

---

# REMOCIÓN DE FÓSFORO DE EFLUENTES DE LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN EMPLEANDO LODO DE ESTACIONES DE TRATAMIENTO DE AGUA

---

Iara Regina Soares Chao, Suher Carolina Yabroudi y Dione Mari Morita

## RESUMEN

El reciclaje de lodo de estaciones de tratamiento de agua en la remoción de fósforo ha sido considerada una importante alternativa de uso benéfico del lodo, permitiendo solucionar dos problemas ambientales: el lanzamiento de fósforo en áreas de manantiales protegidos y la disposición inadecuada del lodo generado durante el proceso de tratamiento del agua. En este trabajo se estudió el reciclaje de lodo 'in natura' de una estación de tratamiento de agua que emplea sales de aluminio

como coagulante en la remoción de fósforo de efluentes de lagunas de estabilización. Los resultados en la remoción de fósforo soluble del efluente aplicando esta alternativa, fue >90% con una dosis de lodo de 131mg·l<sup>-1</sup>, así como remociones elevadas de turbidez (62%) y color aparente (56%), confirmando esta alternativa como una opción sustentable en el tratamiento terciario de efluentes de sistemas de lagunas de estabilización.

## Introducción

El crecimiento desordenado de la mayoría de las ciudades brasileras, en particular de los municipios que componen las regiones metropolitanas, generó un desequilibrio ambiental acentuado y, más específicamente, con múltiples impactos en los recursos hídricos, debido al lanzamiento indiscriminado de contaminantes a lo largo de décadas. En el caso específico de la Región Metropolitana de São Paulo (RMSP), donde la mayoría de sus manantiales se encuentran deteriorados, además de enfrentar innumerables problemas económicos en función de la escasez de agua, la situación se agrava por el hecho que las estaciones de tratamiento de aguas residuales no fueron proyec-

tadas para la remoción de nutrientes como nitrógeno y fósforo. Por otro lado, las propias compañías de saneamiento básico poseen como práctica común el lanzar toneladas de lodo proveniente de las estaciones de tratamiento de agua (ETA) en el cuerpo receptor más próximo, independientemente de los impactos ambientales. No existe duda de que la sustentabilidad de las regiones metropolitanas está directamente vinculada con la garantía y manutención de las fuentes de agua, pues el desenvolvimiento económico, la producción agrícola y todas las actividades humanas dependen de la disponibilidad hídrica y del acceso a agua de adecuada calidad.

La creciente eutrofización de los recursos hídricos y el consecuente deterioro de la

calidad de los manantiales ha exigido el compromiso de todos los actores involucrados. De estos, el fósforo es considerado como el nutriente de mayor importancia en los fenómenos de eutrofización y ha sido el foco de atención para mejorar la calidad de los cuerpos de agua, por ser considerado factor limitante en el crecimiento de las algas. Por otro lado, el lodo generado en las ETA que utilizan sales de aluminio como coagulante posee un elevado potencial para la remoción de fósforo por mecanismos de adsorción, propiedad característica de la estructura amorfa de los precipitados de hidróxido de aluminio que permite incrementar el área superficial en comparación con la forma cristalina (Stumm, 1992; Dayton y

Basta, 2005; Zhao *et al.*, 2006).

En este trabajo se estudió el post-tratamiento de efluentes de lagunas de estabilización, a través de la utilización de lodo de estaciones de tratamiento de agua (ETA) que utiliza PAC (cloruro de polialuminio) como coagulante. No son conocidos estudios en la literatura con utilización de lodo real de estaciones de tratamiento de agua para remoción de fósforo con efluente real, apenas con efluente sintético y lodo producido en laboratorio, de ahí la dificultad en comparar los resultados aquí obtenidos con los de otros investigadores (Urano y Tachikawa, 1991; Basta *et al.*, 1999; Galarneau y Gehr, 1999; Gallimore *et al.*, 1999; Makris *et al.*, 2004; Zhao *et al.*, 2006).

---

**PALABRAS CLAVE / Efluente de Lagunas de Estabilización / Reciclaje de Lodo / Remoción de Fósforo / Tratamiento de Agua / Uso Benéfico de Lodo /**

---

Recibido: 26/09/2010. Aceptado: 03/10/2011.

