional de saneamento básico 2000.** Rio de Janeiro, 2002.

LIMA, J. E. F. W.; FERREIRA, R. S. A.; CHRISTOFIDIS, D. O uso da irrigação no Brasil. In: FREITAS, M. A. V. (org.) **O estado das águas no Brasil: perspectivas de gestão e informação de recursos hídricos.** Brasília: ANEEL, MME, MMA/SRH, OMM, PNUD, 1999. p. 73-82.

MAY, S.; HESPANHOL, I. Caracterização e tratamento de águas cinzas para consumo não potável em edificações. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, 30, 2006, Punta del Este, Uruguai. **Anais...** Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental – AIDIS, 2006. 1 CD.

METCALF & EDDY, INC. **Wastewater engineering: treatment and reuse.** 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

MEYBECK, M.; HELMER, R. An introduction to water quality. In: CHAPMAN, D. (ed.) **Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring.** London: Chapman & Hill, 1992. cap.1 (Published on behalf of UNESCO, WHO, UNEP).

PROGRAMA DE PESQUISA EM SANEAMENTO BÁSICO – PROSAB 5. **Esgoto.** Desenvolvimento de pesquisas sobre tratamento de esgotos e reúso de águas residuárias, considerando a qualidade do efluente tratado para diversos usos produtivos e para atender aos padrões de lançamento estabelecidos pelo CONAMA. Rio de Janeiro: FINEP, CNPq, CEF, 2007a. Disponível em: www.finep.gov.br/prosab/index.html.

PROGRAMA DE PESQUISA EM SANEAMENTO BÁSICO – PROSAB 5. **Uso racional de água e energia.** Desenvolvimento de ferramentas para minimizar perdas de energia e água em sistemas de abastecimento; estudo do aproveitamento de fontes alternativas de água e do uso de dispositivos economizadores e desenvolvimento de sistemas alternativos de gerenciamento de águas residuárias em edificações urbanas. Rio de Janeiro: FINEP, CNPq, CEF, 2007b. Disponível em: www.finep.gov.br/prosab/index.html.

SÃO PAULO. Assembléia Legislativa. Lei N° 12.183, de 29 de dezembro de 2005. Dispõe sobre a cobrança pela utilização dos recursos hídricos do domínio do Estado de São Paulo, os procedimentos para fixação dos seus limites, condicionantes e valores e dá outras providências. São Paulo, Diário Oficial do Estado, 30 dez. 2005.

SÃO PAULO. Secretaria de Recursos Hídricos, Saneamento e Obras (SRHSO). Decreto N° 50.667, de 30 de março de 2006. Regulamenta dispositivos da Lei N° 12.183, de 29 de dezembro de 2005, que trata da cobrança pela utilização dos recursos hídricos do domínio do Estado de São Paulo, e dá providências correlatas. **Diário Oficial do Estado.** São Paulo, 31 mar. 2006.

TAVARES, D. Lodo que vira adubo. **Globo Rural.** Rio de Janeiro, p. 57-62, abr. 2003.

TSUTIYA, M. T. Alternativas de disposição final de biosólidos. In: TSUTIYA, M. T. *et al.* (eds.). **Biosólidos na agricultura.** São Paulo: ABES, 2002.

TUNDISI, J. G. **Água no século XXI: enfrentando a escassez.** São Carlos, SP: RiMA, 2003.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). (2004). **Saving water through sustainable consumption and production: a strategy for increasing resource use efficiency.** Division of Technology, Industry & Economics (DTIE)/Unep, Paris. Disponível em: www.unepie.org/pc/cp/reportspdf/GMEFwater.pdf.jp/letc/Publications/index_pub.asp.

Antônio Domingues Benetti Profesor Adjunto de Ingeniería Sanitaria y Ambiental del Instituto de Pesquisas Hidráulicas de la Universidad Federal do Rio Grande do Sul, IPH – UFRGS. E-mail: benetti@iph.ufrgs.br

Mónica Liliana Salazar Peláez Ingeniera Sanitaria de la Universidad de Antioquia (Medellín, Colombia). M.Sc. en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental por el Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS). Estudiante de Doctorado en el Instituto de Ingeniería, UNAM. E-mail: msalazarp@iingen.unam.mx