**Iara Regina Soares Chao.** Ingeniera Civil, Especialista en Control de Polución y Maestría en Ingeniería Hidráulica y Sanitaria, Universidad de São Paulo (USP), Brasil. Ingeniera, Empresa de Saneamiento Básico

del Estado de São Paulo (SABESP), Brasil. Dirección: Rua Nicolau Gagliardi 313, Pinheiros -São Paulo (SP). Brasil. e-mail: ichao@sabesp.com.br  
**Suher Carolina Yabroudi.** Ingeniera Química y Maestría en

Ingeniería Química, la Universidad del Zulia, Venezuela. Estudiante del Programa de Doctorado de la Escuela Politécnica de la Universidad de São Paulo, Brasil. Profesora, LUZ, Venezuela.

**Dione Mari Morita.** Ingeniera Civil, Universidade Presbiteriana Mackenzie, Brasil. Doctora en Ingeniería Hidráulica y Sanitaria, USP, Brasil. Profesora, USP, Brasil.

## PHOSPHORUS REMOVAL FROM STABILIZATION LAGOON EFFLUENTS USING WATER TREATMENT PLANT SLUDGE

Iara Regina Soares Chao, Suher Carolina Yabroudi and Dione Mari Morita

### SUMMARY

*Sludge recycling in water treatment plants during phosphorus removal has been considered an important alternative for beneficial sludge utilization, allowing the solution of two environmental problems: phosphorus spills in areas with protected spills and inadequate disposal of sludge generated during the water treatment process. In this paper a study is presented of the sludge recycling 'in natura' of a water treatment station*

*that employs aluminum salts as a coagulant in the removal of phosphorus from effluents from stabilization lagoons. Results of soluble phosphorus removal from effluents applying this alternative was >90% with a dose of sludge of 131mg·l<sup>-1</sup>, and high turbidity (62%) and apparent color (56%) removal, confirming this alternative as a sustainable option in the tertiary treatment of stabilization lagoon systems.*

## REMOÇÃO DE FÓSFORO DE EFLUENTES DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO EMPREGANDO LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Iara Regina Soares Chao, Suher Carolina Yabroudi e Dione Mari Morita

### RESUMO

*A reciclagem de lodo de estações de tratamento de água na remoção de fósforo tem sido considerada uma importante alternativa de uso benéfico do lodo, permitindo solucionar dois problemas ambientais: o lançamento de fósforo em áreas de mananciais protegidos e a disposição inadequada do lodo gerado durante o processo de tratamento da água. Neste trabalho se estudou a reciclagem de lodo 'in natura' de uma estação de tratamento de água que emprega sais de alumínio*

*como coagulante na remoção de fósforo de efluentes de lagoas de estabilização. Os resultados na remoção de fósforo solúvel do efluente, aplicando esta alternativa, foram >90% com uma dose de lodo de 131mg·l<sup>-1</sup>, assim como remoções elevadas de turbidez (62%) e cor aparente (56%), confirmando esta alternativa como uma opção sustentável no tratamento terciário de efluentes de sistemas de lagoas de estabilização.*

### *Eutrofización en el reservorio Paiva Castro*

El estudio fue realizado en la sub-cuenca hidrográfica Juqueri-Cantareira, perteneciente a la cuenca hidrográfica del Alto Tieté. Esta juega un papel importante en el sistema integrado de abastecimiento de agua en la RMS, ya que abriga el reservorio Paiva Castro (municipio Mairiporã) que aporta de 2 a 3m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> del caudal total de 33m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> del Sistema Cantareira que alimenta la ETA Guaraú, responsable por el abastecimiento de una población de 19,6 millones de habitantes. Según el informe de calidad de aguas del interior de São Paulo (CETESB, 2010) el manantial ya presenta señales de eutrofización, atribuida a una concentración de fósforo total superior a los límites legales (Giatti, 2000; SEADE, 2009).

A pesar de que el municipio cuenta con más del 80% de su área bajo la Ley de

Protección de Manantiales, se ha venido constatando un deterioro ambiental creciente de su cuenca hidrográfica por razones antropogénicas. En los últimos diez años las concentraciones de fósforo en el punto de monitoreo del reservorio Paiva-Castro se encuentran en torno de 0,045mg·l<sup>-1</sup> de fósforo, lo cual caracteriza un ambiente eutrofizado. En 2009, las medias anuales fueron de 0,062mg·l<sup>-1</sup>, muy por encima del valor límite establecido en la legislación correspondiente, de 0,020mg·l<sup>-1</sup> (CONAMA 357/2005, 2005; Ley N° 9.433, 1997).

El municipio también sufre con la precariedad en los niveles de atención al saneamiento básico; datos divulgados en los últimos censos disponibles por SEADE (2009) indican que posee una cobertura de 86% de agua potable, mientras que solo es tratada un 56% del agua residual generada. En estas condiciones nuevos focos no pun-

tuales de fósforo (eutrofización por carga difusa) se van sumando a través del incremento de una porción significativa de aguas residuales lanzadas en fosas sépticas y de descargas clandestinas a través de redes de aguas pluviales que van directamente al reservorio. Asociado a estos problemas y debido al hecho que la estación de tratamiento de aguas residuales (ETAR) Mairiporã no fue proyectada para la remoción de nutrientes, hoy ésta representa una fuente puntual de aporte de fósforo para el Río Juqueri, encuadrado según el Decreto N° 10755 del 22 de Noviembre de 1977 como cuerpo receptor Clase II (Giatti, 2000; Giatti y Rocha, 2000). Además de lo expuesto, en esta cuenca se descarga el lodo generado durante el proceso de tratamiento de agua de los decantadores y flotadores de la ETAR Mairiporã, lo que contribuye con la disminución del nivel del reservorio e in-

crementa los niveles de toxicidad, turbidez y color aparente, así como los de concentración de hierro y aluminio en el cuerpo receptor.

### **Materiales y Métodos**

Se empleó lodo generado en uno de los flotadores por aire disuelto de la ETA Mairiporã que utiliza PAC como coagulante (Figura 1), siendo las muestras de lodo colectadas directamente del sobrenadante. Esta estación posee una capacidad de tratamiento de 70m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup> y se encuentra conformada por una unidad de flotación con aire disuelto y filtros de presión, con inyección automatizada de cloro y fluor. El lodo generado en la estación es dispuesto en la red colectora de agua de lluvia y descargado finalmente en el reservorio Paiva-Castro.

La ETAR del municipio Mairiporã es del tipo lagunas de estabilización con capacidad de tratar 50l·s<sup>-1</sup>, y está



Figura 1. Colecta de lodo del flotador de la Estación de Tratamiento de Agua (ETA).

conformada por una unidad de desbaste, desarenador, dos lagunas anaerobias seguidas de dos lagunas facultativas (Figura 2). Se encuentra localizado aguas arriba del reservorio Paiva Castro y descarga el efluente tratado en el corredor Itaim, que presenta bajos valores de caudal y muestra estar afectado severamente por el aporte de cargas contaminantes (Giatti, 2000). Las muestras de efluente fueron colectadas puntualmente.

Un total de siete ensayos fueron realizadas a través de ensayos de jarras. El procedimiento consistió en colocar una mezcla de lodo-efluente: diferentes concentraciones de lodo, medido como sólidos totales-ST y completando el volumen de 1 litro con el efluente de las lagunas de estabilización. Se adicionó solución 0,1M de HCl para disminuir el pH inicial de 7 hasta 6,5 con la finalidad de garantizar el medio ligeramente ácido requerido para la adsorción de fósforo por los óxidos e hidróxidos de aluminio. Con respecto a las condiciones del ensayo se fijó el tiempo de mezcla en 30min con un gradiente de  $40s^{-1}$ , condiciones óptimas encontradas por Chao (2006). El efluente final permaneció en reposo en el propio recipiente por 15min (Garnreau y Gehr, 1999; Chao, 2006; Zhao *et al.*, 2006).

Resumiendo las condiciones operacionales empleadas, éstas son: concentración inicial de fósforo ( $PO_4^{3-}$ ) de  $1,12mg\cdot l^{-1}$ ; pH original de las muestras de 6,89-7,00; pH de los ensayos de 6,5; tiempo de contacto de 30min; y gradiente medio de velocidad de  $40s^{-1}$ .

El gradiente seleccionado de  $40s^{-1}$  buscaba garantizar el contacto con la menor quiebra de flocos, de forma tal de alcanzar una buena sedimentación. Gradientes de velocidad mayores pueden ser empleados; sin embargo, es probable que se genere una mayor ruptura de los flocos, lo que implicaría proyectar decantadores con una menor tasa de aplicación y en consecuencia con necesidades de mayores áreas de construcción.

Después del período de sedimentación fueron tomadas muestras para realizar las mediciones por triplicado de los parámetros fósforo soluble y turbidez, según las técnicas descritas en APHA, 2005). En este estudio solo fue considerado el fósforo soluble, ya que apenas la

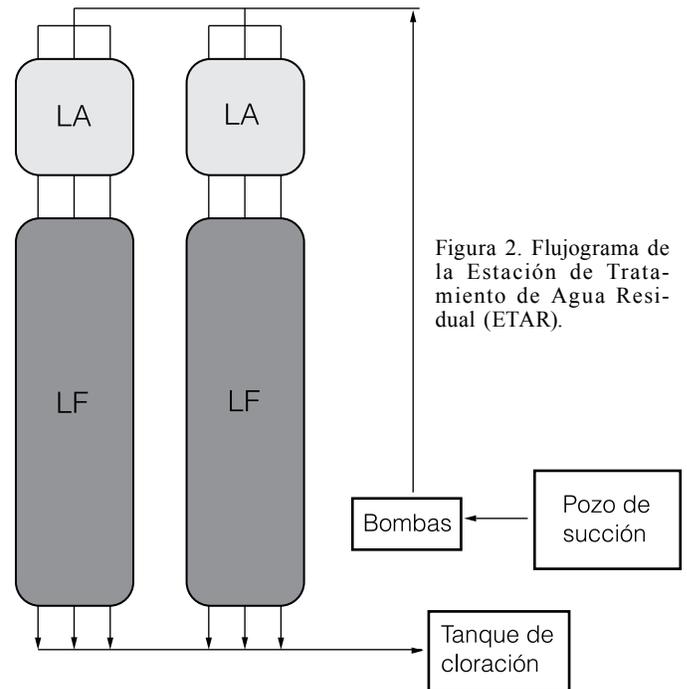


Figura 2. Flujoograma de la Estación de Tratamiento de Agua Residual (ETAR).

TABLA I  
REMOCIÓN DE FÓSFORO OBTENIDA EN LOS ENSAYOS  
CON DIFERENTES DOSIS DE LODO

Dosis de lodo ( $mg\cdot l^{-1}$ )	Resultados	Ensayos						
		I	II	III	IV	V	VI	VII
65	Concentración final *	0,27	0,29	0,26	0,18	0,23	0,33	0,27
	Porcentaje de remoción	76	74	77	84	80	71	76
131	Concentración final *	0,12	0,10	0,08	0,08	0,14	0,11	0,01
	Porcentaje de remoción	90	92	92	93	87	90	99
196	Concentración final *	0,10	0,23	0,04	0,05	0,21	0,07	0,06
	Porcentaje de remoción	91	80	96	95	81	94	95
262	Concentración final *	0,05	0,11	0,02	0,04	0,07	0,04	0,03
	Porcentaje de remoción	95	91	98	97	94	96	97
371	Concentración final *	0,04	0,03	0,01	0,02	0,06	0,04	0,03
	Porcentaje de remoción	96	97	99	98	95	97	97

\*  $mg$  de  $PO_4^{3-}$  por litro de solución.

fracción soluble se encuentra inmediatamente disponible para el crecimiento de algas y plantas, por lo que tiene mayor interés limnológico.

Durante los experimentos se confirmó que el efluente de la ETAR Mairiporã presentaba una coloración verde debido a la elevada concentración de algas, y después de los ensayos se obtuvo un efluente visiblemente clarificado. Por tanto, se resolvió medir en dos ensayos la remoción de color para las mismas dosis citadas anteriormente.

## Resultados y Discusión

Las Tablas I y II resumen los resultados de la eficiencia de remoción de fósforo soluble y turbidez respectivamente.

Los resultados fueron tratados estadísticamente por el Método Box Plot, que proporciona una representación gráfica de los datos en base al resumen de cinco números (cuartiles 1 y 3, mediana, punto máximo y mínimo), y son reportados en la Figura 3, donde se muestran los valores

TABLA II  
REMOCIÓN DE TURBIDEZ OBTENIDA EN LOS ENSAYOS CON  
DIFERENTES DOSIS DE LODO

Dosis de lodo (mg·l <sup>-1</sup> )	Resultados	Ensayos						
		I	II	III	IV	V	VI	VII
65	Concentración final (UT)	26	19	14	16	12	10	16
	Porcentaje de remoción	32	50	62	58	52	58	42
131	Concentración final (UT)	24	15	13	13	11	8	14
	Porcentaje de remoción	37	62	66	66	55	62	47
196	Concentración final (UT)	21	15	12	11	8	7	12
	Porcentaje de remoción	46	60	68	71	63	64	52
262	Concentración final (UT)	18	13	10	10	7	6	10
	Porcentaje de remoción	53	67	74	75	64	67	58
371	Concentración final (UT)	15	9	7	7	5	5	7
	Porcentaje de remoción	62	78	81	83	70	71	66

UT: unidades de turbidez.

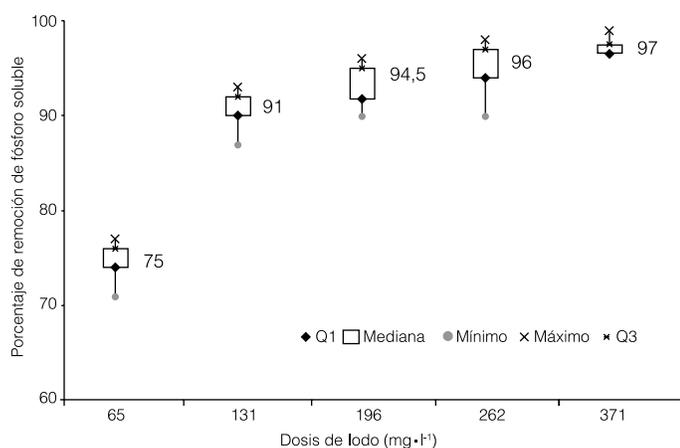


Figura 3. Remoción de fósforo en función de la dosis de lodo empleada.

obtenidos en los ensayos de jarras, al evaluar el efecto que sobre la remoción de fósforo tiene el incremento de la dosis de lodo. La evaluación estadística muestra reproducibilidad de los ensayos (Levine *et al.*, 2008). La figura ilustra que la remoción de fósforo

aumenta con el incremento de la dosis de lodo, alcanzando un porcentaje de remoción mayor a 99,99% con una dosis de 371mg·l<sup>-1</sup>. Con excepción de la dosis de 65mg·l<sup>-1</sup>, que presentó una remoción media de 76%, las medias de las otras cuatro concentracio-

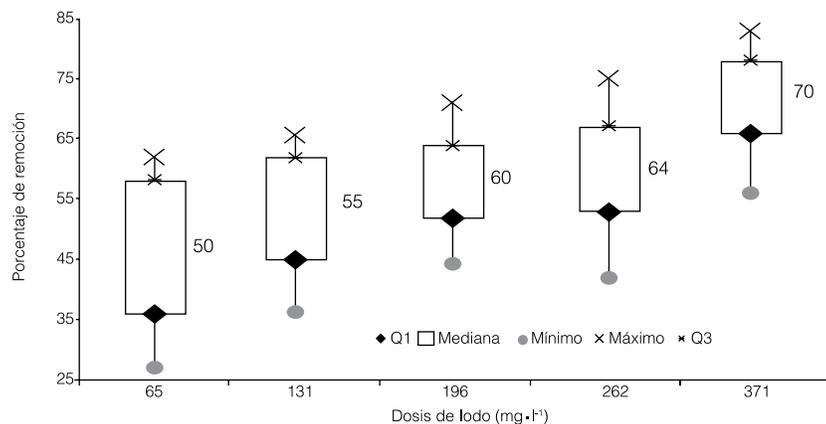


Figura 4. Remoción de turbidez en función de la dosis de lodo empleada.

nes evaluadas oscilaron entre 92% (131mg·l<sup>-1</sup>) y 97% (371mg·l<sup>-1</sup>). Operacionalmente, el incremento en 5% en la remoción de fósforo entre la mayor dosis, de 371mg·l<sup>-1</sup>, y la de 131mg·l<sup>-1</sup> no es significativo y por lo tanto se consideró como dosis óptima la concentración de 131mg·l<sup>-1</sup>, con una remoción media de 92%, donde 75% de los resultados registraron una eficiencia >90%.

Se puede apreciar que la dosis de lodo ejerce una elevada influencia en la adsorción de fósforo, debido a que el aumento de las concentraciones de sólidos y, consecuentemente, del área superficial de adsorción interfiere directamente en la efi-

doblar la concentración de sólidos de la caulinita empleada como adsorbente, aumentaba la remoción de fósforo durante las 24h iniciales, mostrando de esta forma el efecto de la concentración de sólidos y del área superficial del adsorbente en la cinética de remoción de fósforo. Adicionalmente, estos resultados son confirmados en los estudios realizados por Galarneau y Gehr (1999), donde el incremento en la dosis de aluminio en pruebas de adsorción empleando ensayos de jarras producía un aumento considerable en la remoción de fósforo de agua residual sintética. En el caso del presente estudio el descarte de lodo del flotador de la ETAR es continuo, siendo este un aspecto importante, ya que estudios previos constataron que el tiempo de permanencia del lodo en el decantador incidía en la capacidad de adsorción del lodo, produciéndose un aumento en

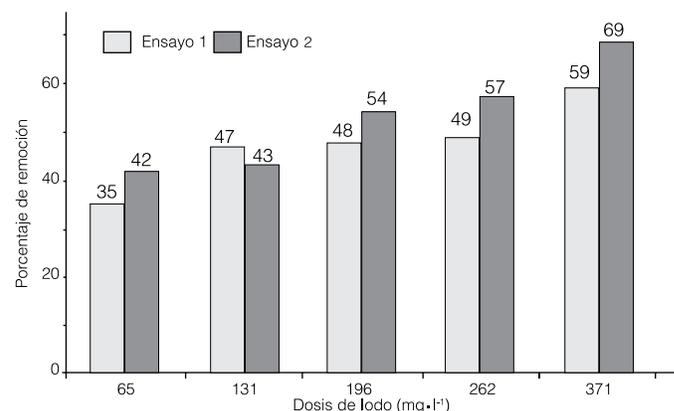


Figura 5. Remoción de color en función de la dosis de lodo empleada.

ciencia de remoción del fósforo. Según algunos trabajos (Stumm, 1992; Zhao *et al.*, 2006), esa característica eleva la capacidad de adsorción que es proporcional al número de sitios activos. La importancia de esta variable también fue verificada por Chen *et al.* (1973), quienes mostraron que al

esta propiedad hasta un máximo de 80 días, y transcurrido ese período de tiempo el lodo presentaba una reducción en su capacidad de adsorber fósforo debido a la cristalización del hidróxido de aluminio (Makris *et al.*, 2004; Chao, 2006). Cabe acotar que no se conocen estudios donde se utilice lodo real de estaciones de tratamiento de agua para remover fósforo de aguas residuales. Solo se cuenta con referencias donde se emplea agua residual sintética y lodo producido en el laboratorio.

De forma general, los efluentes de lagunas tienden a presentar una elevada turbidez en función de la presencia de algas, afectando la apariencia del agua. Para este estudio, los valores iniciales de turbidez oscilaron entre 32 y 38 unidades. Luego de aplicado el tratamiento con el lodo de la ETAR (Figura 4) las remociones medias alcanzadas fueron de 52% para una dosis de 65mg·l<sup>-1</sup> y de 71% para una dosis máxima de 371mg·l<sup>-1</sup>, mientras que para la concentración seleccionada de 131mg·l<sup>-1</sup>, la remoción media fue de 62%.

Así mismo, la coloración verde del efluente de las lagunas de Mairiporã fue visiblemente clarificado una vez efectuados los ensayos, como muestra la Figura 5, alcanzando remoción de 45% de color para una dosis de 131mg·l<sup>-1</sup> de lodo.

### Conclusión

El reciclaje de lodo producido en el proceso de tratamiento de agua que emplea PAC como coagulante es efectivo en la remoción de fósforo de efluentes de lagunas de estabilización mediante la im-

plementación de sistemas de tratamiento complementario empleando el residuo generado en las estaciones de tratamiento de agua.

### REFERENCIAS

- APHA (2005) *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*. 21ª ed. APHA-AWWA-WEF. Nueva York, EEUU. 1325 pp.
- Basta N, Dayton E, Gallimore L (1999) Nutrient adsorption capacity of water treatment residuals. *Joint Residuals and Biosolids Management Conference*, Charlotte, NC, 27-30/01/1999. WEF. Arlington. EEUU.
- CETESB (2010) *Relatório de Qualidade de Águas Interiores do Estado de São Paulo*. Companhia de Tecnologia Ambiental do Estado de São Paulo. Brasil. 297 pp.
- Chen Y, Butler J, Stumm W (1973) Kinetic Study of Phosphate Reaction with aluminum oxide and Kaolinite. *Env. Sci. Technol.* 7: 327-332.
- Chao IRS (2006) *Remoção de Fósforo de Efluentes de Estações de Tratamento Biológico de Esgotos Utilizando Lodo de Estação de Tratamento de Água*. Tesis. Universidade de São Paulo. Brasil. 160 pp.
- CONAMA 357/2005 (2005) Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Ministério do Meio Ambiente. Brasil. [www.Mma.Gov.Br/Port/Conama/Res/Res05/Res35705.Pdf](http://www.Mma.Gov.Br/Port/Conama/Res/Res05/Res35705.Pdf)
- Dayton E, Basta N (2005) Use of drinking water treatment residuals as a potential best management practice to reduce phosphorus risk index scores. *Env. Qual.* 34: 2112-2117.
- Decreto Nº. 10.755 de 22 de Novembro de 1977. São Paulo, Brasil.
- Galarneau E, Gehr R (1999) Phosphorus removal from wastewaters: Experimental and theoretical support for alternative mechanisms. *Water Res.* 31: 328-338.
- Gallimore L, Basta N, Storm D, Payton M, Hunke R, Smolen M (1999) Water treatment residual to reduce nutrients in surface runoff from agricultural land. *Env. Qual.* 28: 1474-1478.
- Giatti LL (2000) *Reservatório Paiva Castro-Mairiporã (SP): Avaliação da Qualidade das Águas sobre alguns Parâmetros Físicos, Químicos e Biológicos (1987/1998)*. Tesis. Universidad de São Paulo. Brasil. 140pp.
- Giatti LL, Rocha A (2000) *Reservatório Paiva Castro-Mairiporã-SP: Avaliação da qualidade da água sobre alguns parâmetros físico químicos e bacteriológicos (1987 /1998)*. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES). [www.bvsde.paho.org/bvsaidis/caliagua/v-055.pdf](http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/caliagua/v-055.pdf)
- Levine D, Stephan D, Krehbiel T, Berenson ML (2008) *Estatística. Teoria e Aplicações*. 5ª ed. LTC. Rio de Janeiro. Brasil.
- Ley Nº 9.433 (1997) *Política Nacional de Recursos Hídricos*. Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Brasil.
- Makris KC, El-Shall H, Harris WG, O'Connor GA, Obreza TA (2004) Intraparticle phosphorus diffusion in a drinking water treatment residual at room temperature. *J Coll. Interface Sci.* 15: 417-423.
- SEADE (2009) *Fundação Estatal de Análise de dados*. São Paulo, Brasil. [www.seade.gov.br/produtos/projpop/index.php](http://www.seade.gov.br/produtos/projpop/index.php)
- Stumm W (1992) *Chemistry of the Solid: Water Interface: Processes at the Mineral-Water and Particle-Water Interface in Natural Systems*. Wiley. Hoboken, NJ, EEUU.
- Urano K, Tachikawa H (1991) Process development for removal and recovery of phosphorus from wastewater by a new adsorbent. Adsorption rates and breakthrough curves. *Ind. Eng. Chem. Res.* 30: 1897-1899.
- Zhao Y, Yang Y, Tomlinson D, Kennedy S (2006) Dewatered alum sludge: a potential adsorbent for phosphorus removal. *Water Sci. Technol.* 52: 525-532.